

Laercio Javarez Junior
Thiago Antonini Alves
Fábio Junkes Corrêa
Henrique Ajuz Holzmann
(ORGANIZADORES)

CONECTANDO O FUTURO

**ENGENHARIA MECÂNICA NA UTFPR E
SEU IMPACTO NA TRANSFORMAÇÃO
DA SOCIEDADE**

Laercio Javarez Junior
Thiago Antonini Alves
Fábio Junkes Corrêa
Henrique Ajuz Holzmamnn
(ORGANIZADORES)

CONECTANDO O FUTURO

**ENGENHARIA MECÂNICA NA UTFPR E
SEU IMPACTO NA TRANSFORMAÇÃO
DA SOCIEDADE**

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora tem um compromisso sério com a transparência e a qualidade em todo o processo de publicação. Trabalhamos para garantir que tudo seja feito de forma ética, evitando problemas como plágio, manipulação de informações ou qualquer interferência externa que possa comprometer o trabalho.

Se surgir qualquer suspeita de irregularidade, ela será analisada com atenção e tratada com responsabilidade.

O conteúdo do livro, textos, dados e informações, é de responsabilidade total do autor e não representa necessariamente a opinião da Atena Editora. A obra pode ser baixada, compartilhada, adaptada ou reutilizada livremente, desde que o autor e a editora sejam mencionados, conforme a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Cada trabalho recebeu a atenção de especialistas antes da publicação. A equipe editorial da Atena avaliou as produções nacionais, e revisores externos analisaram os materiais de autores internacionais.

Todos os textos foram aprovados com base em critérios de imparcialidade e responsabilidade.

Conectando o futuro: engenharia mecânica na UTFPR e seu impacto na transformação da sociedade

| Organizadores:

Laercio Javarez Junior
Fábio Junkes Corrêa

Thiago Antonini Alves
Henrique Ajuz Holzmann

| Revisão:

Os autores

| Diagramação:

Thamires Gayde

| Capa:

Yago Raphael Massuqueto Rocha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C747 Conectando o futuro: engenharia mecânica na UTFPR e seu impacto na transformação da sociedade / Organizadores Laercio Javarez Junior, Thiago Antonini Alves, Fábio Junkes Corrêa, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Outro organizador
Henrique Ajuz Holzmann

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3798-7
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.987251212>

1. Engenharia mecânica. 2. Impacto social. 3. Educação tecnológica. I. Javarez Junior, Laercio (Organizador). II. Alves, Thiago Antonini (Organizador). III. Corrêa, Fábio Junkes (Organizador). IV. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

☎ +55 (42) 3323-5493

☎ +55 (42) 99955-2866

🌐 www.atenaeditora.com.br

✉ contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas


SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

MÉTODO DE ENSINO DE PROJETOS DE MECANISMOS COM O USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Luciano Zart Olanyk

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512121>

CAPÍTULO2 16

ANÁLISE DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE PETG OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D

Luis Felipe Pereira Folha

Sandra Mara Kaminski Tramontin

Heliety Rodrigues Borges Barreto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512122>

CAPÍTULO 3 30

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COLETORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES

Gustavo Vinícius Vieira Mello

Allefe Jardel Chagas Vaz

Humberto Ianczkovski

Vinícius Mariani Lenart

Thiago Antonini Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512123>

CAPÍTULO 4 53

PROTOTYPING IN ENGINEERING EDUCATION: DEVELOPMENT OF AN OPERATION MANUAL FOR 3D PRINTING

Daniela Feres de Marchi

Felipe Barreto Campelo Cruz

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512124>

SUMÁRIO

SUMÁRIO


CAPÍTULO 5 67

ANÁLISE DOS INDICADORES DE DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE
NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045

Henrique Ajuz Holzmann

Géssica Katalyne Bilcati

Aldo Braghini Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512125>


CAPÍTULO 6 80

AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES
RESIDUAIS EM COMPONENTES ESTRUTURAIS

Fábio Junkes Corrêa

Wagner Silveira

Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512126>

CAPÍTULO 7 94

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA
CORTE DE VIDRO EM GEOMETRIAS NÃO CONVENCIONAIS PARA ARTESÃOS

Gabriel Moreli da Costa

Carlos Cziulik, Ph.D.


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512127>

CAPÍTULO 8 111

UNCERTAINTY QUANTIFICATION IN BEAM BENDING THEORIES BY
STOCHASTIC SPECTRAL FINITE ELEMENT METHOD

Roberto Mauro Felix Squarcio

Rodrigo Villaca Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512128>

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 9129

PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

Bruna Camila Schwab

Luiz Fernando Rigatti

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9872512129>



C A P Í T U L O 1

MÉTODO DE ENSINO DE PROJETOS DE MECANISMOS COM O USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Luciano Zart Olanyk

UTFPR, Campus Curitiba, PR, Brasil

INTRODUÇÃO

A engenharia mecânica contribuí profundamente para a transformação da sociedade através do uso de ferramentas computacionais. Desde os primórdios dos computadores até as complexas simulações atuais, a tecnologia impulsiona a inovação e a eficiência na área. A não muito tempo, projetos mecânicos eram realizados de forma manual, dependente de pranchetas com um grande volume de papel e protótipos físicos e caros. Atualmente, o uso de ferramentas computacionais é uma realidade, acessível para engenheiros, projetistas e alunos de graduação. A revolução iniciou com a introdução do CAD (Computer-Aided Design), inicialmente com sistemas CAD 2D. Com o avanço do CAD 3D, a capacidade de visualização de modelos tridimensionais, tornou possível o projeto de peças e montagens complexas de máquinas. Desde então, diversos softwares permitem criar protótipos virtuais, identificar interferências e otimizar os projetos antes mesmo de qualquer fabricação física. Isso não apenas reduz os custos e o tempo de desenvolvimento, mas libera a criatividade do praticante, para se dedicar em design e soluções inovadoras em favor da sociedade. A evolução não parou no projeto mecânico. A necessidade de prever o comportamento mecânico de componentes, sob diferentes condições operacionais, levou ao desenvolvimento das ferramentas de CAE (Computer-Aided Engineering). Integradas ou complementares aos sistemas CAD, as ferramentas CAE permitem que engenheiros realizem análises complexas, como as de movimento ou análise cinemática. Neste tipo de análise, é possível determinar os esforços da interação entre componentes, como as forças de contato entre as peças. Com isto, estas análises fornecem dados para o dimensionamento dos componentes com o uso de softwares de Análise de Elementos Finitos (AEF). Paralelo às ferramentas de CAD e CAE, os softwares de cálculo numérico permitem a validação de resultados

obtidos pelas ferramentas de CAE. Software como o Matlab fornecem a base para a validação matemática dos resultados obtidos através das ferramentas de CAE. Este texto apresenta uma metodologia de solução de um exemplo clássico encontrado em livros de engenharia mecânica utilizando o software Solidworks como ferramenta CAD/CAE e o Matlab para validação matemática.

APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS EM SALA DE AULA

O uso das ferramentas computacionais no ambiente de sala de aula tem se mostrado útil para acelerar o aprendizado e a experiência de criar novas soluções. A aplicação de programas de CAD/CAE e de cálculo numérico em disciplinas baseadas em teorias repletas de equações complexas, permite ao aluno de engenharia, uma análise mais voltada para a realidade. Ao mesmo tempo, aproxima a teoria com a realidade, mesmo que virtualmente, e captura o interesse do aluno pois torna a disciplina mais atrativa. Isto é um diferencial em uma sociedade em que o desinteresse de jovens pela engenharia é cada vez mais evidente. Este texto apresenta um exemplo de aplicação dessas ferramentas na disciplina de mecanismos. Observou-se que após cinco anos de uso da metodologia, o interesse dos alunos pela disciplina aumentou e proporcionou o desenvolvimento de projetos mais reais.

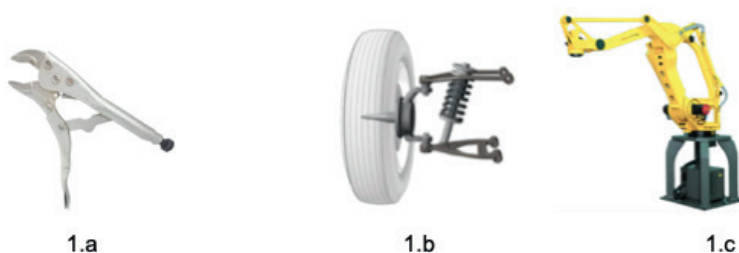
MECANISMOS

Os mecanismos são dispositivos criados para realizar movimentos específicos de forma isolada ou em conjunto com outros componentes. Este assunto está no domínio do estudo de corpos rígidos. A cinemática, ou o estudo da geometria do movimento, não se preocupa com as causas que o geram - como forças ou torques - mas apenas com os deslocamentos dos componentes. Este estudo muitas vezes é denominado de cinetostática ou dinâmica inversa pois inicia a partir do movimento desejado. O uso da hipótese de corpos rígidos, permite a aplicação da análise vetorial. O estudo deste tema é fundamental para engenheiros e projetistas pois, como os mecanismos compõem as máquinas, garantem a exata execução das tarefas previamente definidas em projeto de equipamentos. Existe uma grande opção de mecanismos e muitos ainda a serem descobertos, contudo neste texto, será explorado o mecanismo de quatro barras. Isto não impede de aplicar o método apresentado a outros tipos de mecanismos como por exemplo, biela manivela e came seguidores.

O projeto de mecanismos de barras possui duas etapas bem distintas, a síntese e a análise cinemática. Na síntese são usadas técnicas específicas para a determinação do comprimento dos elos que formam o mecanismo e na análise, são verificadas as condições de funcionamento, como posições, velocidades e acelerações. Com estes resultados, é possível determinar os esforços que atuam nas conexões dos elos e usar estes valores para dimensionar os elos.

Mecanismo quatro barras – terminologias e premissas

A versatilidade dos mecanismos de quatro barras permite aplicações nas mais diferentes circunstâncias de um projeto mecânico. Desde movimentos simples, como janelas e portões basculantes até operações mais complexas como próteses biônicas de membros. O mecanismo de barras é composto por elos rígidos unidos por juntas, que podem ter de diferentes formas. Neste texto vamos explorar apenas a junta de revolução no plano com um grau de liberdade. Frequentemente utilizado em projetos mecânicos, o leitor deve estar habituado com mecanismos de barras pois frequentemente se depara com exemplo de sua aplicação, desde alicates de pressão, suspensão de automóveis que compõem um automóvel ou braços robóticos (Figuras 1).



Figuras 1 – Exemplos de mecanismo quatro barras (1.a) alicate de pressão, (1.b) suspensão duplo A utilizado em automóveis e (1.c) braço robótico.

A aplicação da hipótese de corpos rígidos permite utilizar a teoria vetorial para solução matemática. Nestes casos, os elos são representados por vetores em um diagrama cinemático (Figura 2), sendo os elos nomeados por \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 , \mathbf{R}_4 e \mathbf{R}_1 e os comprimentos (módulos dos vetores) dados pelas variáveis a , b , c e d , respectivamente. Observa-se que as juntas de revolução são representadas por variações dos ângulos θ_2 , θ_3 e θ_4 . O ângulo θ_1 não aparece na figura pois, como está relacionado ao elo terra, seu valor é nulo e não varia. Os vetores representam os elos denominados como \mathbf{R}_1 - elo terra (fixo ou elo de referência), \mathbf{R}_2 - elo de entrada, \mathbf{R}_3 - elo acoplador e \mathbf{R}_4 - elo de saída. O elo 2 geralmente é denominado de elo de entrada, porque é acionado por um motor ou um atuador.

As posições das juntas são localizadas pelas letras A , B , O_2 e O_4 . Assim, podemos afirmar que, tanto os elos \mathbf{R}_2 e \mathbf{R}_4 realizam apenas de movimento de rotação em torno de O_2 e O_4 e o elo \mathbf{R}_3 realiza um movimento complexo (rotação e translação simultaneamente). Através desta configuração, os ângulos θ_2 , θ_3 e θ_4 são utilizados como variáveis para determinar a posição instantânea dos vetores \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 e consequentemente, dos pontos A e B .

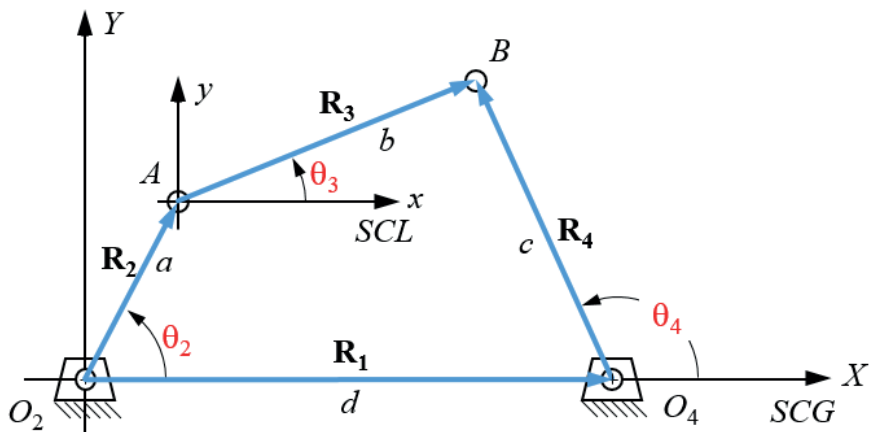


Figura 2 – Diagrama vetorial utilizado para a análise cinemática de um mecanismo quatro barras.

O processo de análise só pode ser realizado após a síntese, quando se determina o comprimento dos elos. A partir da definição do comprimento dos vetores, é possível realizar os cálculos para as possíveis posições dos pontos A e B , em função da variação do ângulo θ_2 . Neste exemplo, será inserido uma velocidade de rotação constante ω_2 no elo 2, que resulta em acelerações em pontos pertencentes aos vetores \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 , inclusive os pontos A e B . Tais acelerações são utilizadas para o cálculo de esforços que atuam nas juntas O_2 , O_4 , A e B .

Análise cinemática

A determinação das posições, velocidade e acelerações que o mecanismo pode alcançar são obtidas por métodos de análise cinemática. Existem dois métodos, o gráfico que utiliza técnicas de geometria descritiva e o analítico, que usa ferramentas de álgebra linear. A Figura 3 exhibe o método gráfico apenas para a análise de posições (também é possível utilizar o método gráfico para análise de velocidades e aceleração). Obtém-se os resultados através da interseção das duas circunferências, com centros em A e θ_4 e raios \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 . Esta interseção indica as posições instantâneas dos pontos B e B' . A partir da determinação destes pontos é possível traçar duas posições, que os elos \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 podem assumir, para um determinado valor de θ_2 . Observe que os valores dos ângulos são medidos em relação à horizontal.

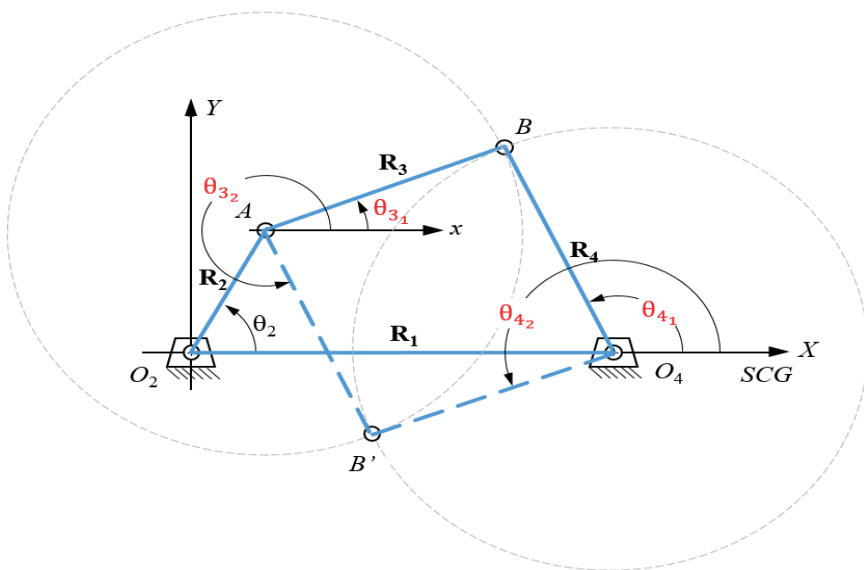


Figura 3 – Análise gráfica de posições para um mecanismo quatro barras.

Tais valores representam as duas possíveis configurações de montagem do mecanismo quatro barras. É importante notar que, ao alterar o valor de θ_2 , novos valores de θ_3 e θ_4 são obtidos. Para se conhecer a variação das posições dos pontos A e B , deveríamos repetir este desenho. Por exemplo, para uma boa precisão, seria interessante avaliar θ_2 variando de grau em grau, de 0° até 360° . Este processo seria insano, pois para cada nova posição de θ_2 , um novo desenho precisaria ser realizado.

Análise de posição utilizando simulador CAE

Uma alternativa é utilizar o recurso de análise de movimentos do software Solidworks, que permite não apenas obter as posições, mas as velocidades, acelerações além das forças que atuam nas juntas dos mecanismos. Neste texto, é demonstrado os resultados obtidos por este recurso. Antes de iniciar a simulação no Solidworks, é necessário desenhar o mecanismo a partir dos dados obtidos na etapa da síntese. Como o objetivo deste texto é apenas ilustrar os resultados da análise cinemática, os elos serão modelados a partir de um exemplo clássico, encontrados em livros textos de projeto de máquinas (Figura 4).

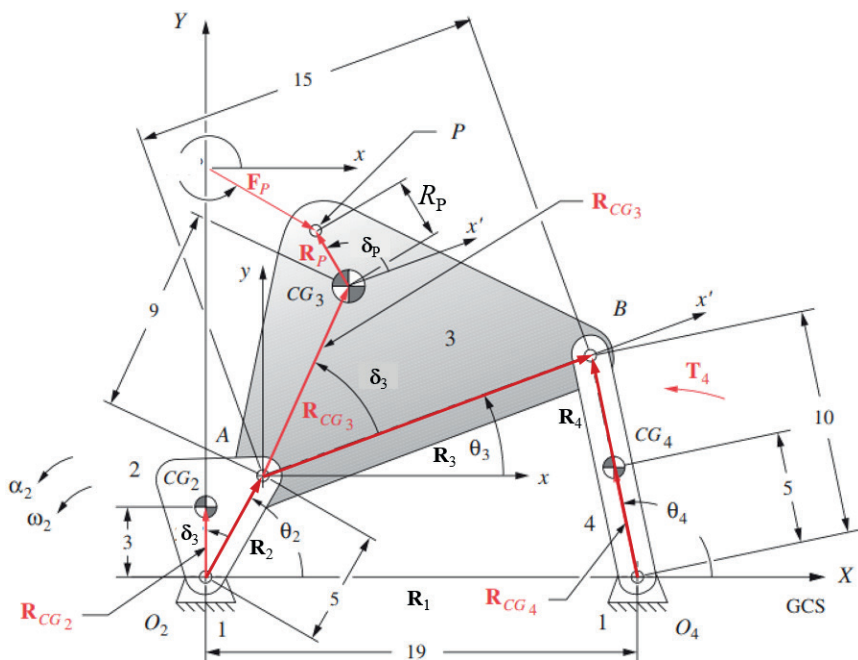


Figura 4 – Exemplo do mecanismo quatro barras (Adaptado de Norton, 2024).

Assim como na Figura 2, observe que os elos são dados pelos vetores \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 , com valores de a , b , c e d dados por 5 in, 15 in, 10 in e 19 in respectivamente. Os vetores \mathbf{R}_{CG2} , \mathbf{R}_{CG3} e \mathbf{R}_{CG4} localizam os centros de gravidade de cada elo. É possível observar que o RCG4 é colinear a \mathbf{R}_4 porque é um elo simétrico. Já os vetores \mathbf{R}_{CG2} e \mathbf{R}_{CG3} são medidos em relação aos vetores \mathbf{R}_2 e \mathbf{R}_3 através dos ângulos δ_2 e δ_3 . Se o elo 4 fosse assimétrico, utilizaríamos um ângulo δ_4 . Os ângulos θ_2 e θ_4 são medidos a partir dos vetores \mathbf{R}_2 e \mathbf{R}_4 em um sistema de coordenada global (SCG) com origem em O_2 . Por outro lado, o ângulo θ_3 é medido a partir de um sistema de coordenadas local não rotacional (SCLNR). O SCLNR tem origem no ponto A e, apesar de acompanhar o movimento do ponto A , mantém-se paralelo à horizontal, por isso o termo “não rotacional”. Além de ser utilizado para determinar o ângulo θ_3 , o SCLNR também é utilizado para localizar o ponto de aplicação de forças externas. Neste exemplo, o vetor \mathbf{R}_p e o ângulo δ_p localiza o ponto de aplicação da força externa \mathbf{F}_p . Todos estes valores numéricos são resumidos na Tabela 1.

	Elo 2	Elo 3	Elo 4
Comprimento [in]	5	15	10
Peso do elo [lb]	1,5	7,7	5,8
Momento de inércia I_G [lb.in.s ²]	0,4	1,5	0,8
Velocidade angular - ω [rad/s]	1,047	?	?
Aceleração angular - α [rad/s ²]	0	?	?
Forças externas F_p [lb]	0	80	0
Ângulo das forças externas F_p [°]	0	330	0
Vetores R_p [in]	0	3	0
Ângulo dos vetores R_p [°]	0	100	0
Forças externas F_p [lb]	0	80	0
Ângulo das forças externas F_p [°]	n.a.	0	120
Torques externos T [lb.in]	n.a.	0	120

Tabela 1 – Características do mecanismo e dos elos mostrados na Figura 4.

Os valores de momento de inércia são obtidos a partir da geometria dos elos e para o peso, atribui-se uma espessura e densidade de um determinado material. Neste caso utilizou-se aço carbono. O mecanismo é acionado inserindo-se um motor rotativo na junta O_2 , com velocidade angular constante ω_2 de 1,047 rad/s (10 RPM). Além disso, no elo 3, atua uma força externa de 80 lb na direção de 330° com a horizontal e no elo 4, um torque externo de 120 lb.in. A montagem do modelo no Solidworks é exibida na Figura 5. O modelo encontra-se na posição inicial, quando $\theta_2 = 0$. A direção da força externa F_p de 80 lb atua no elo 3 e foi definida por uma cunha desenhada no elo terra. Além disso, atribuiu-se no elo 4, um torque externo T_4 de 120 lb.in. Uma vez definido, é possível executar o estudo da análise de movimentos e extrair as forças resultantes nas juntas e torque T_2 necessário para que o motor, que atua no elo 2, execute o movimento. O torque T_2 representa o torque do motor atribuído ao elo 2, necessário para a execução do movimento considerando as massas, momentos de inércia, forças externas e torques externos atribuídos ao estudo.

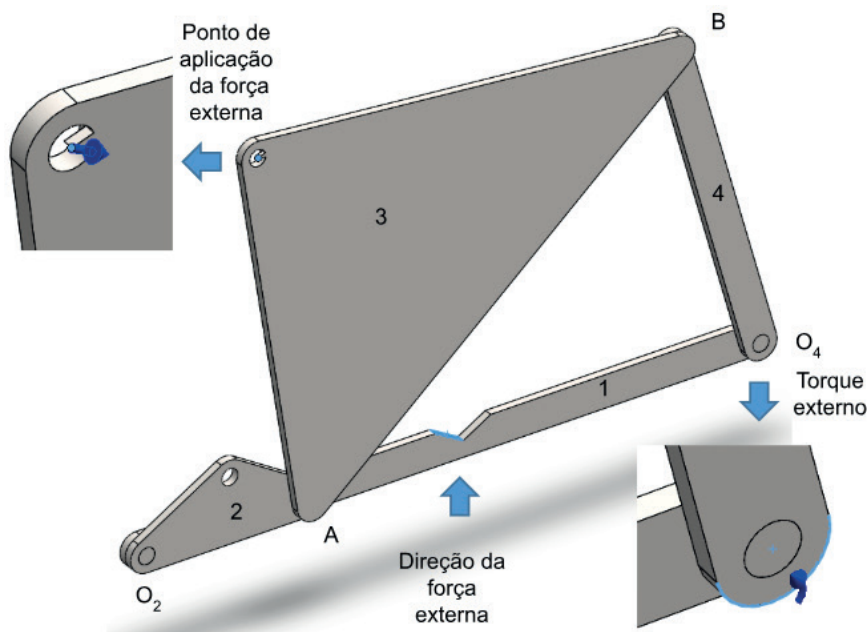


Figura 5 – Montagem do mecanismo no Solidworks com todas as características definidas na Tabela 1.

Para este exemplo, os gráficos da Figura 6, indicam a variação das forças que atuam nas juntas. A partir destes gráficos, é possível determinar valores de máximos que atuam em cada junta. No caso da junta O_2 , F_{21} máximo é de 53 lb e representa o módulo da resultante da força exercida do elo 2 sobre o elo 1 (F_{21}). Um valor próximo é observado para F_{32} (força exercida do elo 3 sobre o elo 2). Isto devido ao princípio da transmissibilidade. Já na junta B, a força que o elo 4 exerce sobre o elo 3 (F_{43}) é de 124 lb, mesmo valor é observado na junta O_4 , ou a reação do elo 1 sobre o elo 4. Estes valores podem ser utilizados para dimensionamento dos elos utilizando ferramentas CAE de simulação de AEF. Além dos esforços nas juntas, a análise cinemática retorna como resultado, um gráfico com valores para o torque T_2 , necessário para acionamento do mecanismo pelo elo 2. Este dado pode ser utilizado para dimensionamento do motor (ou atuador) necessário para acionar o mecanismo. Neste exemplo, o torque máximo encontrado foi de 175 lb.in.

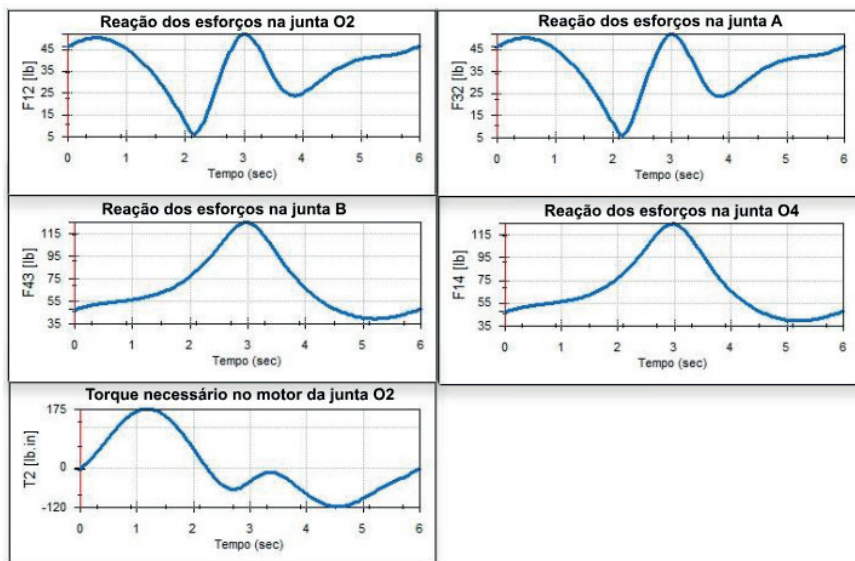


Figura 6 – Resultados das simulações de esforços nas juntas Montagem do mecanismo no Solidworks segundo as características definidas na Tabela 1.

A questão é: podemos confiar que estes resultados estão corretos? Uma forma de verificar é utilizar o método analítico tendo como ferramenta computacional o software Matlab. Antes de apresentar este método computacional, é necessário apresentar o método analítico que utiliza equações algébricas para representar o comportamento cinemático dos vetores \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 .

Método analítico

Como mostra a Figura 2, um mecanismo pode ser representado por vetores. Assim, equações vetoriais podem ser utilizadas para a solução de problemas cinemáticos. Neste método são deduzidas equações cujos resultados determinam as posições instantâneas para os vetores \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 , \mathbf{R}_3 e \mathbf{R}_4 . Através das primeira e segunda derivadas dessas equações também é possível obter valores para as velocidades e acelerações instantâneas. Finalmente, estimando-se massas e momentos de inércia para os elos e utilizando a segunda lei do movimento de Newton, é possível calcular os esforços nas juntas. A definição das equações algébricas de posição utiliza o método de notação de números complexos permite obter expressões na forma polar e na forma de coordenadas através da Identidade de Euler (Equação 1).

$$Re^{j\theta} = r\cos\theta + jr\sin\theta \quad (1)$$

Observe que o termo ao lado esquerdo da igualdade é uma função exponencial, que relaciona o comprimento do vetor \mathbf{R} e o ângulo θ (Figura 7). A derivada deste termo é facilmente obtida a partir da regra da cadeia. Além disso, o lado direito da igualdade apresenta duas simples relações trigonométricas de seno e cosseno, também com derivação trivial e que definem as projeções das componentes do vetor \mathbf{R} nos eixos x e y .

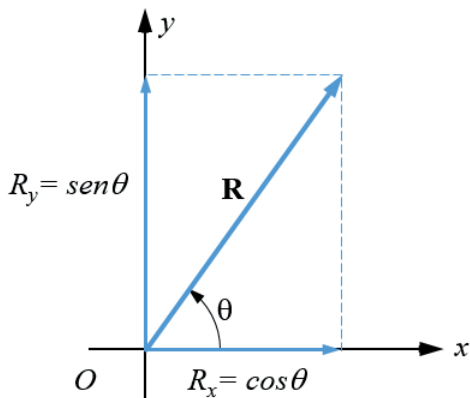


Figura 7 – Relação geométrica entre as variáveis \mathbf{R} e θ e as suas projeções \mathbf{R}_x e \mathbf{R}_y nos eixos x e y .

A definição das equações para o cálculo dos valores dos ângulos θ_3 e θ_4 em função de θ_2 , envolve um método de soma vetorial. Para isto, observe que a soma de \mathbf{R}_2 e \mathbf{R}_3 é igual à soma de \mathbf{R}_1 e \mathbf{R}_4 . Esta relação também pode ser escrita como:

$$\mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_4 + \mathbf{R}_1 \quad (2.a)$$

Ou então:

$$\mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_1 = 0 \quad (2.b)$$

Substituindo a notação polar para números complexos na Equação (2.b), obtém-se a Equação 3:

$$R_2 e^{j\theta_2} + R_3 e^{j\theta_3} - R_4 e^{j\theta_4} - R_1 e^{j\theta_1} = 0 \quad (3)$$

Substituindo a identidade de Euler na Equação (3), tem-se a Equação 4:

$$a(\cos\theta_2 + j\text{sen}\theta_2) + b(\cos\theta_3 + j\text{sen}\theta_3) - c(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) - d(\cos\theta_1 + j\text{sen}\theta_1) = 0$$

A Equação (4) permite encontrar os valores de θ_3 e θ_4 em função de θ_2 . Para tanto, separa-se a parte sem operador j (real) da parte com operador j (imaginária). Após simplificar o operador, tem-se um sistema de duas equações reais com duas incógnitas (θ_3 e θ_4), como mostra as equações 5.a e 5.b:

$$a \cdot \cos\theta_2 + b \cdot \cos\theta_3 - c \cdot \cos\theta_4 + d \cdot \cos\theta_1 = 0 \quad (5.a)$$

$$a \cdot \sin\theta_2 + b \cdot \sin\theta_3 - c \cdot \sin\theta_4 + d \cdot \sin\theta_1 = 0 \quad (5.b)$$

Após uma série de manipulações algébricas, resolvendo o sistema de Equações 5 para θ_4 , determina-se a Equação 6:

$$\theta_{4,1,2} = 2 \operatorname{atg} \cdot \left[\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right] \quad (6)$$

Os termos A , B e C da Equação 6 são calculados em função de relações envolvendo os comprimentos dos elos e também, em função do ângulo θ_2 , que define a posição do elo de entrada. Após determinar θ_4 , é possível usar a Equação 7 para determinar o valor de θ_3 , deduzida da equação 5.b:

$$\theta_{3,1,2} = \operatorname{arcsen} \left[\frac{-a \cdot \sin\theta_2 + c \cdot \sin\theta_4}{b} \right] \quad (7)$$

Após determinação dos valores de θ_3 e θ_4 , calcula-se as velocidades angulares e lineares de qualquer ponto pertencente ao mecanismo. Sabendo que a velocidade é a variação instantânea de uma posição em relação ao tempo, deriva-se a equação 3 em relação ao tempo e obtém-se:

$$j \cdot a \cdot \omega_2 e^{j\theta_2} + j \cdot b \cdot \omega_3 e^{j\theta_3} - j \cdot c \cdot \omega_4 e^{j\theta_4} = 0 \quad (8)$$

As equações de velocidades angulares para o elo acoplador (ω_3) e para o elo de saída (ω_4) são obtidas inserindo a identidade de Euler na Equação 8. Simplificando o operador j e após algumas manipulações algébricas, determina-se valores de ω_3 e ω_4 . As velocidades instantâneas dos pontos A e B , são calculadas através das Equações 9:

$$V_A = a\omega_2(-\sin\theta_2 + j \cdot \cos\theta_2) \quad (9.a)$$

$$V_{BA} = b\omega_3(-\sin\theta_3 + j \cdot \cos\theta_3) \quad (9.b)$$

O passo seguinte é calcular as acelerações lineares e angulares dos pontos A e B . Derivando-se a Equação 8, que resulta na Equação 10:

$$(a\alpha_2je^{j\theta_2} - a\omega_2^2e^{j\theta_2}) + (b\alpha_3je^{j\theta_3} - b\omega_3^2e^{j\theta_3}) - (c\alpha_4je^{j\theta_4} - c\omega_4^2e^{j\theta_4}) = 0 \quad (10)$$

Observe que surgem duas componentes de aceleração, uma para cada termo da Equação 10, que correspondem às acelerações tangencial e a centrípeta. As acelerações angulares para o elo acoplador (α_3) e para o elo de saída (α_4) são obtidas substituindo a identidade de Euler na Equação 10 e simplificando o operador j . Obtém-se assim, um sistema de duas equações. As acelerações lineares dos pontos A e B são calculadas pelas Equações 11.

$$A_A = a\alpha_2(-\text{sen}\theta_2 + j.\text{cos}\theta_2) - a\omega_2^2(\text{cos}\theta_2 + j.\text{sen}\theta_2) \quad (11.a)$$

$$A_{BA} = b\alpha_3(-\text{sen}\theta_3 + j.\text{cos}\theta_3) - b\omega_3^2(\text{cos}\theta_3 + j.\text{sen}\theta_3) \quad (11.b)$$

A análise de esforços nas juntas considera a localização de todas as forças atuando no sistema e utiliza a segunda lei de Newton para movimento. A Equação (12.a) relaciona movimentos de translação e (12.b), de rotação.

$$\sum F = m . a \quad (12.a)$$

$$\sum T = I_g . \alpha \quad (12.b)$$

Este cálculo é similar a análise estática de uma estrutura fixa, tanto que se utiliza um DCL para cada elo, como mostra a Figura 8. Observe os esforços de reação que aparecem nas juntas O_2 , O_4 , A e B , mostradas na Figura 8. Devido à terceira lei de Newton, é possível afirmar que $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$, $\mathbf{F}_{23} = -\mathbf{F}_{32}$, $\mathbf{F}_{34} = -\mathbf{F}_{43}$ e $\mathbf{F}_{41} = -\mathbf{F}_{14}$. Além disso, as origens desses vetores são localizadas em relação ao centro de gravidade (CG) do respectivo elo, assim como a localização de qualquer força externa. A partir do DCL, é possível determinar o equilíbrio dinâmico de cada elo utilizando as Equações 12, que resulta em três equações de equilíbrio por elo – duas para as forças em x e y e outra para o equilíbrio de momentos.

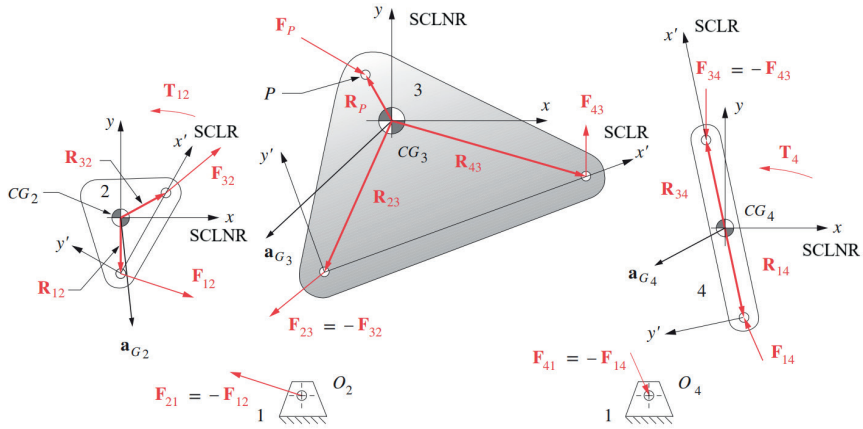


Figura 8 – Diagrama de corpo livre (DCL) de cada elo do mecanismo mostrado na Figura 4.

Contudo, como são três elos, isto resulta em um sistema de nove equações. Como os elos se movimentam acoplados por juntas, as equações também devem ser resolvidas simultaneamente como equações acopladas. As equações 13.a,b,c dizem respeito ao elo 2 (entrada), as equações 13.d,e,f ao elo 3 (acoplador) e as equações 13.g,h,i ao elo 4 (saída).

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 a_{CG2x} \quad (13.a)$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 a_{CG2y} \quad (13.b)$$

$$(R_{12x} F_{12y} - R_{12y} F_{12x}) + (R_{32x} F_{32y} - R_{32y} F_{32x}) + T_2 = I_{CG2} \alpha_2 \quad (13.c)$$

$$F_{43x} - F_{32x} + F_{Px} = m_3 a_{G3x} \quad (13.d)$$

$$F_{43y} - F_{32y} + F_{Py} = m_3 a_{G3y} \quad (13.e)$$

$$(R_{43x} F_{43y} - R_{43y} F_{43x}) - (R_{23x} F_{32y} - R_{23y} F_{32x}) + (R_{Px} F_{Py} - R_{Py} F_{Px}) = I_{G3} \alpha_3 \quad (13.f)$$

$$F_{14x} - F_{43x} = m_4 a_{G4x} \quad (13.g)$$

$$F_{14y} - F_{43y} = m_4 a_{G4y} \quad (13.h)$$

$$R_{14x} F_{14y} - R_{14y} F_{14x} - (R_{34x} F_{43y} - R_{34y} F_{43x}) + T_4 = I_{G4} \alpha_4 \quad (13.i)$$

Na equação 13.c, o torque T_2 é definido como incógnita. Este sistema de nove equações pode ser resolvido simultaneamente, através da forma matricial $[A] \times [B] = [C]$, onde a matriz A representa a matriz dos coeficientes, a matriz B das incógnitas e a matriz C dos valores conhecidos. Assim, organizando o conjunto de equações 13 na forma matricial, tem a Equação 14:

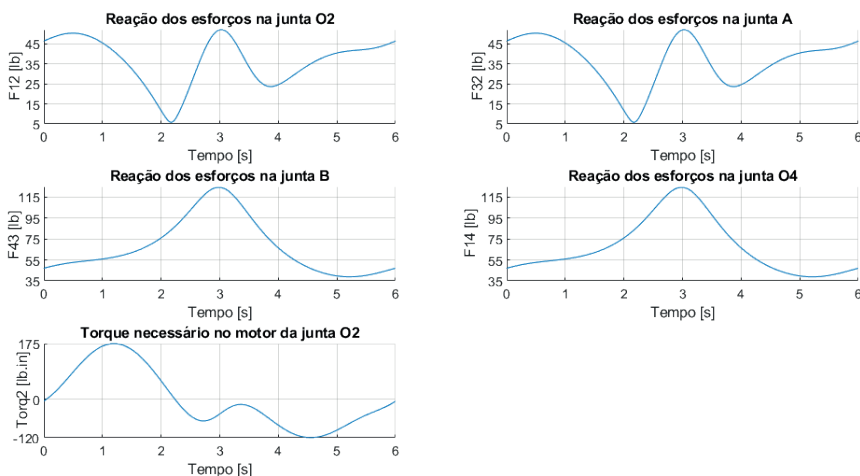


Figura 11 – Resultados de esforços nas juntas e torque obtidos pelo Matlab.

CONCLUSÃO

Diversas ferramentas computacionais estão disponíveis para uso na engenharia mecânica. Este texto apresenta uma metodologia de ensino para a disciplina de mecanismos, que possui uma ementa teórica repleta de métodos de geometria descritiva e equações algébricas. A título de ilustração, é apresentado um método aplicado em sala de aula, com o uso dos softwares Solidworks e Matlab para solução de um problema clássico envolvendo um mecanismo quatro barras. Ao introduzir ferramentas computacionais como o Solidwork e o Matlab como metodologia de ensino, observou-se aumento no interesse dos alunos pela disciplina e pelo curso de engenharia mecânica.

BIBLIOGRAFIA

CONSTANTS, E.; DYER, K. B. Introduction to Mechanism Design With Computer Applications (2018).

NORTON, R. Design of Machinery. 6º Ed. (2020).



C A P Í T U L O 2

ANÁLISE DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE PETG OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D

Luis Felipe Pereira Folha

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

Sandra Mara Kaminski Tramontin

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

Heliety Rodrigues Borges Barreto

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, mais conhecida como impressão 3D, consolidou-se nas últimas décadas como uma das tecnologias mais promissoras da engenharia e do design de produtos. Seu avanço possibilitou não apenas a produção de geometrias complexas, antes inviáveis por métodos convencionais, como também a customização de peças em pequena ou larga escala, atendendo setores tão diversos quanto o automotivo, aeroespacial, médico, odontológico e educacional (VOLPATO, 2017). Essa flexibilidade, aliada à redução de custos e de desperdício de material, contribui para o crescimento contínuo da manufatura aditiva como alternativa viável em processos produtivos.

Apesar de suas vantagens, a impressão 3D ainda apresenta limitações relacionadas às propriedades mecânicas das peças produzidas, especialmente quando se trata de polímeros. Um dos principais problemas identificados é a fragilidade entre camadas sucessivas, resultado do gradiente térmico estabelecido durante a deposição do material. Esse fenômeno pode comprometer a resistência estrutural e a durabilidade das peças, restringindo sua aplicação em ambientes que exigem desempenho mecânico elevado (JAYANTH et al., 2021).

Nesse contexto, destaca-se o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), um polímero termoplástico modificado que combina boa resistência mecânica, estabilidade química e facilidade de processamento. Sua crescente utilização em impressoras 3D

do tipo FDM (Fused Deposition Modeling) deve-se à versatilidade e ao equilíbrio entre custo acessível e propriedades físicas satisfatórias (VALVEZ et al., 2022). Ainda assim, tal como ocorre com outros polímeros, as peças em PETG sofrem influência da orientação de impressão, parâmetros de deposição e condições térmicas, fatores que impactam diretamente seu desempenho.

Para mitigar essas limitações, o tratamento térmico pós-impressão surge como uma alternativa eficaz. Esse processo, já consolidado na indústria metalúrgica, vem sendo adaptado ao campo dos polímeros, mostrando-se capaz de aliviar tensões internas, aumentar a cristalinidade e melhorar a adesão entre camadas (JAYANTH et al., 2021). Dessa forma, peças de PETG submetidas a aquecimento controlado podem alcançar propriedades mecânicas superiores às obtidas somente pela impressão.

Além disso, a análise dos efeitos do tratamento térmico não deve se restringir à resistência mecânica. Outras propriedades, como densidade aparente, porosidade e absorção de água, também são relevantes, pois impactam estabilidade dimensional e durabilidade das peças produzidas. Uma investigação abrangente desses fatores possibilita avaliar com maior precisão o real potencial do tratamento térmico como estratégia para ampliar as aplicações do PETG na manufatura aditiva.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PETG

O Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) é um copolímero termoplástico derivado do PET, modificado pela adição de glicol para eliminar a fragilidade típica da versão convencional. Essa modificação resulta em um material de maior tenacidade, excelente resistência química, boa estabilidade dimensional e facilidade de processamento (VALVEZ et al., 2022a).

O PETG combina propriedades de outros polímeros amplamente utilizados na impressão 3D, como o PLA e o ABS, oferecendo ao mesmo tempo facilidade de impressão, boa aderência entre camadas e resistência ao impacto. Além disso, apresenta transparência, brilho e boa resistência a agentes químicos, o que o torna adequado para embalagens, prototipagem, dispositivos médicos e componentes de uso geral (PARK; FU, 2021).

No âmbito da manufatura aditiva, o PETG é cada vez mais adotado por aliar custo acessível, boa resistência mecânica e facilidade de impressão em equipamentos FDM. Contudo, assim como outros polímeros, o desempenho das peças impressas é fortemente influenciado por parâmetros de impressão (temperatura, velocidade, preenchimento, orientação de camadas) e por tratamentos pós-processamento, como o tratamento térmico.

2.2 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, refere-se a um conjunto de tecnologias capazes de produzir objetos tridimensionais a partir da adição sucessiva de camadas de material. Diferentemente dos métodos convencionais de usinagem ou conformação, que envolvem a remoção ou deformação do material de partida, a manufatura aditiva é um processo construtivo que permite maior liberdade geométrica e otimização do uso de matéria-prima (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Entre as diversas técnicas disponíveis, o FDM destaca-se pelo baixo custo dos equipamentos e insumos, o que viabilizou sua ampla disseminação tanto em uso doméstico quanto acadêmico e industrial. O processo baseia-se na extrusão de um filamento termoplástico previamente aquecido até atingir temperatura superior à de fusão ou transição vítrea. O material é depositado camada por camada, seguindo o percurso definido por um arquivo digital.

Embora vantajoso, o processo apresenta desafios associados à adesão entre camadas, à presença de porosidades e à anisotropia mecânica. A orientação de impressão e os parâmetros de deposição exercem influência direta sobre as propriedades finais da peça, tornando necessário o estudo de estratégias que minimizem tais limitações (VOLPATO, 2017).

Além do campo da prototipagem, a manufatura aditiva vem ganhando relevância em aplicações de alto valor agregado, como implantes médicos personalizados, componentes aeronáuticos de geometrias complexas, e até mesmo a produção de peças sob demanda em setores automotivo e ferroviário. Essa evolução é impulsionada por pesquisas que buscam aprimorar tanto os materiais empregados quanto os tratamentos pós-processamento, como é o caso do tratamento térmico em polímeros.

2.3 Tratamento Térmico em Polímeros

O tratamento térmico em polímeros consiste na aplicação controlada de calor, com o objetivo de modificar sua microestrutura e propriedades mecânicas. Diferentemente dos metais, nos quais o tratamento térmico promove transformações de fases cristalinas bem definidas, nos polímeros os efeitos estão relacionados principalmente à reorganização das cadeias moleculares e à alteração do grau de cristalinidade.

Durante a impressão 3D pelo processo FDM, o resfriamento não uniforme das camadas pode gerar tensões residuais internas. O tratamento térmico, nesse contexto, atua no alívio dessas tensões e na reorganização estrutural, reduzindo a fragilidade e aumentando a resistência do material.

Esse processo é conhecido como recozimento, no qual a peça impressa é aquecida até uma temperatura próxima à temperatura de transição vítrea e mantida por um determinado tempo, seguido de resfriamento controlado. O resultado esperado é uma melhoria das propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e redução de falhas por trinca.

Estudos recentes mostram que o tratamento térmico em peças impressas em PETG promove uma melhora significativa no módulo elástico e na resistência à tração, ainda que em alguns casos ocorra redução do alongamento na ruptura (VALVEZ et al., 2022b). Tais resultados confirmam que o tratamento térmico pode ser um recurso eficaz para ampliar a aplicabilidade do PETG em contextos em que se exige maior desempenho estrutural.

3. METODOLOGIA

3.1 Preparação das Amostras

Os corpos de prova foram produzidos por manufatura aditiva do tipo FDM (Fused Deposition Modeling), utilizando filamento de PETG. em uma impressora 3D da marca Creality, modelo Ender 5 S1. A impressora possui um volume de impressão de 220 x 220 x 280 mm, temperatura máxima da mesa de até 110 °C, temperatura do bico de extrusão de até 300 °C e precisão de impressão de +/- 0.1 mm.

Os parâmetros de impressão utilizados foram definidos com base em testes de calibração da impressora, visando atingir a melhor qualidade de impressão para o filamento utilizado e estão indicados na Tabela 1. Foram utilizados dois parâmetros de preenchimento para os corpos de prova: 40% e 100%.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão utilizados

Parâmetro	Valor
Altura de camada	0.12 mm
Largura de extrusão	0.4 mm
Número de filetes da parede	2
Alinhamento da costura em Z	Canto mais agudo
Temperatura do bico de impressão	230 °C
Temperatura da mesa de impressão	80 °C
Velocidade de preenchimento	80.0 mm/s
Velocidade da parede	40.0 mm/s
Velocidade da camada inicial	20.0 mm/s

Habilitar retração	Ativo
Distância de retração	3.0 mm
Velocidade de retração	45.0 mm/s
Velocidade da ventoinha	50.0 %
Preenchimento	40% e 100%
Padrão de preenchimento	Grade

Fonte: Autoria própria, 2024.

Após a impressão, as amostras foram separadas em oito lotes , sendo quatro lotes de controle (sem tratamento) quatro lotes submetidos ao tratamento térmico em estufa,nas temperaturas de 80° C e 100° C, conforme Tabela 2, a fim de avaliar a influência deste processo nas propriedades mecânicas e físicas do produto. Para cada lote foram impressos 5 corpos de prova.

O tratamento térmico foi conduzido no Laboratório de controle Térmico: Pesquisa & Desenvolvimento da UTFPR, em uma mufla fabricada pela SolidSteel Indústria e Comércio de Equipamentos Laboratoriais LTDA., modelo SSE-64L. Durante o tratamento térmico, a temperatura foi mantida constante, durante um período de 4 horas, seguido de resfriamento lento em ambiente de estufa.

Tabela 2 - Lotes de tratamento térmico, preenchimento e ensaio realizado

Tratamento	40 % Preenchimento	100% Preenchimento
Sem tratamento (1)	Lote 1	Lote 5
Tratado a 100 °C	Lote 2	Lote 6
Sem tratamento (2)	Lote 3	Lote 7
Tratado a 80 °C	Lote 4	Lote 8

Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638, na Máquina Universal de Ensaios, marca EMIC, modelo DL10000. Os corpos de prova foram impressos com geometria padrão do tipo I, conforme definido pela norma.

3.3 Ensaio de Absorção de Água

A determinação da absorção de água foi realizada conforme a metodologia definida pela norma ASTM D570: (a) pesagem das amostras em balança analítica, registrando a massa seca inicial; (b) imersão, as amostras foram totalmente submersas em água destilada, em temperatura ambiente controlada; (c) intervalos de medição: a massa foi novamente medida em intervalos regulares, até atingir estabilização.

A variação de massa foi expressa em termos percentuais, representando a quantidade de água absorvida ao longo do tempo.

3.4 Determinação da Densidade Aparente e Porosidade Aparente

A densidade aparente foi calculada pela razão entre a massa e o volume geométrico das amostras. O volume foi obtido por medição direta das dimensões dos corpos de prova com paquímetro digital, garantindo precisão milimétrica.

A porosidade aparente foi estimada a partir da comparação entre a densidade aparente experimental e a densidade teórica do PETG, determinada com base em valores de referência do material.

4. RESULTADOS

4.1 Ensaio de Tração

Os resultados obtidos no ensaio de tração revelaram diferenças significativas entre as amostras tratadas e não tratadas termicamente.

Observa-se que as amostras tratadas a 100 °C apresentaram aumento nos valores de tensão de escoamento, enquanto as amostras tratadas a 80 °C apresentaram redução na tensão, quando comparados com os lotes de controle. As tabelas 3 apresenta as médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração realizados.

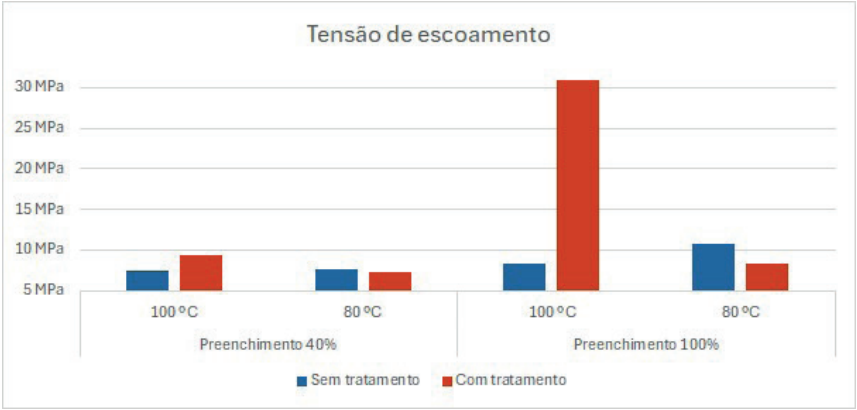
Tabela 3 – Valor médio das propriedades por lote ensaiado

Lote	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Tensão máxima (MPa)
1	7,36	10,22	29,54
2	9,44	11,57	27,96
3	7,63	11,65	29,62
4	7,19	7,28	17,52
5	8,32	10,34	45,62
6	30,86	10,70	40,50
7	10,81	11,34	32,04
8	8,23	10,22	30,22

Fonte: Autoria própria, 2024.

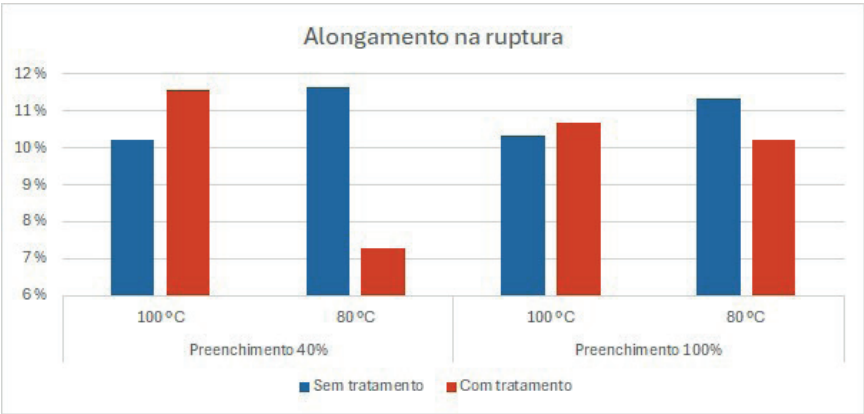
Os gráficos 1, 2 e 3 apresentam o comparativo entre as médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova utilizados como referência e os tratados termicamente .

Grafico 1 – Comparação das tensões de escoamento entre os lotes tratados e sem tratamento



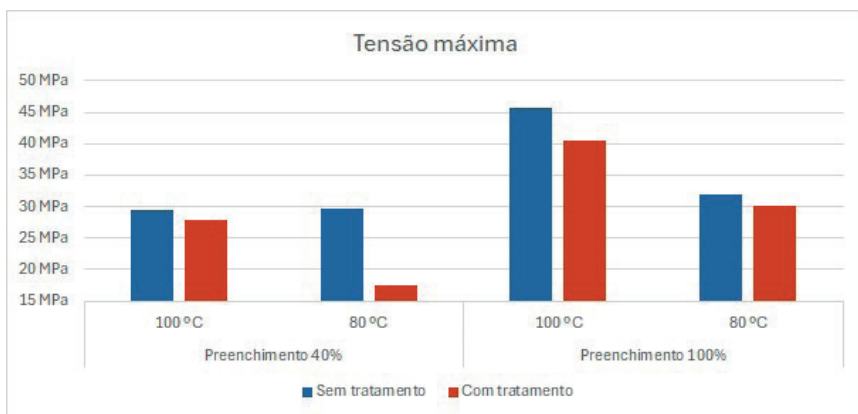
Fonte: Autoria própria, 2024.

Grafico 2 – Comparação dos alongamentos entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Grafico 3 – Comparação das tensões de máximas entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Esses resultados podem ser atribuídos à reorganização estrutural promovida pelo aquecimento, que tende a reduzir tensões internas e favorecer a cristalização parcial, aumentando a rigidez do material. Por outro lado, o aumento de cristalinidade reduz a capacidade de deformação plástica, justificando a menor ductilidade observada.

4.2 Absorção de Água

A análise da absorção de água mostrou comportamento crescente ao longo do tempo de imersão, até atingir valores estáveis, como os apresentados na tabela 4.

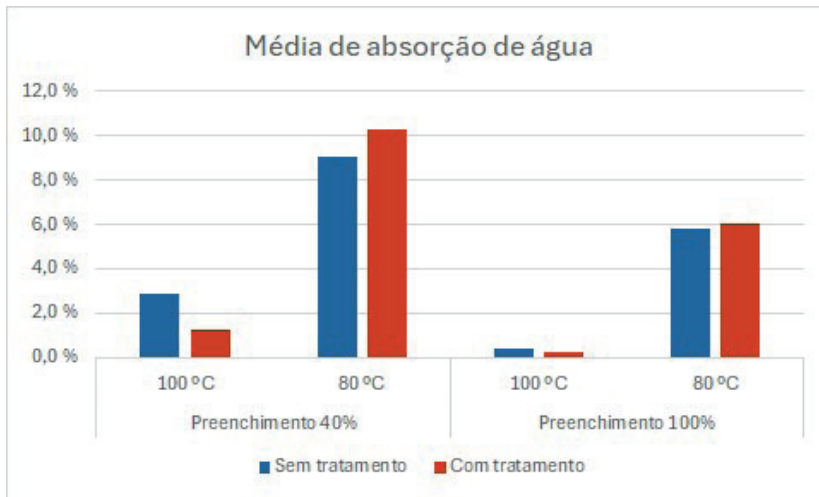
O gráfico 4 apresenta o comparativo entre as médias dos resultados obtidos nos testes de absorção de água para os corpos de prova utilizados como referência e os tratados termicamente .

Tabela 4 – Valores médios de absorção de água

Lote	Média de absorção de água (%)
1	2,897
2	1,222
3	9,051
4	10,27
5	0,413
6	0,231
7	5,802
8	6,061

Fonte: Autoria própria, 2024.

Gráfico 4 - Comparação da absorção de água entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os resultados indicam que amostras tratadas termicamente a 100 °C absorveram menor quantidade de água, em comparação às não tratadas. O tratamento térmico contribuiu para a redução da porosidade superficial, dificultando a difusão de água para o interior da peça.

A estabilização da absorção ocorreu mais rapidamente nas amostras tratadas, sugerindo menor conectividade entre poros. Esse comportamento é coerente com a hipótese de que o tratamento térmico promoveu uma reorganização molecular, diminuindo a permeabilidade do material.

4.3 Densidade Aparente e Porosidade Aparente

Os valores de densidade aparente apresentaram variação discreta, mas significativa entre os grupos de amostras.

As amostras com 40% de preenchimento apresentaram aumento na densidade aparente após o tratamento térmico, enquanto as amostras com 100% de preenchimento apresentaram redução no valor. Valores médios apresentados na tabela 5.

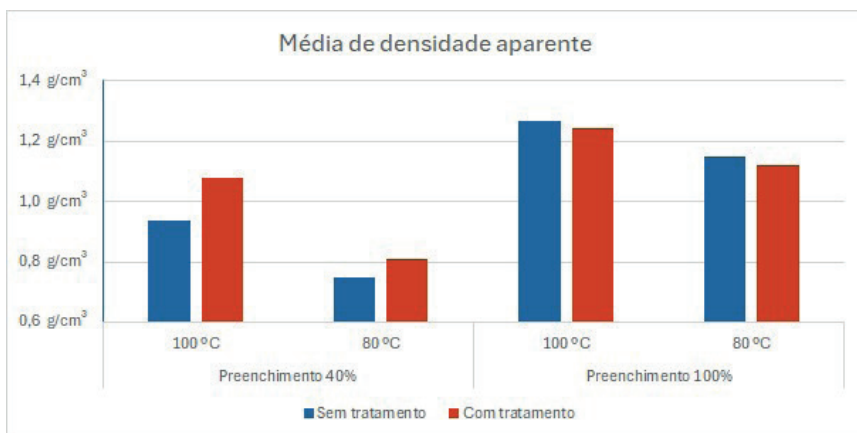
Tabela 5 – Valores médios de densidade aparente e porosidade aparente

Lote	Média de densidade aparente (g/cm ³)	Média de porosidade aparente (%)
1	0,936	5,290
2	1,076	12,582
3	0,747	5,724
4	0,812	11,393
5	1,267	5,163
6	1,246	11,538
7	1,148	4,088
8	1,122	4,217

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os gráficos 5 apresenta o comparativo das médias dos resultados obtidos nos testes de densidade aparente para os corpos de prova para referência e os tratados termicamente.

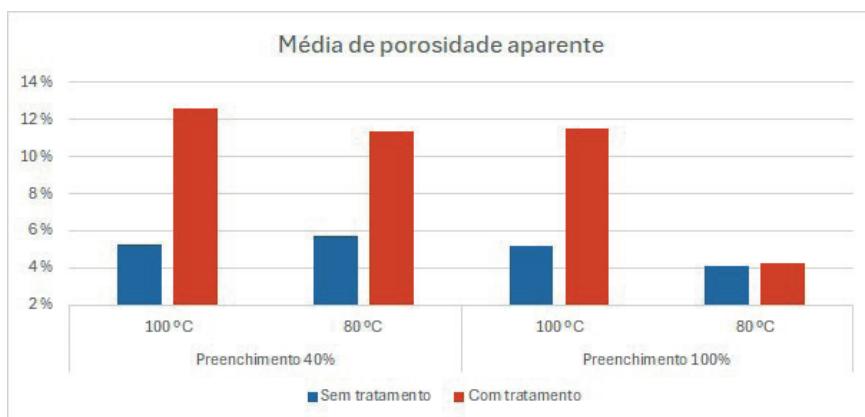
Gráfico 5 - Comparação da densidade aparente entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

O gráfico 6 apresenta o comparativo das médias dos resultados obtidos nos testes de porosidade aparente. A porosidade aparente mostrou tendência de aumento após o tratamento térmico, independente do preenchimento e temperatura de tratamento térmico.

Gráfico 6 - Comparação da porosidade aparente entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

5. DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa demonstram que o tratamento térmico exerce uma influência significativa nas propriedades mecânicas e microestrutura do PETG obtido por impressão 3D. Especificamente, o tratamento a 100°C elevou a tensão de escoamento e o alongamento na ruptura, enquanto a 80°C houve redução nesses dois parâmetros. Evidencia-se, assim, a complexa interação entre o processo de impressão e o tratamento térmico. Foi possível observar que, um pós-tratamento muito utilizado em materiais metálicos, também pode ser vantajoso para polímeros fabricados por impressão 3D.

A análise de densidade aparente e porosidade indicou que o aquecimento pode promover tanto densificação quanto formação de poros, a depender das condições de processamento. A absorção de água também foi afetada, variando de modo diretamente relacionado à porosidade do material.

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar que o tratamento térmico pode ser usado como ferramenta para ajustar as propriedades do PETG impresso, permitindo obter características específicas para diferentes aplicações. Contudo, é essencial otimizar os parâmetros de tratamento para cada peça e uso, a fim de evitar degradação e assegurar as propriedades desejadas.

O tratamento a 100°C mostrou-se mais eficiente para elevar propriedades mecânicas, aumentando o valor médio da tensão de escoamento, sem comprometer a ductilidade, inclusive proporcionando aumento na capacidade de alongamento à ruptura. Além disso houve diminuição da absorção de água. Em contrapartida, esta temperatura de tratamento conferiu maiores deformações aos corpos de prova.

O tratamento a 80 °C não alterou de maneira significativa a geometria da peça, porém resultou em diminuição da tensão de escoamento, redução do alongamento na ruptura e aumento na absorção de água.

Em relação aos corpos de prova sem tratamento, observou-se que os valores de tensão máxima diminuíram para os lotes tratados, independente do preenchimento ou da temperatura de tratamento térmico. Este comportamento também se repetiu quanto aos valores de porosidade aparente, houve acréscimo de porosidade, independente do preenchimento ou da temperatura de tratamento térmico;

Verificou-se aumento da densidade aparente para o preenchimento de 40%.

Importante ressaltar que as limitações do estudo incluem a avaliação de um único material e a variação restrita dos parâmetros de impressão e de tratamento térmico. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar outros termoplásticos, diferentes níveis e padrões de preenchimento, bem como explorar combinações variadas de

tempo e temperatura, buscando-se padrões de otimização do pós-tratamento para o PETG. Sugere-se, ainda, avaliar o comportamento de outras propriedades após o tratamento térmico, como dureza e resistência à flexão.

6. CONCLUSÃO

Em conclusão, o estudo demonstra o potencial do tratamento térmico como ferramenta para otimizar propriedades mecânicas e funcionais de peças impressas em 3D. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento sobre o comportamento de materiais impressos e podem orientar o desenvolvimento de novos produtos e processos de fabricação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1895**: Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. West Conshohocken, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D570**: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken, 2022.

FRĂȚILĂ, D.; ROTARU, H. **Additive manufacturing – a sustainable manufacturing route**. In: MATEC WEB CONFERENCE, 94, 2017. Proceedings... [s.l.]: MATEC Web Conf., 2017. DOI: 10.1051/mateconf/20179403004. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/08/mateconf_cosme2017_03004/mateconf_cosme2017_03004.html>. Acesso em: 21 de maio de 2023.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015.

JAYANTH, N. *et al.* **Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA**. Coimbatore: Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 123, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616121004070>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

NUNES, Edilene de Cássia Dutra; LOPES, Fábio Renato Silva Lopes. **Polímeros**: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

PARK, Soyeon; FU, Kun (Kelvin). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, v. 213, 2021, 108876. ISSN 0266-3538. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108876>>. Acesso em: 21 maio 2023.

VALVEZ, S.; SILVA, A. P.; REIS, P. N. B. **Compressive Behaviour of 3D-Printed PETG Composites**. *Aerospace*, v. 9, p. 124, 2022a. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/aerospace9030124>>. Acesso em: 17 de maio de 2023.

VALVEZ, S.; SILVA, A. P.; REIS, P. N. B. **Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts**. *Polymers*, v. 14, p. 2564, 2022b. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym14132564>>. Acesso em: 21 de maio de 2023.

VOLPATO, Neri (Org.). **Manufatura Aditiva**. São Paulo: Blucher, 2017.



C A P Í T U L O 3

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COLETORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES

Gustavo Vinícius Vieira Mello

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Allefe Jardel Chagas Vaz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Humberto Ianczkovski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Vinícius Mariani Lenart

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Thiago Antonini Alves

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

RESUMO: Diante do crescente desenvolvimento industrial e populacional, a demanda por geração de energia está em constante aumento. Sistemas solares térmicos surgem como uma solução promissora para enfrentar esses desafios, aproveitando o sol como uma fonte de calor inesgotável. Coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões demonstram grande eficiência. O aquecimento de água em aplicações residenciais, por meio desses coletores solares, pode reduzir consideravelmente o consumo de energia. Além de serem sustentáveis, os coletores solares de tubos evacuados de alta pressão podem ser economicamente vantajosos. Comparados aos coletores solares convencionais, eles são mais eficientes e operam em temperaturas mais elevadas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de um sistema de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões, utilizando água como fluido de trabalho. Testes experimentais foram conduzidos ao longo de um dia da primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa/PR. Através

da Primeira Lei da Termodinâmica foi observado que a eficiência térmica tanto dos coletores colares analisados individualmente, quanto do sistema variou entre 59% e 85%, sob condições meteorológicas reais. Os resultados indicam que um sistema de coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões pode ser uma alternativa viável e sustentável para o aquecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Termossifões, Energia Solar, Coletor Solar, Desempenho Térmico, Experimental.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A SYSTEM OF THERMOSYPHON-ASSISTED EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS

ABSTRACT: Against of the growing industrial and population development, the demand for energy generation is constantly increasing. Solar thermal systems emerge as a promising solution to address these challenges, harnessing the sun as an inexhaustible heat source. Evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons demonstrate great efficiency. Water heating in residential applications through these solar collectors can considerably reduce energy consumption. In addition to being sustainable, high pressure evacuated tube solar collectors can be economically advantageous. Compared to conventional solar collectors, they are more efficient and operate at higher temperatures. This work aims to evaluate the thermal performance of a system of three evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons, using water as the working fluid. Experimental tests were conducted over a day in the spring of 2023 in the city of Ponta Grossa/PR. Through the First Law of Thermodynamics, it was observed that the thermal efficiency of both the individually analyzed solar collectors and the system ranged between 59 and 85% under real weather conditions. The results indicate that a system of evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons can be a viable and sustainable alternative for water heating.

KEYWORDS: Thermosyphon. Solar Energy. Solar Collectors. Experimental Thermal Performance.

INTRODUÇÃO

De acordo com os dados fornecidos pela *International Energy Agency* (IEA, 2022), sobre a divisão percentual da produção energética mundial, a produção advinda de fontes não renováveis, como do petróleo e derivados (29,5%), carvão mineral (26,8%) e gás natural (23,7%), representa um total de 80% da produção de energia global. A energia nuclear representa 5%. Enquanto que as fontes consideradas renováveis são responsáveis por uma parcela ínfima de 15% do total, essa porcentagem está alocada em outros (2,5%), fotovoltaica e eólica, somada a biomassa (9,8%) e hidráulica (2,7%).

Das informações do Balanço Energético Nacional de 2022 – BEN 2022 (EPE, 2022), a distribuição da matriz energética no Brasil apresenta particularidades em relação à matriz energética global. A principal é que no Brasil as fontes renováveis totalizam 44,8%, somando hidráulica (11%), lenha e carvão vegetal (8,7%), derivados de cana-de-açúcar (16,4%) e outras renováveis (8,7%). A energia nuclear representa 1,3%. Os não renováveis de combustíveis fósseis totalizam 53,9%.

A utilização dos combustíveis fósseis como fontes de energia contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa, o que acelera o processo de mudanças climáticas. Portanto, é fundamental buscar alternativas energéticas limpas e renováveis, como a energia solar, que apresenta um grande potencial para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação de impactos ambientais (Goldemberg, 2007).

O Brasil é um país com um clima tropical e possui mais de 92% do seu território localizado acima do Trópico de Capricórnio, possuindo um enorme potencial para o uso de energia solar (Tessaro, 2006). Conforme descrito no Atlas Brasileiro de Energia Solar, a irradiação solar média diária varia entre 3,50Wh/m² e 6,25Wh/m².

O presente trabalho possui o foco em coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões como sistemas térmicos que absorvem a radiação solar e a transformam em calor, que é transferido para o fluido. De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética de 2011 – PNEf 2011 publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2011), a adoção dos sistemas de aquecimento solar de água pode levar a uma economia de até 2,2 TWh/ano em 2030.

JUSTIFICATIVA

Os termosifões são dispositivos passivos que operam em ciclos bifásicos e têm vantagens em relação a outros sistemas térmicos. Huang *et al.* (2017) demonstraram que o uso de termosifões em coletores solares de um sistema de aquecimento solar resultou em um aumento de cerca de 30% na eficiência térmica, tornando a energia solar mais eficiente e economicamente viável. A pesquisa nessa área é crucial para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis, contribuindo para a transição energética para fontes limpas e renováveis.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma investigação experimental do desempenho térmico de um sistema contendo três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, contribuindo para o desenvolvimento de soluções tecnológicas mais eficientes e sustentáveis para a geração de energia solar térmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

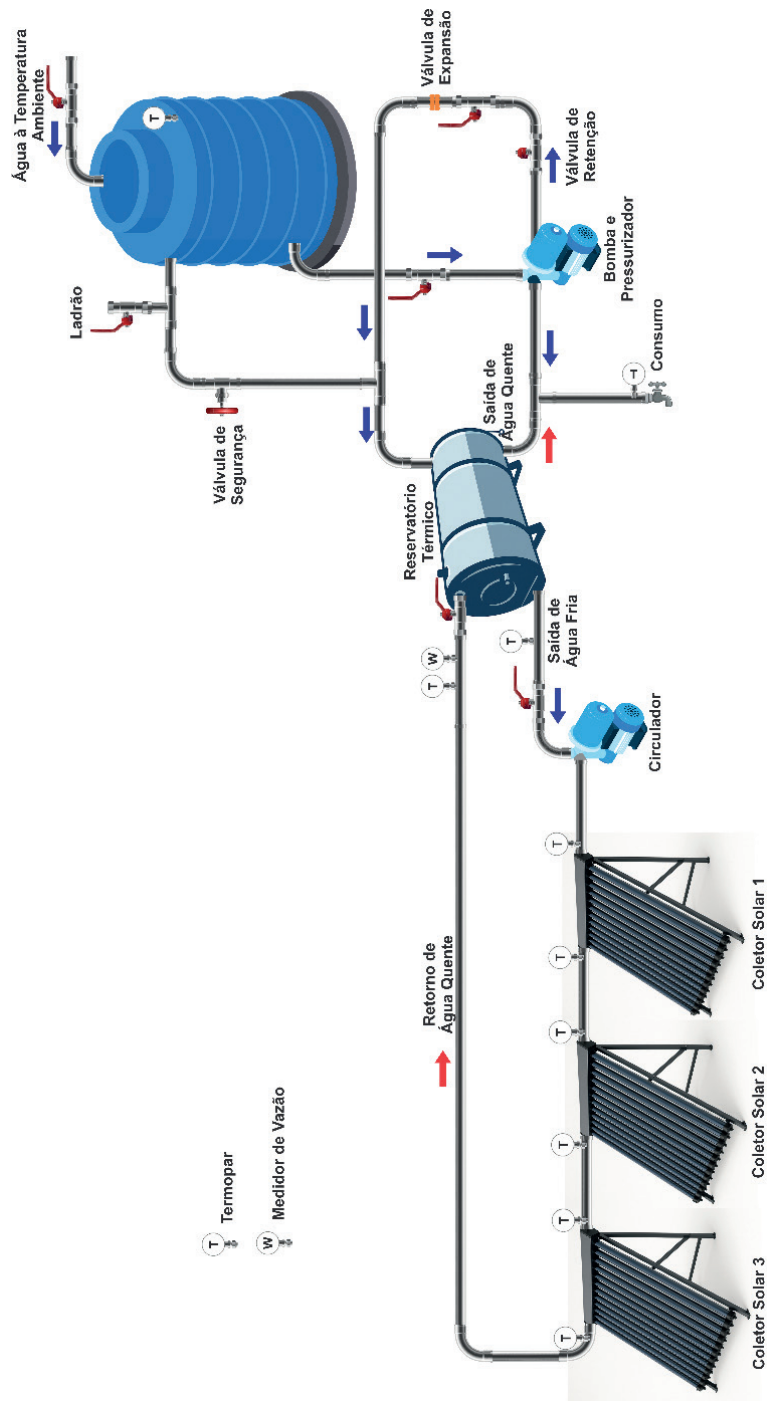
Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) vinculado ao Programa de Pós-Graduação *Multicampi* (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Aparato experimental

O aparato experimental utilizado é mostrado no diagrama esquemático da Figura 1. Ele é composto por um sistema fechado de circulação de água em alta pressão e por um sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por dez termossifões cada.

O sistema fechado de circulação de água em alta pressão, ilustrado na Figura 2, consiste em diversos componentes: uma caixa d'água *Fortlev*TM de 310L, um reservatório térmico *Riberso*TM de 100L, um conjunto bomba *Hioda*TM HP500AH de 1/2HP e pressostato *Laspa*TM LS-8, um vaso de expansão *Hioda*TM de 24L, uma válvula de segurança com manômetro, tubos, conexões, acessórios, um painel de comando elétrico com controlador *Tholz*TM TLZ, uma válvula de retenção, um medidor de vazão eletromagnético *IFM*TM SM7120 e um circulador de água *Hioda*TM HBS/100. Esse sistema está instalado no mezanino interno localizado no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR),

FIGURA 1. Diagrama esquemático do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 2. Sistema de circulação de água em alta pressão.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a aquisição dos dados experimentais, um sistema composto pelo medidor de vazão eletromagnético *IFM™* SM7120, por um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais *Agilent™* 34901A e por um computador *Dell™* foram utilizados. Esses equipamentos possibilitaram a coleta de dados de vazão volumétrica, temperatura e pressão na entrada e saída da água nos *manifolds* dos coletores solares de tubos evacuados assistido por termossifões, assim como as temperaturas na entrada e saída do reservatório térmico (*boiler*). Termopares do tipo K *Omega Engineering™* e transdutores de pressão *Salcas™* SA-1000H foram utilizados nessas medições.

As tubulações que conduzem a água de saída e retorno são direcionadas para um pátio localizado fora do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR), na área externa do Bloco J1 da UTFPR/ Ponta Grossa – Figura 3. Essas tubulações foram conectadas a mangueiras e, por sua vez, essas mangueiras foram conectadas aos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões. Essa configuração permite que a água flua do reservatório térmico para os coletores solares e retorne ao reservatório térmico. Três coletores solares *SolarVAC™* de tubos evacuados assistidos por termossifões estão instalados no piso do pátio externo do LabSOLAR. Todas as tubulações possuem isolamento térmico de polietileno expandido, e as tubulações localizadas na área externa do bloco possuem uma camada adicional de isolamento refletivo. Essas medidas visam reduzir as perdas de calor durante o percurso percorrido pela água e minimizar os efeitos externos.

FIGURA 3. Pátio externo do Laboratório de Energia Solar da UTFPR/Ponta Grossa.



Fonte: Autoria própria (2025)

Procedimento experimental

Para a execução dos testes experimentais, o procedimento consistiu em seguir algumas etapas. Primeiramente, foi necessário ligar o sistema de aquisição de dados mostrado na Figura 2. Na sequência, foram fixadas as mangueiras que conectam os coletores solares ao circuito fechado de circulação forçada de água em alta pressão. Feito isso, uma vazão volumétrica de aproximadamente 7,0L/min foi ajustada na tubulação do sistema. Foram utilizadas mangueiras hidráulicas de 20bar (300psi) com um diâmetro de 22mm (7/8") e foram adaptados termopares do tipo K da *Omega Engineering*TM para medir as temperaturas de entrada e saída da água nos coletores solares.

Os testes experimentais com o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões foram executados para avaliar o desempenho térmico do sistema sob condições reais de operação nas condições meteorológicas da primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, na Região Sul do Brasil. Esses coletores solares SolarVAC®, Figura 4, são assistidos cada um por dez termossifões de cobre contendo água como fluido de trabalho, possuem também, *manifold* em cobre para a passagem de água nos condensadores dos termossifões e estrutura leve de perfil de alumínio de 40mm por 40mm. Eles estão inclinados a 25°, que corresponde à latitude da cidade de Ponta Grossa: 25°05'42" Sul, conforme modelo proposto por Bezerra (1990).

FIGURA 4. Sistemas de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para o armazenamento dos dados experimentais foi utilizado o *software Agilent™ Benchlink Data Logger v3*. Esses dados foram coletados e registrados a cada 30s e, posteriormente, tratados no *software Microsoft™ Excel*, visando a avaliação do desempenho térmico do sistema de coletores solares. Ressalta-se ainda que, visando suavizar as variações abruptas na coleta de dados, que podem ser provenientes de nuvens que cobriram a cúpula do piranômetro durante os testes experimentais, foram utilizadas médias móveis em conjuntos de 60 leituras, ou seja, valores médios referentes ao um intervalo de 30min. Dessa forma, os dados foram registrados em intervalos de 30s e exibidos em gráficos por meio de média móvel de 30min, mostrando a tendência a cada meia hora.

Parâmetros de interesse

Os valores de radiação solar incidente, irradiação solar ou irradiância solar, foram obtidos utilizando um piranômetro *Kipp & Zonen™ CMP3* que está acompanhando a inclinação de 25° do suporte dos coletores solares. A irradiância solar obtida através das medidas da voltagem de saída do piranômetro foi calculada através da Equação (1), conforme descrito no guia de instruções do fabricante (Kipp & Zonen, 2018):

$$G_{solar} = \frac{U_{emf}}{S}, \quad (1)$$

sendo que, G_{solar} representa a irradiância solar em $[W/m^2]$, U_{emf} é a voltagem de saída em $[\mu V]$ e S é a sensibilidade do equipamento utilizado, cujo valor é de $23,72 \mu V/W/m^2$.

Conforme descrito por Azad (2008), a eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica, de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões, $\eta_{l,coletor solar}$ pode ser determinada como:

$$\eta_{l,coletor solar} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (T_{\text{sai,água}} - T_{\text{ent,água}})}{G_{solar} A_{coletor solar}}, \quad (2)$$

sendo que, $\dot{m}_{\text{água}}$ é a vazão mássica de água dentro do *manifold* do coletor solar $[kg/s]$, $c_{p,\text{água}}$ é o calor específico a pressão constante da água $[J/kgK]$ e $T_{\text{sai,água}}$ e $T_{\text{ent,água}}$ são as temperaturas médias de saída e de entrada da água no *manifold* do coletor solar $[K]$, respectivamente, $A_{coletor solar}$ é a área do coletor solar $[m^2]$ e G_{solar} é a irradiância solar $[W/m^2]$.

A eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema contendo mais de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões, $\eta_{l,sistema'}$ pode ser determinar como:

$$\eta_{l,sistema} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (T_{\text{sai sistema,água}} - T_{\text{entra sistema,água}})}{N_{coletor solar} G_{solar} A_{coletor solar}}, \quad (3)$$

sendo que, $\dot{m}_{\text{água}}$ é a vazão mássica de água dentro do sistema de coletores solares $[kg/s]$, $c_{p,\text{água}}$ é o calor específico a pressão constante da água $[J/kgK]$ e $T_{\text{sai sistema,água}}$ e $T_{\text{entra sistema,água}}$ são as temperaturas médias de saída e de entrada da água no sistema de coletores solares $[K]$, respectivamente, $N_{coletor solar}$ é a quantidade de coletores solares existentes no sistema, $A_{coletor solar}$ é a área de um único coletor solar $[m^2]$ e G_{solar} é a irradiância solar $[W/m^2]$.

Incertezas Experimentais

A incerteza padrão combinada é usada para determinar a incerteza total de uma grandeza que é função de várias outras grandezas medidas, cada uma com sua própria incerteza e pode ser descrita, de acordo com Holman (2011), como:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2}, \quad (4)$$

sendo que, R é a grandeza derivada, x_1, x_2, \dots, x_n são as grandezas medidas, $\partial x_1, \partial x_2, \dots, \partial x_n$ são as incertezas padrão associadas às grandezas medidas e $\partial R / \partial x_i$ são as derivadas parciais de R em relação a cada x_i .

RESULTADOS

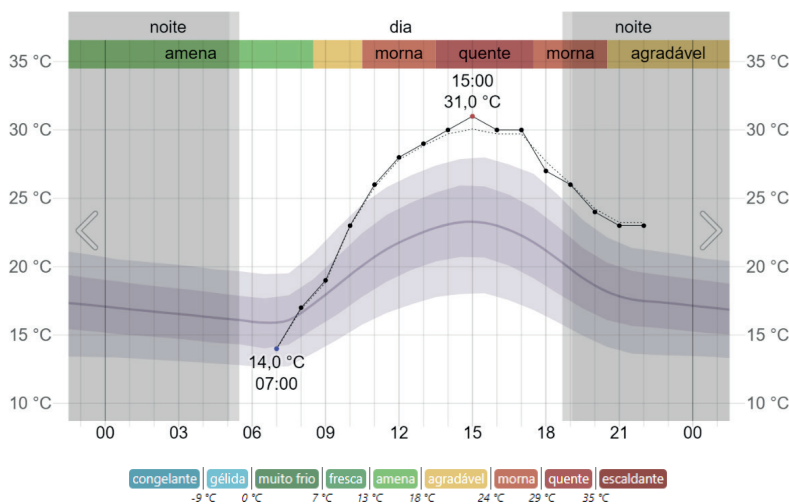
Nesta seção são apresentados os resultados da análise experimental do desempenho térmico do sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões sob condições meteorológicas reais de um dia de primavera na cidade de Ponta Grossa/PR. Esses resultados experimentais foram coletados no dia 08 de novembro de 2023, em um período de 6 horas, correspondendo ao horário das 10h até 16h, nas dependências do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) da UTFPR/Ponta Grossa. Para a execução dos testes experimentais foi considerada uma vazão volumétrica de água de aproximadamente 7,0L/min, uma inclinação de 25° nos coletores solares, de acordo com a latitude de Ponta Grossa/PR/Brasil. Para a área de cada coletor solar, o valor foi de 1,572m² (Shafieian *et al.*, 2019).

Condições meteorológicas

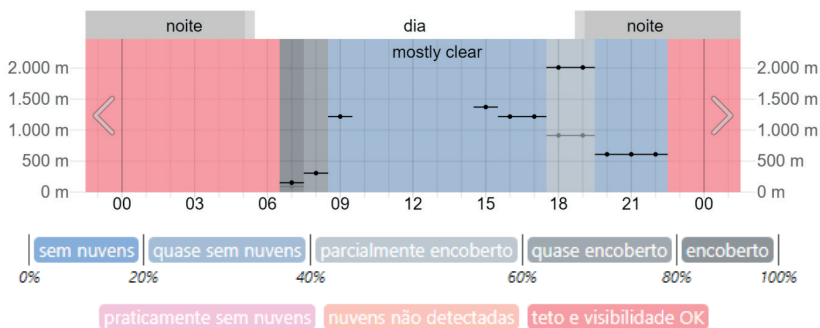
Os dados meteorológicos para a cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, Região Sul do Brasil, durante a execução dos testes experimentais em condições reais de operação de um sistema de coletores solares foram obtidos através do *site* ©WeatherSpark¹ após a seleção desse município brasileiro e do dia 08 de novembro de 2023. Destaca-se que não ocorreu precipitação de chuva nesse dia de primavera.

Na Figura 5 é apresentada a distribuição de temperaturas ambientes durante os testes experimentais, essa temperatura foi medida a 2m acima da superfície em um campo aberto. Na Figura 6 é apresentada a condição de cobertura de nuvens no céu durante o dia, onde a nebulosidade é indicada com cores codificadas de acordo com a porcentagem de céu encoberto. Na Figura 7 é ilustrada a elevação solar no dia da execução dos testes experimentais, sendo que as áreas em amarelo e cinza indicam dia e noite, respectivamente. Na Figura 8 é apresentada a direção dos ventos enquanto que na Figura 9 é mostrada a velocidade do vento durante a investigação experimental.

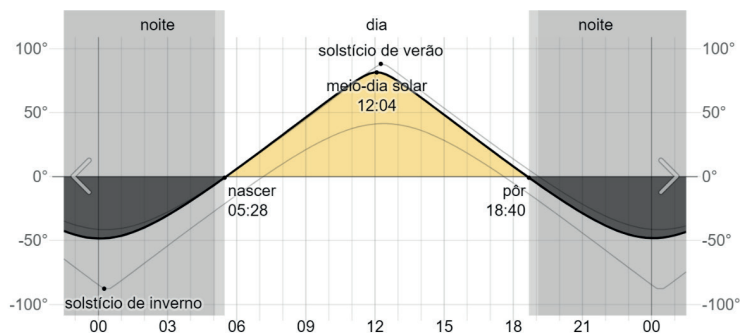
¹ <https://pt.weatherspark.com/h/d/29814/2023/11/8/Condições-meteorológicas-históricas-em-quarta-feira-8-de-novembro-de-2023-em-Ponta-Grossa-Paraná-Brasil>

FIGURA 5. Temperatura ambiente em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

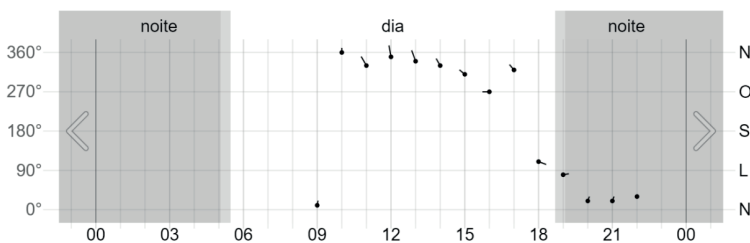
Fonte: ©WeatherSpark (2025).

FIGURA 6. Condição de cobertura de nuvens em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

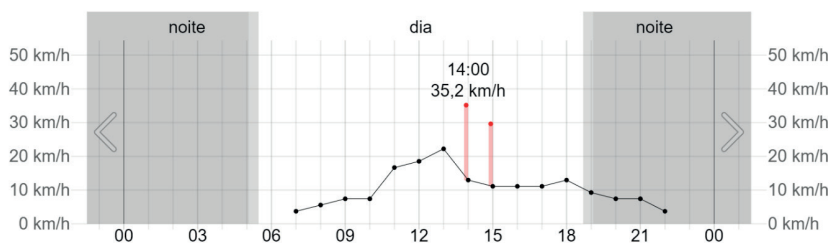
Fonte: ©WeatherSpark (2025).

FIGURA 7. Elevação solar em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

FIGURA 8. Direção dos ventos em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

FIGURA 9. Velocidade do vento em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

A Tabela 1 apresenta os resultados médios horários da temperatura ambiente, da velocidade e direção dos ventos e as condições de nebulosidade durante a execução dos testes experimentais em Ponta Grossa/PR no dia 08 de novembro de 2023.

TABELA 1. Condições meteorológicas em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

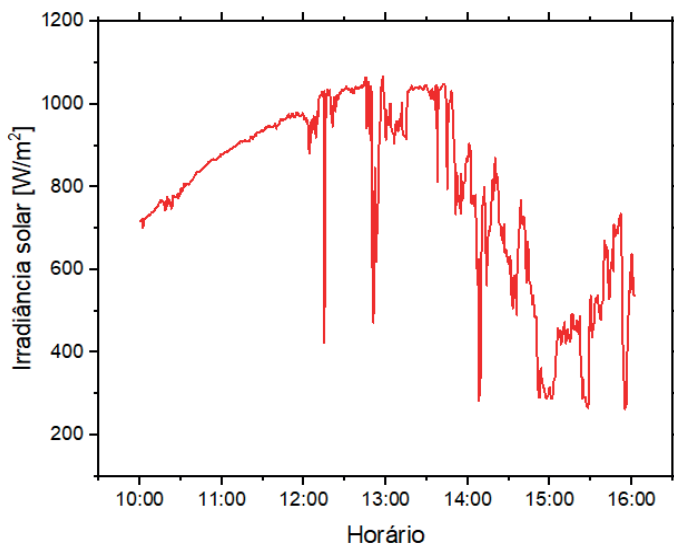
Horário	T_{amb} [°C]	V_{vento} [km/h]	Direção do Vento	Visibilidade
10:00	23	7,4	N	Teto e visibilidade OK
11:00	26	16,7	NO	Teto e visibilidade OK
12:00	28	18,5	N	Teto e visibilidade OK
13:00	29	22,2	N	Teto e visibilidade OK
14:00	30	13,0	NO	Teto e visibilidade OK
15:00	31	11,1	NO	Quase sem nuvens (1.372m)
16:00	30	11,1	O	Quase sem nuvens (1.219m)

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

Durante os testes experimentais, das 10h às 16h, no dia 08 de novembro de 2023, na primavera, a temperatura ambiente variou entre 23°C e 31°C enquanto a velocidade do vento ficou entre 7,4km/h e 22,2km/h. A direção predominante do vento foi o Norte (N) e Nordeste (NO). O céu permaneceu ensolarado com ótima visibilidade até às 14h e, então, ele apresentou uma condição de quase sem nuvens até o final da execução dos testes experimentais.

Na Figura 10 é apresentado o comportamento da irradiância solar instantânea em função do tempo para o horário compreendido entre 10h e 16h durante a execução dos testes experimentais. Pode ser observado a influência da condição de cobertura de nuvens na radiação solar incidente no aparato experimental.

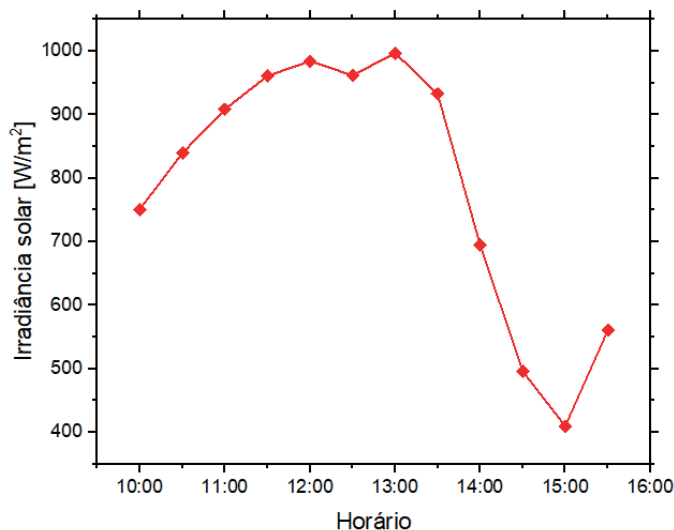
FIGURA 10. Irradiância solar instantânea em função do horário em Ponta Grossa no dia 08/11/2023.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 11 são apresentados os valores da irradiância solar média (G_{solar}) para cada período de 30min durante a investigação experimental. A irradiação solar média durante os testes experimentais foi de 791W/m², com picos em torno de 1.000W/m² entre às 12:30 e 13:30. No final dos testes experimentais, a partir das 14:30, a irradiância solar média foi inferior a 600W/m².

FIGURA 11. Irradiância solar média em função do horário em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.



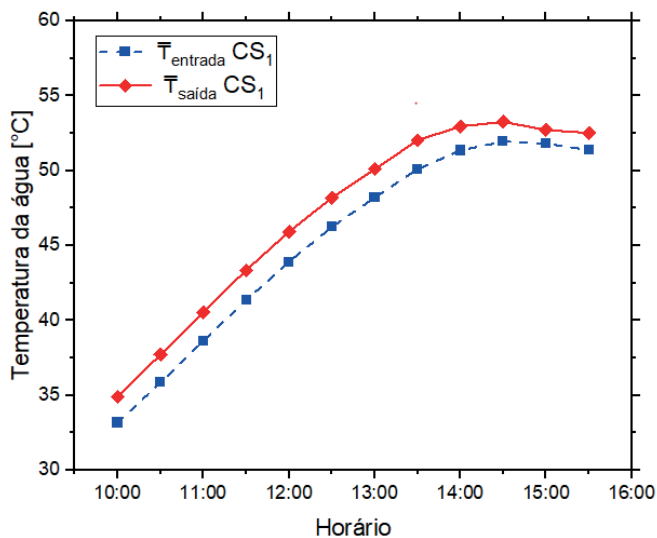
Fonte: Autoria própria (2025).

As condições meteorológicas estáveis e quase sem nuvens proporcionaram um cenário favorável para avaliar o desempenho térmico do sistema dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões durante a primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa/PR, Região Sul do Brasil. Ressalta-se que ao realizar a investigação experimental em um dia predominantemente ensolarado com quase sem nuvens, pode ser garantida uma melhor exposição à radiação solar, o que é importante para a análise do desempenho térmico do sistema de aquecimento térmico de água. Essa escolha permite obter resultados mais consistentes e confiáveis sobre a eficiência térmica do sistema em condições reais de operação e irradiância solar para a estação do ano estudada.

Aquecimento da água

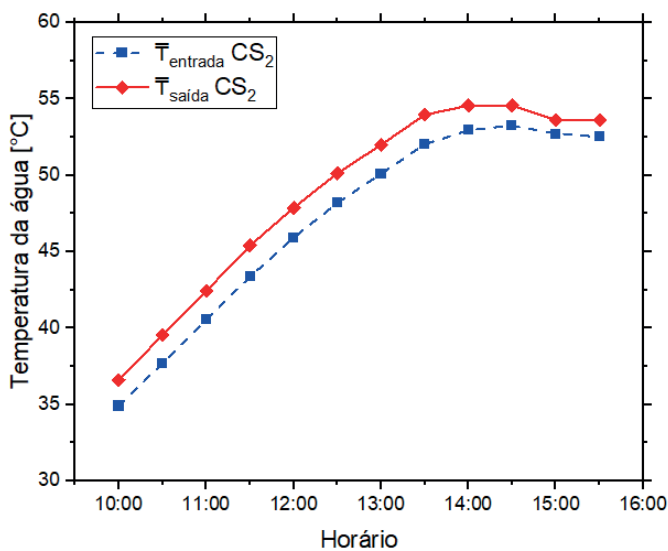
Nas Figuras 12, 13 e 14 são apresentados, em função do horário, os resultados experimentais encontrados para as temperaturas médias de entrada e de saída da água no Coletor Solar 1 (CS_1), no Coletor Solar 2 (CS_2) e no Coletor Solar 3 (CS_3), respectivamente, considerando intervalos de 30 minutos.

FIGURA 12. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 1 em função do horário.



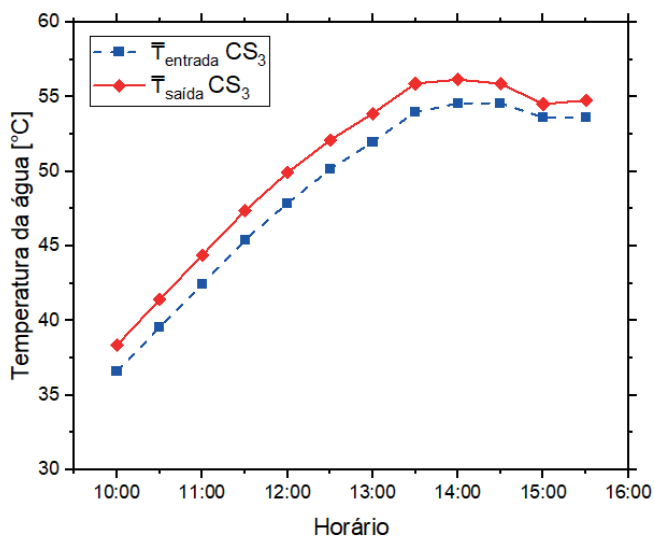
Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 13. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 2 em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

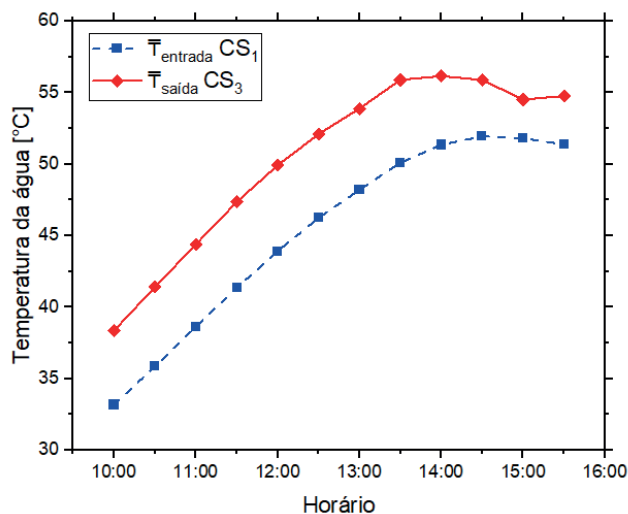
FIGURA 14. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 3 em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 15 são apresentados, em função do horário, os resultados experimentais encontrados para as temperaturas médias de entrada e de saída da água no sistema em série de três coletores solares considerando intervalos de 30 minutos.

FIGURA 15. Temperaturas médias de entrada e de saída no sistema em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao analisar o comportamento das temperaturas médias de entrada e de saída da água nos coletores solares, de um modo geral para todos os casos estudados, à medida que a água passa pelos condensadores dos termosifões no *manifold* dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, sua temperatura aumenta. Pode ser observado ainda que as temperaturas aumentam gradualmente durante a execução dos testes experimentais, atingindo um pico por volta das 14h, com a temperatura de saída sempre superior à temperatura de entrada. Durante esse período inicial, também podem ser encontradas as maiores diferenças entre as temperaturas de saída e de entrada nos coletores solares. Após o pico, há uma pequena diminuição nas temperaturas médias de entrada e de saída e em seus gradientes. Esse comportamento indica que o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões está efetivamente aquecendo a água, com um desempenho térmico melhor durante as horas de maior irradiância solar.

Eficiência térmica

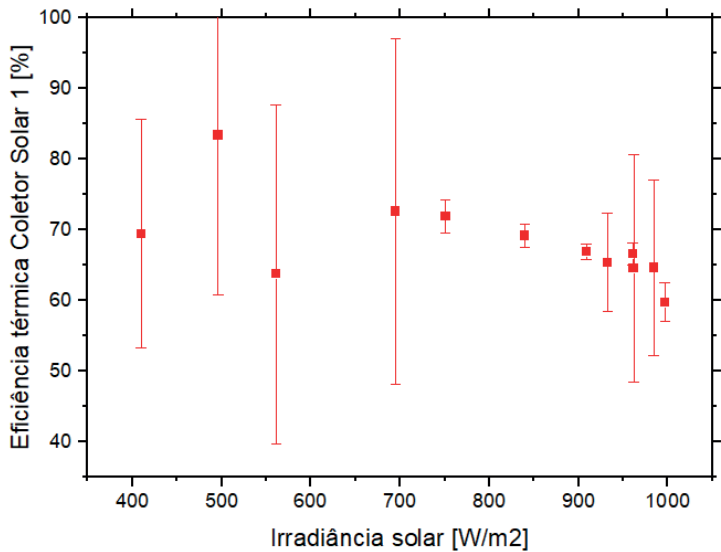
Na Tabela 2 e na Figura 16 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 1 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Eficiência térmica no Coletor Solar 1 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m ²]	ΔT_{CS1} [°C]	Eficiência Térmica $\eta_{I,CS1}$ [%]	Incerteza Experimental [%]
10:00 – 10:30	751	1,7	72,0	± 2,3
10:30 – 11:00	840	1,8	69,2	± 1,7
11:00 – 11:30	908	1,9	66,9	± 1,1
11:30 – 12:00	961	2,0	66,6	± 1,5
12:00 – 12:30	984	2,0	64,7	± 12,4
12:30 – 13:00	962	2,0	64,6	± 16,2
13:00 – 13:30	997	1,9	59,7	± 2,8
13:30 – 14:00	932	1,9	65,4	± 7,0
14:00 – 14:30	695	1,6	72,6	± 24,4
14:30 – 15:00	496	1,3	83,4	– 22,5
15:00 – 15:30	410	0,9	69,5	± 16,2
15:30 – 16:00	561	1,1	63,7	± 24,0

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 16. Eficiência térmica do Coletor Solar 1 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 3 e na Figura 17 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 2 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 3.

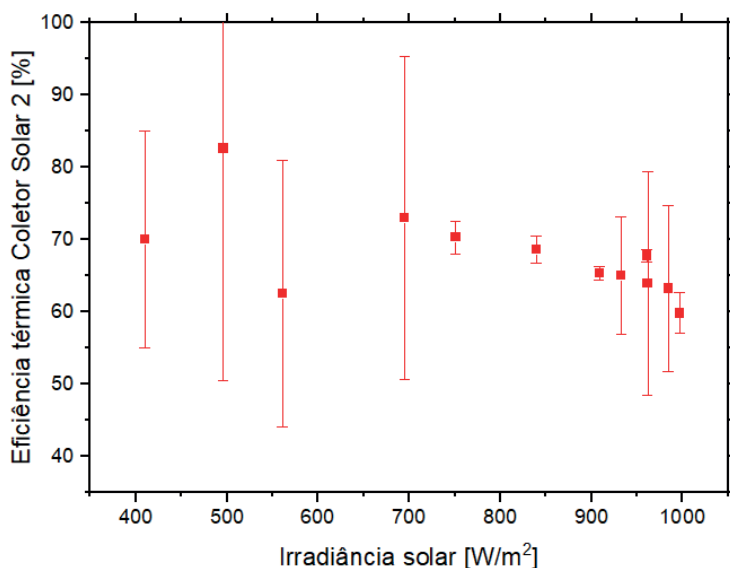
TABELA 3. Eficiência térmica no Coletor Solar 2 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m²]	ΔT_{CS2} [°C]	Eficiência Térmica	Incerteza Experimental [%]
			$\eta_{I,CS2}$ [%]	
10:00 – 10:30	751	1,7	70,3	± 2,3
10:30 – 11:00	840	1,8	68,6	± 1,9
11:00 – 11:30	908	1,9	65,4	± 1,0
11:30 – 12:00	961	2,0	67,8	± 0,9
12:00 – 12:30	984	2,0	63,2	± 11,5
12:30 – 13:00	962	1,9	64,0	± 15,5
13:00 – 13:30	997	1,9	59,8	± 2,9
13:30 – 14:00	932	2,0	65,1	± 8,1
14:00 – 14:30	695	1,6	73,0	± 22,3

14:30 – 15:00	496	1,3	82,6	- 32,1
15:00 – 15:30	410	0,9	70,1	± 15,0
15:30 – 16:00	561	1,1	62,5	± 18,5

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 17. Eficiência térmica do Coletor Solar 2 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 4 e na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 3 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 4.

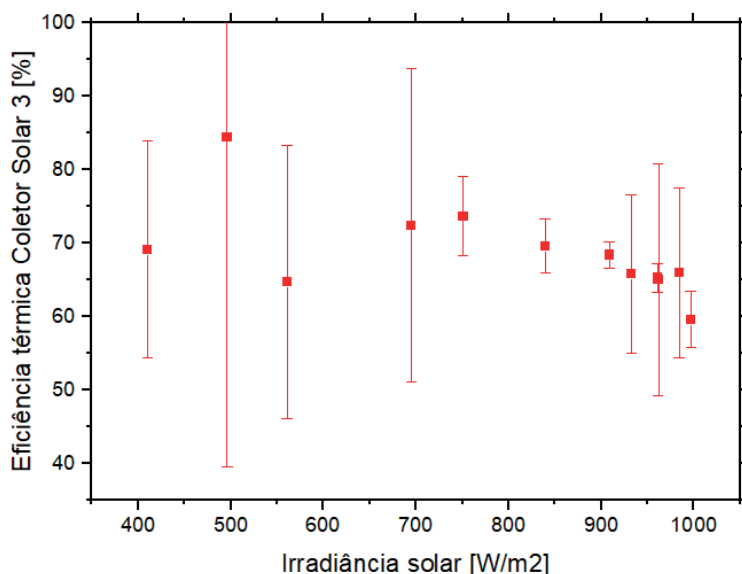
TABELA 4. Eficiência térmica no Coletor Solar 3 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m ²]	ΔT_{CS3} [°C]	Eficiência Térmica	Incerteza Experimental [%]
			$\eta_{I,CS3}$ [%]	
10:00 – 10:30	751	1,8	73,7	± 5,4
10:30 – 11:00	840	1,9	69,6	± 3,7
11:00 – 11:30	908	2,0	68,4	± 1,7

11:30 – 12:00	961	2,0	65,3	$\pm 1,9$
12:00 – 12:30	984	2,0	66,0	$\pm 11,6$
12:30 – 13:00	962	2,0	65,1	$\pm 15,8$
13:00 – 13:30	997	1,9	59,6	$\pm 3,9$
13:30 – 14:00	932	1,9	65,8	$\pm 10,8$
14:00 – 14:30	695	1,6	72,4	$\pm 21,3$
14:30 – 15:00	496	1,3	84,4	$- 44,9$
15:00 – 15:30	410	0,9	69,1	$\pm 14,8$
15:30 – 16:00	561	1,2	64,7	$\pm 18,6$

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 18. Eficiência térmica do Coletor Solar 3 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

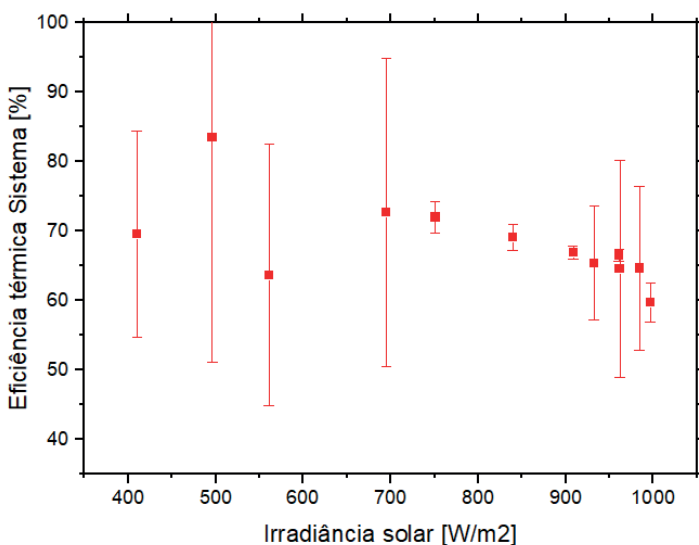
E, finalmente, na Tabela 5 e na Figura 19 são apresentados os resultados encontrados para a eficiência térmica para o sistema de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Eficiência térmica do sistema de três coletores solares para cada 30min de testes.

Horário	G_{solar} [W/m ²]	$\Delta T_{sistema}$ [°C]	Eficiência Térmica $\eta_{sistema}$ [%]	Incerteza Experimental [%]
10:00 – 10:30	751	5,2	72,0	± 2,3
10:30 – 11:00	840	5,5	69,1	± 1,9
11:00 – 11:30	908	5,8	66,9	± 1,0
11:30 – 12:00	961	6,0	66,6	± 0,9
12:00 – 12:30	984	6,0	64,6	± 11,8
12:30 – 13:00	962	5,9	64,5	± 15,6
13:00 – 13:30	997	5,7	59,7	± 2,9
13:30 – 14:00	932	5,8	65,4	± 8,1
14:00 – 14:30	695	4,8	72,7	± 22,2
14:30 – 15:00	496	3,9	83,5	- 32,4
15:00 – 15:30	410	2,7	69,5	± 14,9
15:30 – 16:00	561	3,4	63,7	± 18,8

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 18. Eficiência térmica do sistema de coletores solares em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao analisar a eficiência térmica individual de cada um dos coletores solares que compõe o sistema, foi possível verificar que a eficiência térmica, baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, está variando entre 59,7% e 83,4% para o Coletor Solar 1, entre 59,8% e 82,6% para o Coletor Solar 2 e entre 59,6% e 84,4% para

Coletor Solar 3. Esses valores estão de acordo com os relatados na literatura por Shafieian *et al.* (2019) em torno de 85% em condições operacionais favoráveis. Finalmente, considerando o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, pode ser notado que a eficiência térmica global do sistema variou entre 59,7% e 83,5%.

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada uma investigação experimental do desempenho térmico de um sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões. O estudo incluiu a montagem do aparato experimental e a execução de testes experimentais sob condições reais de operação e meteorológicas, na cidade de Ponta Grossa, estado no Paraná, Região Sul do Brasil, durante a primavera, no dia 08 de novembro de 2023. Os dados coletados permitiram o cálculo da eficiência térmica dos coletores solares utilizando a Primeira Lei da Termodinâmica. A análise dos resultados mostrou que, os coletores solares apresentaram uma eficiência térmica máxima em torno de 85%. A eficiência térmica global do sistema dos três coletores solares também ficou próxima a esse valor. Esses resultados indicam uma consistência entre os coletores solares quando operam em um sistema combinado, aproveitando de maneira mais eficiente a energia solar disponível e potencializando o aquecimento da água. Comparando os resultados experimentais encontrados para as eficiências térmicas individuais e global do sistema dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, em até 85% (Shafieian *et al.*, 2019), com os valores típicos de eficiência térmica de coletores solares convencionais de placa plana (em torno de 30%), pode ser concluído que esses resultados encontrados são satisfatórios e consistentes com a literatura existente.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AZAD, E. Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 32, n. 8, p. 1666-1672, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA): Matriz Energética e Elétrica, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em :15 maio 2024.

HUANG, B.; ZHANG, X.; WANG, S.; CAI, W.; XIONG, R. Experimental study on a thermosyphon solar water heater with a heat pipe inserted into the condenser. *Energy Conversion and Management*, v. 135, p. 277-284, 2017.

KIPP & ZONEN: Instruction Sheet – Pyranometers – CMP3, 2018. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Download/81/Instruction-Sheet-Pyranometers-CMP3>>. Acesso em: 16 julho 2024.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA): Plano Nacional de Eficiência Energética. 2011. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/publicacoes-e-estudos/PlanoNacionalEficinciaEnergeticaPDF.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2024.

SHAFIEIAN, A.; KHIADANI, M.; NOSRATI, A. Theoretical modelling approaches of heat pipe solar collectors in solar systems: A comprehensive review. *Solar Energy*, v. 193, p. 227-243, 2019.

TESSARO, A. R.; SOUZA, S. N. M.; RICIERI, R. P.; FERRUZI, Y. Desempenho de um Painel Fotovoltaico Acoplado a um Rastreador Solar. Anais do Encontro de Energia no Meio Rural, Vol. 6, Campinas, Brasil, 2006.



C A P Í T U L O 4

PROTOTYPING IN ENGINEERING EDUCATION: DEVELOPMENT OF AN OPERATION MANUAL FOR 3D PRINTING

Daniela Feres de Marchi

Mechanical Engineering Student – UTFPR – Ponta Grossa, PR.

Felipe Barreto Campelo Cruz

Professor of Mechanical Engineering Course – UTFPR – Ponta Grossa, PR.

ABSTRACT: Additive manufacturing, through Fused Deposition Modeling (FDM) technology, has stood out as both a pedagogical and technical tool in engineering education. This chapter presents the development and application of an operation manual for the Creality Ender 3 V2 3D printer, with a focus on the practical training of students and professionals. The adopted methodology involved 3D modeling in SolidWorks, slicing in Ultimaker Cura, and printing using PLA filament. Three replicas of a test part were produced, designed with multiple and complex geometries to assess dimensional accuracy and process repeatability. The comparative analysis between the CAD model and the printed parts demonstrated solid technical performance, confirming the applicability of the methodology in the academic context. The results highlight the potential of 3D printing as a supporting tool for developing technical skills in multidisciplinary learning environments.

KEYWORDS: 3D PRINTING; PROTOTYPING; ENGINEERING EDUCATION; INTERDISCIPLINARITY.

INTRODUCTION

Additive manufacturing, especially through Fused Deposition Modeling (FDM) technology, has become an essential tool in the prototyping stage of product development processes. Its ability to rapidly materialize virtual models into physical objects positively impacts the time, cost, and quality of projects across various fields of engineering (JENSEN, ÖZKIL, MORTENSEN, 2016).

The advancement of low-cost 3D printers, such as Creality Ender 3 V2, has enabled the democratization of rapid prototyping. These machines allow for direct experimentation by students, researchers, and professionals, enhancing autonomy in creative and iterative processes within academic and technical contexts (WANG, RANSCOMBE, EISENBART, 2024).

The versatility of 3D printing has expanded its use beyond mechanical engineering, reaching fields such as electrical, production, biomedical, and civil engineering. In these fields, the technology is employed in the creation of anatomical models, electronic devices, prototype structures, and replacement parts, among others. This broad applicability demonstrates the potential of additive manufacturing as a support tool for innovation and interdisciplinary development, fostering greater integration between theory and practice in academic and professional environments (EL KHATIB *et al.*, 2019; GHAFAR *et al.*, 2024; TÖRÖK, DUPLÁKOVÁ, 2025).

In addition to knowledge of virtual modeling and model slicing, operating a 3D printer requires technical mastery of its components, settings, and materials. Proper user training regarding equipment usage is essential to ensure the quality, safety, and efficiency of the outcomes (BASTAWROUS *et al.*, 2021).

Therefore, this chapter aims to present, based on a developed operation manual for the Creality Ender 3 V2 3D printer, practical and operational guidelines applicable to the broader context of engineering. The proposal is to establish connections between the use of the printer and the real demands of prototyping, contributing to the training of professionals better prepared to operate in environments of innovation and technological development.

METHODOLOGY

To obtain the aforementioned manual, software tools widely adopted in the context of prototyping were used, such as SolidWorks for three-dimensional modeling and Ultimaker Cura for slicing the models. The activities were carried out in a controlled environment, following best practices for preparation, calibration, and safe operation of the equipment.

The material selected for printing was polylactic acid (PLA), a thermoplastic widely used in educational and research settings due to its good machinability, ease of extrusion, dimensional stability, and sustainable properties such as biodegradability and environmental compatibility. These characteristics make PLA ideal for didactic applications and design validation tests (EL KHATIB *et al.*, 2019; TÜMER, ERBİL, 2021; MASZYBROCKA *et al.*, 2022).

The methodology was structured into three main stages: equipment preparation, digital configuration of the model, and execution of the print followed by technical inspection of the obtained parts. All stages were documented with the aim of

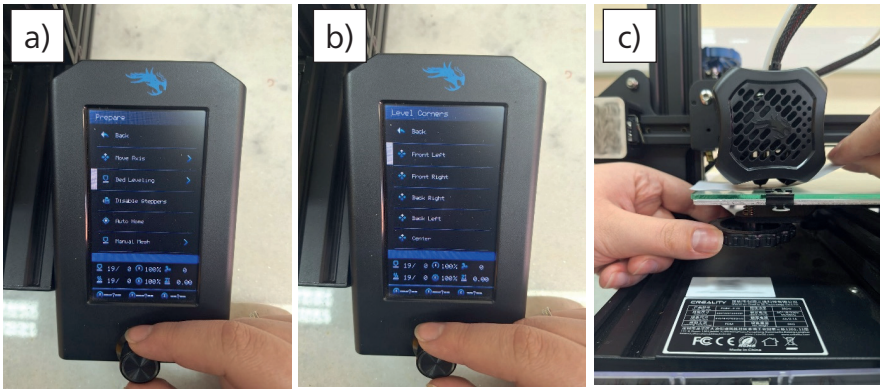
producing a replicable and multidisciplinary instructional material, in line with the practices of rapid prototyping in academic and professional contexts, as suggested in Bastawrous et al (2021).

Equipment Preparation

The printer was placed on a flat surface in an area protected from drafts and temperature fluctuations, minimizing warping during the printing process. Once these precautions were taken, the print bed was cleaned with a dry cloth to remove solid residues and improve the adhesion of the first layer to be printed.

Next, bed leveling was performed: a procedure considered critical to the success of the manufacturing process (JENSEN, ÖZKIL, MORTENSEN, 2016; RAJKUMAR, 2022). On the control panel, by turning the knob to select a function and clicking the button to confirm, the “Prepare” tab was accessed and the “Auto Home” function was used to align the axes and position the extruder nozzle at the origin point. Entering the “Bed Leveling” function and using a sheet of 75g/m² paper positioned between the nozzle and the bed, manual adjustments were made using the four leveling knobs in the four corners of the bed: “Front Left”, “Front Right”, “Back Left”, and “Back Right” (Figure 1). The sheet should slide with slight resistance, indicating the ideal distance between the nozzle and the printing surface.

Figure 1 – Manual bed leveling adjustment: (a) Entering the “Bed Leveling”; (b) Setting the four corners of the bed; (c) Bed leveling performed by the knobs using a sheet of 75g/m² paper.

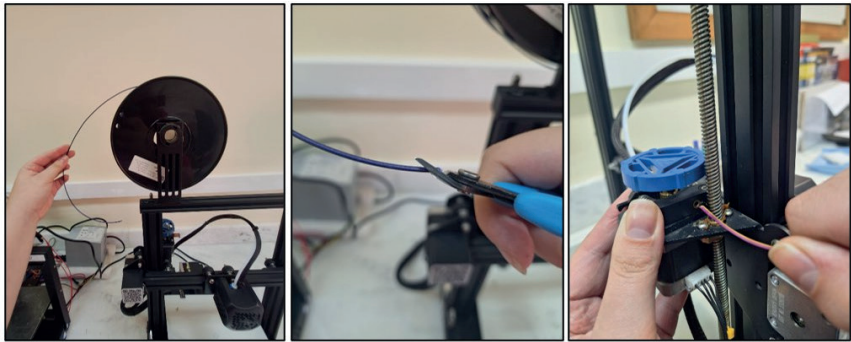


Source: Author's own work (2025).

Some other printer models have or allow the possibility of promoting leveling automatically.

After calibration, the PLA filament was installed. The spool was placed on the top holder with counterclockwise unwinding, and the tip of the filament was cut at a 45° angle and inserted into the extruder until it reached the “HotEnd” (Figure 2). This procedure ensured proper and continuous material feeding.

Figure 2 – Positioning and insertion of the PLA filament with the tip cut at a 45° angle.

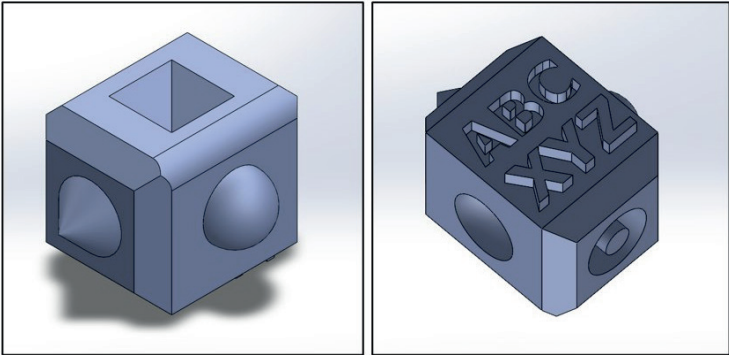


Source: Author’s own work (2025).

Modeling And Slicing Of The Part

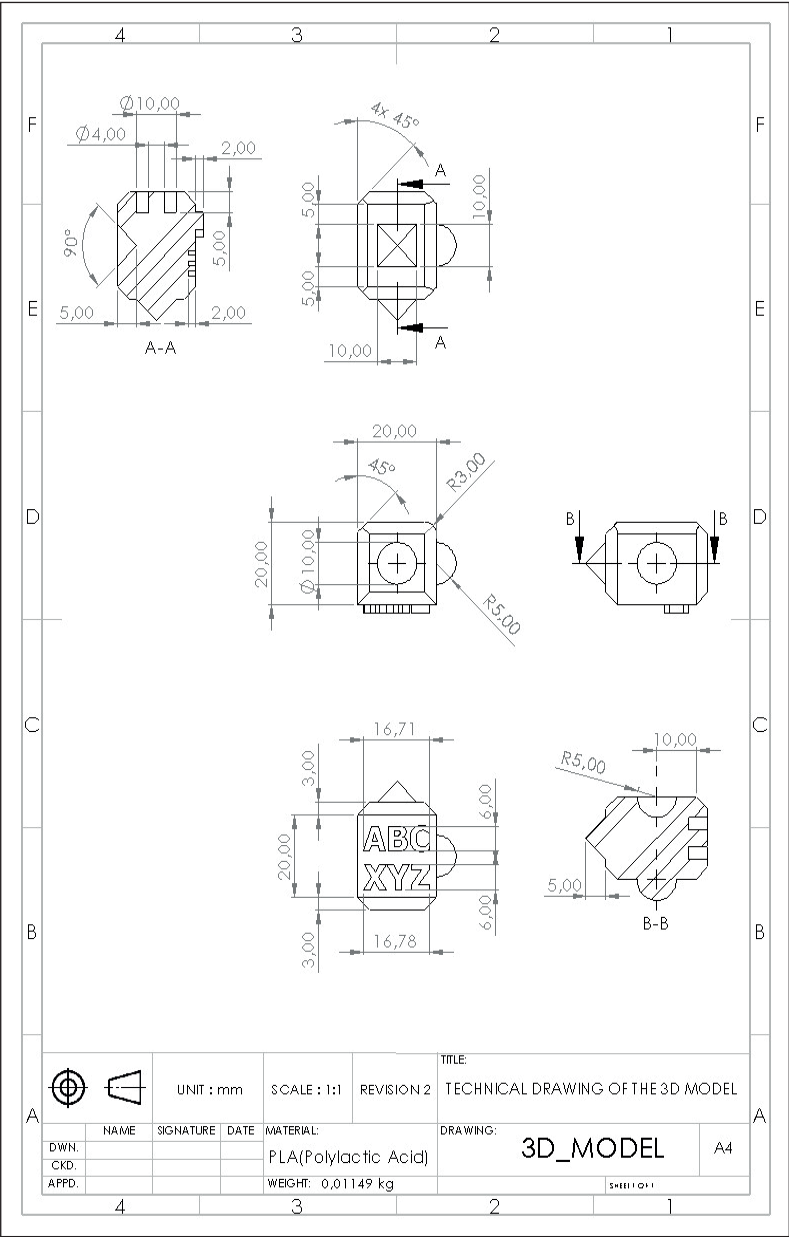
The three-dimensional modeling of the test part was carried out in SolidWorks, incorporating various intentional geometries such as 45° inclined angles, chamfers, fillets, spheres, protrusions, cavities, embossed and engraved texts, among others. The purpose of the part was to enable the analysis of the printer’s ability to accurately reproduce complex geometric details.

Figure 3 – 3D model developed in SolidWorks with multiple geometric features.



Source: Author’s own work (2025).

Figure 4 – Orthogonal views and technical dimensions of the test part.



Source: Author's own work (2025).

After completing the modeling, the file was exported in .STL format and imported into Ultimaker Cura. In the main interface of the software, at the “Prepare” tab, first select the printer model from the left panel of the top-center bar. Then define the filament type and nozzle diameter in the center panel. Finally insert the configuration parameters listed in Table 1 using the panel on the right. Support structures were enabled to ensure proper construction of overhanging regions, as identified by the slicing software.

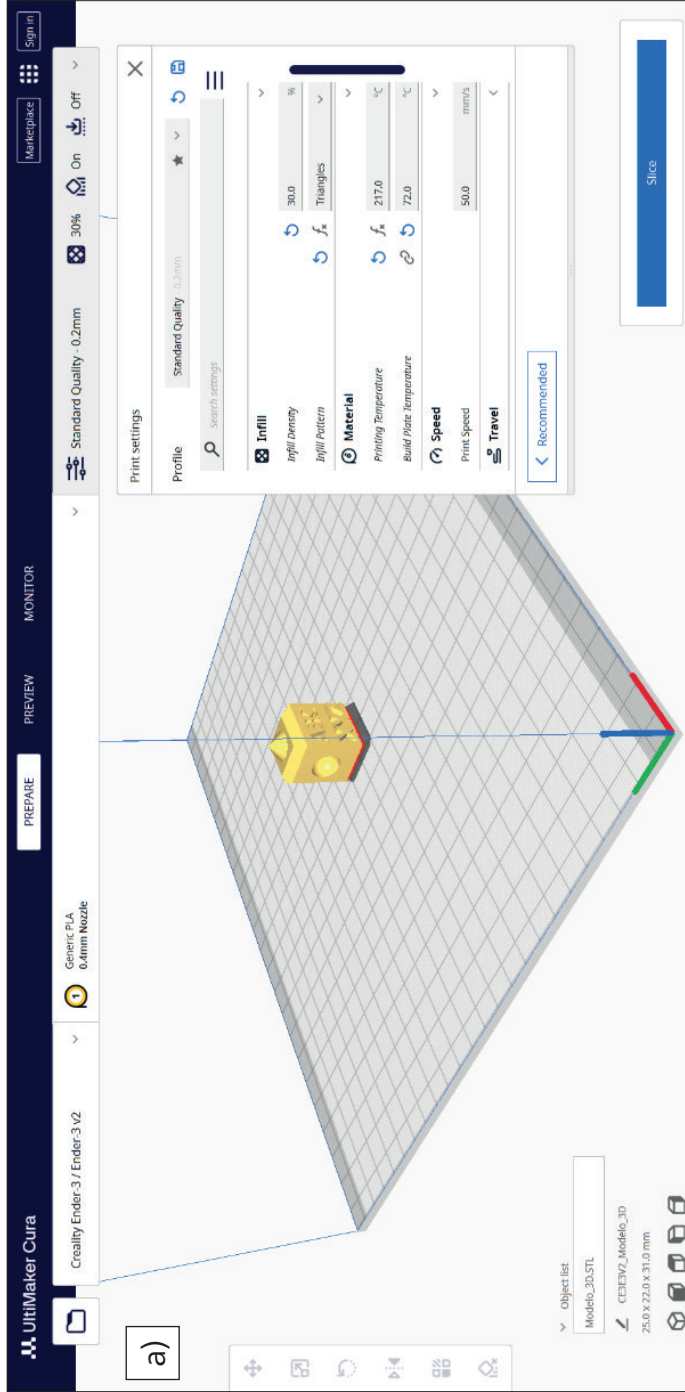
Table 1 – Configuration parameters.

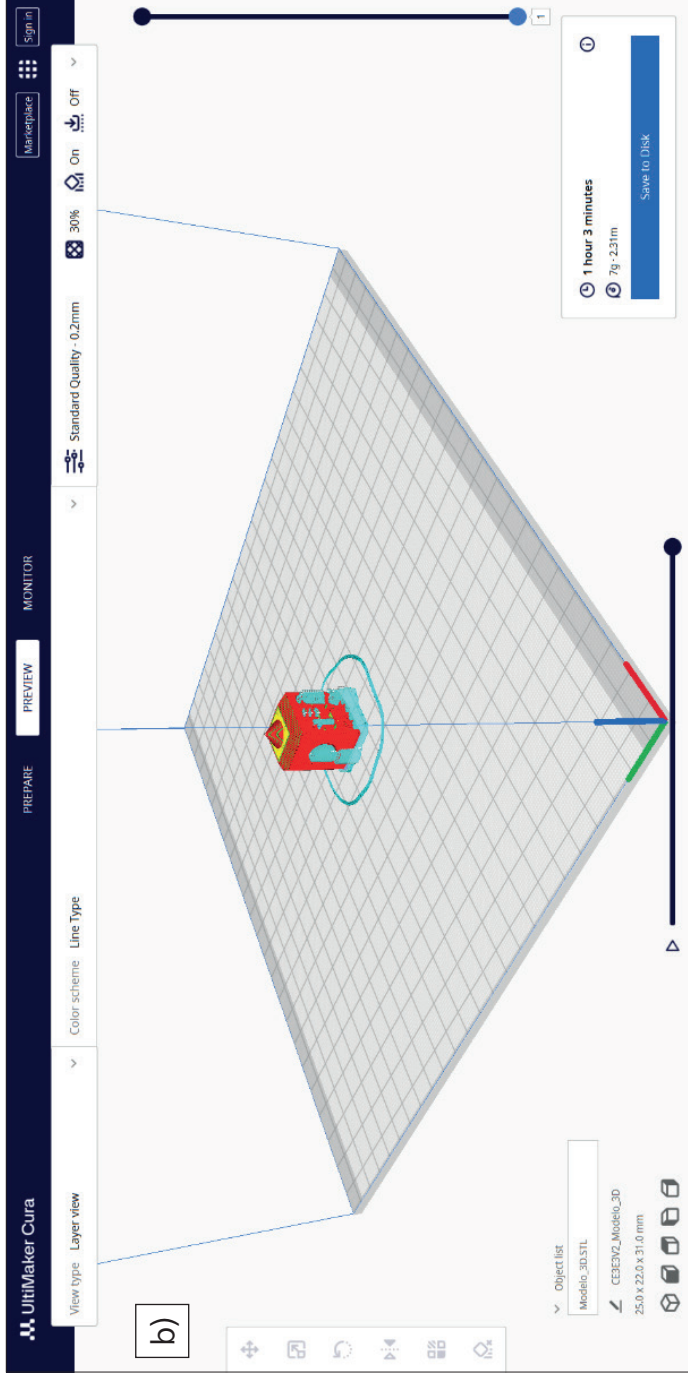
Layer Height	0.2 mm
Infill Density	30%
Infill Pattern	triangular
Print Speed	50 mm/s
Printing Temperature	217 °C
Build Plate Temperature	72 °C

The settings were defined according to the optimal values recommended by the printer manufacturer, while the printing temperatures (nozzle and bed) were based on the average values suggested by the PLA filament manufacturer and supported by recent studies on FDM performance (BASTAWROUS *et al.*, 2021; TÜMER, ERBİL, 2021).

With the settings properly adjusted, the model was sliced using the command located in the lower right corner of the interface (Figure 5-a) and then the Preview tab was accessed for visual inspection of the slicing, allowing verification of layer conformity and support distribution before sending it to print (Figure 5-b).

Figure 5 – Main interface of the software of the Ultimaker Cura: a) Print parameter configuration; b) Visual inspection of the slicing.





Source: Author's own work (2025).

After slicing, the model was automatically converted by the software into a G-code file, a format recognized by the 3D printer and responsible for gathering machine instructions regarding axis displacements, deposition speeds, temperatures, and extrusion parameters. The file was then saved to a microSD card and transferred to the printer, enabling the start of additive manufacturing of the part.

Print Execution And Finishing

After transferring the G-code file to the printer, the printing process was initiated directly from the printer’s control panel, by selecting the “Print” option (Figure 6-a) and then confirming the “CE3E3V2_Modelo_3D_cubo.gcode” file (Figure 6-b). First, the machine automatically heats the bed and then the extruder nozzle. Finally, the axis homing procedure (axes referencing) is executed, initiating the part production.

Figure 6 – Initiating the print from the control panel.



Source: Author's own work (2025).

The first layers were carefully monitored to ensure proper extrusion and adhesion. During operation, the stability of the bed, continuous filament flow, and the integrity of the layers formation were observed. The entire process took approximately 70 minutes.

At the end of the print, the part was removed using a spatula, and the support structures were carefully extracted with precision tweezers. The print bed was cleaned again to prevent residue buildup and ensure optimal conditions for future prints.

Figure 7 – Finished part before removal and support extraction.



Source: Author's own work (2025).

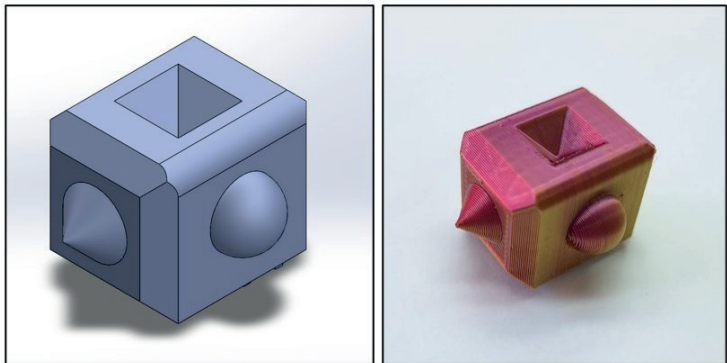
Three replicas of the part were produced to validate the repeatability and quality of the process. The technical analysis included a visual inspection of the surface finish, verification of the sharpness of the features, and measurements using a digital caliper to compare with the CAD model in order to assess dimensional deviations and the printer's technical performance (EL KHATIB *et al.*, 2019).

RESULTS AND DISCUSSION

The execution of the prototyping process allowed for the evaluation of the dimensional accuracy and visual quality of the part produced through additive manufacturing, based on the originally developed CAD model. The 3D model, created in SolidWorks, served as a reference for both visual and metrological inspection of the PLA-printed part.

The isometric views comparison (Figure 8) revealed a high degree of similarity between the digital design and the physical object. Features such as embossments, cavities, chamfers, and fillets were reproduced with good definition, maintaining the geometry and proportions specified in the project. Layer adhesion and continuous extrusion were positively observed, with no visible defects or interruptions during the printing process.

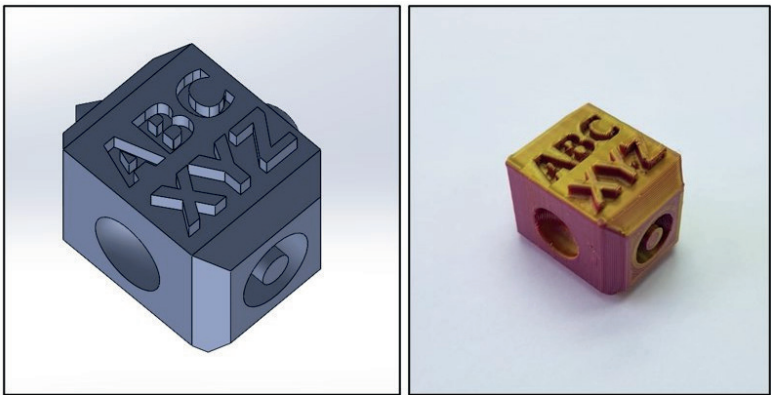
Figure 8 – Comparison between the CAD model and the printed part with isometric view.



Source: Author's own work (2025).

With the rotation of the isometric views (Figure 9), it can be observed the remaining faces of the part, allowing the analysis of inclined surfaces, reliefs, and inscriptions. The comparison revealed good definition even in hard-to-reach areas, with minor imperfections on the edges of some fine details, attributed to the resolution limitations of the FDM process and the material properties of PLA (EL KHATIB *et al.*, 2019; TÜMER, ERBİL, 2021).

Figure 9 – Comparison between the CAD model and the printed part with rotated isometric view.



Source: Author's own work (2025).

Despite these minor inaccuracies, the obtained results were satisfactory for academic and experimental purposes. The part demonstrated good dimensional stability, with deviations within the acceptable range for initial validation projects. The three replicas produced showed consistency among themselves, highlighting the repeatability of the process.

CONCLUSION

The experience described in this chapter demonstrated the feasibility and relevance of using the Creality Ender 3 V2 3D printer as a support tool for prototyping in multiple fields of engineering. The development and application of an operational manual not only standardized the printing process but also enabled the practical training of students and professionals, promoting greater familiarity with the fundamentals of additive manufacturing.

The choice of PLA filament proved to be suitable for educational and experimental contexts, yielding satisfactory results in terms of dimensional stability, surface finish, and geometric fidelity. The comparative analysis between the digital model and the printed parts highlighted the precision of the FDM system in replicating complex geometries, even when considering the inherent limitations of the technology and material used.

Furthermore, the consistent reproduction of three replicas validated the repeatability of the process and reinforced the potential of 3D printing as an accessible and effective tool for concept testing, dimensional verification, and technical training. The adopted methodology, combining modeling, slicing, operation, and analysis, can be replicated in various academic contexts, encouraging the integration of theory and practice in engineering education.

In this sense, additive manufacturing prototyping is established as a strategic pedagogical and technical resource, especially when combined with well-structured and documented practices, such as the manual developed in this work.

STATEMENT OF RESPONSIBILITY

The authors declare that they are the only ones responsible for the content presented in this chapter, ensuring the accuracy of the information, the originality of the work, and compliance with current ethical and academic standards. All sources used have been properly cited, and there is no conflict of interest related to this publication.

ACKNOWLEDGMENTS

The completion of this work was only possible thanks to the trust and encouragement of Professor Felipe Barreto Campelo Cruz, to whom I am deeply grateful for the opportunity to participate in this project and for his generous guidance throughout the entire process.

I also extend my heartfelt thanks to my parents, Sidnei Roberto de Marchi and Patrícia Gelli Feres de Marchi, as well as to Amanda Ferreira Sartori, for their unwavering emotional and motivational support. Their constant presence, words of encouragement, and dedication were essential during the most challenging moments.

I am also grateful to the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) for the opportunity to develop and publish this work as a book chapter. This initiative reinforces the institution's commitment to academic training, applied research, and the dissemination of scientific knowledge.

REFERENCES

BASTAWROUS, S.; WU, L.; STRZELECKI, B.; LEVIN, D. B.; LI, J. S.; COBURN, J.; RIPLEY, B. Establishing quality and safety in hospital-based 3D printing programs: patient-first approach. *RadioGraphics*, [S.l.], v. 41, n. 4, p. 1208–1229, jul./ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1148/rg.2021200175>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EL KHATIB, R.; WRISLEY, D. J.; ELBASSUONI, S.; JABER, M.; EL ZINI, J. Prototyping across the disciplines. *Digital Studies/Le champ numérique*, [S. l.], 3 jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.16995/dscn.282>. Acesso em: 24 jul. 2025.

GHAFAR, A., RIAZ, M. T., REHMAN, A., & AL MAHMUD, M. M. S. (2024). An Optimized 3D Printer by Enhancing Material Properties and Surface Finish of PLA Through Modifications. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/9198329>

JENSEN, L. S.; ÖZKIL, A. G.; MORTENSEN, N. H. Prototypes in engineering design: definitions and strategies. In: INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN 2016, Dubrovnik, Croatia, May 16–19, 2016. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2016. p. 821–830.

MASZYBROCKA, J., DWORAK, M., NOWAKOWSKA, G., OSAK, P., & ŁOSIEWICZ, B. (2022). The Influence of the Gradient Infill of PLA Samples Produced with the FDM Technique on Their Mechanical Properties. *Materials*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041304>

RAJKUMAR, S. Effect of infill pattern and build orientation on mechanical properties of FDM printed experimental modal analysis approach, 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2202.05692>>. Acesso em: 30 junho 2025.

TÖRÖK, J., & DUPLÁKOVÁ, D. (2025). Integrated Practical Framework for Multidisciplinary Prototype Design and Manufacturing Process. *Processes*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/pr13020454>

TÜMER, E. H.; ERBİL, H. Y. Investigation of mechanical properties and machinability of polylactic acid (PLA) based composites produced by fused deposition modeling (FDM). *Coatings*, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 1–21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings11040390>. Acesso em: 25 jul. 2025.

WANG, J.; RANSCOMBE, C.; EISENBART, B. An integrated prototyping tool to enhance interdisciplinary communication in smart product design. *Ergonomics*, [S.l.], 22 out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2418949>. Acesso em: 24 jul. 2025.



CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS INDICADORES DE DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045

Henrique Ajuz Holzmann

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Géssica Katalyne Bilcati

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Aldo Braghini Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa

RESUMO: O processo de usinagem, especialmente o torneamento, é caracterizado por fenômenos como a formação de cavacos, a qualidade superficial, o desgaste da ferramenta de corte e variações dimensionais. Este trabalho teve como objetivo estudar a relação entre os diferentes critérios de fim de vida útil de ferramentas de corte no processo de torneamento. A metodologia empregada incluiu a realização de ensaios de torneamento externo em etapa de acabamento, utilizando dois materiais de peça: aço ABNT 1045 fundido ligado e aço ABNT 1045 laminado. Os testes foram conduzidos em duas condições distintas: com e sem a aplicação de fluido de corte. Durante os ensaios, foram medidos e analisados o desgaste de flanco da ferramenta, a rugosidade superficial da peça, a variação dimensional e a análise visual do cavaco formado. Os resultados obtidos revelaram que o uso de fluido de corte promoveu maior estabilidade e consistência nos resultados. Nos ensaios com fluido, o desgaste de flanco seguiu um aumento linear, enquanto a rugosidade, embora tenha aumentado, manteve-se em níveis de crescimento menores, facilitando o corte. A variação dimensional da peça também apresentou um aumento gradual e mais controlado. A análise do cavaco demonstrou que sua forma foi mais constante e uniforme. Em contrapartida, os ensaios realizados a seco apresentaram um comportamento mais irregular. O desgaste de flanco não seguiu um padrão linear, com uma potencialização significativa do desgaste ao final do teste. A variação dimensional mostrou um crescimento irregular devido às condições de corte mais difíceis, e a forma do cavaco foi menos constante. Em conclusão, os dados indicam que o uso de fluido de corte proporciona maior previsibilidade, permitindo

que critérios como rugosidade e variação dimensional sejam utilizados de forma mais confiável para determinar o fim da vida útil da ferramenta. O tempo efetivo de corte também se mostrou um fator determinante, já que a faixa de tempo dos ensaios foi similar em ambas as condições.

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste, Ferramenta de corte, Fluido de corte.

ANALYSIS OF CUTTING TOOL WEAR INDICATORS IN THE TURNING OF ABNT 1045 STEEL

ABSTRACT: The machining process, particularly turning, is characterized by phenomena such as chip formation, surface quality, cutting tool wear, and dimensional variations. This study aimed to investigate the relationship between the different criteria for the end of cutting tool life in the turning process. The methodology included conducting external turning tests in the finishing stage, using two workpiece materials: cast alloy ABNT 1045 steel and rolled ABNT 1045 steel. The tests were performed under two distinct conditions: with and without the application of cutting fluid. During the trials, the tool's flank wear, the workpiece's surface roughness, dimensional variation, and a visual analysis of the formed chip were measured and analyzed. The results revealed that the use of cutting fluid promoted greater stability and consistency in the outcomes. In the tests with fluid, flank wear followed a linear increase, while roughness, although it increased, remained at lower growth levels, which facilitated the cutting. The workpiece's dimensional variation also showed a more gradual and controlled increase. The chip analysis demonstrated that its shape was more constant and uniform. In contrast, the dry cutting tests showed a more irregular behavior. The flank wear did not follow a linear pattern, with a significant intensification of wear towards the end of the test. Dimensional variation showed irregular growth due to more difficult cutting conditions, and the chip's shape was less consistent. In conclusion, the data indicates that the use of cutting fluid provides greater predictability, allowing criteria such as roughness and dimensional variation to be used more reliably to determine the end of a tool's life. The effective cutting time also proved to be a determining factor, as the time range of the tests was similar in both conditions.

KEYWORDS: Wear, Cutting tools, Cutting fluid

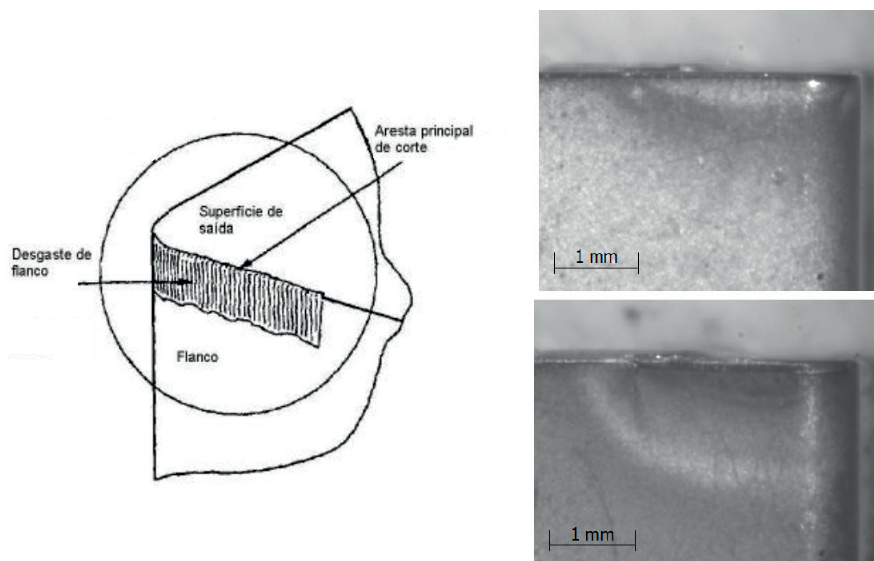
INTRODUÇÃO

A usinagem tem passado por diversas transformações impulsionadas pela competitividade do mercado e pela busca contínua por qualidade. A redução dos custos de produção é uma meta diária para as empresas, o que exige o aprimoramento dos processos produtivos, equilibrando os fatores de prazo, custo e qualidade.

Essa busca por otimização visa a redução do custo final do produto através do aumento da produção em larga escala e do uso mais eficiente de ferramentas de corte e energia. Pesquisas têm recebido investimentos crescentes com o objetivo de melhorar processos e reduzir custos. A eficiência dos equipamentos e as condições de usinagem são cruciais para o custo final, levando à utilização de máquinas mais modernas, treinamento de pessoal e estudos sobre a durabilidade dos materiais. Uma programação das atividades também é importante para a obtenção do produto (KALPAKJIAN, SCHMID e WERNER, 2011; TRENT e WRIGHT, 2000).

O custo de um lote de peças está diretamente relacionado ao tempo de fabricação, que inclui desde a preparação do material e da máquina até a distribuição do produto final. O tempo gasto na substituição da ferramenta de corte e as paradas de máquina para trocas prematuras são fatores de custo relevantes. O tempo utilizado na substituição do inserto tem influência no custo final e deve ser considerado como um fator de relevância. Para determinar o fim da vida útil de uma ferramenta de corte, vários critérios são empregados, como falha total da ferramenta, desgaste de flanco, vibrações, acabamento superficial, formação de cavacos, alteração dimensional da peça e forças de corte. Nas indústrias, os métodos mais comuns para estimar o fim da vida útil da ferramenta são a rugosidade final (para operações de acabamento), o tipo de cavaco formado e as variações dimensionais da peça.

Figura 1 – a) Representação esquemática do desgaste de flanco, b) Início do desgaste do inserto de corte - 1 min e c) Gume do inserto de corte já desgastado - 14 min.



Fonte: Adaptado de AMORIN, 2002.

No entanto, a utilização isolada desses métodos nem sempre fornece uma avaliação precisa sobre o fim da vida útil da ferramenta. A medição do desgaste de flanco, conforme mostrado na Figura 1, é o parâmetro que melhor caracteriza a vida da ferramenta, mas sua medição é complexa em um ambiente de produção. Embora a medição de rugosidade e dimensões seja importante para atender aos requisitos do projeto, ela não garante a máxima utilização da ferramenta (KNIGHT e BOOTHROYD, 2005; TRENT e WRIGHT, 2000).

A avaliação do cavaco é de fácil visualização, mas sua subjetividade limita a precisão do diagnóstico. O desafio reside em encontrar um método de análise que seja de fácil aplicação, rápido e confiável para indicar o fim da vida útil da ferramenta. Esses métodos são mais confiáveis em processos de torneamento CNC, onde falhas de operador são minimizadas e não há interrupção do padrão de desgaste (SHAW e COOKSON, 2005; TRENT e WRIGHT, 2000).

O presente trabalho busca realizar um estudo comparativo entre a rugosidade superficial, a variação dimensional da peça e a forma do cavaco em relação ao desgaste de flanco no processo de torneamento de aços ABNT 1045 obtidos de duas maneiras, fundido e laminado.

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

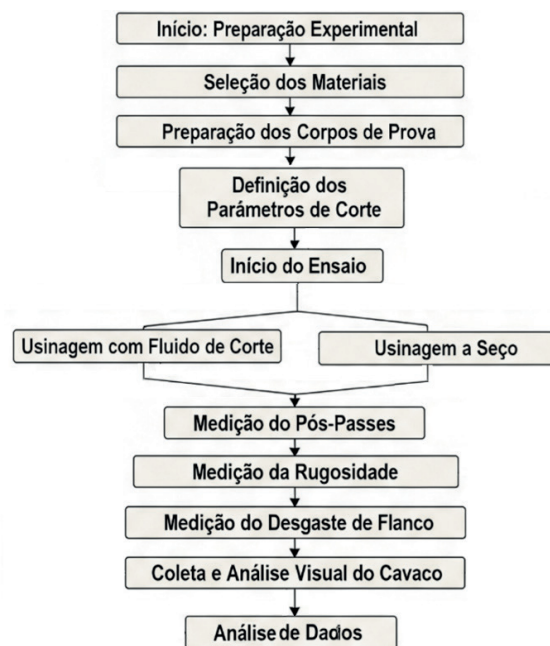
Este estudo empregou dois tipos de corpos de prova: aço ABNT 1045 fundido ligado e aço ABNT 1045 laminado. Ambos os materiais apresentaram a seguinte composição química: 98,64% de Ferro, 0,72% de Manganês, 0,45% de Carbono, 0,04% de Enxofre e 0,15% de outros elementos. As amostras não foram submetidas a tratamento térmico. O aço fundido possuía dureza de $88,5 \pm 0,5$ Rockwell B, enquanto o aço laminado apresentava $95 \pm 0,5$ Rockwell B. As medições de dureza foram obtidas a partir de cinco pontos no diâmetro externo, com espaçamento de 120° entre as posições. Ambos os corpos de prova tinham dimensões de 440 mm de comprimento e 120 mm de diâmetro.

Procedimento Experimental

Os ensaios consistiram no torneamento longitudinal externo de acabamento. Os parâmetros de corte foram baseados no catálogo do fabricante da ferramenta e definidos como: avanço (f) de 0,15 mm/volta, profundidade de corte (ap) de 1 mm e velocidade de corte (vc) de 250 m/min.

Antes dos ensaios, a máquina foi pré-aquecida por aproximadamente 1 hora em vazio para mitigar variações dimensionais. Ao final de cada conjunto de passes, foram realizadas as seguintes ações: Coleta do cavaco para análise visual, Medição do diâmetro da peça, Medição do desgaste de flanco do inserto, Medição da rugosidade da peça, a Figura 2 apresenta uma esquemática das etapas realizadas.

Figura 2 – Etapas do procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria.

O critério de fim de vida da ferramenta foi estabelecido em um desgaste de flanco máximo de 0,25 mm. A rugosidade e a variação dimensional foram monitoradas continuamente até que o desgaste de flanco atingisse esse limite pré-estabelecido. No caso dos ensaios a seco, a peça foi resfriada com água corrente após cada conjunto de passes para evitar a dilatação térmica do material.

Para a usinagem, foi utilizado um torno CNC Romi, modelo Galaxy 15 S. As ferramentas de corte consistiram em um inserto de metal duro TNMG 160408 PF 4025 de classe ISO P25, acoplado a um suporte de ferramenta MTJNR 2525 M16, ambos fabricados pela Sandvik Coromant. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão de base vegetal, de nome comercial Vasco 1000 (Blasser Swisslube), com 5% de concentração.

A análise microestrutural foi conduzida em amostras de aço retiradas anteriormente aos ensaios de usinagem, embutidas, lixadas manualmente e polidas com alumina de 0,3 μm . Após o polimento, as amostras foram atacadas com Nital e examinadas em um microscópio Olympus, modelo BX521. Para as medições dimensionais, foi empregado micrômetro Mitutoyo centesimal 100-125 mm, todos

previamente calibrados, foram efetuadas 5 medições em cada um dos pontos e na sequência realizou-se a média simples. Já para as medições de rugosidade, utilizou-se rugosímetro Mitutoyo modelo Surf test - 301, aferido com um padrão de calibração. Os parâmetros de medição foram definidos como cut off de 0,8 mm, 5 intervalos de medição e comprimento de amostragem de 4 mm. Os parâmetros de rugosidade Ra e Rz foram monitorados para fornecer informações complementares.

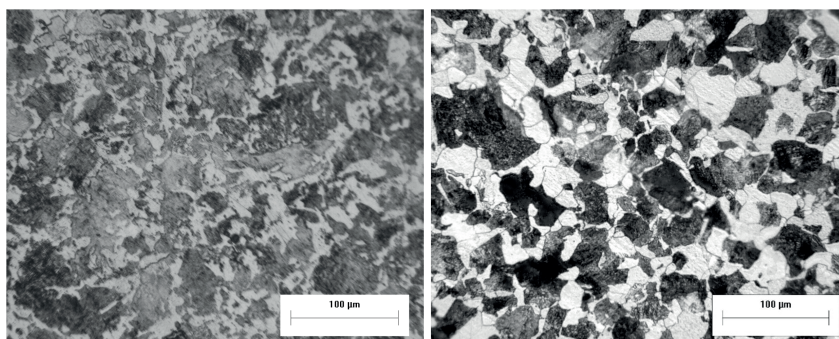
Para identificação e medição do desgaste da ferramenta, utilizou-se um microscópio ferramenteiro Metrimpex – PZO Labimex para medição do desgaste de flanco da ferramenta, com resolução de 2,5 μm .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo, apresentados em gráficos, foram segmentados em desgaste de flanco, rugosidade e variação dimensional para uma análise comparativa e detalhada. A investigação considerou a usinagem com e sem fluido de corte, incluindo os ensaios e suas réplicas, com o objetivo de correlacionar os critérios de fim de vida da ferramenta de corte (DE ASSIS e LIMA, 2021, TRENT e WRIGHT, 2000).

O critério de fim de vida útil da ferramenta foi predeterminado em um desgaste de flanco de 0,25 mm. Os valores obtidos para os ensaios com o aço ABNT 1045 fundido foram: sem fluido de corte $60,03 \pm 3,8$ minutos, com fluido $51,83 \pm 1,07$ minutos. Já para o aço ABNT 1045 laminado os tempos foram: $62,66 \pm 3,2$ minutos e com fluido $57,17 \pm 0,8$ minutos. A análise dos tempos de corte efetivos demonstrou que a dispersão da vida da ferramenta foi significativamente maior nos ensaios a seco. Em contrapartida, os ensaios com fluido de corte apresentaram uma dispersão reduzida ou nula, o que possibilitou uma estimativa mais confiável da perda de eficiência da ferramenta.

Figura 3 – a) metalografia aço ABNT 1045 fundido e b) metalografia aço ABNT 1045 laminado.

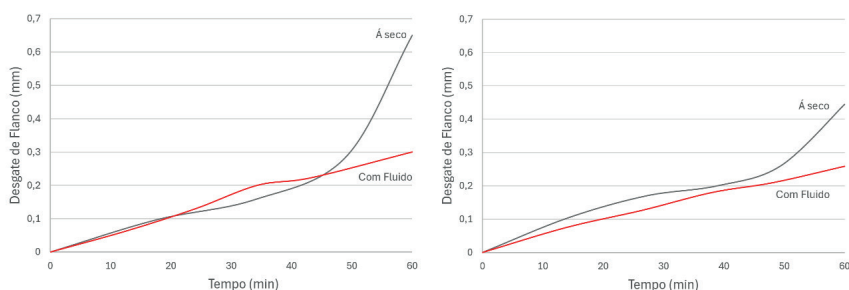


Fonte: Autoria própria.

Desgaste de Flanco

O desgaste de flanco, critério primário de fim de vida da ferramenta, exibiu comportamentos distintos. Nos ensaios a seco, o desgaste permaneceu constante por cerca de 40 minutos, seguido por um aumento abrupto e acentuado. Em contraste, com a utilização de fluido de corte, o desgaste apresentou uma taxa de crescimento linear com pouca variação, permitindo um melhor controle do processo, a Figura 4 traz os resultados obtidos nos ensaios.

Figura 4 – Acompanhamento do desgaste de flanco da ferramenta –
a) Aço ABNT 1045 fundido e b) Aço ABNT 1045 laminado.



Fonte: Autoria própria.

A usinagem sem fluido de corte leva a um acúmulo de calor extremo na interface de corte. Essas elevadas temperaturas podem levar a um “amolecimento” do material da ferramenta, tornando-o mais vulnerável ao desgaste (TRENT e WRIGHT, 2000; DE ASSIS e LIMA, 2021).

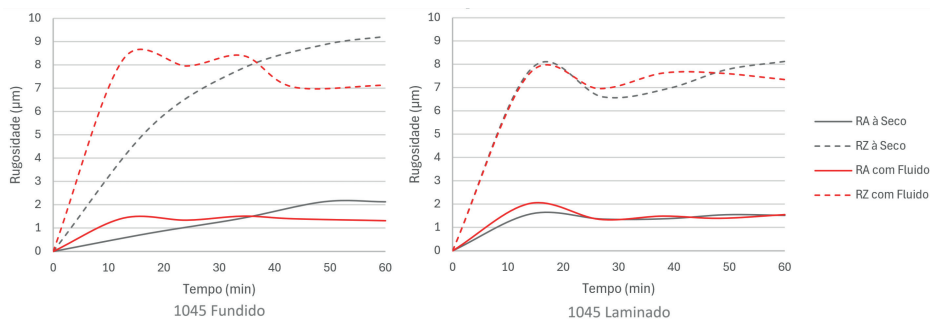
Ainda a falta de lubrificação intensifica o atrito, acelerando o desgaste por abrasão. Assim o calor e o atrito favorecem a formação da aresta postiça de corte (APC) e o processo de difusão. Quando a APC se rompe, pode ocorrer a retirada conjunta de fragmentos da ferramenta, um mecanismo de desgaste que é potencializado na usinagem a seco. Em contraste, na usinagem com fluido de corte ocorre uma otimizada dissipação do calor da zona de usinagem, mantendo a temperatura da ferramenta em níveis seguros, preservando sua dureza. A ação lubrificante reduz o atrito, minimizando o desgaste abrasivo e a formação da APC, resultando em uma maior vida útil da ferramenta (MACHADO e DA SILVA, 2004).

Rugosidade

A rugosidade superficial, monitorada após cada conjunto de passes, seguiu a tendência teórica de aumento conforme o desgaste do inserto progredia. Nos ensaios a seco e com fluido, a rugosidade cresceu de forma quase constante até aproximadamente 40 minutos, quando o desgaste de flanco se tornou abrupto. A partir deste ponto, a efetividade de corte e a confiabilidade da análise foram comprometidas, os resultados obtidos para as amostras estudadas, são mostradas na Figura 5. Este fenômeno pode ser explicado que com o avanço do desgaste de flanco, a aresta de corte da ferramenta pode se tornar arredondada (alterando seu raio de quina) e as forças de corte se elevam. Isso leva a um aumento geral da rugosidade da superfície, pois a ferramenta não consegue remover o material de forma tão eficiente. O valor de R_a , nesse cenário, tende a subir de maneira relativamente gradual e consistente, refletindo a deterioração progressiva. A influência do desgaste na rugosidade R_a é um indicativo do declínio da qualidade global da superfície (WHITEHOUSE, 2002).

O desgaste de flanco pode causar fenômenos como o lascamento da aresta de corte ou a formação e quebra da aresta postiça de corte (APC), podendo ocasionar sulcos ou crateras profundas e irregulares na superfície, que mesmo que ocorram esporadicamente, terão um grande impacto no valor de R_z .

Figura 5 - Acompanhamento da rugosidade R_a e R_z da peça – a) Aço ABNT 1045 fundido e b) Aço ABNT 1045 laminado.



Fonte: Autoria própria.

O uso de fluido de corte proporciona uma ação de lubrificação e refrigeração, sendo crucial para a qualidade do acabamento. A lubrificação forma uma película entre a ferramenta e a peça, reduzindo o atrito e, consequentemente, o desgaste abrasivo e a formação da APC (TRENT e WRIGHT, 2000). A refrigeração, por sua

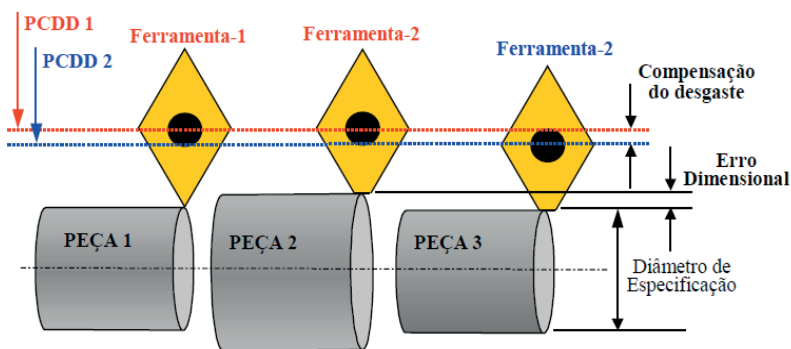
vez, previne o aquecimento excessivo da ferramenta, preservando sua dureza e a capacidade de corte por mais tempo.

Embora a literatura majoritária, incluindo trabalhos de Klocke e Einsenblättere (1997), reforce a importância do fluido de corte, algumas pesquisas mostram que seu impacto pode variar dependendo das condições de usinagem e do tipo de material. No entanto, é amplamente aceito que o controle do desgaste da ferramenta, seja com o uso de fluido de corte ou através de ferramentas de alto desempenho para usinagem a seco, é fundamental para garantir uma baixa rugosidade superficial e a qualidade final da peça. A literatura técnica, incluindo estudos de Klocke e Einsenblättere (1997) e outros autores, frequentemente usa ambos os parâmetros para uma análise completa do acabamento superficial.

Variação Dimensional

A variação dimensional da peça, influenciada pela flexão do conjunto, desgaste da ferramenta e dilatação térmica, foi um critério importante de análise. A Figura 6 exemplifica como o desgaste da ferramenta influencia nas medidas finais do conjunto, e como o desgaste pode gerar peças fora do padrão pré-estabelecidos.

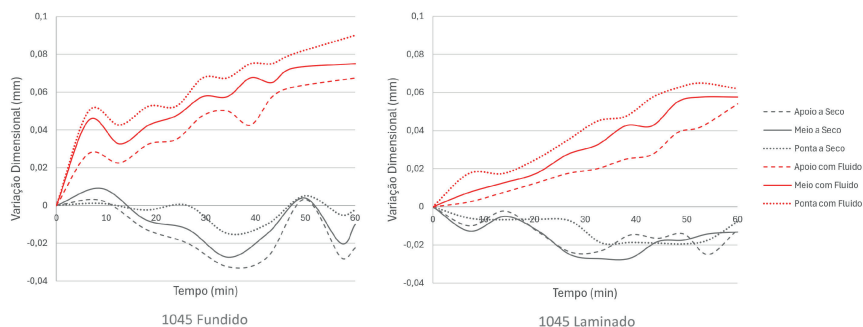
Figura 6 - Influência do desgaste do inserto nas dimensões final.



Fonte: Júnior, 2002.

Nos ensaios a seco, a variação dimensional não seguiu um padrão, oscilando entre picos e vales em relação à medida padrão. A dilatação térmica descontrolada da peça e a contração desuniforme após o resfriamento resultaram em medições inconsistentes. Em contraste, com o fluido de corte, a variação dimensional seguiu a tendência teórica de um aumento gradual e monitorável, diretamente relacionado ao desgaste do inserto.

Figura 7 - Acompanhamento da variação dimensional da peça em 3 pontos – a) Aço ABNT 1045 fundido e b) Aço ABNT 1045 laminado.



Fonte: Autoria própria.

Conforme a aresta de corte se deteriora, ela se torna arredondada, o que altera a geometria original da ferramenta. Essa mudança resulta em um aumento das forças de corte, especialmente na direção radial. Esse aumento de força tende a afastar a ferramenta da peça, gerando dimensões maiores do que as programadas, um fenômeno bem documentado na literatura técnica, como nos trabalhos de Trent e Wright (2000).

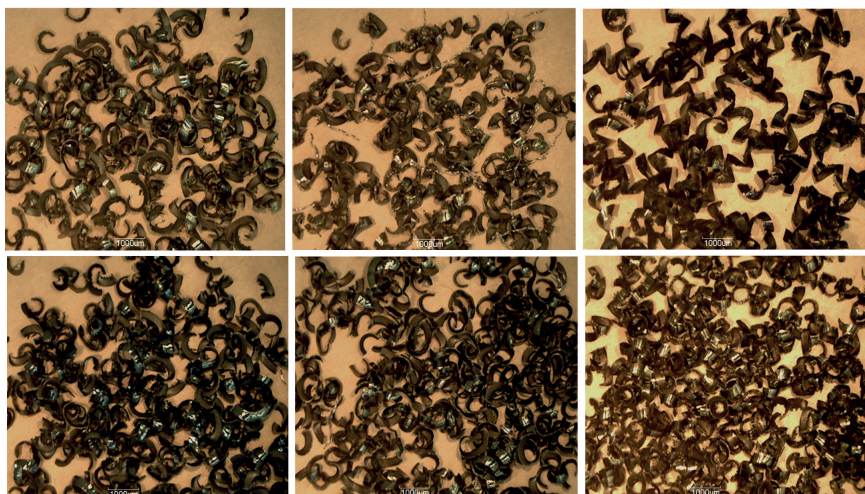
Além disso, o atrito elevado causado pelo desgaste gera mais calor na zona de usinagem. O aumento da temperatura provoca a expansão térmica da peça. Quando o material resfria, ele contrai, resultando em dimensões menores do que o esperado. A combinação da deflexão elástica do sistema máquina-ferramenta-peça, causada pelo aumento das forças, com a expansão e contração térmica, é um dos principais responsáveis pela imprecisão dimensional.

A perda de geometria e o aumento do atrito também podem induzir vibrações (chatter) no processo, o que leva a irregularidades na superfície e variações na profundidade de corte. Autores como Machado e Da Silva (2004) destacam a importância de se manter um processo estável para garantir a precisão dimensional. Pesquisas como as de Klocke e Einsenblätter (1997) e Weinert *et al.* (2004) também abordam as consequências do desgaste na usinagem a seco, onde as altas temperaturas e o rápido desgaste da ferramenta são fatores críticos que afetam diretamente a precisão dimensional. Em suma, o desgaste de flanco não apenas deteriora a qualidade superficial, mas também afeta diretamente a precisão dimensional da peça, um desafio que exige monitoramento e controle rigorosos para garantir a conformidade do produto final (CORREIA e DAVIM, 2011).

Análise do Cavaco

A análise visual do cavaco revelou que, na usinagem a seco do aço ABNT 1045 fundido, a forma do cavaco se alterou com o decorrer do ensaio. Inicialmente em vírgulas, evoluiu para hélices oblíquas e, com o desgaste de flanco elevado, para fitas de pequeno tamanho. No ensaio com fluido de corte, a mudança foi de vírgula para hélice oblíqua, mas a formação de fitas não foi observada, devido ao desgaste mais gradual. Para o aço ABNT 1045 laminado, a forma do cavaco permaneceu constante em vírgulas em todas as condições. A mudança na forma do cavaco parece estar mais relacionada ao tipo de material e seus elementos de liga do que ao uso de fluido de corte (DAYMI *et. al.*, 2009)

Figura 8- Acompanhamento da variação dimensional da peça em 3 pontos – a) Aço ABNT 1045 fundido e b) Aço ABNT 1045 laminado.



Fonte: Autoria própria.

O desgaste de flanco da ferramenta de corte influencia diretamente a morfologia e o formato do cavaco no torneamento, servindo como um indicador visual do estado do processo. Uma ferramenta em bom estado promove um corte limpo, resultando em cavacos bem formados e controlados. No entanto, o avanço do desgaste de flanco aumenta o atrito e a força de corte na interface entre a ferramenta e a peça. Esse aumento do atrito eleva a temperatura e intensifica a deformação plástica do material, levando a uma mudança na formação do cavaco (SREEJITH e NGOI, 2000).

Em materiais dúcteis, o cavaco pode deixar de ser segmentado ou espiral para se tornar uma longa fita contínua, difícil de quebrar. Isso não apenas compromete a segurança do operador, mas também pode danificar a superfície da peça. O desgaste também promove a formação de aresta postiça de corte (APC) em materiais específicos, o que causa um cavaco de formato irregular e instável. A transição de um cavaco controlado para um formato emaranhado ou fragmentado é um claro sinal de que a vida útil da ferramenta está no fim. A análise do cavaco é, portanto, uma ferramenta de diagnóstico importante para monitorar o desgaste da ferramenta e garantir a estabilidade do processo.

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram estabelecidas correlações entre diversos critérios para a determinação do fim da vida útil de ferramentas de corte em torneamento cilíndrico externo de acabamento, com foco em ensaios com e sem fluido de corte em dois tipos de aço.

Os resultados demonstram que o fluido de corte atua como um fator estabilizador no processo, influenciando o crescimento do desgaste de flanco de maneira mais consistente. Nos ensaios com fluido, a rugosidade da superfície (R_a) e a variação dimensional (ΔD) emergiram como critérios robustos para o fim de vida da ferramenta, exibindo uma progressão previsível e, em alguns casos, linear. Em contraste, a variação dimensional não se mostrou um indicador eficaz para a usinagem a seco.

A forma do cavaco não apresentou uma correlação direta com o desgaste da ferramenta para a determinação do fim de vida, embora tenha sido observado que mudanças na morfologia do cavaco ocorrem em resposta a um desgaste de flanco elevado e a alterações na composição do material usinado.

Conclui-se que o uso de fluido de corte promove a consistência do processo de usinagem, permitindo que critérios de monitoramento de fácil aplicação, como a rugosidade da superfície e a variação dimensional, sejam empregados para prever o fim da vida da ferramenta. Essa abordagem é mais viável para o controle de qualidade em ambientes de produção do que a medição direta do desgaste de flanco, que demanda equipamentos e tempo não disponíveis na maioria dos cenários industriais.

BIBLIOGRAFIA

AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. 2002. Dissertação -Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORREIA, A. E.; DAVIM, J. P. Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. **Measurement**, v. 44, n. 5, p. 1000-1005, 2011.

DAYMI, A., BOUJELBENE, M., SALEM, S. B., SASSI, B. H., TORBATY, S. Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces. **Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering**, v. 1, n. 2, p. 77-83, 2009.

DE ASSIS, D. G.; LIMA, R. O. C. Monitoramento do desgaste da ferramenta de HSS no processo de torneamento através da potência consumida. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, n. 2, p. 126-136, 2021.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R.; WERNER, Ewald. **Werkstofftechnik**. Pearson Deutschland GmbH, 2011.

KNIGHT, W. A.; BOOTHROYD, G. **Fundamentals of metal machining and machine tools**. CRC Press, 2019.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. **Dry Cutting**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 46, issue 2, p.519-526, 1997.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. Usinagem dos metais. **Metal Cutting**, Technical Notes, 9th version, 2004.

SHAW, M. C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B.K.A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 101, p.287-291, 2000.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WAKABAYASHI, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 53, issue 2, p.511-537, 2004.

WHITEHOUSE, D. J. **Surfaces and their Measurement**. CRC Press, 2002.



C A P Í T U L O 6

AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM COMPONENTES ESTRUTURAIS

Fábio Junkes Corrêa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

Wagner Silveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

O estudo de tensões residuais (TR) é relevante no desenvolvimento de projetos estruturais, visto que a sua ocorrência pode alterar significativamente a resistência dos componentes como, por exemplo, diminuir a resistência à tração, tanto em carregamentos estáticos, quanto em carregamentos dinâmicos. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados em componentes estruturais, como as resistências à fratura e à fadiga, podem ser consideravelmente influenciadas pelas TR, trazendo, usualmente, custos elevados com reparos e restauração de equipamentos e estruturas. Assim, TR são um dos principais fatores na influência das propriedades dos materiais e deveriam ser levadas em consideração durante o projeto e a manufatura de produtos. Por exemplo, a presença de TR de tração em uma peça é, geralmente, prejudicial, uma vez que pode contribuir para a falha por fadiga. Por outro lado, as TR compressivas induzidas por diferentes meios nas camadas superficiais e subsuperficiais do material são, normalmente, benéficas, pois podem evitar a formação e a propagação de fissuras por fadiga. Exemplos de operações que produzem tensões tratativas prejudiciais são o corte, a usinagem, o esmerilhamento e a extrusão ou trefilação. Sendo assim, as TR podem facilitar a geração de trincas e reduzir a performance de um equipamento (PUYMBROECK *et al.*, 2018; VALIORGUE *et al.*, 2018).

As aplicações de processos de manufatura, térmicos, químicos ou termoquímicos podem gerar TR. Dentre os processos mencionados, há o de conformação, que modifica a forma de um componente devido às deformações plásticas, como os

processos de forjamento, laminação e estampagem, produzindo TR (BEGHINI; BERTINI; MONELLI, 2014). Quando um componente estrutural é carregado além de seu limite de escoamento, ocorre uma deformação permanente e, após o descarregamento, todas as tensões, teoricamente, podem desaparecer. Entretanto, esse fenômeno não acontece na prática, pois as TR permanecem em uma estrutura após o descarregamento (MEYER *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019). No entanto, elas podem ser definidas como as tensões elásticas que permanecem dentro de um corpo mesmo com a ausência de carregamentos externos (ROSSINI *et al.*, 2012). (ROSSINI *et al.*, 2012). Em relação aos processos térmicos, como soldagem e tratamentos térmicos, as tensões residuais são geradas pelo aquecimento e resfriamento localizados, que causam contrações desiguais nas diferentes regiões da peça (SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012).

Na literatura podem ser encontrados diversos métodos de medição de tensões residuais (TR), tais como métodos não destrutivos, destrutivos ou semi-destrutivos. Considerando as aplicações e as particularidades de cada método, dependendo da natureza do componente, tipos de tensões, gradientes térmicos, forma do componente, profundidade pretendida, precisão exigida e outros fatores, seleciona-se o mais apropriado (PAIVA, 2015).

MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos não destrutivos têm por característica principal medir as mudanças nos espaçamentos entre os planos cristalinos do material decorrente da presença de TR. Esses métodos, quanto à abrangência, além de avaliar as TR macroscópicas, possibilitam examinar as TR microscópicas. Entre os métodos não destrutivos utilizados para a medição de TR, existem diversas técnicas, como ultrassom, difração de raios-X, difração de síncrotron e difração de nêutrons.

A técnica de difração de raios-X é a técnica não destrutiva mais usada, principalmente pelas suas praticidade e efetividade, e é especializada na medição de TR superficiais. Essa técnica é baseada no espaçamento interatômico do material (LIN; MA; LEI, 2017; MOUSSAOUI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017).

A técnica de difração de síncrotron, conhecida como difração de raio-X de alta energia, utiliza o mesmo princípio da difração de raios-X padrão. Em relação a esta, a técnica de síncrotron tem uma maior capacidade de penetração e um menor tempo de aquisição dados. A incidência de raios-X de alta energia, que são difratados, possibilita medir a mudança na separação dos planos da rede atômica devido às TR (HOLMBERG; STEUWER; STORMVINTER, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A técnica de difração de nêutrons é uma técnica não destrutiva que mede as TR mais profundas dentro de um material com base na detecção das difrações de um

feixe de nêutrons incidente. O feixe de nêutrons difratado permite a identificação de mudanças no espaçamento da rede atômica devido às TR. As mudanças relativas no espaçamento são comparadas a uma amostra de material sem a presença de TR, permitindo calcular os valores das TR (HEMMESI; FARAJIAN; BOIN, 2017; SEO *et al.*, 2017; STEGEMANN *et al.*, 2017).

A técnica de medição ultrassônica é uma técnica não destrutiva aplicável a diversos materiais. As ondas ultrassônicas são, comumente, usadas para detectar descontinuidades em materiais. Elas também podem ser usadas para a medição de TR. A velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam através de um material é afetada pela direção e magnitude das TR presentes. Desta maneira, a magnitude e a direção das TR presentes dentro dos materiais podem ser calculadas, medindo com precisão a mudança no tempo de propagação de uma onda ultrassônica que se propaga pelas regiões tensionadas e não tensionadas dos materiais (MININ; TROFIMOV; TROFIMOV, 2016; ZHAN *et al.*, 2017).

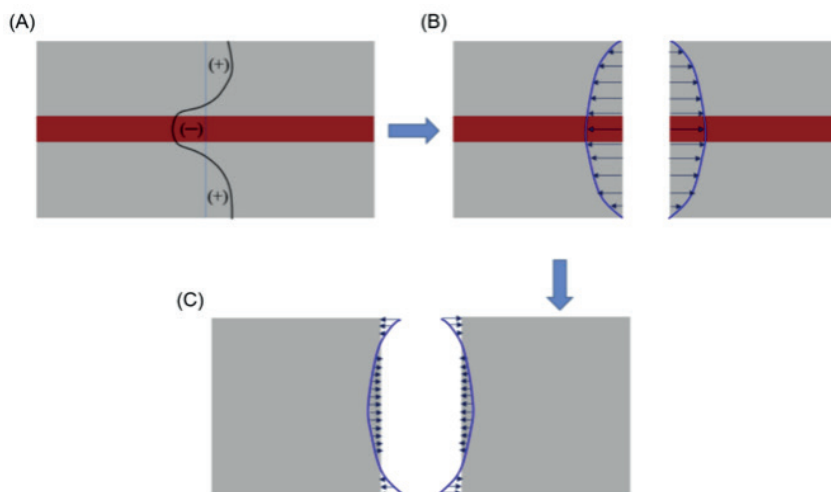
Os métodos não destrutivos, comparados aos métodos semi-destrutivos e destrutivos, são mais rápidos e eficientes, e possibilitam medir tensões em escala microscópica. Porém, os métodos não destrutivos possuem algumas desvantagens tais como: dificuldade de serem utilizados em geometrias complexas como, por exemplo, uma junta soldada; custo mais elevado e necessidade de um treinamento específico aos inspetores, podendo ser aplicados em campo.

MÉTODOS DESTRUTIVOS

Os métodos destrutivos, diferentemente dos métodos não destrutivos, caracterizam-se pela remoção de material do componente durante a aplicação da técnica e do seu descarte funcional. Dentre os diversos métodos destrutivos utilizados para a avaliação das TR, encontram-se o método do contorno, o método de Sanchs-Boring e o método do corte.

O método do contorno é um método destrutivo empregado para investigar a tensão residual normal à seção de corte. Essa técnica é baseada no princípio da variação da superposição elástica de Bueckner, o qual afirma que um corpo fraturado, sujeito a carregamentos externos, apresenta TR nas superfícies de fratura. Essa técnica envolve um corte integral da amostra por eletroerosão (Figura 1), a avaliação das deformações usando um equipamento de medição por coordenadas, com base nas distorções presentes na superfície de corte, resultantes do alívio de deformações e, por fim, as TR são recalculadas usando análises por elementos finitos (MURÁNSKY *et al.*, 2016a, 2016b; WAN *et al.*, 2017).

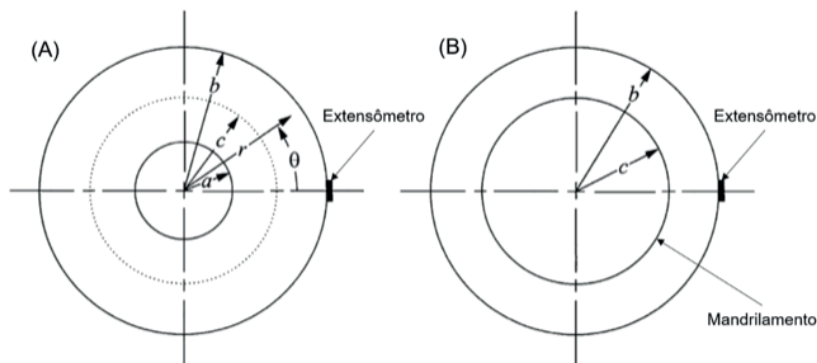
Figura 1 - Etapas do método do contorno: (a) previsão teórica da distribuição de tensões, (b) execução do corte e (c) reprodução das tensões residuais com base nas distorções superficiais.



Fonte: Adaptado de Gadallah et al. (2015)

Uma alternativa ao método do contorno é a utilização do método de Sanchs-Boring. Esse método consiste na medição de TR axissimétricas a partir da análise do alívio de deformações durante a retirada incremental de camadas de material através do processo de mandrilamento (Figura 2). Para realizar a técnica, os extensômetros são instalados na superfície lateral externa do componente antes da remoção de material. O processo de retirada incremental de material é realizado a partir da face interna em direção à superfície externa onde estão fixados os extensômetros. Cada incremento de usinagem remove uma camada axissimétrica do componente até não ser mais possível medir o alívio de deformação (GARCIA-GRANADA; LACARAC; SMITH, 2001).

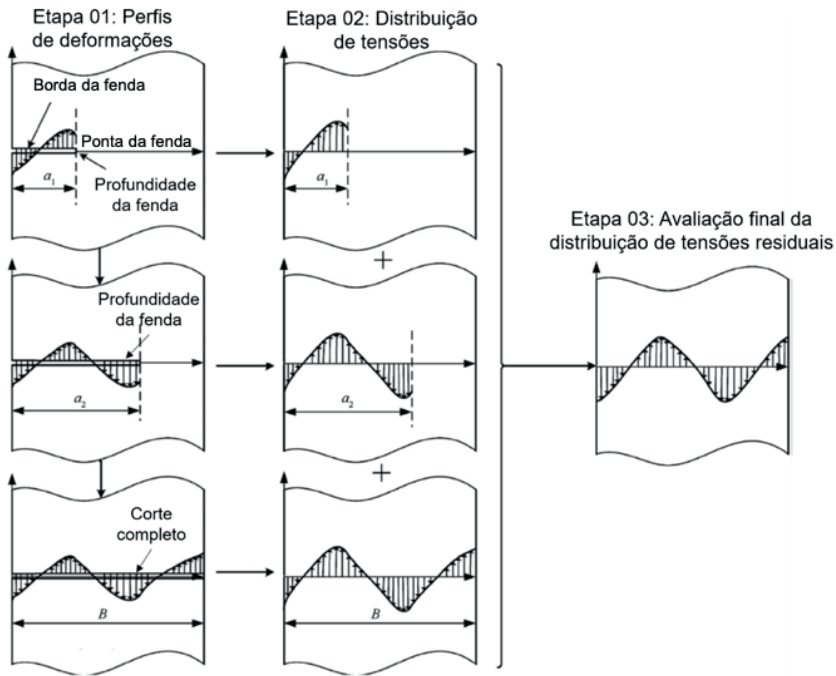
Figura 2 - Método sanchs-boring: (a) antes e (b) depois de mandrilar.



Fonte: Adaptado de Garcia-Granada et al. (2001)

A técnica do corte é uma técnica destrutiva na qual são medidas com precisão as TR próximas à superfície e ao longo da espessura a partir do alívio das deformações. A técnica envolve o corte de uma fenda por eletroerosão em um componente (Figura 3), sendo que a medição das deformações superficiais é realizada por extensômetros localizados ao lado da fenda. Durante o procedimento, a profundidade da fenda é aumentada de forma incremental para profundidades predeterminadas e, em cada incremento de profundidade a deformação é medida. Os alívios das deformações superficiais estão relacionados às tensões ao longo da espessura da amostra usando coeficientes numericamente determinados (JONES; BUSH, 2017; SHOKRIEH; JALILI; KAMANGAR, 2018; XU; BAO, 2017).

Figura 3 - Método do corte.



Fonte: Adaptado de Xu e Bao (2017)

Em relação a outras técnicas de medição de TR, os métodos destrutivos têm a grande vantagem de poder medir tensões em profundidades significativas de um componente e poder analisar o campo tridimensional das TR presentes. Por outro lado, a grande desvantagem é a inutilização da amostra após ser aplicada a técnica.

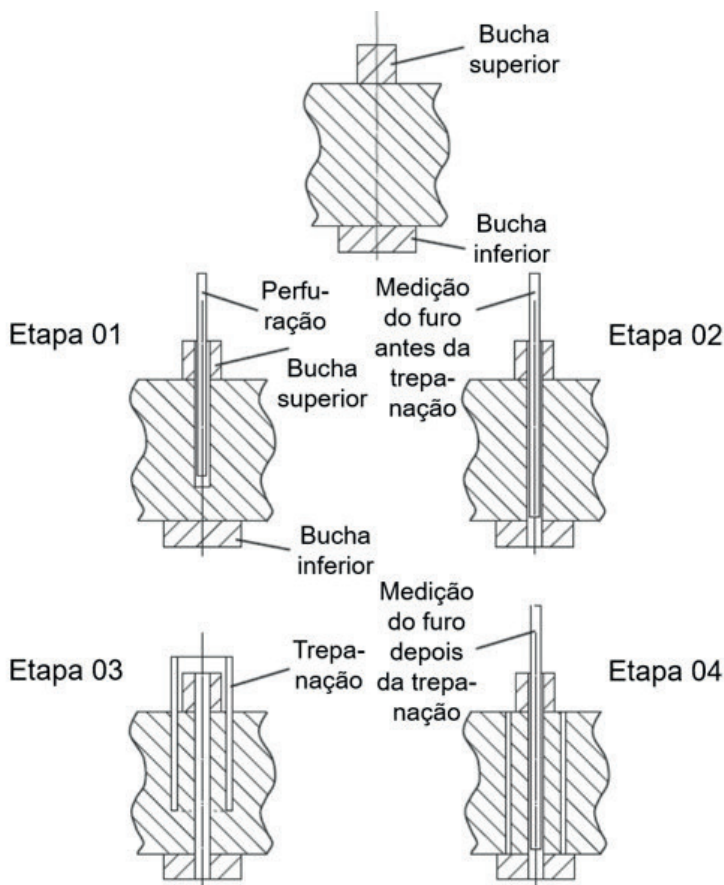
MÉTODOS SEMI-DESTRUTIVOS

Outra forma de medir TR é através das técnicas semi-destrutivas, como o método do furo profundo, a técnica do núcleo toroidal e a técnica do furo cego. Enquanto os métodos não destrutivos não alteram a funcionalidade ou a resistência mecânica do componente analisado, os métodos semi-destrutivos causam algum dano no componente, os quais podem ser significativos ou não, podendo comprometer ou não a sua operação.

O método do furo profundo é um método semi-destrutivo usado para medir as TR em seções espessas (Figura 4). A técnica do furo profundo envolve a perfuração

de um furo guia ao longo do componente (Figura 4 - Etapa 1) e a medição com precisão do seu diâmetro antes (Figura 4 - Etapa 2) e depois (Figura 4 - Etapa 4) do alívio de tensão causado pela execução da trepanação (Figura 4 - Etapa 3) em torno do furo guia. As diferenças entre os diâmetros medidos antes e depois do alívio de tensões permitem que as TR originais sejam calculadas (GARZA; DAS; SHTERENLIKHT, 2018; JAMES; NEWBY; DOUBELL, 2014; SKOURAS *et al.*, 2013).

Figura 4 - Etapas do método do furo profundo.

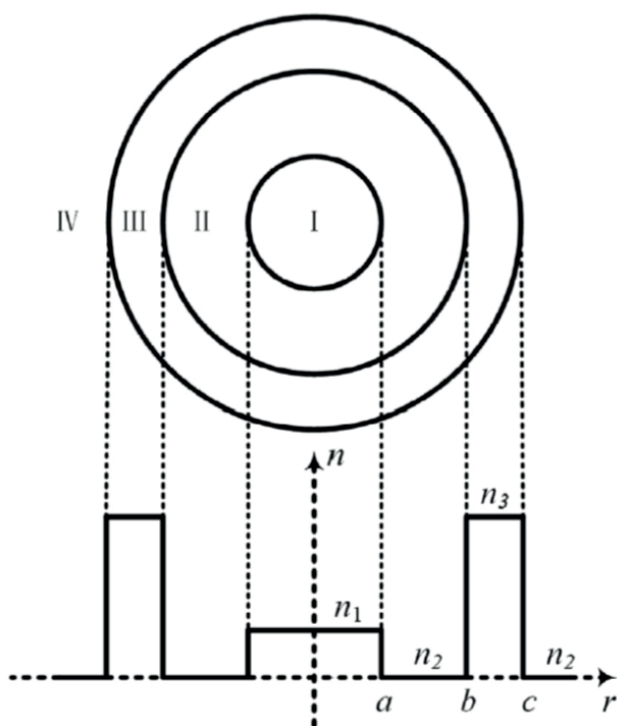


FONTE: Adaptado de Zheng et al. (2017)

A técnica do núcleo toroidal é uma técnica semi-destrutiva baseada no alívio de deformações e é usada para medir TR, uniformes ou não-uniformes, próximas

à superfície. Essa técnica envolve a realização de uma ranhura anular concêntrica (Figura 5 - Região II) em torno dos extensômetros situados na região central do componente (Figura 5 - Região I). Através dos alívios das deformações aferidos pelos extensômetros posicionados na superfície do núcleo central (Figura 5 - Região I), são determinadas as TR para cada incremento de profundidade (BOUFFIOUX; PESCI; BOMAN, 2016; GIRI; MAHAPATRA, 2017).

Figura 5 - Método do núcleo toroidal.

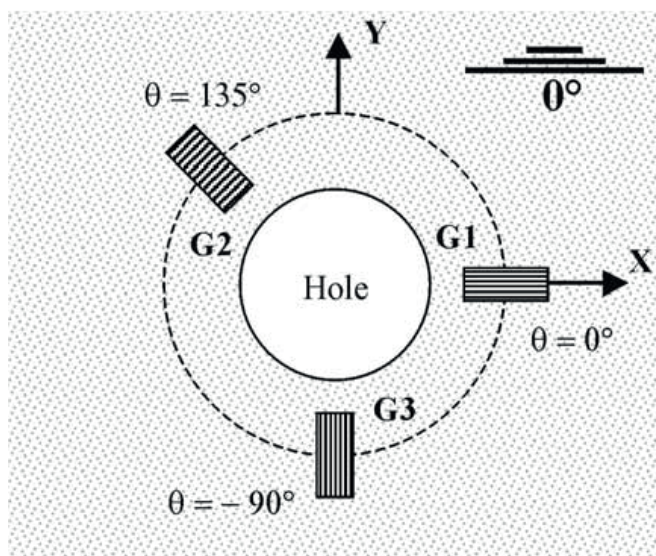


Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2015)

A técnica do furo cego consiste em medições das deformações, através de extensômetros, causadas pelo alívio das TR durante perfurações incrementais. Em outras palavras, uma porção do material que está sob TR é removida e, com isso, ocorre um alívio de tensões. A Figura 06 mostra uma roseta em um componente durante a execução da perfuração no seu centro. Essa técnica pode ser usada para calcular as TR uniformes ou não uniformes ao longo da profundidade do material.

Na prática, normalmente, as tensões variam com a profundidade (LOTHHAMMER; VIOTTI; ALBERTAZZI, 2017).

Figura 6 - Roseta utilizada no método do furo cego.



FONTE: Adaptado de Lin et al. (2014)

O método do furo cego permite medir tensões residuais em peças fundidas e em juntas soldadas, desde que haja uma preparação da amostra, a qual é submetida a operações de desbastes e de lixamentos. Esse método apresenta algumas limitações como: sensibilidade dos extensômetros com o aumento da profundidade; erros experimentais; aplicação apenas em materiais linear-elásticos e necessidade de que as TR não ultrapassem 60% da tensão de escoamento do material.

O método do furo cego é uma das técnicas experimentais mais utilizadas para a medição de tensões residuais por conta de sua praticidade, mobilidade do equipamento, possibilidade de aplicação em diversos materiais, facilidade em medir TR com precisão e, principalmente, devido a seu baixo custo de execução. Trata-se de um método semi-invasivo, padronizado pela norma ASTM E837, e é amplamente aplicado na engenharia mecânica, aeroespacial, entre outras áreas. O método baseia-se na ideia de que, ao relaxar as tensões residuais em uma pequena região do material, por meio de um furo, as deformações que ocorrem ao redor desse furo refletem o estado de tensões presente antes da perfuração (HOSSEINI; AKBARI; SHOKRIEH, 2019).

Os métodos propostos para medição de TR têm como base a utilização de uma roseta com três extensômetros para medições em três direções diferentes, combinando as equações de forma a encontrar as TR presentes. Com isso, estabeleceu-se as dimensões a serem usadas pelos extensômetros para medir TR em torno de um furo que impactou na origem das rosetas do Tipo A e Tipo B como consta na norma ASTM E 837-13 (2013).

Para a medição das deformações, existem diversos modelos de rosetas, dentre os quais se destaca a roseta com pares de extensômetros, desenvolvida para alcançar maior precisão nos resultados (SCHAJER; TOOTOONIAN, 1997). Essa configuração é conhecida como roseta do tipo C conforme a norma ASTM E 837-13 (2013). Apesar de apresentar uma melhor precisão, ela é menos utilizada que as rosetas do tipo A e do tipo B devido ao seu elevado custo (SCHAJER, 2007; SCHAJER; PRIME, 2006).

REFERÊNCIAS

ASTM E 837-13. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method. **ASTM E 837-13a**, West Conshohocken, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0837-13A.2>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MONELLI, B. D. Experimental parameter sensitivity analysis of residual stresses induced by deep rolling on 7075-T6 aluminium alloy. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 254, p. 175–186, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.008>

BOUFFIOUX, C.; PESCI, R.; BOMAN, R. Comparison of Residual Stresses on Long Rolled Profiles Measured by X-Ray Diffraction, Ring Core and the Sectioning Methods and Simulated by FE Method. **Thin-Walled Structures**, [S. l.], v. 104, p. 126–134, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.03.017>

GADALLAH, R.; TSUTSUMI, S.; HIRAOKA, K. Prediction of Residual Stresses Induced by Low Transformation Temperature Weld Wires and its Validation Using the Contour Method. **Marine Structures**, [S. l.], v. 44, p. 232–253, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.10.002>

GARCIA-GRANADA, A. A.; LACARAC, V. D.; SMITH, D. J. A New Procedure Based on Sachs Boring for Measuring Non-Axisymmetric Residual Stresses: Experimental Application. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 43, n. 12, p. 2753–2768, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00071-6)

GARZA, C.; DAS, R.; SHTERENLIKHT, A. Measurement of assembly stress in composite structures using the deep-hole drilling technique. **Composite Structures**, [S. l.], v. 202, n. December, p.

119–126, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.031>

GIRI, A.; MAHAPATRA, M. M. On the Measurement of Sub-Surface Residual Stresses in SS 304L Welds by Dry Ring Core Technique. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [S. l.], v. 106, p. 152–160, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.043>

HEMMESI, K.; FARAJIAN, M.; BOIN, M. Numerical Studies of Welding Residual Stresses in Tubular Joints and Experimental Validations by Means of X-Ray and Neutron Diffraction Analysis. **Materials & Design**, [S. l.], v. 126, p. 339–350, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.088>

HOLMBERG, J.; STEUWER, A.; STORMVINTER, A. Residual Stress State in an Induction Hardened Steel Bar Determined by Synchrotron and Neutron Diffraction Compared to Results from Lab-XRD. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 667, p. 199–207, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.075>

HOSSEINI, S. M.; AKBARI, S.; SHOKRIEH, M. M. Residual stress measurement through the thickness of ball grid array microelectronics packages using incremental hole drilling. **Microelectronics Reliability**, [S. l.], v. 102, n. June, p. 113473, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113473>

JAMES, M. N.; NEWBY, M.; DOUBELL, P. Weld Residual Stresses Near the Bimetallic Interface in Clad RPV Steel: A Comparison Between Deep-Hole Drilling and Neutron Diffraction Data. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 274, p. 56–65, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.042>

JONES, K. W.; BUSH, R. W. Investigation of Residual Stress Relaxation in Cold Expanded Holes by the Slitting Method. **Engineering Fracture Mechanics**, [S. l.], v. 179, p. 213–224, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.004>

LIN, B.; HE, K.; SHAN, D. Research on Measurement of Residual Stresses of Hemispherical Lithium Hydride by Blind-Hole Method. **Fusion Engineering and Design**, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 365–369, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.016>

LIN, J.; MA, N.; LEI, Y. Measurement of Residual Stress in Arc Welded Lap Joints by cosa X-Ray Diffraction Method. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 243, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.021>

LOTHHAMMER, L. R.; VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI, A. Residual Stress Measurements in Steel

Pipes using DSPI and the Hole-Drilling Technique. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 152, p. 46–55, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.008>

MEYER, K. *et al.* Influence of residual stress depth distribution on lifecycle behaviour of AISI 4140. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 87, p. 450–455, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.064>

MININ, S. I.; TROFIMOV, A. I.; TROFIMOV, M. A. Automated Ultrasonic System Residual Stresses in the Welded Joints of the Circulation Pipe NPP. **Nuclear Energy and Technology**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 236–239, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.11.002>

MOUSSAOUI, K. *et al.* Studying the Measurement by X-Ray Diffraction of Residual Stresses in Ti6Al4V Titanium Alloy. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 667, p. 340–348, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.130>

MURÁNSKY, O. *et al.* Evaluation of a Self-Equilibrium Cutting Strategy for the Contour Method of Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], 2016a Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.002>

MURÁNSKY, O. *et al.* Investigating Optimal Cutting Configurations for the Contour Method of Weld Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], 2016b Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.006>

OLIVEIRA, J. P. *et al.* Residual Stress Analysis in Laser Welded NiTi Sheets using Synchrotron X-Ray Diffraction. **Materials & Design**, [S. l.], v. 100, p. 180–187, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.137>

PAIVA, V. E. L. **Simulação de tensões residuais de soldagem e seu alívio por teste hidrostático**. 2015. - PUC-Rio, [S. l.], 2015.

PUYMBROECK, E. Van *et al.* Determination of residual weld stresses with the incremental hole-drilling method in tubular steel bridge joints. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 213, p. 651–661, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.061>

ROSSINI, N. S. *et al.* Methods of Measuring Residual Stresses in Components. **Materials and Design**, [S. l.], v. 35, p. 572–588, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>

SCHAJER, G. S. Hole-Drilling Residual Stress Profiling With Automated Smoothing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, [S. l.], v. 129, n. 3, p. 440–445, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2744416>

SCHAJER, G. S.; PRIME, M. B. Use of Inverse Solutions for Residual Stress Measurements. **Journal of Engineering Materials and Technology**, [S. l.], v. 128, n. 3, p. 375–382, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2204952>

SCHAJER, G. S.; TOOTOONIAN, M. A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements. **Experimental Mechanics**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 299–306, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02317422>

SEIFI, R.; SALIMI-MAJD, D. Effects of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method. **Mechanics of Materials**, [S. l.], v. 53, p. 72–79, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.05.009>

SEO, S. *et al.* Neutron Diffraction Residual Stress Analysis During Fatigue Crack Growth Retardation of Stainless Steel. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 104, p. 408–415, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.007>

SHOKRIEH, M. M.; JALILI, S. M.; KAMANGAR, M. A. An eigen-strain approach on the estimation of non-uniform residual stress distribution using incremental hole-drilling and slitting techniques. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 148, p. 383–392, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.035>

SKOURAS, A. *et al.* Residual Stress Measurements in a Ferritic Steel/In625 Superalloy Dissimilar Metal Weldment using Neutron Diffraction and Deep-Hole Drilling. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 101, p. 143–153, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.11.002>

STEGEMANN, R. *et al.* Residual Stress Characterization of Steel TIG Welds by Neutron Diffraction and by Residual Magnetic Stray Field Mappings. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [S. l.], v. 426, p. 580–587, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.102>

VALIORGUE, F. *et al.* Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 213, p. 623–629, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058>

WAN, Y. *et al.* Weld Residual Stresses in a Thick Plate Considering Back Chipping: Neutron Diffraction, Contour Method and Finite Element Simulation Study. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 699, p. 62–70, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.079>

WANG, C. *et al.* Surface Mechanical Property and Residual Stress of Peened Nickel-Aluminum Bronze Determined by In-Situ X-ray Diffraction. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 420, p. 28–33, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.108>

XU, Y.; BAO, R. Residual Stress Determination in Friction Stir Butt Welded Joints using a Digital Image Correlation-Aided Slitting Technique. **Chinese Journal of Aeronautics**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 1258–1269, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.11.003>

ZHAN, Y. *et al.* Experiment and Numerical Simulation for Laser Ultrasonic Measurement of Residual Stress. **Ultrasonics**, [S. l.], v. 73, p. 271–276, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.013>

ZHANG, Z. *et al.* Distribution of residual stress in an asymmetric T-section beam by stretch-bending. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 164, n. September, p. 105184, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105184>

ZHENG, G. *et al.* An Optimisation Study of the Modified Deep-Hole Drilling Technique using Finite Element Analyses Applied to a Stainless Steel Ring Welded Circular Disc. **International Journal of Solids and Structures**, [S. l.], v. 118–119, p. 1339–1351, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.008>

ZHU, M. *et al.* A New Designed Dual-Guided Ring-Core Fiber for OAM Mode Transmission. **Optical Fiber Technology**, [S. l.], v. 25, p. 58–63, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.016>



C A P Í T U L O 7

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CORTE DE VIDRO EM GEOMETRIAS NÃO CONVENCIONAIS PARA ARTESÃOS

Gabriel Moreli da Costa

Engenheiro Mecânico/UTFPR - Curitiba - PR - Brasil
UTFPR – Campus Curitiba, PR, Brasil

Carlos Cziulik, Ph.D.

Professor do Departamento de Mecânica/UTFPR - Curitiba - PR – Brasil
UTFPR – Campus Curitiba, PR, Brasil

INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, avançou-se mais sobre o entendimento do vidro e seu processamento do que em toda a história anterior para essa tecnologia. Hoje, os vidros estão presentes em praticamente todas as áreas da atividade humana: no ambiente doméstico, na ciência, na indústria e até na arte, adaptando-se às diversas finalidades para as quais são destinados. Em suas diversas aplicações, eles podem filtrar, conter, transmitir ou resistir a radiações eletromagnéticas em quase todas as faixas do espectro (AKERMAN, 2000).

O vidro possui aplicações técnicas distintas e diversas, atuando no campo da ótica e sinalização, nas fibras de isolantes térmicos e acústicos, no reforço estrutural de materiais compósitos e está cada vez mais presente nos cabos de fibra óptica.

Apesar do uso do vidro em aplicações de expressivo nível técnico ele continua sendo amplamente utilizado no campo do artesanato. Isso se deve à relativa versatilidade para se trabalhar com o material, seu baixo custo e pelo fato das peças artísticas produzidas a partir do vidro possuírem alto valor de mercado, resultando em bons retornos financeiros.

A produção manual de objetos, geralmente utilizando matérias-primas naturais, é conhecida como artesanato. Com a crescente mecanização dos processos, o artesão passou a ser visto como aquele que cria peças que refletem a cultura popular. Esses objetos, ao representarem e reforçarem os costumes, características, arte e história de um povo ou comunidade, conferem ao artesão um papel fundamental na sociedade (SEBRAE, 2021).

A artesã consultada para realização do trabalho utiliza o vidro como matéria-prima para confecção de pingentes de bijuterias, como colares, brincos e pulseiras. Para isso, retalhos de vidro são coletados em vidraçarias parceiras, recortados nas geometrias pretendidas, pintados e fundidos em alta temperatura, resultando na peça final (ver figura 1).

Figura 1 – Exemplos de bijuterias de vidro



Fonte: Autoria própria (2024)

Sabendo das limitações de processos impostos a artesãos que utilizam o vidro como matéria-prima, o trabalho a seguir viu como oportunidade o desenvolvimento de um dispositivo que auxilie no processo de corte do vidro em geometrias não convencionais, uma vez que esta atividade é de grande dificuldade e risco empregado. Além disso, na maioria das vezes, o processo de corte de vidro oferece baixa produtividade, baixa qualidade de acabamento e limitação quanto as geometrias de corte possíveis para produção.

A partir da apresentação da oportunidade, o trabalho teve como objetivo desenvolver o projeto e protótipo de um dispositivo para corte de vidro em geometrias não convencionais para artesãos, resultando em melhorias de segurança, versatilidade, produtividade e qualidade.

Para que esses objetivos fossem atingidos, as etapas fundamentais abaixo foram realizadas:

- (1) Visita a campo para compreensão dos processos produtivos;
- (2) Caracterização e mapeamento detalhado do processo de corte atual;
- (3) Mapeamento técnico do processo de corte de vidro em geral;
- (4) Validação de esforços necessários para corte atual de vidro.

APLICAÇÃO DO VIDRO NO ARTESANATO

Artesanato

Segundo a Comissão Consultiva do Artesanato (apud LIMA e AZEVEDO, 1982) a atividade artesanal pode ser caracterizada com base na matéria-prima utilizada, no processo de produção e nas condições de trabalho. Em relação à matéria-prima, ela pode ser natural, semielaborada, elaborada ou proveniente de sobras de outros produtos. Cada tipo de material principal dá origem a práticas específicas, resultando em diferentes tipologias de produtos. Entre as matérias-primas mais utilizadas estão o barro, fios e tecidos, metais, pedras e vidros, entre outros.

O processo de produção deve ser predominantemente manual, permitindo o uso de ferramentas ou máquinas, desde que estas não substituam a criatividade e a habilidade do artesão. Além disso, a produção pode seguir um padrão, mas, mesmo quando há repetição, cada peça mantém sua individualidade devido à natureza artesanal do trabalho.

O artesanato desempenha um papel fundamental na economia criativa do Brasil, conectando tradição e desenvolvimento econômico. Com um setor que movimenta cerca de R\$ 50 bilhões anuais e representa 3% do PIB, a atividade artesanal é fonte de renda para milhares de brasileiros (MINISTÉRIO DA CULTURA, 2024).

Vidro

Os materiais vítreos apresentam uma característica interessante: seja qual for a necessidade, sempre haverá aplicações para os mais diferentes contextos. Dessa maneira, muitas vezes os vidros passam completamente despercebidos, uma vez que, naturalmente, fazem parte de nosso cotidiano. Muito desta situação vem do fato de que os vidros são materiais conhecidos há muito tempo (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

Vestir Artesanato

Dentro dos diversos campos do artesanato, existe o grupo de artesãos que elaboram produtos que podem ser vestidos, mais especificamente, o de colares, brincos e pulseiras.

As pessoas vestem artesanato diversos motivos. Em primeiro lugar, o artesanato muitas vezes reflete a identidade cultural de uma comunidade ou região específica. Ao usar roupas ou acessórios artesanais, as pessoas podem expressar orgulho e conexão com suas raízes culturais e étnicas. Além disso, o fato de os produtos serem frequentemente produzidos à mão confere a elas um senso de autenticidade e qualidade artesanal. Isso pode ser valorizado por aqueles que apreciam o trabalho manual e as habilidades dos artesãos.

Processo de corte do vidro

Em um modelo de negócio, a artesã Juliana Moreli, 43 anos, produz bijuterias (ver figura 2) a partir de pingentes de vidro. A matéria prima é coletada a partir de retalhos de vidro que seriam descartados por um fabricante de molduras de quadros e porta-retratos. A partir daí, todo o processamento da matéria prima até a confecção do pingente de vidro é artesanalmente realizado por ela.

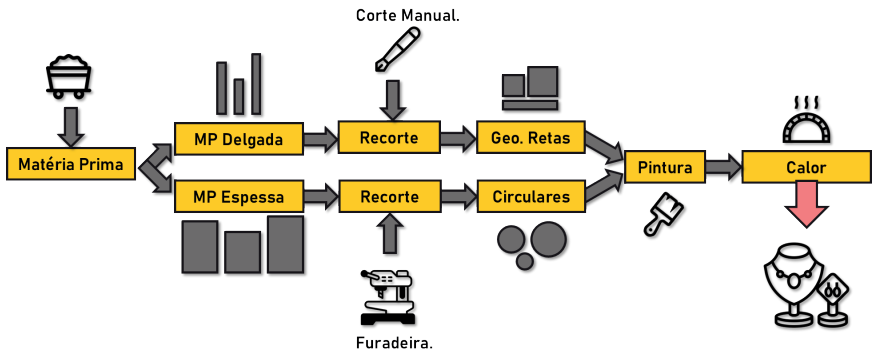
Figura 2 – Artesã e suas obras em feira de rua



Fonte: Autoria própria (2024)

O processo ao todo conta com as etapas de coleta da matéria prima e que pode tomar duas geometrias diferentes, circular ou de faces retas. Para a produção de peças de vidro circular é utilizada uma furadeira de bancada e brocas de perfurações de diamante. Enquanto para geometrias de faces retas é utilizada ferramenta de rodízio padrão para o corte do vidro, (ver figura 3).

Figura 3 – Esquema de produção das bijuterias



Fonte: Autoria própria (2024)

Após o corte, as peças são levadas à pintura, utilizando-se tinta específica para o trabalho. Após pintura e secagem, as peças vão ao forno durante oito minutos a uma temperatura de 850°C e permanecem sob resfriamento lento. A partir desse ponto, os pingentes estão prontos para serem montados em cordões ou apliques de metais para finalização da confecção das bijuterias, conforme figura 4.

Figura 4 – Pingentes de vidro fabricados artesanalmente

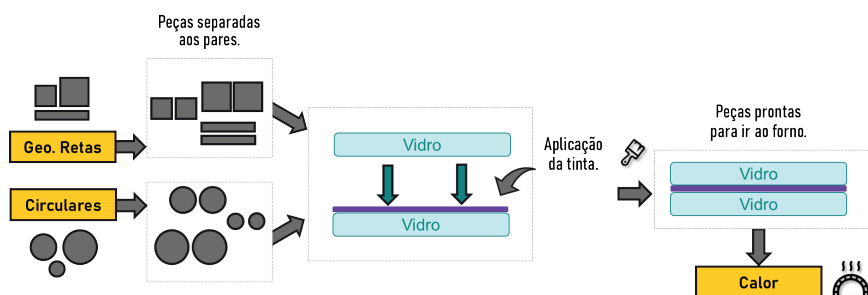


Fonte: Autoria própria (2024)

Nesse momento, é importante ressaltar o padrão geométrico adotado na produção atual dos pingentes, sendo unicamente formatos circulares ou semicirculares, quadrados e retangulares. Isso se deve aos métodos de corte utilizados atualmente e que serão devidamente explorados posteriormente.

Outro fato importante no modo de produção que é impactado diretamente pelo processo de corte e sua qualidade está na etapa seguinte, a de pintura. O pingente é composto por duas placas de vidro que devem ter dimensões muito similares. A tinta é adicionada a uma das placas de vidro recortada e a outra placa é posicionada em conjunto. A partir desse ponto, as peças estão prontas para receber calor, fundindo-se e tornando-se uma peça única, como é mostrado na figura 5.

Figura 5 – Esquema do processo de pintura dos pingentes



Fonte: Autoria própria (2024)

Benchmarking

A partir da vasta aplicação do vidro encontrada atualmente é possível encontrar uma quantidade considerável de dispositivos específicos para o corte desse material. Eles variam desde dispositivos extremamente simples, de operação manual e baixíssimo custo, até máquinas com comando numérico computadorizado (CNC), alto índice de automatização e produção. Um fato relevante que foi identificado a partir do benchmarking é a não existência, quando se trata do mercado brasileiro, de um dispositivo de corte “intermediário” entre máquinas de grande escala de produção e os instrumentos de corte comuns e manuais.

Levantamento das necessidades do cliente

Considerando que todo produto é projetado para ser utilizado por ou para alguém, as propostas metodológicas recomendam que sejam tomados cuidados especiais em termos de dados e que estes estejam alinhados com as necessidades

do segmento-alvo deste produto. Estabelecido o público-alvo, o passo crítico para o sucesso do produto é a identificação de suas necessidades. Um questionário com perguntas pertinentes aos processos empregados atualmente para a fabricação de peças de vidro e questões relacionadas aos seus requisitos e necessidades foi desenvolvido e aplicado à principal potencial cliente e usuária do produto a ser desenvolvido. Com a realização do questionário e entrevista foi possível identificar de maneira clara as necessidades do usuário.

A partir das respostas coletadas de um questionário e da análise realizada do mapeamento de processos adotada, determinou-se as necessidades dos clientes (ver quadro 1).

Quadro 1 – Excerto das necessidades dos clientes levantadas

	Necessidade dos clientes	Valor do Consumidor	Fonte
1	Possibilidade de corte de vidro em geometrias não convencionais.	8	Questionário
2	Possibilidade de corte de vidro em geometrias convencionais.	8	Análise de Processo
3	Eliminação de processos de lixamento posterior ao corte.	10	Questionário
4	Corte de matéria prima com dimensões não padronizadas.	8	Entrevista
5	Dimensões gerais dentro de 500x500x500mm.	7	Questionário
6	Baixo ruído.	8	Questionário
7	Corte de peças em tamanho mínimo de 7x7mm.	9	Entrevista
8	Corte de peças em tamanho máximo de 400x400mm.	6	Entrevista
9	Facilidade de limpeza.	8	Questionário
10	Facilidade de transporte.	6	Questionário
11	Segurança em relação aos estilhaços.	10	Questionário
12	Baixo Custo.	8	Questionário

Fonte: Autoria própria (2024)

A partir do levantamento das necessidades dos clientes faz-se necessário transformá-las, a partir do viés técnico e pragmático da engenharia, em requisitos de produto. A especificação do produto (ver quadro 2) é resultado do levantamento das necessidades dos clientes e dos requisitos do produto.

Quadro 2 – Excerto das especificações do produto

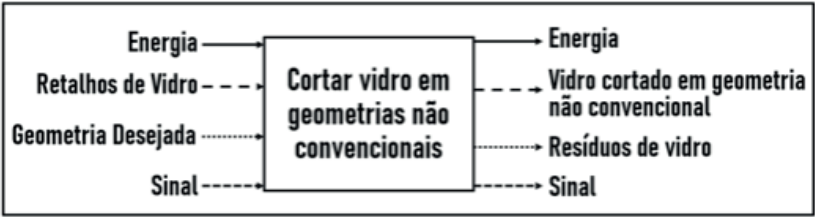
	Requisitos do Produto	Objetivo ou Meta	Unidade	Tendência	Sensor	Saídas Indesejáveis
1	Tempo para seleção e corte de uma peça em geometria não convencional.	<=10	segundos	↓	cronômetro	Alta complexidade de operação e baixa produtividade.
2	Tempo para seleção e corte de uma peça em geometria convencional.	<=10	segundos	↓	cronômetro	Alta complexidade de operação e baixa produtividade.
3	Número de processos de acabamento posterior ao corte.	0	unidades	↓	contagem	Desperdício de tempo com processos de retrabalho das peças.
4	Número de operações necessárias para fixação da matéria-prima.	<=5	unidades	↓	contagem	Impossibilidade de utilização de retalhos de vidro como matéria-prima.
5	Largura.	<=500	mm	↓	trena	Impossibilidade de posicionamento em local adequado.
6	Comprimento.	<=500	mm	↓	trena	Impossibilidade de posicionamento em local adequado.
7	Altura.	<=500	mm	↓	trena	Impossibilidade de posicionamento em local adequado.
8	Controle de ruído.	<=50	dB	↓	decibelímetro	Impossibilidade de utilização local desejado.
9	Tamanho mínimo de peça possível.	<=50	mm²	↓	trena	Limitação para a produção de peças nos tamanhos desejáveis.
10	Tamanho máximo de peça possível.	>=90000	mm²	↑	trena	Limitação para a produção de peças nos tamanhos desejáveis.

Fonte: Autoria própria (2024)

PROJETO CONCEITUAL

A partir da definição das especificações do produto nas etapas anteriores, o projeto conceitual visou criar alternativas de concepções do produto que atendam a essas demandas, respeitando as limitações e restrições impostas. A escolha da melhor concepção, realizada a partir da matriz de avaliação relativa, buscou garantir que o produto cumpra sua função global de maneira eficiente, servindo de alicerce para o desenvolvimento do projeto preliminar.

Figura 6 - Função global do produto



Fonte: Autoria própria (2025)

Matriz de seleção do princípio de solução

Antes da definição e desenvolvimento da estrutura de funções do produto, viu-se necessária a definição do princípio de solução adotado para o corte do vidro. Ou seja, qual seria o método utilizado para cortar o vidro, dentre os quais estão a roldana de metal duro, jato d'água, fresamento, laser ou fio diamantado.

A partir dessa seleção foram realizados testes dos princípios de solução para cada um dos métodos, com o objetivo de avaliar o desempenho, as limitações e principais características para cada um deles.

Com base nos dados obtidos a partir dos testes, foi possível elaborar um quadro comparativo entre os diferentes métodos de solução (ver quadro 3). A avaliação considerou onze critérios com diferentes pesos, atribuindo pontuações de um a cinco para cada método de corte, onde um representa o pior desempenho e cinco, o melhor.

Quadro 3 - Matriz de seleção do princípio de solução

Critérios de Seleção	Marcador Vídea	Laser	Fresa	Jato D'água	Serra de fio	Peso	Vencedor
Velocidade de corte	8,3mm/s	0,16mm/s	1,95mm/s	N/A	0,035mm/s	-	Vídea
Investimento Inicial (Estimativa)	R\$ 150,00	R\$ 1.000,00	R\$ 300,00	R\$ 1.500,00	R\$ 120,00	-	Vídea
Risco de Segurança	3	3	3	4	3	5	Empate
Complexidade Manutenção	5	2	5	2	3	4	Vídea
Complexidade Projeto	3	3	3	2	2	3	Empate
Custo/Complexidade de operação	4	3	3	4	3	3	Vídea
Nível de Ruído	5	5	2	2	3	2	Vídea
Flexibilidade Geométrica	2	4	5	5	4	5	Jato
Portabilidade	4	4	4	2	3	3	Vídea
Qualidade do Corte	3	4	4	5	3	3	Jato
Processo secundário	Sim	Sim	Não	Não	Não	-	
Total	97	95	106	96	86		



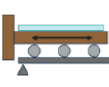
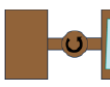
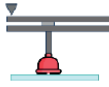

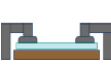
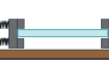
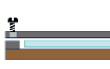
Fonte: Autoria própria (2024)

A partir dessa matriz, o fresamento foi definido como método de corte com maior potencial de sucesso na aplicação no dispositivo.

Estrutura de funções

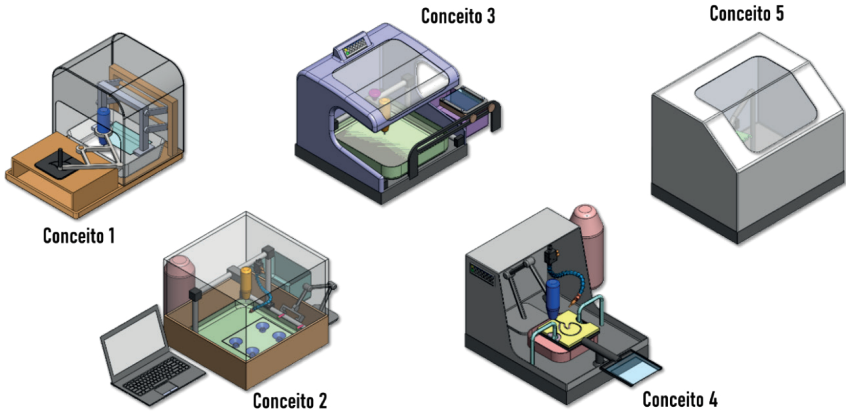
A partir da seleção do método de corte a ser utilizado, foi decomposta a função global em uma lista de subfunções de nível inferior, com o objetivo de simplificar a visualização do processo e aprimorar a concepção do produto. Cada subfunção elementar apresentada no mapa de funções possui uma variedade de alternativas de solução e que podem ser combinadas para a geração de diversas concepções do produto. Para essa construção foi utilizada a ferramenta matriz morfológica conforme Pahl et al. (2005), ver figura 7.

Figura 7 – Excerto da matriz morfológica

		Soluções				
		A	B	C	D	E
Função Global	Cortar vidro em geometrias não convencionais					
F1	Posicionar retalho de vidro na posição para corte	Manual 	Braço articulado 	Gaveta com guia 	Braços rotativos 	Trilho com ventosa 
F1.2	Fixar retalho para corte	Ventosas 	Apoios Superiores 	Presilhas Laterais 	Quadro Superior 	

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 8 – Concepções criadas



Fonte: Autoria própria (2024)

Método para a geração das concepções

A partir de diferentes combinações das soluções apresentadas para cada subfunção na matriz morfológica, foram geradas cinco concepções de produtos e são dispostas na figura 10 a seguir.

Para a seleção da concepção com maior potencial, utilizou-se a matriz de avaliação relativa (ver quadro 4). A concepção de número 3 foi escolhida como referência para comparação com as outras soluções propostas.

A avaliação foi realizada com base nas especificações do produto passíveis de comparação, atribuindo-se um sinal positivo (+) caso a solução comparada fosse considerada superior à referência, um sinal negativo (-) caso fosse inferior, e um sinal de igualdade (=) caso apresentasse o mesmo desempenho. A cada comparação, os sinais positivos e negativos foram somados, e a solução com o maior valor absoluto da diferença entre os sinais foi selecionada. Após as análises, verificou-se um empate entre as concepções 1 e 3. A especificação de segurança foi adotada como critério de desempate, resultando na seleção da concepção 1 como a de maior potencial.

Quadro 4 - Matriz de avaliação relativa

Especificações de Avaliação	Tendência	Concepções				
		1	2	3	4	5
Tempo para seleção e corte de uma peça em geometria não convencional	↓	=	=	Referência	=	=
Número de operações necessárias para fixação da matéria prima	↓	+	-		-	-
Nível ruído	↓	=	+		=	+
Tempo para limpeza	↓	=	-		-	-
Massa total do conjunto	↓	=	-		-	-
Nível de Segurança	↑	+	+		=	+
Custo do dispositivo	↓	=	-		=	-
Custos de manutenções	↓	=	-		-	-
Número de operações para selecionar uma geometria do corte	↓	-	-		-	-
Número de operações para realizar o corte	↓	=	+		=	=
Número de processos para criação de uma nova geometria não convencional	↓	-	-		-	-
Tempo de processo para criação de uma nova geometria não convencional	↓	-	-		-	-
Capacidade de produção	↑	+	+		+	+
Número de processos para a preparação do dispositivo para o corte	↓	-	=		-	-
Repetitividade geométrica das peças	↑	+	+		+	+
$\Sigma (+) - \Sigma (-)$		0	-3	0	-6	-5
Classificação da concepção		1º	3º	2º	5º	4º

Fonte: Autoria própria (2025)

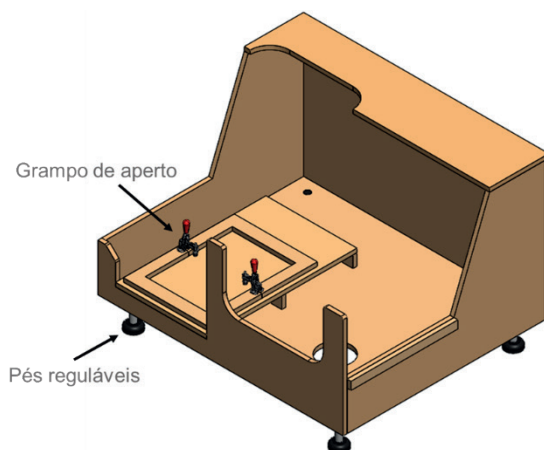
PROJETO DETALHADO E DIMENSIONAMENTO

Após a seleção da concepção de maior potencial, inicia-se a fase de dimensionamento de todos os componentes do projeto. Para o desenvolvimento de todas as peças, foi utilizado o software de modelagem CAD SolidWorks. A construção de um modelo matemático permitiu a análise de diversas alternativas e a identificação de riscos, diminuindo o número de erros e falhas, possibilitando maior precisão no desenvolvimento do projeto.

Base

A base do dispositivo (ver figura 9) tem como principal função o posicionamento de todos os componentes. É majoritariamente construído em material MDF devido sua versatilidade, resistência mecânica e baixo custo.

Figura 9 - Base do dispositivo

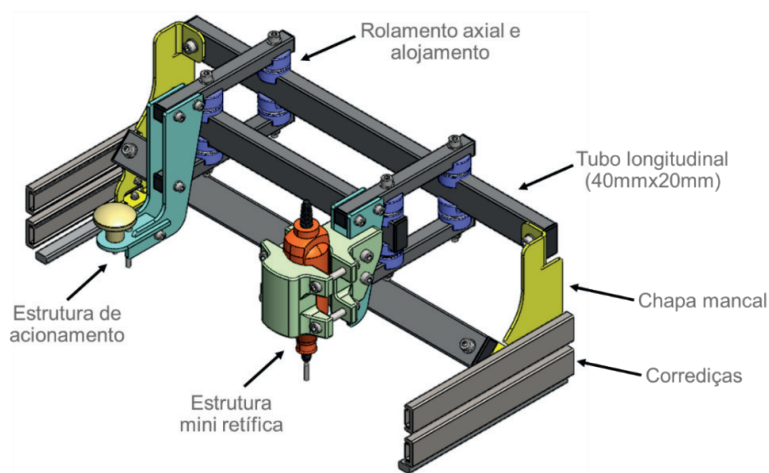


Fonte: Autoria própria (2025)

Mecanismo de movimentação longitudinal

A movimentação longitudinal da ferramenta ocorre a partir de um mecanismo de quatro barras fixado em guias lineares (ver figura 10). O sistema é construído a partir de tubos de aço de 40mmx20mm e 20mmx20mm, rolamentos e seus alojamentos, chapas de aço, corrediças, porcas e parafusos.

Figura 10 - Mecanismo de movimentação longitudinal

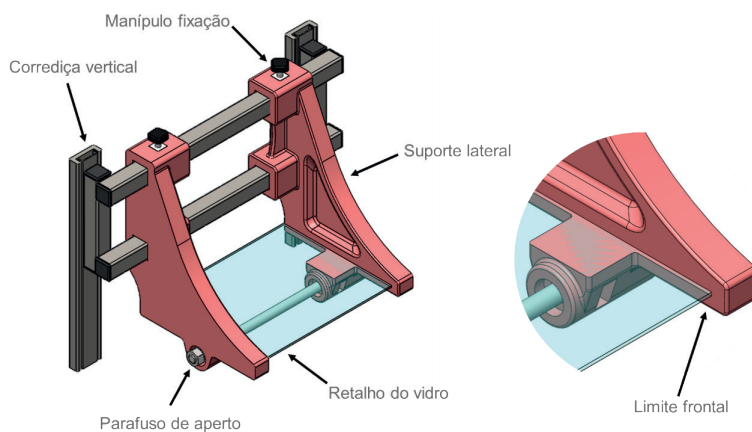


Fonte: Autoria própria (2025)

Suporte dos retalhos de vidros

O suporte dos retalhos tem função de fixar de maneira segura retalhos de vidro de diferentes dimensões, conforme figura 11.

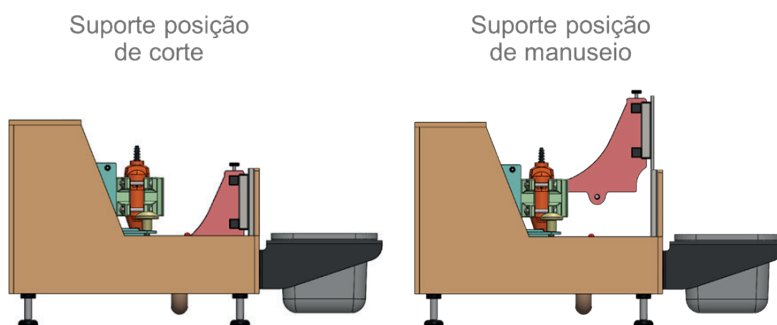
Figura 11 - Suporte dos retalhos de vidros



Fonte: Autoria própria (2025)

O sistema possui um parafuso que aproxima e afasta as placas que fixam os retalhos conforme é afrouxado ou apertado (ver figura 11). Além disso, o conjunto possui uma corrediça disposta na posição vertical, permitindo a elevação do conjunto, retirando-o da imersão em fluido de corte para manuseio (ver figura 12).

Figura 12 - Sistema de elevação do suporte

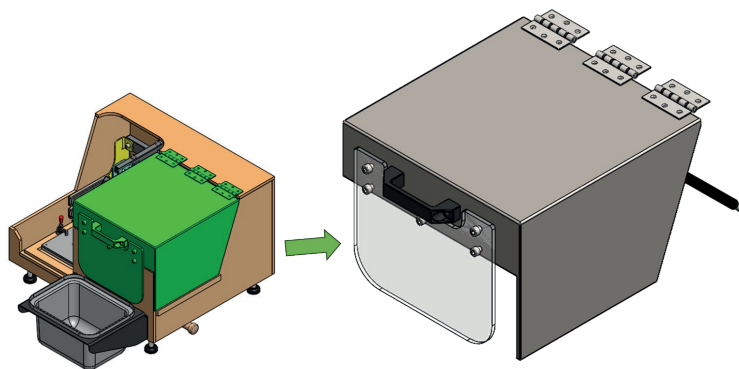


Fonte: Autoria própria (2025)

Proteções

As proteções têm como função isolar o ambiente de corte do operador, evitando que possíveis estilhaços possam atingi-lo. Além disso, as proteções devem permitir a visualização para inspeção do processo e deve ser de fácil manuseio para fechamento e abertura. Ela é composta de uma estrutura de tubos de aço, uma chapa metálica dobrada, um visor frontal de acrílico, um puxador e uma mola a gás (conforme figura 13).

Figura 13 - Proteções

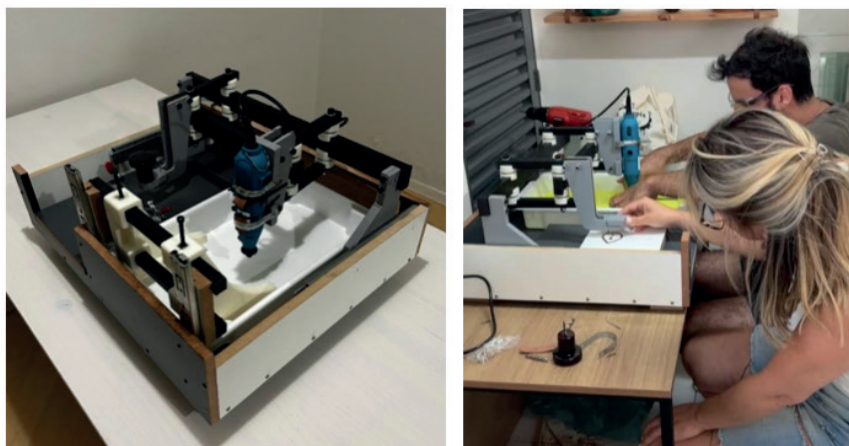


Fonte: Autoria própria (2025)

CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E TESTES

Com a conclusão da fase de dimensionamento detalhado do produto, iniciou-se a construção de um protótipo para validação. Para minimizar custos, riscos e o tempo de fabricação, o primeiro protótipo do dispositivo foi desenvolvido em uma versão simplificada do projeto final.

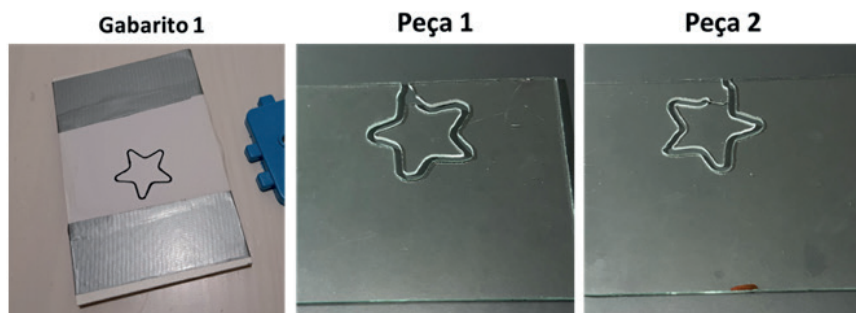
Figura 14 - Protótipo finalizado e testes



Fonte: Autoria própria (2025)

Nos testes preliminares do equipamento foram encontradas folgas no sistema de guias lineares e falta de rigidez do sistema de mancais fabricados em MDF, resultando no corte de uma geometria não correspondente à desejada. Medidas foram adotadas ao protótipo para a resolução das falhas de construção. A partir dessas melhorias iniciou-se uma nova bateria de testes e os resultados encontrados foram muito satisfatórios (Ver figura 15).

Figura 15 – Excerto dos resultados finais



Fonte: Autoria própria (2025)

CONCLUSÕES

A produção artesanal de pingentes de vidro para bijuterias apresenta grande potencial de crescimento no mercado. No entanto, os métodos tradicionais para fabricação dos pingentes não apenas representavam riscos à saúde e à segurança, mas também limitavam as possibilidades geométricas das peças. Essa limitação evidenciou uma oportunidade para o trabalho.

Com pesquisas extensas sobre o tema, sobre o mercado, avaliação do processo de corte adotado anteriormente, o levantamento das necessidades dos clientes, definição das especificações do produto e dos testes de princípios de solução para o corte de vidro, construiu-se uma base de informação sólida para o início do desenvolvimento do produto.

Com o desenvolvimento e análise conceitual do produto, definiu-se com segurança a solução que seria adotada como de maior potencial. O projeto dimensionamento e detalhado do produto foi essencial para tornar as funções do produto factíveis. Na sequência, a construção de um protótipo simplificado do produto, acompanhado de seus testes, melhorias adotadas e resultados alcançados, evidenciam que os objetivos do trabalho foram atingidos.

Durante a declaração da oportunidade encontrada para o trabalho, foram relatados problemas de segurança, produtividade e limitações geométricas do processo de corte de vidro. Dessa forma, concluindo o presente trabalho, pode-se afirmar que o produto desenvolvido reduziu os riscos de segurança presentes no processo e permitiu o corte de vidro em geometrias não convencionais. Em relação à produtividade, são necessários testes comparativos para comprovação da melhoria. De maneira geral, vê-se como atingidos de maneira satisfatória, os objetivos propostos para o trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho gostariam de manifestar seu agradecimento à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial ao Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica (DAMEC), que proporcionaram um ambiente propício ao desenvolvimento do conhecimento e da inovação.

Agradecemos também, o apoio financeiro da UTFPR/PROREC através do Edital 03/2024, que incentiva Trabalhos de Conclusão de Curso com enfoque em inovação.

À artesã Juliana Moreli, pela valiosa parceria ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo com informações detalhadas sobre seus processos, as quais foram fundamentais para a concretização deste projeto.

Ao professor Celso Salamon, pelo apoio contínuo em seu laboratório e pela generosidade de quem não poupou esforços para oferecer sua ajuda e compartilhar seu vasto conhecimento.

REFERÊNCIAS

AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Alfenas: Centro Técnico de Elaboração do Vidro, 2000. Disponível em: https://www.unifalmg.edu.br/ppgcem/wpcontent/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut_Prop_Vidro-Saint-Gobain2000.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024

SEBRAE (org.). **Desafios e oportunidades para artesãos em 2021**. 2021. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/desafios-eoportunidades-para-artesaos-em2021,e2a49f266efd7710VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acesso em: 16 abr. 2024.

LIMA, A. A. de M.; AZEVEDO, I. M. **O Artesanato nordestino: características e problemática atual**. Fortaleza: BNB. ETENE, 1982.

MINISTÉRIO DA CULTURA. **MinC destaca a importância do protagonismo dos artesãos para a cultura brasileira**. Disponível em: <https://www.gov.br/cultura/ptbr/assuntos/noticias/minc-destaca-importancia-do-protagonismo-dos-artesaos-para-a-cultura-brasileira>. Acesso em: 15 dez. 2024

ALVES, O.; GIMENEZ, I.; MAZALI, Í. **Vidros. Revista química nova na escola**, edição especial, p. 9-20, 2001.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos - Métodos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.



C A P Í T U L O 8

UNCERTAINTY QUANTIFICATION IN BEAM BENDING THEORIES BY STOCHASTIC SPECTRAL FINITE ELEMENT METHOD

Roberto Mauro Felix Squarcio

Postgraduate Program in Mechanical Engineering – Cornélio Procópio/Ponta Grossa (PPGEM), Federal University of Technology – Parana – Ponta Grossa

Rodrigo Villaca Santos

Department of Mechanical Engineering (DAMEC), Federal University of Technology – Parana – Ponta Grossa

ABSTRACT: In stochastic structural mechanics, it is possible to associate uncertainties with material, geometric properties and external loading, while estimates response may be present in fields of displacement, stress, strain, frequency, and phase differences, among others. At work the stochastic formulation of elliptic differential equations associated with the beam bending problem is present. The propagation of uncertainty is explored from the perspective of the numerical methodology of asymptotic complexity Neumann-Monte Carlo (NMC). The variational solution is studied for the classical theory of Euler-Bernoulli and the higher order theories of Timoshenko and Levinson-Bickford using from the stochastic version of Galerkin's method. Numerical results present the expected value and variance of the stochastic displacement field for the three beam theories. Comments are present for the cases where the initial variability is associated with the modulus of elasticity and height beams, not simultaneously and simultaneously.

KEYWORDS: Stochastic Structural Mechanics, Bending Beam Theory, Uncertainty Quantification, Neumann-Monte Carlo methodology.

1. INTRODUCTION

One of the main concerns in dealing with the stochastic problem is to portray the irregular disparity of the mechanical properties so that an adequate formulation can be established. The model must represent the uncertainties of the random variables in a way that the response contain relevant information about the stochastic process.

The numerical results depend on the adopted model and, usually contain two terms: the expected value and the variability of the responses. The mathematical model identifies a set of relationships generally based on principles, conservation laws, and physical magnitude metrics related through differential equations.

In this regard, the Galerkin method is used to obtain approximate numerical solutions based on the lemma of Doob-Dynkin, Rao and Swift, 2006 ensure that to obtain the space of the approximate numerical solutions for all the realizations of the stochastic process displacement truncating a total system in the approximation space. In this method, the coefficients of the equation system are to be determined by minimizing the projection residue generated by the approximation function of the problem. Therefore by replacing the numerical approximation of the sampling function of the stochastic displacement process, a linear system of algebraic equations is generated.

The application of the Neumann series in stochastic problems arises from the works of Shinozuka, 1987 and Yamazaki et al. 1988. In these works, numerical results are obtained to estimate the uncertainty in the stress and strain fields for the beam bending problem. The Neumann-Monte Carlo methodology combines the Monte Carlo simulation methods and the Neumann series, with the objective of obtaining the results of the realizations of the stochastic process. The series acts to obtain the approximation of the inverse of the matrix of random coefficients originated by the system of equations of the variational formulation.

The theories of bending stationary or vibrational beams are of fundamental importance in the solution of other structural elements, such as plates, frames, and membranes. The classical deterministic theory of Euler-Bernoulli beam bending, in terms of the elasticity equations, can be found in Reddy, 1984 taking into account the partial differential equation of motion, the external loading, and the boundary conditions.

In Timoshenko, 1921, and Timoshenko, 1922 the author adds the effect of shear and develops the equation of motion from principles of equilibrium. An asymptotic expansion procedure is presented in Goodie e Timoshenko, 1951, which shows second-order effects on beam curvature. However, the formulation requires the arbitrary insertion of the shear coefficient and the boundary conditions of the numerical solution require the estimation of the curvature of the displacement field.

The theory presented by Levinson e Stephens, 1979 includes shear deformation of the cross-section using a high-order approximation function that satisfies the condition of free shear on the side surfaces. Bickford, 1981 presents a variational formulation of the theory and develops the expressions of the primary and secondary variables associated with the boundary conditions. Heyliger and Reddy, 1988

derive equations of motion for a beam from Levinson's kinematic assumptions and Hamilton's principle. Karttunen and Hertezen, 2015 employ the principle of virtual displacements with the addition of external virtual work on the lateral surfaces of the beam and numerical examples are presented using the Finite Element method. Stationary and dynamic solutions to the high-order beam bending problem can be found in Reddy, 2010. Squarcio and Ávila, 2022 apply the Neumann-Monte Carlo methodology to the stationary beam bending problem based on the high-order theory of Levinson-Bickford.

The layout of a reminder of this paper is as follows. The uncertainty propagation analysis is presented for the Neumann-Monte Carlo (NMC) methodology. The following section is a technical and pragmatic review of the stochastic problem of elastic and stationary beam bending with numerical solutions obtained from three theories: Euler-Bernoulli, Timoshenko e Levinson-Bickford. The numerical simulations discuss the results for the statistical moments of the displacement field when the uncertainty is associated with stiffness matrix. The results obtained by SSFEM, for each of the beam theories, are compared.

2. STOCHASTIC FORMULATION OF ELLIPTIC DIFFERENTIAL EQUATIONS

This section is presented the problem of random bending beam through random stiffness coefficient or loading. The problem is formulated from the point of view of Monte Carlo simulation-based methods on the Hilbert space with functions in the domain $D \subset \mathbb{R}^n$ and random variables defined in $(\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P})$ such that, $\omega \in \Omega$, were Ω the sample space, \mathcal{F} σ -álgebra, and $\mathcal{P}: \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}^+$ a Probability with values in $[0,1]$ such that $\mathcal{P}(A) \geq 0$ and $\mathcal{P}(\Omega) = 1$, $\forall A \in \mathcal{F}$.

Considering the problem of sample stochastic bending is presented, for the k-th structural samples, a finite set of random variables $\xi_k(\omega)$, respectively, for the stiffness and loading coefficient. The uncertainty model is mapped by spatial functions $\Omega \rightarrow \mathbb{R}$ denoted by $\Xi_k = \Xi(\xi_k(\omega))$ (Arnold, 1973). The family $\Xi_k = \{\xi(\omega_k) \in \mathbb{I}\} \subset \mathbb{R}^n$ is the set of random vectors, where $I \in (\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P})$, a non-empty set of indices and Ξ_k the parameter and state spaces, respectively.

In this space, the estimators, in general, are represented by Lebesgue integrals, and the inner product is defined in $H \times \Omega$, that this, $(h_i(x), h_j(x)) = \int_{\Omega} h_i(x) \cdot h_j(x) dx$, where h is the orthogonal approximation functions, if and only if, $(h_i(x), h_j(x)) = 0$.

From the point of view of stochastic mechanics, most systems involve a differential equation with random coefficients. These coefficients represent the properties of the problem under investigation. Thus, the stochastic differential equations are written by,

$$\Lambda u = f, \quad (1)$$

where Λ is stochastic differential operator, u is a random response and f the random loading.

Whereas $\Lambda(x, \Xi_k)$ is positive definite and uniformly bounded in probability, $f(x, \Xi_k)$ bounded and with finite variance then, for the set of n structural samples $\{\Lambda(\cdot, \Xi_k)\}_{k=1}^n$ and $\{f(\cdot, \Xi_k)\}_{k=1}^n$ the initial hypotheses are:

$$(H1): \exists \underline{\Lambda}, \bar{\Lambda} \in \mathbb{R}^+: P\left(\Xi_k \in \Omega / \Lambda(x, \Xi_k) \in [\underline{\Lambda}, \bar{\Lambda}], \forall x \in (0, l)\right) = 1,$$

$$(H2): \Lambda(\cdot, \Xi_k) \in H^2(0, l), \quad \forall k \in \{1, \dots, n_s\},$$

$$(H3): f(\cdot, \Xi_k) \in L^2(0, l), \quad \forall k \in \{1, \dots, n_s\}.$$

Another way of writing the stochastic differential equation, Eq. (1), considering the randomness in the differential operator is given by,

$$(L(x) + \Pi(x, \omega))u(x, \omega) = f(x, \omega), \quad (2)$$

where $L(x)$ is the deterministic differential operator $\Pi(x, \omega)$ is the differential operator with coefficients obtained for the zero mean random process.

The solution of Eq. (2) is proposed considering the result with deterministic and random behavior (Ghanem and Spanos, 1991), such that,

$$u_k(x, \omega) = \bar{u}_k(x) + \alpha_k(x, \omega), \quad (3)$$

where $\bar{u}_k(x)$ is the expected value of the linear differential operator and $\alpha_k(x, \omega)$ is the random process with zero mean. It is observed that $\bar{u}_k(x)$ and $\alpha_k(x, \omega)$ in the same covariance function.

2.1. Spectral Stochastic Finite Element Method

In the deterministic numerical method, a finite element of coordinates x_i e x_j , the local mean or mean value \bar{x}_k is used, with interpolation functions P_1 and P_2 , whose weighted average is given by $P_1 u(x_i) + P_2 u(x_j)$. The stochastic process $u(x, \omega)$ is defined by the arguments of a set of orthogonal functions $g(x)$ from a linear or non-linear functional, in the probability space \mathcal{P} , that is,

$$u(x, \omega) = \int g(x) d\mathcal{P}(\omega), \quad (4)$$

whose covariance function is $C(x_1, x_2) = \int g(x_1)g(x_2)\langle d\mathcal{P}_1(\omega)d\mathcal{P}_2(\omega)\rangle$.

To obtain the inner product of the orthogonal functions in discrete form, the random vector sets $\xi_i(\omega_k)$ is rewritten such that,

$$\left(\xi_i(\omega_k), \xi_j(\omega_k)\right) = \int_{H \times \Omega} \xi_i(\omega_k) \cdot \xi_j(\omega_k) d\mathcal{P} = \Xi_{ij}(\omega_k). \quad (5)$$

Furthermore, for numerical solution, the Fredholm equation is written as

$$\int_D C(x_1, x_2)\psi(x_2)dx_2 = \lambda\psi(x_1). \quad (6),$$

where $\psi_i(x)$ is a complete set of functions defined in Hilbert space H and λ are eigenvalues.

The Kernel eigenfunctions $C(x_1, x_2)$ are obtained from,

$$\psi_k(x) = \sum_{i=0}^N d_i^{(k)} h_i(x). \quad (7),$$

where $d_i^{(k)}$ is a set of coefficients associated with the functions $\psi_i(x)$ for the k th realization of the stochastic process.

Substituting the approximate solution into the differential equation, we have the error, or residuals given by,

$$\epsilon_N = \sum_{i=0}^N d_i^{(k)} \int_D C(x_1, x_2)\psi(x_2)dx_2 - \lambda\psi(x_1). \quad (8)$$

In Galerkin's method, the weight functions are selected and it is imposed that the weighted average of the residue in relation to the weight functions is equal to zero. In mathematical terms the error is made orthogonal to the weight functions, such that, $\left(\epsilon_N, h_j(x)\right) = 0, j = 1, \dots, N$.

The solution of the linear system, is obtained solving for D and λ_k and, replacing in Eq. (10) get the eigenfunctions, $\psi_k(x)$:

$$CD = ABD \quad (9),$$

where $C_{ij} = \int_D \int_D C(x_1, x_2) h_i(x_2) dx_2 h_j(x_1) dx_1 dx_2$, $B_{ij} = \int_D h_i(x) h_j(x) dx$, $D_{ij} = d_i^{(j)}$

and $A_{ij} = \delta_{ij} \lambda_i$.

The columns of the matrix become the eigenvectors computed at the respective nodal point of the induced mesh, and the j^{th} element of the matrix \mathbf{C} becomes the weighted correlation between the process at nodes i and j . \mathbf{C} and \mathbf{B} are symmetric, positive definite.

2.2. System of Linear Algebraic Equations

However, it should be noted that the mean and the covariance are inadequate to fully define a second-order general stochastic field. For the k th realization of the stochastic process $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, \omega_k)$ and defined by the random variables, $\Xi_k(\omega) = \left\{ \xi_i(\omega_k) \right\}_{i=1}^n$, the random response is given by,

$$\mathbf{u}(x, \Xi_k(\omega)) = \mathbf{u}\left(x, \xi_1(\omega_k), \dots, \xi_n(\omega_k)\right). \quad (10)$$

Then the numerical approximation of the realization of the stochastic process has the following form:

$$\mathbf{u}_m(x, \Xi_k(\omega)) = \mathbf{u}_i(\Xi_k(\omega)) \cdot \psi_i(x) = \mathbf{U}(\Xi_k(\omega)) \cdot \Phi(x) \quad (11),$$

where \mathbf{u}_i' 's are the coefficients to be determined by minimizing the residual and $\Phi(x)$ are functions sets $\psi_i(x)$.

Substituting the numerical approximation of the sampling function in the Abstract Variational Problem, obtained from the stochastic version of the Lax-Milgram Lemma (Babuska et al., 2005), a system of linear algebraic equations is generated, that is,

$$(\mathbf{K}\mathbf{U})(\Xi_k(\omega)) = \mathbf{F} \Rightarrow \mathbf{U}(\Xi_k(\omega)) = \mathbf{H}(\Xi_k(\omega)) \cdot \mathbf{F} \quad (12),$$

where $\mathbf{K}(\Xi_k(\omega))$, is the matrix of random coefficients, $\mathbf{F} = [f_1, \dots, f_m]^t$, is the force vector, $\mathbf{H}(\Xi_k(\omega)) = [h_{ij}(\Xi_k(\omega))]_{m \times m} = (\mathbf{K}(\Xi_k(\omega)))^{-1}$, and displacement vector, $\mathbf{U}(\Xi_k(\omega)) = [u_1(\Xi_k(\omega)), \dots, u_m(\Xi_k(\omega))]^t$.

The k -th response vector is given by,

$$\mathbf{u}_i(\Xi_k(\omega)) = \sum_{j=1}^m h_{ij}(\Xi_k(\omega)) f_j \quad (13).$$

Of Eqs (11) and (12) the numerical approximation to the sampling function of the stochastic process of the response is given by,

$$u_m(x, \Xi_k(\omega)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left(h_{ij}(\Xi_k(\omega)) f_j \right) \psi_i = \mathbf{F} \cdot \left(\mathbf{H}(\Xi_k(\omega)) \right) \Phi(x) \quad (14).$$

For the k -th realization, it is necessary to obtain the solution of the linear system expressed in Eq. (14). Given the conditions of the hypotheses (**H1-H3**), an alternative to reduce the computational effort is the use of the Neumann series. To obtain the variance, the Neumann series can be applied intrusively or non-intrusively, with considerable gain in computational processing time.

2.3. The Neumann Series

The Neumann series is a convergent series as long as the adopted variation around the expected value is small. (spectral radius less than 1). In this case, the matrix of random coefficients admits the following decomposition:

$$\mathbf{K}(\Xi_k(\omega)) = \mathbf{K}_0(\Xi_k(\omega)) + \Delta \mathbf{K}(\Xi_k(\omega)), \quad (15)$$

where $\mathbf{K}_0(\Xi_k(\omega))$ is the matrix composed by the expected value of the coefficients and $\Delta \mathbf{K}(\Xi_k(\omega))$ is the uncertainty represented by its statistical moments.

To approximate the inverse of the matrix of random coefficients it is written in the form:

$$\mathbf{K}(\Xi_k(\omega)) = \mathbf{K}_0 \left[\mathbf{I} - \mathbf{P}(\Xi_k(\omega)) \right], \quad (16)$$

where $\mathbf{I} \in \mathbb{M}_n(\mathbb{R})$ is the identity matrix and $\mathbf{P}(\Xi_k(\omega))$ is the argument of the series.

The matrix $\mathbf{P}(\Xi_k(\omega))$ is a linear operator, continuous with normed space, such that $\mathbf{P}^0 = \mathbf{I}$. Substituting Eq. (16) in Eq. (12), the approximate random response of the inverse of the stochastic coefficient matrix is such that,

$$\mathbf{U}(x, \Xi_k(\omega)) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{P}(\Xi_k(\omega)) \right)^{-1} \mathbf{U}_0, \quad (17)$$

where $\mathbf{U}_0 = (\mathbf{K}_0)^{-1} \mathbf{F}$.

In particular, if $\|\mathbf{P}\| < 1$ the matrix $(\mathbf{I} - \mathbf{P})^{-1} \in \mathbb{M}_n(\mathbb{R})$ is approximated by, $(\mathbf{I} - \mathbf{P})_{(q)}^{-1} = \sum_{n=0}^q \mathbf{P}^n$, where q is the order adopted for expanding the series. Substituting this property in Eq. (17) the system of algebraic equations is rewritten as:

$$\mathbf{U}(x, \Xi_k(\omega)) = \sum_{n=0}^q \mathbf{P}^n(\Xi_k(\omega)) \mathbf{U}_0, \quad (18)$$

The first-order or linear approximation for the Neumann expansion has reached an appropriate accuracy. The application of SSFEM and NMC to obtain responses in the form of statistical moments is widely used in elliptic differential equations that represent the beam bending problem.

3. STOCHASTIC FORMULATION FOR BEAM BENDING THEORIES

This section presents a variational problem for a stationary beam based on the theories of Euler-Bernoulli, Timoshenko and Levinson-Bickford. It is a synthesis to obtain the bilinear form and consequently the random response.

3.1. Euler-Bernoulli Stochastic Beam Bending

The classical Euler-Bernoulli theory is applied to prismatic beams with longitudinal length as the predominant dimension. The beam is made of material with homogeneous density, isotropic, linearly elastic, obeying Hooke's law. The material properties are represented by the estimator of the expected value of Young's modulus, $\hat{\mu}_{E(x, \omega_k)}$. The beam is assumed to be symmetric about the vertical axis and remains so after bending. This kinematic hypothesis consists of assuming that the sections remain flat, undisturbed and orthogonal to the longitudinal axis of the beam. The beam geometry is represented by the estimator of the expected value of the moment of inertia, $\hat{\mu}_{E(x, \omega_k)}$. The shear stresses are very small in relation to the normal stresses and can be ignored, and the effects of the mass moment of inertia are neglected for small vertical displacements $w(x, \omega_k)$ and angular displacements $\phi(x, \omega_k)$ remains constant.

The stationary beam differential equation is obtained from equilibrium conditions, with homogeneous boundary conditions and complying with the Lax-Milgram lemma. Observing hypotheses (H1)-(H3), the problem can be expressed as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Find } w(x, \omega_k), \phi(x, \omega_k) \in (0,1) \times (\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P}), \text{ such that,} \\ \frac{d^2}{dx^2} \left(K \frac{d^2 w}{dx^2} \right) (x, \omega) = q(x, \omega), \\ w(0, \omega) = w(l, \omega) = 0, \phi(0, \omega) = \phi(l, \omega) = 0, \end{array} \right. \quad (19)$$

where $K = EI$ is the bending stiffness.

For the solution using the deterministic Finite Element Method, a beam element consisting of two nodes is considered. The degrees of freedom are associated with the transverse displacement $w(x, \xi_k)$ and angular displacement $\phi(x, \xi_k)$. The goal becomes to interpolate the deflection at any point on the element in terms of the local degrees of freedom, $w_1^e, \phi_1^e, w_2^e \in \phi_2^e$. As the beam element has four nodal values the approximate functions are a generalization of Hermite cubics. Thus the stiffness matrix of the beam element is given by,

$$\left[K(x, \xi_k) \right]^e = \frac{EI}{L^3}(x, \xi_k) \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

And the loading vector of the element,

$$\left\{ q(x, \xi_k) \right\}^e = q(x, \xi_k) \left\{ \frac{L}{2} \quad \frac{q \cdot L}{12} \quad \frac{L}{2} \quad -\frac{q \cdot L}{12} \right\}^t \quad (21).$$

The assembly of a global stiffness matrix and a global displacement vector must combine information from all elements. From the values generated by the approximation polynomial at the nodes of each element, interpolation functions are used to obtain the approximate solution.

3.2. Timoshenko Stochastic Beam Bending

The assumption that the cross section remains flat and normal to the neutral axis means neglecting the shear strain. Timoshenko's theory of beam bending considers that, although the cross section remains flat, additional rotation also occurs due to shear and the section does not remain normal to the neutral axis. As the relationship between beam length and height increases, shear stresses in the height direction become important and can no longer be neglected.

The strong formulation of the stochastic problem for Timoshenko's stationary beam bending problem obtained from equilibrium principles is expressed by:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Find } w(x, \omega_k) \text{ and } \phi(x, \omega_k) \in L^2(\Omega, F, P; H^2), \text{ such that,} \\ \frac{d}{dx} \left[k_s AG \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \phi \right) (x, \omega_k) \right] + q(x, \omega_k) = 0, \\ \frac{d}{dx} \left[\left(EI \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) (x, \omega_k) \right] + k_s AG \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \phi \right) (x, \omega_k) = 0, \\ w(0, \omega) = w(l, \omega) = 0, \phi(0, \omega) = \phi(l, \omega) = 0, \forall x \in (0, l) \text{ e } \omega \in (\Omega, F, P), \end{array} \right. \quad (22)$$

where $G(x, \omega_k)$ is the transverse modulus of elasticity, $A(x, \omega_k)$ is the cross-sectional area and k_s is the shear factor.

Draw $k_f = EI$ and $k_c = k_s AG$ the bilinear forms are obtained, in a system of equations. The model adopts an element with two nodes and four degrees of freedom. Integration is performed using Gaussian quadrature approximation polynomials. The Jacobian is associated with the Lagrange interpolation functions. With this expedient the stiffness matrix of the element, given by:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{EI}{l} + k_c Gh l & -\frac{EI}{l} + k_c Gh l & -\frac{k_c Gh}{2} & -\frac{k_c Gh}{2} \\ -\frac{EI}{l} + k_c Gh l & \frac{EI}{l} + k_c Gh l & \frac{k_c Gh}{2} & \frac{k_c Gh}{2} \\ -\frac{k_c Gh l}{2} & \frac{k_c Gh l}{2} & \frac{k_c Gh}{4} & \frac{k_c Gh l}{4} \\ -\frac{k_c Gh l}{2} & \frac{k_c Gh l}{2} & \frac{k_c Gh l}{4} & \frac{k_c Gh}{4} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

And the force vector becomes:

$$q^e = \{q_1^e \quad q_2^e \quad q_3^e \quad q_4^e\}^t, \quad (24)$$

where,

$$\begin{aligned} q_1^e &= -K_c \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \phi \right) (x) \Big|_{x=0}, & q_1^e &= -K_f \frac{\partial \phi}{\partial x} (x) \Big|_{x=0} \\ q_3^e &= -K_c \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \phi \right) (x) \Big|_{x=h}, & q_4^e &= -K_f \frac{\partial \phi}{\partial x} (x) \Big|_{x=h}. \end{aligned}$$

For different linear interpolation functions of vertical and angular displacement shear numerical locking can occur. An exposition of these elements is presented in Tiwari and Hyer, 2002. To avoid this occurrence, an alternative is to use higher order beam theories, e.g., the Levinson-Bickford.

3.3. Levinson-Bickford Stochastic Beam Bending

The Levinson-Bickford beam theory stands out for the relationship between the cross-sectional deformation and the mass moment of inertia. The high-order stationary beam bending problem, for the k -th realization of the random process, is expressed by the following differential equation:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Find } w(x, \omega_k) \text{ and } \phi(x, \omega_k) \in L^2(\Omega, F, P) \times H^m(0, l), \text{ such that,} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha \left(\phi + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] (x, \omega_k) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\beta \left(5 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 16 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] (x, \omega_k) = q(x, \omega_k), \\ -\alpha \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \phi \right) (x, \omega_k) - \frac{d}{dx} \left[\beta \left(16 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 68 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] (x, \omega_k) = 0, \\ w(0, \omega) = w(l, \omega) = 0, \phi(0, \omega) = \phi(l, \omega) = 0, \forall x \in (0, l) \text{ e } \omega \in (\Omega, F, P), \end{array} \right. \quad (25)$$

where $\alpha = \kappa_c(\xi(\omega_k)) = \frac{8}{15}GA(\xi(\omega_k))$ and $\beta = \kappa_f(\xi(\omega_k)) = \frac{1}{105}EI(\xi(\omega_k))$.

It is verified in Karttunen and Hertezen, 2015 that the stiffness matrix of the element is expressed by,

$$\left[K(x, \omega_k) \right]^e = \frac{EI(x, \omega_k)}{(1 + \Phi)L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & (4 + \Phi)L^2 & -6L & (2 - \Phi)L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & (2 - \Phi)L^2 & -6L & (4 + \Phi)L^2 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

And loading by,

$$[q]^e = \frac{f}{2} \left\{ l \quad -\frac{l^2}{30}(\Phi - 5) \quad l \quad \frac{l^2}{30}(\Phi - 5) \right\}, \quad (27)$$

where, $\Phi = \frac{3h^2(1 + \nu)}{l^2}$, the functional associated with the position and the random variable.

The similarity between the stiffness matrix and the loading vector for the Levinson-Bickford beam element and the Euler-Bernoulli beam element is observed when $\Phi = 0$. The similarity between the stiffness matrix and the loading vector for the Levinson-Bickford beam element and the Timoshenko beam element is observed when $k_s = \frac{2}{3}$.

4. NUMERICAL RESULTS

In this section the stochastic beam bending problem is presented for the fixed boundary condition as shown in Figure 1 and statistical results are obtained for the transverse and angular displacement field. Are performed $n_s = 30.000$ samples of the stochastic response process, $\left\{ u(x, \Xi(\xi_k)) \right\}_{k=1}^{n_s}$, $\forall x \in D$. The problem

is discussed for a beam of rectangular cross section defined in the domain $D = \{x \in \mathbb{R} \mid 0 < x < L\}$, width $b = 5$ cm and uniformly distributed loading $q(x) = 1$ KN/m. Initially, the relationship between the length L and the height of the beam h is discussed and, for subsequent analyzes, the height assumes the expected value $\mu_h = 15.24$ cm. The beam is made of isotropic material, linearly elastic, obeying Hooke's law with an expected value of the Young modulus $\mu_E = 205 \times 10^9$ PA. The Neumann series is used with first order approximation and the domain is discretized with 100 finite elements of equal length.

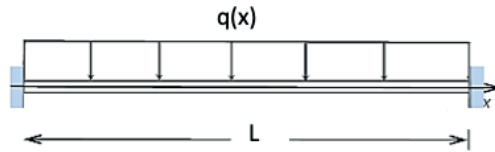


Figure 1. Fixed beam

Expected value estimators $\left(\hat{\mu}_u \right)$ and variance $\left(\hat{\sigma}_u^2 \right)$ of the stochastic displacement process are given, respectively, by the following expressions:

$$\hat{\mu}_u(x) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} u(x, \Xi(\xi_k)), \quad \forall x \in \bar{D}, \quad (28)$$

$$\hat{\sigma}_u^2(x) = \left(\frac{1}{n_s - 1} \right) \sum_{k=1}^{n_s} \left(u(x, \Xi(\xi_k)) - \mu_u(x) \right)^2, \quad \forall x \in \bar{D}. \quad (29)$$

Since Monte Carlo simulation is involved, the convergence of the solution is studied to verify that the number of simulations is appropriate for the reference accuracy. The behavior of the estimator of the expected value and the variance of the vertical displacement field, in relation to the number of realizations of the stochastic process n_s is obtained by fixing $x = \frac{1}{2}l$, and coefficient of variation $\delta_E = 1/10$. Convergence is analyzed for the uncertainty associated with the stiffness matrix.

Figure 2 and Figure 3 show the convergence of expected value and variance, respectively, with the number of realizations of the stochastic process, for the beam bending problem based on the Euler-Bernoulli theory.

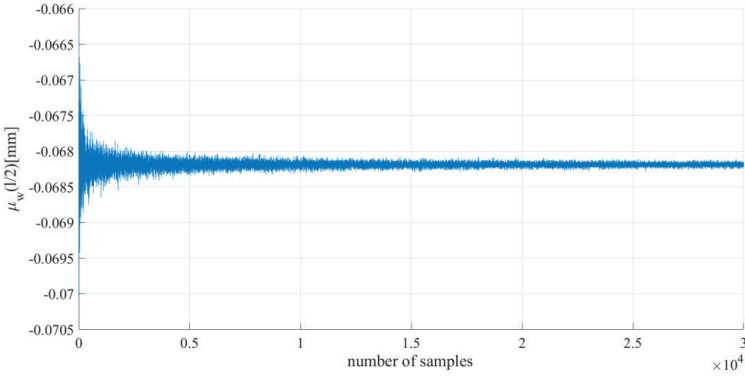


Figure 2. Convergence of the expected value of the vertical displacement field.

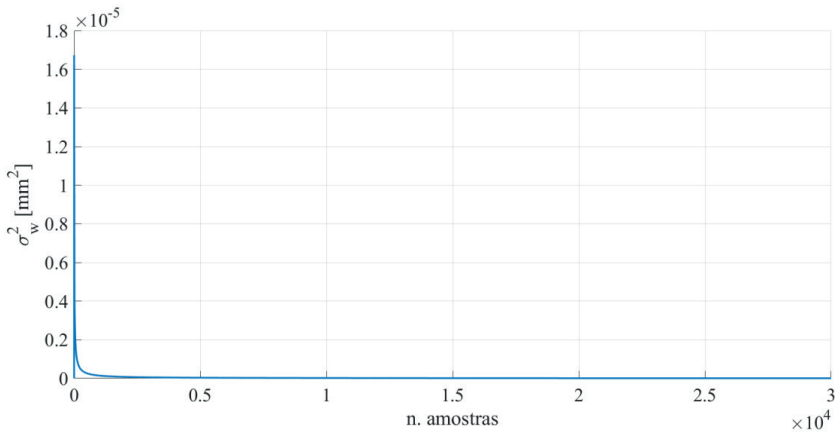


Figure 3. Convergence of displacement field variance.

In both figures, verify that for $n_s \geq 1.000$, the estimators stabilize for an adequate resolution adopted in the work.

A preliminary result for the section evaluates the expected value of the vertical displacement as a function of the geometric properties of the beam and verifying the differences between the beam theories. The boundary condition considered for a beam fixed at both ends. Thus, Figure 4, Figure 5 and Figure 6 show the graph of

the estimator of the expected value of the vertical displacement for the different beam theories, and considering the beam length varying between $L = 0.25, 0.5$ and 1 m, respectively with coefficient of variation $\delta_\epsilon = 1/10$, using NMC methodology.

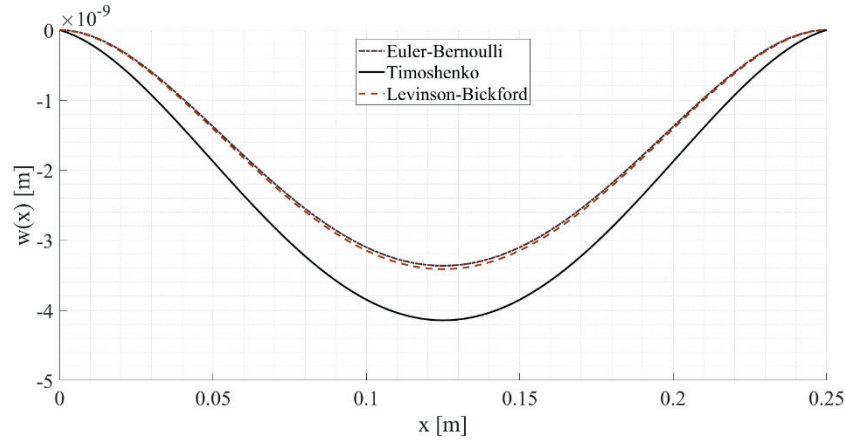


Figure 4. Expected value of vertical displacement for $L = 0.25$ m.

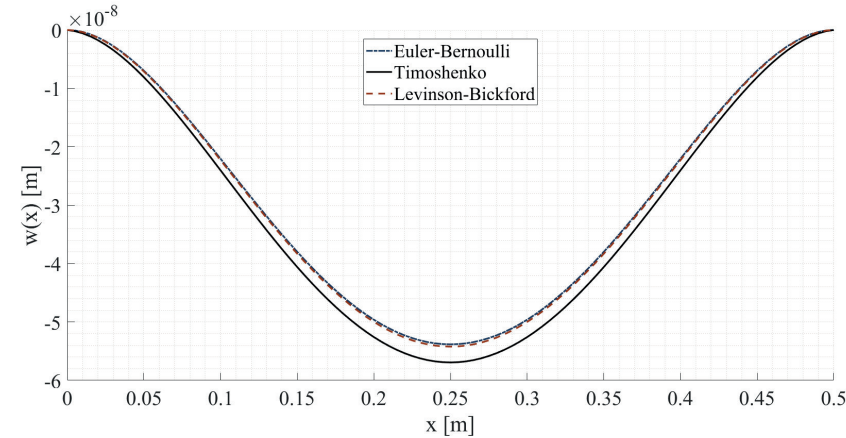


Figure 5. Expected value of angular displacement for $L = 0.5$ m.

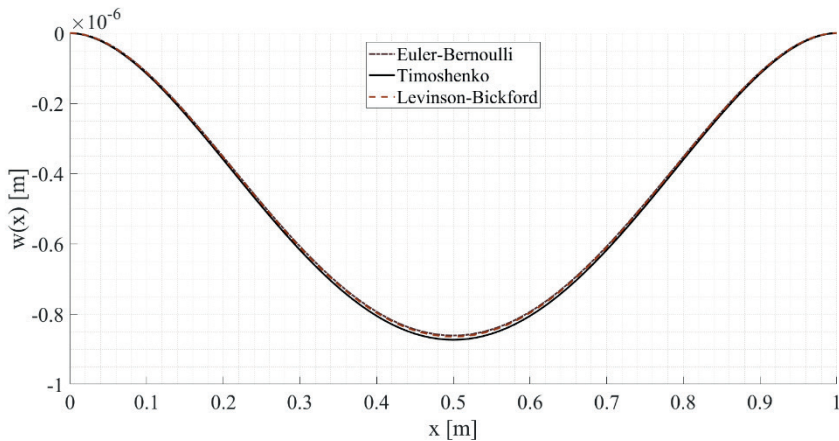


Figure 6. Expected value of angular displacement for $L = 1$ m.

It is verified that, with the increase of the beam length (L) the difference between the beam theories becomes more accentuated. In this case, the Euler-Bernoulli and Levinson-Bickford theories remain close to each other, with a distancing of the vertical displacement for Timoshenko's theory.

Figure 7 shows the graph of the variance estimator of the vertical displacement, with $\delta = 1/10$, for the three beam theories using the length $L = 1$ m. This length was chosen because it presents the smallest difference between the expected value of the beam theories, allowing evaluate the effect of the deviations of each of the stochastic processes.

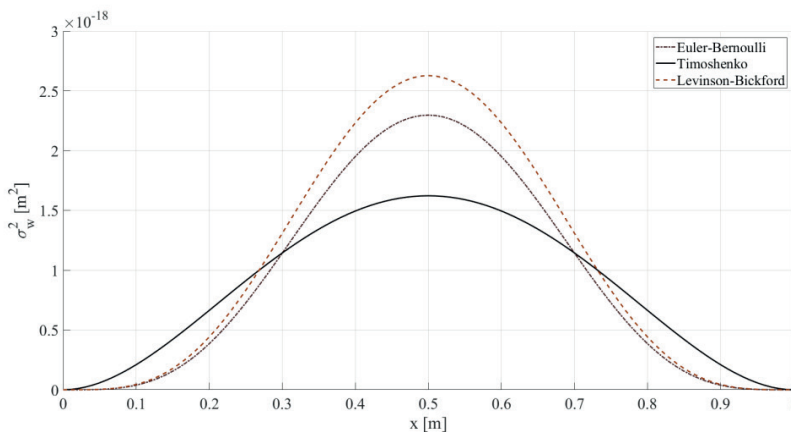


Figure 7. Vertical displacement variance.

Figure 8 shows the graph of the angular displacement variance estimator, with $\delta = 1/10$, for the three beam theories using the length $L = 1\text{ m}$. It is observed that, in relation to the variance estimator, the results obtained for the Euler-Bernoulli and Levinson-Bickford theories differ considerably from those obtained for the Timoshenko theory.

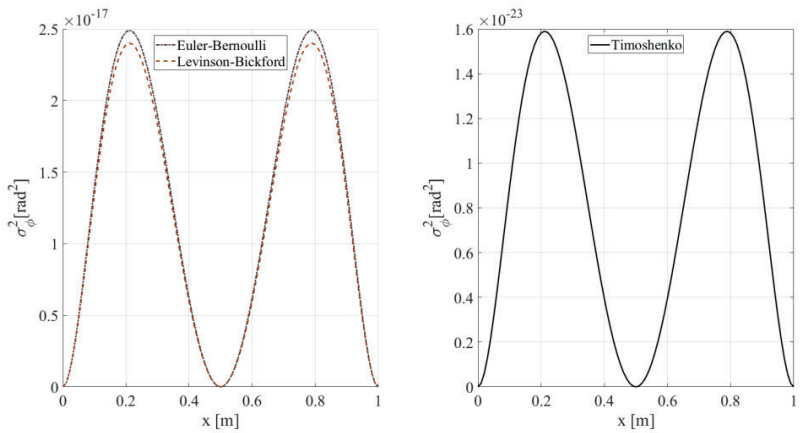


Figure 8. Angular displacement variance.

Table 1 presents the processing times for each beam theory and different uncertainty quantification methodologies.

Table 1. Processing time (seg)

Methodology	Euler-Bernoulli	Levinson-Bickford	Timoshenko
SMC	1,472	1,783	12,792
NMC	0,040	0,055	1,472
SSFEM	0,448	0,960	6,803

The computational times are close for the Euler-Bernoulli and Levinson-Bickford theories, but significantly higher for the Timoshenko theory. Similarly, the time is considerably longer when using the pure Monte Carlo simulation in relation to the Neumann-Monte Carlo methodology and the Spectral Finite Element method.

5. CONCLUSION

In this work, results are obtained for the quantification of the uncertainty of the stochastic bending problem of an elastic and stationary beam by Euler-Bernoulli, Timoshenko and Levinson-Bickford. The proposed object consists of applying the Spectral Finite Element Method and the Neumann series as a numerical strategy to obtain the approximate solution of the system of linear equations resulting from the variational procedure. The weak formulation of the problem is obtained from the sampling Galerkin method.

In the numerical simulations, initially, the convergence of the expected value is verified as a function of the number of simulations. For samples, the estimator of expected value and variance does not present a sensitive or significant difference between theories. Then it is confirmed that, when the length and cross-section ratio is increased, the shear effect becomes more pronounced for Timoshenko's theory.

It turns out that the variance estimator is considerably larger for the Levinson-Bickford and Euler-Bernoulli theory. The interpretation of this result is associated with the uncertainty model adopted, that is, by trigonometric series. Regarding estimator error estimates the expected value is less than 1% for all beam theories. The Levinson-Bickford beam solution presents the greatest difference between the results, while the processing time is relatively higher when using the pure Monte Carlo simulation.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Arnold, L.: Stochastic Differential Equations: Theory and Applications. Wiley Interscience, New York (1973).

Babuska, I., Tempone, R., Zouraris, G.E.: Solving elliptic boundary value problems with uncertainty coefficients by the Finite Element method: The stochastic formulation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 194(12-16), 1251-1294 (2005).

Bickford, W.B.: A consistent higher order beam theory. Developments in Theoretical and Applied Mechanics, 11, 137 (1981).

Ghanem, R.G., Spanos, P.D.: Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach. Springer-Verlag, New York (1991).

Goodier, J.N., Timoshenko S.P.: Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Company, New York (1951).

Heyliger, P.R., Reddy, J.N.: A higher order beam finite element for bending and vibration problems, *Journal of Sound and Vibration*, 126(2), 309-326 (1988).

Karttunen, A., Von Herten, R.: Variational formulation of the static Levinson beam theory. *Mechanical Research Communications*, 66, 15-19, (2015).

Levinson, M., Stephens N.G.: A second order beam theory. *Journal of Sound and Vibration*, 67(3), 293-305 (1979).

Rao M.M., Swift, R.J.: *Probability Theory with Applications, Mathematics and Its Applications*. Springer Verlag, New York (2006).

Reddy, J.N.: *An Introduction to the Finite Element Method*. Mc-Graw-Hill Book Company, New York (1984).

Reddy, J.N.: Nonlocal nonlinear formulations for bending of classical and shear deformation theories of beams and plates. *International Journal of Engineering Science*, 48(11), 1507-1518 (2010).

Shinozuka, M.: Structural response variability. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 113(6), 825-842, (1987).

Squarcio, R.M.F., Ávila, C.R.S.J.: Uncertainty quantification via λ -Neumann methodology of the stochastic bending problem of the Levinson-Bickford beam. *Acta Mechanica*, 233, 12-16 (2022).

Timoshenko S.P.: On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *Philosophical Magazine*, 41, 744-746 (1921).

Timoshenko S.P.: On the transverse vibration of bars of uniform cross-section. *Philosophical Magazine*, 43, 125-131 (1922).

Tiwari N., Hyer M.W.: Secondary buckling of compression-loaded composite plates, *AIAA journal*, 40(10), 2120-2126, (2002).

Yamazaki, F., Shinozuka, M., Dasgupta, G.: Neumann expansion for stochastic Finite Element analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(8), (1988).



C A P Í T U L O 9

PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

Bruna Camila Schwab

Engenheiro Mecânico/UTFPR - Guarapuava - PR - Brasil
UTFPR – Campus Guarapuava, PR, Brasil

Luiz Fernando Rigatti

Professor da COEMT-GP/UTFPR - Guarapuava - PR – Brasil
UTFPR – Campus Guarapuava, PR, Brasil

1. INTRODUÇÃO

A lubrificação é uma área de estudo que se propõem como principal função a redução do atrito e por consequência a redução do desgaste entre superfícies que estão em movimento relativo entre si, formando uma película de fluido lubrificante entre elas. No entanto pode se dizer que as funções da lubrificação vão além.

Para Ribeiro (2012) os lubrificantes são substâncias que formam uma película protetora cuja função principal é reduzir o atrito e o desgaste, auxiliar no controle da temperatura e na vedação dos componentes, realizando também a limpeza, proteção contra corrosão e a atuação como transmissão de força e movimento.

A viscosidade do lubrificante é fundamental para esse processo porque determina a capacidade do fluido de formar uma película resistente à deformação e ao cisalhamento sob as condições de operação.

De acordo com Carreteiro e Belmiro (2006) a viscosidade é uma propriedade dos fluidos de grande importância, ela é definida como sendo a resistência que o fluido possui para escoar, ou seja, quando o fluido é submetido ao um esforço de cisalhamento as camadas adjacentes do fluido movem-se a diferentes velocidades, quanto menor for essa velocidade mais viscoso o fluido é e menor é a capacidade de escoar, o contrário também é válido, quando o fluido é menos viscoso a capacidade de escoar é maior.

Para Mang e Dresel (2007) a viscosidade pode sofrer variações de acordo com a temperatura e a pressão. A viscosidade de muitos lubrificantes diminui com a temperatura, tornando-o mais fácil de fluir e mantendo suas propriedades lubrificantes. Por outro lado, a viscosidade pode aumentar em temperaturas mais baixas, o que dificulta o fluxo adequado do lubrificante e compromete a eficiência da lubrificação. Em relação a pressão a viscosidade aumenta muito em relação ao aumento de pressão.

Para que se possa promover a lubrificação que garanta a redução do atrito e consequentemente do desgaste, aumento da vida útil dos componentes e a otimização do desempenho dos sistemas mecânicos a viscosidade ocupa um papel decisivo e precisa ser adequada ao funcionamento desde motores automotivos a máquinas industriais.

O estudo e a compreensão dessa propriedade são essenciais para o desenvolvimento de lubrificantes mais eficientes e para o avanço contínuo das técnicas de lubrificação. Portanto, a viscosidade tem um papel decisório na escolha do lubrificante de acordo com o tipo de lubrificação a ser usada e temperatura de trabalho. Para Carmo (2012) os lubrificantes com maior viscosidade são mais eficientes para a lubrificação limítrofe por possuírem maior capacidade de carga. Já para a lubrificação hidrodinâmica os lubrificantes com menor viscosidade são mais eficientes.

1.1 Problema de pesquisa

A proposta deste trabalho é desenvolver um dispositivo de análise de viscosidade que será utilizado em atividades práticas como forma de complementação da aula teórica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Campus Guarapuava. Esse dispositivo terá como objetivo auxiliar nas pesquisas e experimentos relacionados à caracterização de fluidos e à avaliação da viscosidade de óleos lubrificantes. A implementação desse dispositivo proporcionará recursos de análise e contribuirá para o aprimoramento contínuo das técnicas de lubrificação e estudos relacionados na instituição.

A realização de experimentos práticos no dispositivo de análise de lubrificação contribui para o processo de ensino-aprendizagem, permitindo que os alunos compreendam melhor os conceitos teóricos por meio da experiência direta e da visualização dos resultados.

Para Souza (2013), o ensino experimental funciona como um auxílio para assegurar a transmissão de conhecimento científico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aprendizagem Experimental

O dispositivo de análise da viscosidade de óleos lubrificantes tem como objetivo auxiliar nas aulas práticas, permitindo que os alunos testem hipóteses e consolidem o conteúdo aprendido em aulas teóricas. Pimentel (2007) destaca que a experimentação é essencial para conectar teoria e prática, promovendo o desenvolvimento profissional.

As Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de Engenharia (Brasil, 2019) exigem atividades práticas e de laboratório em disciplinas básicas e específicas, com destaque para Física, Química e Informática. A prática permite ao aluno compreender o comportamento dos objetos, testar hipóteses, desenvolver habilidades e conectar teoria com a realidade, tornando a aprendizagem mais significativa.

2.2 Lubrificação

Almeida (2017) define lubrificação como a inserção de um lubrificante entre superfícies para reduzir o atrito e evitar falhas, superaquecimento e desgaste de componentes. Óleos derivados do petróleo são amplamente utilizados na indústria por sua capacidade de formar uma película lubrificante.

Almeida (2017) classifica a lubrificação em dois tipos:

- I **Lubrificação limite:** película fina ($\sim 10 \mu\text{m}$), entre atrito seco e lubrificação plena.
- I **Lubrificação hidrodinâmica:** película espessa (0,025 a 0,25 mm), dependendo de variáveis como viscosidade e carga.

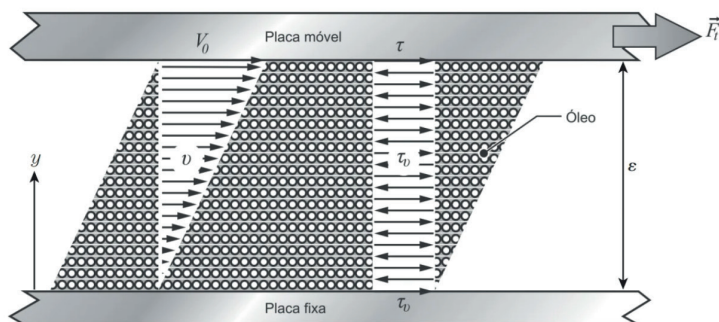
A espessura adequada da película lubrificante depende da viscosidade correta, considerada a propriedade mais importante para especificar um lubrificante (Totten, 2006).

2.3 Viscosidade

De acordo com a NBR 10441:2014 e Carreteiro & Belmiro (2006), a viscosidade dinâmica é a resistência do fluido ao cisalhamento, definida pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. Bistafa (2017) ilustra com a Figura 1 o escoamento entre placas paralelas, onde a viscosidade é calculada pela Equação (1):

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}} \quad (1)$$

Figura 1 - Lei do escoamento de fluido viscoso entre placas paralelas



Fonte: Bistafa (2018)

A viscosidade é expressa em Pascal-segundos (Pa.s) ou centipoise (cP).

2.4 Influência da Temperatura e Pressão na Viscosidade

Wen e Huang (2017) explicam que com o aumento da temperatura, o movimento molecular se intensifica e a viscosidade dos líquidos diminui.

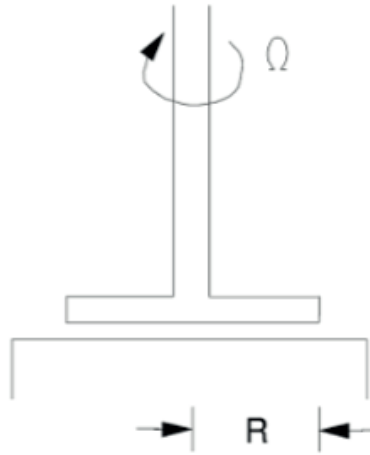
Já a pressão tem o efeito oposto: ao aumentar a pressão, as moléculas se aproximam e a viscosidade cresce.

2.5 Medição da Viscosidade

A viscosidade pode ser medida por diferentes viscosímetros, que utilizam princípios distintos:

- **Copo Ford:** mede o tempo de escoamento de um fluido.
- **Ostwald:** mede o tempo de escoamento em tubo capilar com base na equação de Poiseuille.
- **Esfera (Stokes):** mede o tempo de queda de uma esfera em fluido, calculando a viscosidade pela Lei de Stokes.
- **Saybolt:** mede o tempo para escoar 60 cm³ de fluido, resultado em unidades SSU (Segundo Saybolt Universal).
- **Rotacionais:** mede a viscosidade pela resistência ao cisalhamento entre superfícies em movimento relativo, como cone e placa, placas paralelas ou cilindros concêntricos. O fluido fica entre essas superfícies, uma delas rotaciona e a viscosidade é calculada a partir do torque necessário para manter a rotação. Conforme a Figura 2.

Figura 2 – Viscosímetro Placas Paralelas



Fonte: Steffe (1992)

Para medições precisas, o fluido deve ser incompressível, com propriedades constantes sob pressão, temperatura controlada e aderência total às paredes (sem deslizamento). Levando em consideração a hipótese descrita de Sampaio (2022) e isolando μ tem-se a equação da viscosidade.

$$\mu = \frac{2Th'}{\pi\omega Ri^4} (Pa \cdot s) \quad (2)$$

Onde T é o torque, h' é a espessura da camada de fluido, ω é a rotação, Ri é o raio interno.

2.6 Ferramentas para Desenvolvimento do Dispositivo

O projeto fez uso de diversas ferramentas:

- I **CAD (Desenho Assistido por Computador):** utilizado para elaborar modelos 2D e 3D do dispositivo. A modelagem 3D permite testes de resistência estrutural e térmica.
- I **Arduino:** plataforma de prototipagem eletrônica que permite controle de sensores e atuadores. O código é programado via ambiente IDE e transferido por cabo USB.

- I **Encoder:** sensor óptico que mede posição e velocidade de eixos rotativos a partir de pulsos gerados por um disco com marcações.
- I **Dinamômetro:** mede força com base na deformação de uma mola, segundo a Lei de Hooke dada pela Equação 3.

$$F = k\Delta L \quad (3)$$

- I **Impressão 3D:** permite a fabricação rápida e econômica de protótipos a partir de arquivos CAD, utilizando materiais como PLA e ABS. As peças são impressas em camadas com geometrias complexas.

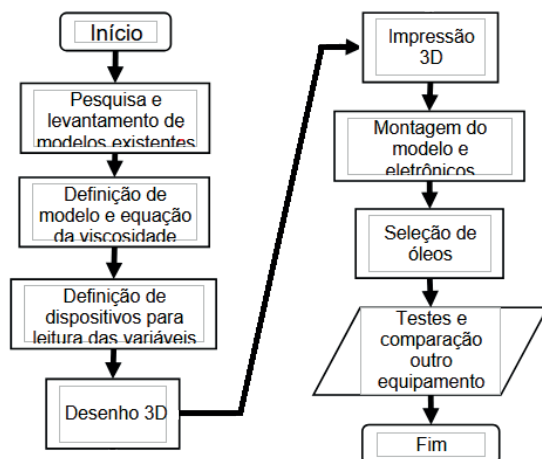
3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica, com busca, seleção e análise de fontes sobre viscosidade, sua importância na lubrificação, métodos de medição e escolha de dispositivos para coleta de variáveis. A pesquisa teve caráter quantitativo, visando analisar dados numéricos e fornecer orientações para a medição da viscosidade. Tecnicamente, envolveu pesquisa teórica bibliográfica e experimentos laboratoriais para validar e aplicar conceitos, resultando em uma abordagem integrada entre teoria e prática.

3.1 Sequência de fabricação do protótipo

Para criação do protótipo, é fundamental seguir as etapas delineadas na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo



Fonte: Autora própria (2023)

O protótipo deste trabalho segue o modelo de um viscosímetro rotacional de placas paralelas. Neste modelo, um disco gira enquanto o outro é submetido a um torque causado pelo arrasto viscoso do fluido. No contexto deste trabalho, o fluido em questão é um óleo lubrificante localizado entre os dois discos.

Para obtenção do valor de viscosidade é utilizado como base a Equação 2 onde reescrevendo alguns termos, tem-se:

$$\mu = \frac{2T\epsilon}{\pi\omega r^4} (Pa \cdot s) \quad (2)$$

Como o valor do torque T pode ser reescrito como o produto entre a força e a distância de aplicação da força $F \cdot r$, tem-se:

$$\mu = \frac{2Fr\epsilon}{\pi\omega r^4} (Pa \cdot s) \quad (3)$$

Simplificando a equação em relação ao termo r :

$$\mu = \frac{2F\epsilon}{\pi\omega r^3} (Pa \cdot s) \quad (4)$$

Para obter os valores das variáveis da Equação (4) o protótipo conta com alguns dispositivos auxiliares. Abaixo é detalhado como o valor de cada variável é obtido.

ϵ é medido entre o disco fixo e o disco rotativo o qual é equivalente a espessura do filme de óleo lubrificante em metros.

ω é a rotação do disco rotativo medido pelo encoder com o auxílio do disco para enconder e o Arduino na unidade de Rad/s.

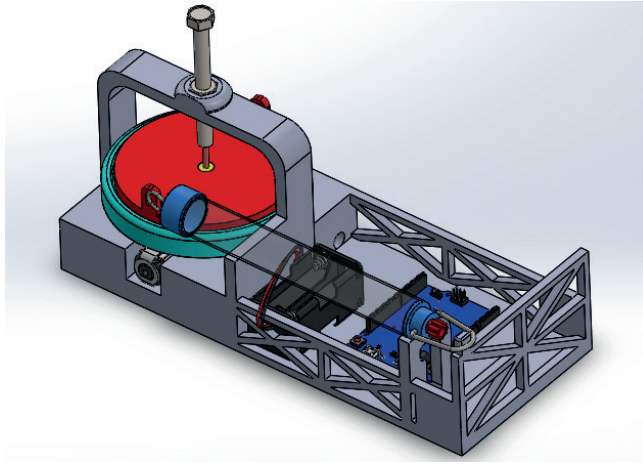
r é o raio do disco fixo em metros.

F é a força viscosa que faz o disco fixo rotacionar medida pelo dinamômetro em Newtons.

3.2 Modelagem 3D

Para modelagem 3D do protótipo foi utilizado o software SolidWorks 2022 com licença acadêmica e um computador pessoal, conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Representação CAD do protótipo

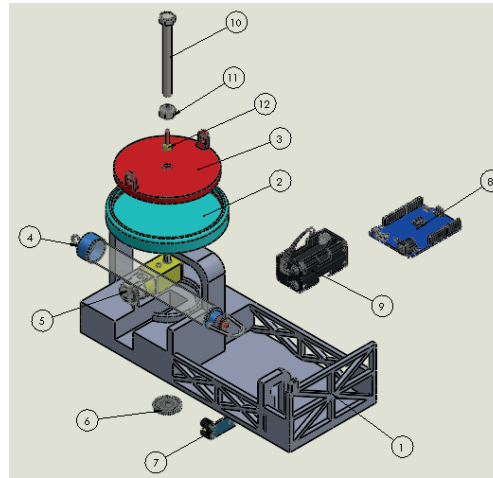


Fonte: Autoria própria (2023)

O modelo conta com uma base fixa para alocar o motor DC, dinamômetro e para alocar os dispositivos eletrônicos como o Arduino e o encoder os quais fazer a leitura da rotação do motor.

O disco rotativo está acoplado ao motor e serve para alocar os óleos lubrificantes submetidos aos testes de viscosidade. O disco que sofre o arrasto viscoso está preso a base fixa por meio de um parafuso para restringir a altura entre o disco e a base rotativa, um rolamento é fixado nele para que haja a liberdade de rotação onde o dinamômetro consegue fazer a leitura correta da força tangencial. A Figura 5 mostra a vista explodida com todos os elementos.

Figura 5 - Vista explodida do protótipo



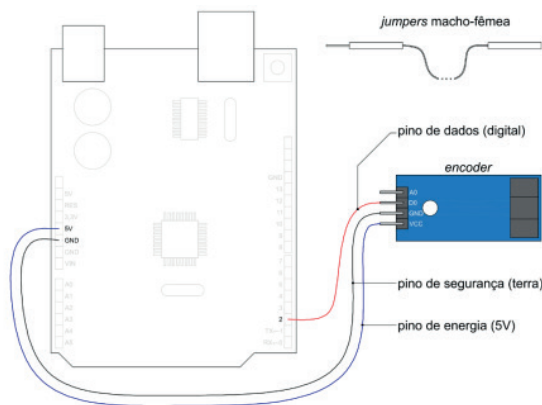
Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Impressão 3D e Conexão eletrônica

Os componentes fabricados em impressão 3D correspondem a base fixa, a base rotativa e o disco, com cerca de 42 horas de impressão.

Para leitura da rotação do disco rotativo é utilizado um Arduino Uno e um Encoder LM393 conforme esquema de ligação da Figura 6 e programação na IDE Arduino.

Figura 6 - Conexão entre Arduino e Encoder



Fonte: Sampaio (2022)

3.4 Testes com reômetro

Com o objetivo de obter valores de viscosidade confiáveis foi realizado um ensaio com o reômetro MCR 92 da Anton Paar o qual pode ser visto na Figura 7. Neste ensaio foram utilizadas 5 amostras de óleos: 3 multiviscosos e 2 monoviscosos sendo eles o SAE 5W30, SAE 15W40, SAE 20W50, SAE 68 e SAE 90 estes mesmos óleos são ensaiados pelo dispositivo proposto neste trabalho.

Figura 7 – Reômetro Anton Paar



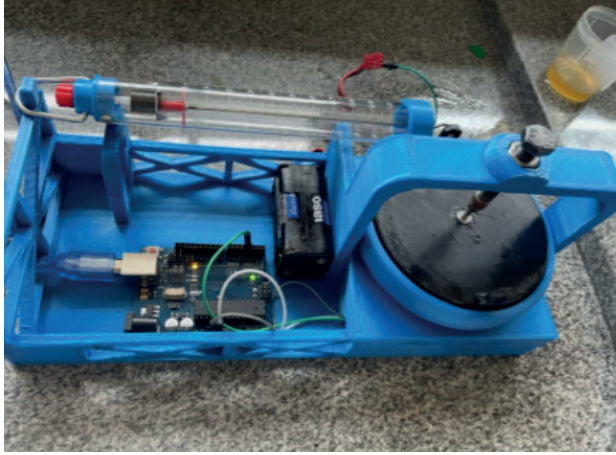
Fonte: Autoria própria (2023)

As amostras foram ensaiadas a temperatura de 40 °C onde o próprio reômetro faz o aquecimento e leitura da temperatura.

3.5 Testes com o viscosímetro proposto

Os testes foram realizados com o protótipo da Figura 8 em um laboratório da UTFPR.

Figura 8 – Protótipo



Fonte: Autoria própria (2023)

Para o aquecimento dos óleos foi utilizada uma estufa modelo TE-394/1 TECNAL.

Todas as amostras de óleos foram aquecidas a temperatura de 40° C, mesma temperatura utilizada no reômetro para que possa haver a comparação.

Em seguida, o óleo é transferido para a base rotativa, onde o disco de medição é rosqueado até estabelecer contato com a superfície do óleo. Posteriormente, o motor é acionado, e a leitura de força é exibida pelo dinamômetro, enquanto a rotação é capturada pelo encoder e transmitida ao Arduino. Isso viabiliza a visualização dos dados através do Monitor Serial no computador.

Para obter o valor de viscosidade é utilizado a Equação (5) onde o valor da espessura da camada de óleo é $\epsilon = 0,003m$ e o raio do disco de medição é $r = 0,048m$. O Valor da força F é obtida pelo dinamômetro. Como o valor de rotação (ω) é obtido em Rotações Por Minuto RPM ele precisa ser transformado para Rad/s utilizando a equivalência:

$$RPM = \frac{2\pi}{60} rad/s \quad (5)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado dos testes com o reômetro

A Tabela 1 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo 5W30.

Tabela 1- Resultados reômetro para o óleo 5W30

5W30					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,1	0,0073	0,0732	40,01	0,0003
2	0,22	0,0151	0,0699	40,01	0,0006
3	0,46	0,0316	0,0682	40,01	0,0012
4	1,00	0,0615	0,0615	40,01	0,0023
5	2,15	0,1327	0,0616	40,02	0,0049
6	4,64	0,2821	0,0608	40,02	0,0104
7	10,0	0,6100	0,0610	40,03	0,0224
8	21,5	1,3046	0,0606	40,03	0,0479
9	46,4	2,8039	0,0604	40,04	0,1030
10	100	5,9813	0,0598	40,05	0,2197

Fonte: Autoria própria (2023)

O mesmo procedimento foi feito utilizando o reômetro nos óleos 15W40, 20W50, SAE68 e o óleo SAE90.

4.2 Resultados dos testes com o protótipo

Os resultados obtidos pelo protótipo contemplam a leitura de rotação fornecida pelo Monitor Serial do Arduino, os resultados de força fornecidos pelo dinamômetro e a viscosidade obtida utilizando a Equação (4). Os resultados das leituras realizadas pelo dispositivo e o valor de viscosidade para o óleo 15W40 podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados protótipo para o óleo 15W40

15W40 a 40°C			
N° Leituras	Rotação (RPM)	Força (N)	Viscosidade (Pa.s)
1	177	0,15	0,139
2	172	0,14	0,134
3	173	0,19	0,181

Fonte: Autoria própria (2023)

O mesmo procedimento foi feito utilizando o protótipo nos óleos 15W40, 20W50, SAE68 e o óleo SAE90. Quanto aos resultados dos óleos 5W30 e SAE 68 não se mostrou satisfatório, houve uma imprecisão na medição da força a qual variava durante o experimento. Acredita-se que isso ocorreu pela baixa viscosidade desses óleos se comparado aos outros nessa mesma temperatura.

Ao analisar a comparação entre os resultados do reômetro e do protótipo na Tabela 3 constata-se que o protótipo exibe um erro aproximado de 40%. Este desvio pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo a escolha do processo de fabricação, ou seja, a impressão 3D, que, neste caso, não proporcionou a precisão dimensional necessária, contribuindo para o desequilíbrio na base rotativa. Além disso, o sistema de ajuste de altura através do parafuso não assegura uma regulagem precisa, e a imprecisão na impressão 3D, juntamente com a colagem entre o parafuso e o disco, resultaram em falta de concentricidade entre o disco de medição e a base rotativa.

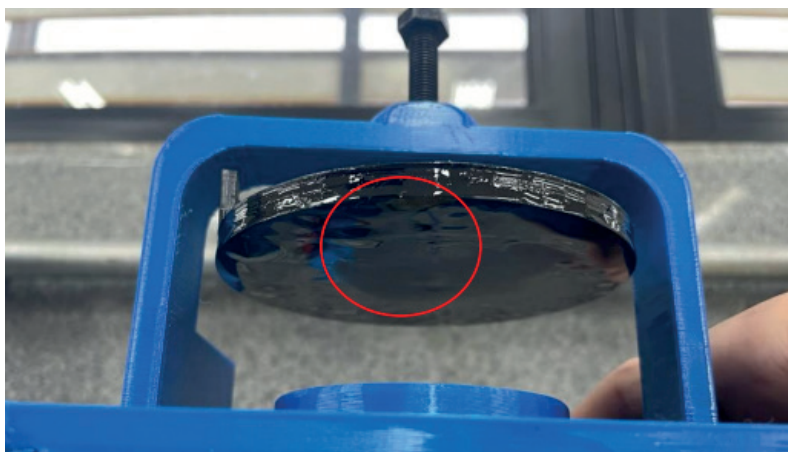
Tabela 3 – Comparação das viscosidades médias entre reômetro e protótipo

Viscosidade média			
	Reômetro	Protótipo	Erro em %
	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade (Pa.s)	
15W40	0,108	0,151	39,8
20W50	0,142	0,199	40,1
SAE 90	0,201	0,277	37,8

Fonte: Autoria própria (2023)

Outro fator que contribui para o erro é o efeito da força centrífuga, pelo qual o óleo é deslocado em direção à borda, deixando o centro desprovido de óleo. Isso resulta em um contato reduzido entre os discos, ocorrendo principalmente nas extremidades. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Efeito da força centrífuga



Fonte: Autoria própria (2023)

5. CONCLUSÃO

Apesar da existência do erro, o dispositivo consegue fazer a leitura da força viscosa e da rotação, evidenciando assim a diferença nos valores de viscosidade entre os diferentes tipos de óleo. Essa capacidade de distinguir as características viscosas dos óleos indica o potencial do dispositivo como uma ferramenta útil para análises comparativas, podendo ser usado pelos alunos de forma didática para compreender as nuances do grau de viscosidade entre os óleos lubrificantes.

Portanto, o presente trabalho cumpre com seu objetivo geral, o qual era desenvolver um dispositivo para a determinação da viscosidade de óleos lubrificantes, e para que isso se tornasse possível, precisou também cumprir com os objetivos específicos os quais incluem a relação entre lubrificação e viscosidade, destacando os fatores influenciadores e proporcionando a base teórica necessária para o desenvolvimento do dispositivo proposto.

A identificação dos principais modelos de equipamentos de mensuração de viscosidade existentes foi efetuada por meio de uma revisão a qual permitiu a adaptação do modelo escolhido ao escopo do projeto. A definição conceitual do modelo escolhido e a apresentação das equações relevantes para a determinação da viscosidade foram abordadas estabelecendo a fundamentação teórica essencial.

A elaboração do protótipo em 3D utilizando o software SolidWorks foi executada, proporcionando um modelo tridimensional o qual serviu para possibilitar a impressão 3D. A escolha dos dispositivos auxiliares para a leitura das variáveis assegurou a

leitura dos dados obtidos pelo dispositivo principal. A obtenção do modelo físico do protótipo por meio da impressão 3D e a subsequente montagem dos dispositivos auxiliares resultou em um dispositivo pronto para análises de viscosidade.

Os testes comparativos evidenciaram a consistência dos resultados em relação ao outro equipamento validado, fortalecendo a aplicabilidade do dispositivo proposto.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernanda. O que é Encoder? Para que serve? Como escolher? Como interfacear? **HI Tecnologia**, 2017. Disponível em: <<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>. Acesso em: 18 de out. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10441: **Produtos de petróleo — líquidos transparentes e opacos — determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica**. Rio de Janeiro, p. 2. 2014.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Mecânica dos fluidos: noções e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 abr. 2019. Seção 1, p. 5.

CARMO, Mariana Ribeiro do. **Influência dos parâmetros de operação e de propriedades dos lubrificantes nas condições de lubrificação em geometria quatro-esferas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CARRETEIRO, Ronald P., BELMIRO, Pedro Nelson A. **Lubrificantes & Lubrificação Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MANG, Theo, DRESEL, Wilfried. **Lubricants and lubrication**. 2. ed. Weinheim, Germany: Wiley-Vch, 2007. DOI: 10.1002/9783527610341

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. 4. ed. São Paulo: Novatec Editora Ltda., 2011.

PIMENTEL, Alessandra. **A teoria da aprendizagem experiencial como alicerce de estudos sobre desenvolvimento profissional**. Estudos de Psicologia (Natal) [online]. (2007); 12(2): 159-168. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-294X2007000200008>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

RIBEIRO DO CARMO, Mariana. **Influência dos parâmetros de operação e de propriedades dos lubrificantes nas condições de lubrificação em geometria quatro-esferas**. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SAMPAIO, José Jailson de Oliveira. **Desenvolvimento e Avaliação de Protótipo de Viscosímetro Rotacional de Baixo Custo Baseado em Impressão 3D e Arduino**. Orientador: Sandro Vagner de Lima. 2022. 103f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69918>. Acesso em: 17 de ago. 2023.

SOUZA, Alessandra Cardosina de. **A experimentação no ensino de ciências: importância das aulas práticas no processo de ensino aprendizagem**. Monografia de Especialização. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Especialização em Educação: Métodos e Técnicas de Ensino. Medianeira, 2013.

STEFFE, J. F. *Rheological methods in food process engineering*. 2. ed. East Lansing, MI: Freeman Press, 1996. ISBN 0-9632036-1-4.


TOTTEN, G. E. *Handbook of lubrication and tribology: volume I – application and maintenance*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.


WEN, S.; HUANG, P. *Principles of Tribology*. 2. ed. Singapura: Wiley, 2017. 608 p. ISBN 978-1-119-21489-2.





CONECTANDO O FUTURO

**ENGENHARIA MECÂNICA NA UTFPR E
SEU IMPACTO NA TRANSFORMAÇÃO
DA SOCIEDADE**

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br



CONECTANDO O FUTURO

**ENGENHARIA MECÂNICA NA UTFPR E
SEU IMPACTO NA TRANSFORMAÇÃO
DA SOCIEDADE**

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br