

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ANÁLISE NUMÉRICA COMO ESTRATÉGIA DIDÁTICA PARA O ENSINO-APRENDIZAGEM DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Numerical analysis as a teaching strategy for teaching and learning the strength of materials

Análisis numérico como estrategia didáctica para la enseñanza y el aprendizaje de la resistencia de los materiales

Elton Brasil Linhares^{1*}, Gabriel Percival Stoppa², & Marcelo Henrique Stoppa³

^{1 2 3} Universidade Federal de Catalão

¹elton@discente.ufcat.edu.br ²gabrielstoppa@discente.ufcat.edu.br ³mhstoppa@ufact.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 21.08.2025

Aprovado: 03.10.2025

Disponibilizado: 06.10.2025

PALAVRAS-CHAVE: Educação em Engenharia; Impressão 3D; Simulação Computacional; Análise Numérica; FreeCAD.

KEYWORDS: Engineering Education; 3D Printing; Computer Simulation; Numerical Analysis; FreeCAD.

PALABRAS CLAVE: Educación en Ingeniería; Impresión 3D; Simulación por computadora; Análisis Numérico; FreeCAD.

***Autor Correspondente:** Linhares, E. B.

RESUMO

O ensino através de aulas expositivas e dialogadas de conceitos abstratos utilizando somente quadro e giz ainda são muito comuns nos cursos de engenharia. Para a disciplina de Resistência dos Materiais, presente nos cursos de Engenharia Civil, essa realidade não é diferente. A mudança para uma abordagem mais concreta, pode incentivar a participação ativa dos discentes e desenvolver a compreensão desses conceitos. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta pedagógica que integra simulação via Método dos Elementos Finitos (MEF) com o software livre FreeCAD, como estratégia didática para o ensino prático de conceitos mecânicos. Para isso, utilizou-se como referência dados obtidos mediante ensaio mecânico de corpos de prova (CPs) cúbicos de 20 mm de aresta, impressos em 3D com material PLA utilizando diferentes padrões de preenchimento e conhecimento teórico. Os resultados teóricos e simulados foram comparados e mostraram boa aproximação para os valores de tensão e deformação, dois conceitos fundamentais na disciplina, destacando a importância da metodologia como ferramenta de ensino e aprendizagem. Além disso, a proposta promove uma metodologia acessível, participativa e que agrega conhecimentos tecnológicos e fomenta práticas pedagógicas inovadoras aos cursos de engenharia.

ABSTRACT

Teaching through expository and dialogued classes of abstract concepts using only blackboards and chalk is still very common in engineering courses. For the Materials Strength discipline, present in Civil Engineering courses, this reality is no different. Shifting to a more concrete approach

can encourage active student participation and develop understanding of these concepts. This work aims to present a pedagogical proposal that integrates simulation via the Finite Element Method (FEM) with the free software FreeCAD, as a teaching strategy for the practical teaching of mechanical concepts. For this, data obtained through mechanical testing of cubic test specimens (CPs) with 20 mm edges, 3D printed with PLA material using different filling patterns and theoretical knowledge, was used as a reference. The theoretical and simulated results were compared and showed a good approximation for the stress and strain values, two fundamental concepts in the discipline, highlighting the importance of the methodology as a teaching and learning tool. Furthermore, the proposal promotes an accessible, participatory methodology that adds technological knowledge and encourages innovative pedagogical practices to engineering courses.

RESUMEN

La enseñanza a través de clases expositivas y dialogadas de conceptos abstractos utilizando únicamente pizarras y tizas sigue siendo muy común en las carreras de ingeniería. Para la disciplina Resistencia de Materiales, presente en los cursos de Ingeniería Civil, esta realidad no es diferente. Cambiar a un enfoque más concreto puede fomentar la participación de los estudiantes y desarrollar la comprensión de estos conceptos. Este trabajo tiene como objetivo presentar una propuesta pedagógica que integra la simulación mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) con el software libre FreeCAD, como estrategia didáctica para la enseñanza práctica de conceptos mecánicos. Para ello se utilizaron como referencia los datos obtenidos mediante ensayos mecánicos de probetas cúbicas (CP) de 20 mm de arista, impresas en 3D con material PLA utilizando diferentes patrones de llenado y conocimientos teóricos. Los resultados teóricos y simulados fueron comparados y mostraron una buena aproximación para los valores de tensión y deformación, dos conceptos fundamentales en la disciplina, destacando la importancia de la metodología como herramienta de enseñanza y aprendizaje. Además, la propuesta promueve una metodología accesible y participativa que agrega conocimiento tecnológico y fomenta prácticas pedagógicas innovadoras a las carreras de ingeniería.

INTRODUÇÃO

A disciplina Resistência dos Materiais é um dos componentes fundamentais na área de estruturas, e integra a matriz curricular da maioria dos cursos de engenharia. Contudo, seu ensino ainda é conduzido predominantemente de forma teórica e abstrata, dificultando o entendimento pleno dos conceitos por parte dos discentes (Kraemer e Kieckow, 2021). Diante desse cenário, o uso de metodologias de ensino apoiadas em ferramentas tecnológicas acessíveis surge como uma possibilidade de transformar essa realidade e tornar a aprendizagem mais significativa (Antolin et al., 2023).

Segundo Oliveira (2008), o ensino de conceitos matemáticos é necessário, mas não suficiente para o desenvolvimento da intuição e das noções qualitativas exigidas em disciplinas estruturais da Engenharia Civil. Embora os números sejam importantes para quantificar e verificar fenômenos, eles não promovem, por si só, o desenvolvimento do pensamento crítico necessário para a formação plena do engenheiro.

Habilidades como pensamento crítico, resolução de problemas e autonomia tem como base a pedagogia construtivista. De acordo com Wengliniski (2005), essa abordagem considera que os discentes devem ser capazes de pensar de forma abstrata, mas também precisam ser expostos a exemplos concretos inseridos em diversos contextos expressivos. Para isso, é papel do professor utilizar os recursos disponíveis, como visitas técnicas, experimentos práticos, apresentações digitais, entre outros, promovendo situações reais que possibilitem a consolidação dos conteúdos trabalhados. Enquanto a abordagem tradicional transmite ideias já estabelecidas, a perspectiva construtivista permite que os estudantes assumam um papel mais ativo na construção do conhecimento, indo além da simples memorização de conceitos. Segundo Nakao et al. (2003), a compreensão parcial de um conceito leva o estudante a não reconhecer sua relevância comprometendo a aprendizagem. Isso reforça a importância de buscar métodos e estratégias que facilitem o processo de ensino-aprendizagem. Nesse sentido, Paz e Ruas (2019) destacam que a articulação entre teoria e prática desperta o interesse, motiva e estimula o engajamento dos discentes.

Desse modo, esse artigo tem como objetivo criar uma proposta didática que favoreça o ensino-aprendizagem da disciplina de Resistência dos Materiais, aplicando conceitos teóricos à prática através de simulações computacionais pelo método dos elementos finitos. Para isso, serão utilizadas tecnologias, como a impressão 3D para a produção dos CPs, a máquina universal de ensaio EMIC DL 2000 e o *software* livre *FreeCAD* para modelagem e simulações. Essa abordagem visa proporcionar uma aprendizagem mais concreta, incentivando a participação ativa dos discentes e uma compreensão mais profunda dos conceitos estruturais (Araújo et al., 2022).

O processo foi dividido em quatro etapas principais: primeiramente a modelagem do cubo com aresta de 20 mm no *FreeCAD*, em seguida a escolha dos parâmetros no *software UltiMaker Cura* e impressão dos CPs em material PLA (Ácido Polilático), posteriormente o ensaio experimental de compressão na máquina EMIC e, por fim, a simulação computacional desses ensaios utilizando novamente o *FreeCAD*. Por meio dessa sequência didática obtém-se resultados experimentais, teóricos e simulados que nos permite comparar e analisar tanto numericamente quanto de maneira qualitativa, ou seja, é possível fazer uma reflexão crítica

sobre as disparidades de dados, validar os modelos computacionais e apresentar suas limitações.

Dessa forma, espera-se contribuir com o ensino e a aprendizagem mais efetiva nas disciplinas de Resistência dos Materiais e na formação de futuros engenheiros. Que este conhecimento os capacite no entendimento do conteúdo, na interpretação dos problemas teóricos e principalmente na aplicação desses conceitos em situações reais. Este trabalho parte da hipótese de que a integração de simulações e práticas de laboratório com impressão 3D resulta em uma compreensão mais profunda dos conceitos de tensão e deformação por parte dos discentes.

REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Kraemer e Kieckow (2021), na disciplina de Resistência dos Materiais, abordado nos cursos de Engenharia, ainda se mantém o ensino predominantemente tradicional, com foco no professor e em aulas teóricas e expositivas, o que favorece uma aprendizagem mais mecânica e pouco crítica. Muitos estudantes enfrentam dificuldades em interpretar e analisar as solicitações mecânicas presentes em elementos estruturais, especialmente no que se refere à compreensão das tensões e deformações que ocorrem nos materiais, o que evidencia a necessidade de metodologias que tornem esse processo mais significativo e aplicado à realidade.

De acordo com a teoria de Ausubel (2000), a aprendizagem só se torna verdadeiramente significativa quando três condições são atendidas: a presença de conhecimentos prévios (subsunçores) que sirvam de base para o novo conteúdo; o uso de materiais didáticos com potencial de significado; e a relação do novo conhecimento com a realidade do estudante, de modo que este faça sentido e seja compreendido de forma integrada.

O cenário atual do ensino superior tem passado por constantes modificações relevantes em relação às práticas de ensino e aprendizagem. Debates e criação de resoluções, vem contribuindo para o avanço dos cursos de graduação, em que coloca o discente como protagonista em seu percurso acadêmico, deixando de ser apenas receptor de informações. As Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Graduação em Engenharia (Resolução nº 2/2019/CNE/CES) e as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira (Resolução nº 7/2018/CNE/CES) que destacam as metodologias ativas e o uso de tecnologias nos processos de ensino e aprendizagem, transformam a simples transmissão de conteúdo em uma formação mais conectada às exigências sociais atuais (Bardini e Spalding, 2017).

Considerando o exposto, Santos et al. (2020) apontam que a aplicação de tecnologias associadas a metodologias ativas no processo de ensino favorece a aprendizagem e contribui para elevar o nível de engajamento dos discentes. Nesse sentido, a integração de recursos tecnológicos ao ensino de engenharia não apenas amplia o conhecimento técnico, mas também fortalece a formação integral do futuro engenheiro.

Observa-se que a escolha da metodologia e dos recursos didáticos empregados pelo professor em sala de aula exerce papel fundamental no processo de aprendizagem. Nesse sentido, as práticas experimentais assumem grande relevância, pois contribuem de maneira efetiva para a construção do conhecimento (Kraemer e Kieckow, 2021).

A inserção da simulação computacional amplia ainda mais essas possibilidades, permitindo ao estudante visualizar fenômenos complexos, testar diferentes condições e compreender, de forma interativa e aplicada, conceitos que muitas vezes seriam de difícil assimilação apenas pela abordagem teórica (Pazin Filho e Scarpelini, 2007). Segundo Tseng (2003), *softwares* computacionais têm sido aplicados de forma eficaz no ensino-aprendizagem, mostrando-se úteis nas universidades e, além disso, a simulação computacional desperta o interesse do discente pelo conhecimento, bem como conecta com as demandas do mercado de trabalho.

Atualmente, há uma ampla variedade de *softwares* de simulação computacional voltados para modelagem e análise. Castilho (2017) destaca, entre eles, ANSYS, ABAQUS, FEMAP e NASTRAN, classificados como *softwares* de CAE (*Computer-Aided Engineerig*), amplamente utilizados em análises complexas, baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). Por outro lado, existem as ferramentas de modelagem CAD (*Computer Aided Design*), direcionadas principalmente para a criação e manipulação de modelos 3D de peças e montagens, que também incorporam simulações com o uso do MEF, como é o caso do *SolidWorks* e *FreeCAD* (Schiontek & Koide, 2019).

O *FreeCAD* surge como uma alternativa relevante nesse cenário, por se tratar de uma ferramenta CAD de código aberto que permite o desenvolvimento de projetos e análises sem os altos custos de *softwares* comerciais. Reconhecido por gerar arquivos mais leves e por disponibilizar recursos específicos para análises de deformação e tensão por elementos finitos. É especialmente direcionado à engenharia mecânica e ao *design* de produtos, embora também possa ser aplicado em áreas como arquitetura, impressão 3D e diversas outras atividades (Kasturi et al., 2025).

Em síntese, o uso de *softwares* de análise computacional na disciplina de Resistência dos Materiais pode assumir um papel fundamental no processo de ensino e aprendizagem dos cursos de engenharia (Antolin et al., 2023).

METODOLOGIA

A metodologia concentra-se em desenvolver atividades práticas para ensino de conceitos teóricos abordados na disciplina de Resistência dos Materiais como deslocamento axial, tensão normal e deformação, sujeitos a esforços de compressão, utilizando métodos complementares de análise: teórico, experimental e computacional. O objetivo é desenvolver aulas de forma investigativa e participativa, proporcionando uma aprendizagem mais efetiva.

A Figura 1 apresenta o desenvolvimento das etapas percorridas neste trabalho, envolvendo o processo de modelagem do corpo de prova no *Software FreeCAD* versão 0.20.2. Em seguida, ocorre a impressão 3D utilizando o material PLA. Posteriormente, a fase de ensaio experimental é conduzida para obtenção de dados sobre a resistência a compressão do material físico. Por fim, é executada a simulação, etapa de análise computacional por meio do método dos elementos finitos no *software FreeCAD*, na qual destina-se à comparação e validação dos resultados experimentais, permitindo discutir os conceitos teóricos estudados.

Figura 1. Fluxograma com etapas desenvolvidas desde a criação do modelo digital até a análise computacional

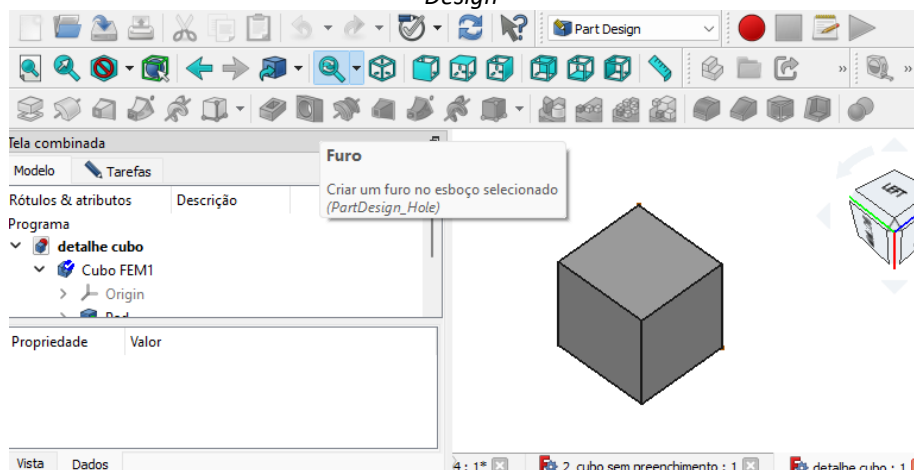
Fonte: Autores (2025).

MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O processo inicia-se com o professor apresentando em sala de aula a proposta que tem como finalidade projetar, fabricar, ensaiar, simular e comparar com os resultados teóricos. Um roteiro e descrição de cada objetivo são apresentados aos discentes. Neste momento, é feita uma contextualização da importância dos conceitos abordados, a relação entre teoria e prática, e a relevância para a formação do profissional.

Como organização da turma e divisão dos grupos, é sugerido o número de participantes por grupo entre 4 e 5 discentes para que todos participem ativamente do processo. Em seguida, cada grupo recebe uma folha de papel com as orientações definidas pelo professor para que projetem e fabriquem seus próprios corpos de prova.

No roteiro encontra-se primeiramente a modelagem da amostra cúbica com 20 mm de aresta no *FreeCAD*, utilizando a bancada “*Part Design*”, conforme apresentado na Figura 2, a qual mostra a área de trabalho do *software*. É importante destacar que o uso da ferramenta garante uma complementação adicional na formação do estudante com iniciação de projetos CAD (Desenho Assistido por Computador).

Figura 2. Área de trabalho do *software* livre *FreeCAD* para modelagem de sólidos através da bancada “*Part Design*”

Fonte: Autores (2025).

IMPRESSÃO 3D

Após a etapa de modelagem do cubo, exporta-se esse sólido no tipo de arquivo STL (*Stereolithography*), um formato de arquivo usado principalmente para impressão 3D e CAD, para que sejam definidos os parâmetros de impressão. Para isso, utiliza-se o *software UltiMaker Cura* versão 5.7.1, na qual são configurados a impressora 3D da marca *Creality* e modelo *Ender-3 S1 Pro*. Nesse momento, sugere-se um padrão de preenchimento a cada grupo para que haja uma discussão mais ampla nas análises dos resultados sobre o comportamento mecânico do material em relação à compressão em diferentes situações. O *software* permite vários padrões de preenchimento, o que permite ampliar de acordo com o número de grupos, neste caso foi escolhido o preenchimento tipo grade, linhas, triângulos e o tipo sem preenchimento interno. A Tabela 1 e 2 apresenta parâmetros comuns e específicos definidos aos grupos. A dinâmica para inserção dos parâmetros fica a cargo do professor conduzir da melhor forma para que não ocorra discrepância nos resultados.

Tabela 1. Parâmetros comuns a todos os grupos inseridos no *software UltiMaker Cura* para produção dos corpos de prova a serem manufaturados na impressora 3D *Ender-3 S1 Pro* da *Creality*

PARÂMETROS COMUM A TODOS OS CPs						
Nozzle (Bico) (mm)	Altura de camada (mm)	Altura da 1ª camada (mm)	Largura de extrusão da parede (mm)	Espessura de parede (mm)	Espessura superior/inferior (mm)	Camada superior/inferior (mm)
0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8	2
Espessura da camada de preenchimento (mm)	Temperatura de impressão (°C)	Temperatura da mesa (°C)	Habilitar Refrigeração de Impressão	Velocidade da ventoinha (%)	Tipo de aderência	Distância da retração (mm)
0,2	200	60	-	100	SKIRT	0,8

Fonte: Autores (2025).

Tabela 2. Cada grupo recebe um padrão de preenchimento específico a ser configurado no *UltiMaker Cura* para posteriormente ser manufaturado na impressora 3D *Ender-3 S1 Pro* da *Creality*

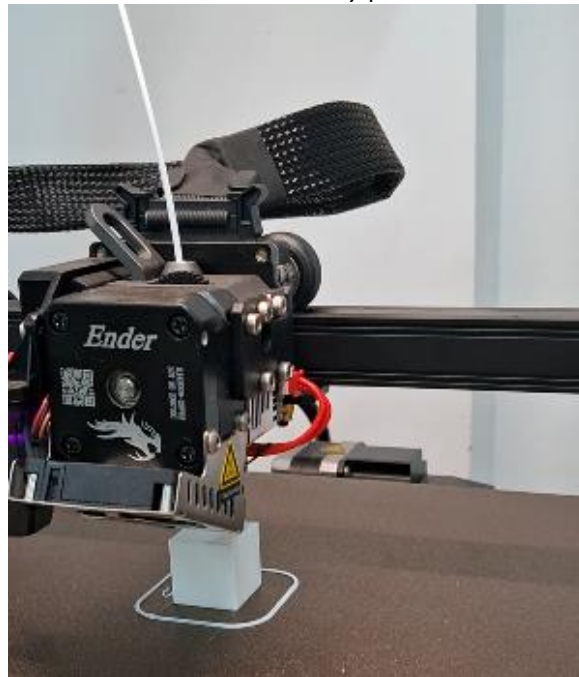
PARÂMETROS ESPECÍFICOS PARA CADA CP					
CP	Padrão de preenchimento	Nº de filetes da parede	Distância da linha de Preenchimento (mm)	Multiplicador de preenchimento	Velocidade de impressão (mm/s)
1	Grade	2	4	1	60
2	Linhas	2	4	1	60
3	Triângulos	2	4	1	60
4	Sem preenchimento	2	0	0	60

Fonte: Autores (2025).

A impressora *Ender-3 S1 Pro* permite utilizar dois tipos de material, o PLA (Ácido Polilático) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), sendo definido para este trabalho a impressão dos corpos de prova com o material PLA por ser de fácil impressão, boa rigidez e, por ser um material popularmente utilizado, acaba sendo mais acessível.

Na etapa de impressão, os CPs foram manufaturados no Laboratório de Pesquisas em Ensino de Ciências (LabPEC) localizado no Câmpus de Ciências Exatas e Tecnológicas (CET) da UEG em Anápolis - GO. Cada peça foi impressa individualmente, como apresentado na Figura 3, para evitar possíveis interferências causadas por erros durante o processo de impressão. Durante e após a impressão de cada peça, eram realizadas inspeções visuais para identificar possíveis deformidades com intuito de garantir a qualidade no ensaio experimental. De acordo com a norma ISO 604: 2002 foram impressos 5 corpos de prova para cada padrão de preenchimento.

Figura 3. Impressora 3D *Ender-3 S1 Pro* da *Creality* produzindo CP cúbico de material PLA



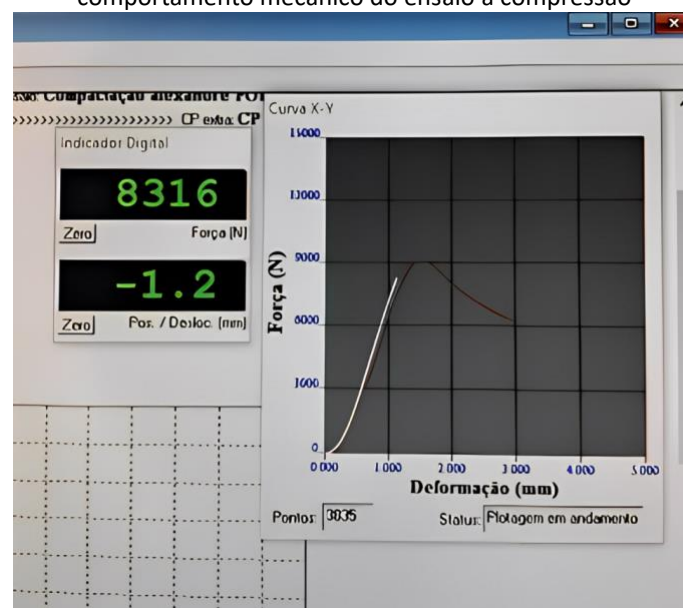
Fonte: Autores (2025).

É importante ressaltar que embora as impressoras 3D tenham popularizado, ainda não são um equipamento amplamente acessível. Proporcionar ao discente a oportunidade de conhecer e manusear essa tecnologia durante sua formação acadêmica representa um importante diferencial para o mercado de trabalho.

ENSAIO EXPERIMENTAL

Em seguida, organiza-se a sequência de ensaios na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos EMIC DL-2000 do Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da UEG em Anápolis - GO (CAiTec), permitindo que cada grupo acompanhe o teste de suas peças. O software acoplado registra dados, como força e deformação, possibilitando a análise gráfica e o armazenamento dos resultados. A Figura 4 apresenta de forma simultânea o indicador digital e o gráfico registrando a capacidade de força e deslocamento.

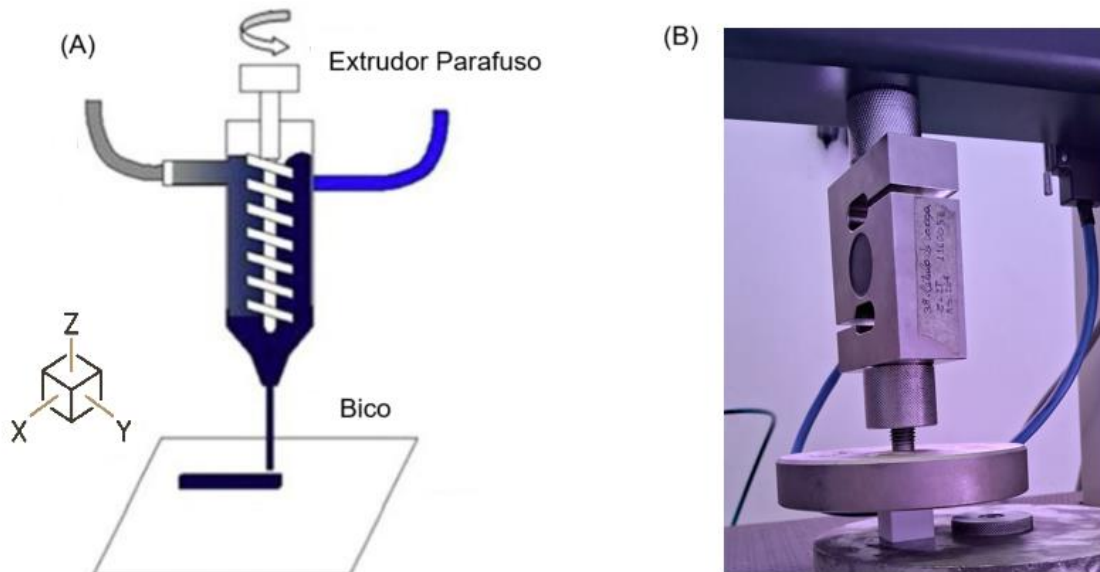
Figura 4. Indicador digital e gráfico gerado pelo software da máquina EMIC DL-2000, auxiliam na observação do comportamento mecânico do ensaio à compressão



Fonte: Autores (2025).

O carregamento é aplicado ao longo do eixo Z, alinhado ao sentido de impressão, direção na qual se espera a maior resistência do material. A Figura 5 apresenta o sentido do carregamento. A taxa de deslocamento e direção de aplicação da carga seguem a norma ISO 604:2002.

Figura 5. A figura (A) apresenta a distribuição das camadas de impressão no sentido do eixo Z e a figura (B) apresenta o ensaio de compressão da máquina EMIC DL-2000 aplicando a carga no sentido do eixo Z



Fonte: Autores (2025).

Com os dados coletados, cada grupo calcula, por meio dos conceitos teóricos, o deslocamento (δ), a tensão normal (σ) e a deformação (ε) ensinados na disciplina de Resistência dos Materiais (Hibbeler, 2010). Para tanto, faz-se necessário recorrer as seguintes equações:

Para a determinação da tensão normal média, utiliza-se a Equação 1.

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

onde,

σ - Tensão normal média

P - Carga suportada pelo material

A - Área inicial da seção transversal do corpo de prova.

A área da seção transversal pode ser determinada com a utilização de um paquímetro ou outros mecanismos de medida, em um corpo de prova impresso parcialmente, em que seja possível visualizar o preenchimento interno ou na imagem gerada no *UltiMaker Cura*, que também permite visualizar um corte na peça. Ambos permitem obter uma boa aproximação da área.

Para determinar o deslocamento axial, utiliza-se a Equação 2.

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (2)$$

onde,

δ - Deslocamento axial

P - Carga axial

L - Comprimento inicial da peça

A - Área da seção transversal

E - Módulo de elasticidade ou módulo de Young

O módulo de elasticidade considerado para o material PLA utilizado nesse experimento foi de $E = 3640 \text{ MPa}$. Valor médio que se encontra dentro do intervalo estabelecido pelo fabricante 3DLAB.

E para determinar a deformação utilizou-se a fórmula da Lei de Hooke (Equação 3):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

onde,

σ - Tensão normal média

E - Módulo de elasticidade ou módulo de Young

ε - Deformação nominal.

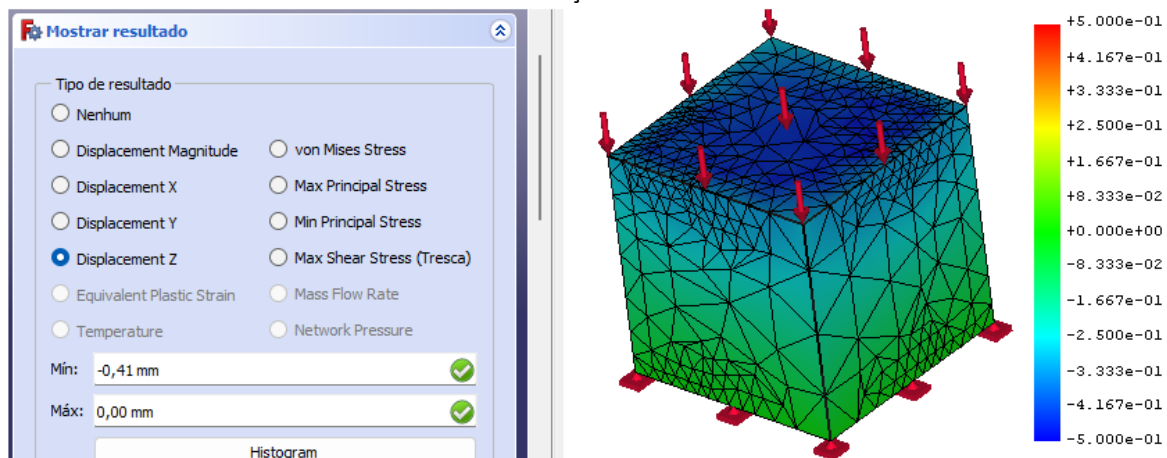
De posse dos resultados, os discentes organizam os dados em planilhas eletrônicas (*Excel* ou *LibreOffice Calc*), finalizando a primeira etapa do processo.

ANÁLISE NUMÉRICA

O próximo passo consiste na modelagem dos CPs previamente definidos no *UltiMaker Cura*, seguidas das simulações computacionais para análises numéricas utilizando a bancada MEF no *software FreeCAD*. Nessa etapa o professor auxilia no uso da ferramenta para construção do modelo, inserção das propriedades do material PLA, na adição da restrição fixa na base, carga máxima na face superior e o tamanho máximo da malha (Figura 5).

Dessa maneira, o *software* gera os resultados das tensões normais e deslocamentos máximos pelo qual são utilizados para comparar aos resultados alcançados através dos conceitos teóricos de Resistência dos Materiais. Além dos resultados numéricos obtidos na simulação, ele permitiu compreender e discutir com os discentes sobre o comportamento do material, visualizando a concentração de tensão quando o CP é submetido a esforço de compressão (Figura 6).

Figura 6. Simulação via MEF de CP submetido à ensaio de compressão e diagrama de cores apresentando a concentração de tensão



Fonte: Autores (2025).

Assim, cada grupo extraiu os dados correspondente a simulação do seu corpo de prova, alimenta a planilha eletrônica com as informações do deslocamento axial e tensão normal, complementa com o cálculo da deformação nominal através da Equação 3 apresentado anteriormente e finaliza-se o processo computacional.

Para o desfecho da atividade, o professor propôs cada grupo expor os resultados, discussões e suas conclusões. Também é feito uma análise entre os quatro modelos de corpo de prova, considerando aspectos como a resistência à compressão com relação aos padrões de preenchimento, deslocamento axial, tensão normal e deformação. Desta forma, o discente aprendeu a estruturar sua apresentação, desenvolver habilidades de comunicação expondo suas hipóteses, defender argumentos com base nos dados obtidos de forma crítica, fortalecendo o raciocínio científico e o trabalho em equipe.

Por meio dessa sequência, o discente vivenciará um processo de aprendizagem prática de forma a consolidar e aplicar os conceitos teórico abordados na disciplina de Resistência dos Materiais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tem-se os resultados da capacidade de carga (P) do ensaio experimental, que são calculados mediante a média aritmética do ensaio experimental realizado em 5 (cinco) corpos de prova de cada padrão de preenchimento. A área da seção transversal (A) de cada CP é determinada pelos parâmetros definidos no *software UltiMaker Cura* e a utilização do paquímetro para precisar as dimensões no próprio material impresso. O módulo de elasticidade do material PLA, considerou-se o mesmo utilizado nas propriedades definidas no *FreeCAD* com valor de $E = 3640 \text{ MPa}$. E o comprimento inicial, conforme estabelecido na modelagem do corpo de prova, ou seja, um sólido cúbico com arestas de 20mm, portanto $L = 20 \text{ mm}$. Assim, determina-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento axial (δ) e deformação nominal (ϵ) (Tabela 3), utilizando as equações (1), (2) e (3) abordados anteriormente.

Tabela 3. Resultados das forças (P) através do ensaio experimental, área da seção transversal, e as tensões (σ), deslocamentos (δ) e deformações (ϵ) determinados pelas equações 1, 2 e 3, para cada corpo de prova

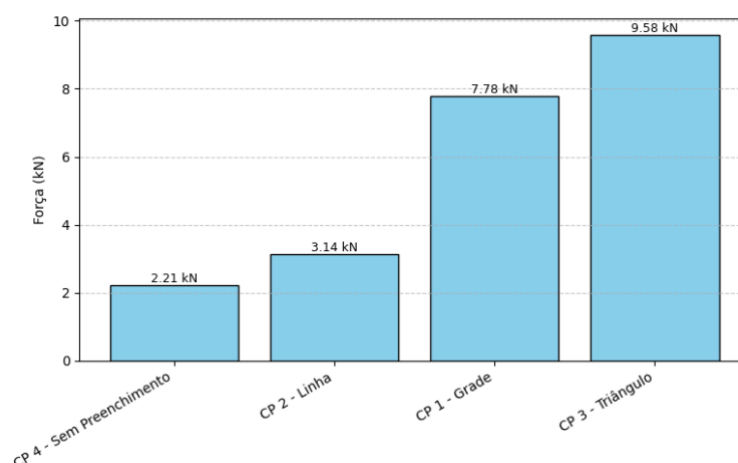
Corpo de Prova	Força (P)(kN)	Área da Seção Transversal (A)(mm ²)	Tensão Normal (σ) (MPa)	Deslocamento Axial (δ) (mm)	Deformação (ϵ)(mm/mm)
CP 1 - Grade	7,78	89,04	87,41	0,48	0,024
CP 2 - Linha	3,14	88,52	35,46	0,19	0,010
CP 3 - Triângulo	9,58	89,50	107,08	0,59	0,029
CP 4 - Sem Preenchimento	2,21	61,44	35,97	0,20	0,010

Fonte: Autores (2025).

Nesse momento o estudante desenvolve uma relação entre a prática, com a observação do comportamento do material diante do ensaio experimental e a teoria, com a elaboração de planilhas em Excel, organização e alimentação de dados, desenvolvimento dos cálculos, compartilhamento de informações e análise de dados.

O Gráfico 1, exibe em ordem crescente a resistência mecânica à compressão com relação aos padrões de preenchimento. Os dados revelam variações significativas em relação a capacidade de carga entre os CPs. O CP 3 apresenta maior resistência (9,58 kN), isso indica que o padrão triangular é mais eficiente nas distribuições das tensões e, de acordo com as análises de estruturas, confirma que é estudado sobre as treliças, que geralmente apresentam maiores estabilidades.

Gráfico 1. Padrão de preenchimento em que os corpos de prova suportam maior capacidade de carga quando submetidos à compressão

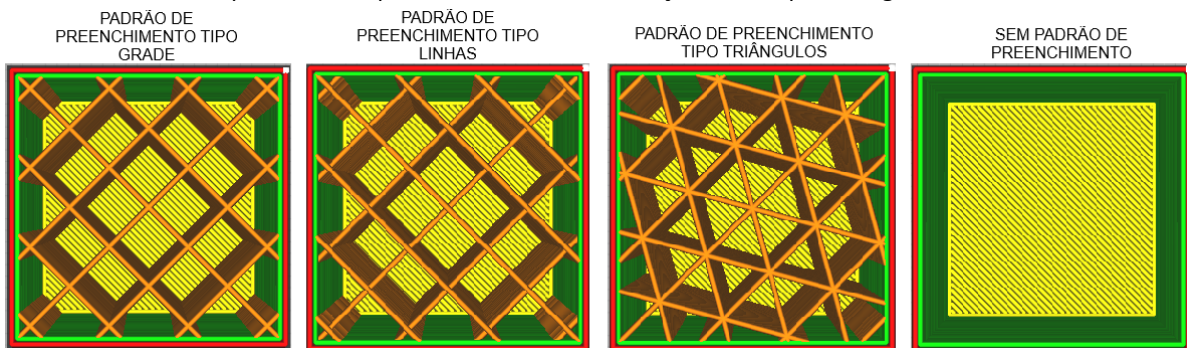


Fonte: Autores (2025).

Observando a diferença entre os padrões linhas e grade (Figura 7) em que o CP 1 é cerca de 2,5 vezes mais resistente que o CP 2, nos desperta uma curiosidade, já que eles apresentam a mesma distribuição de preenchimento interno. É nessa ocasião que o ensino se aprofunda, pois o discente é provocado a dá respostas e para isso, são estimulados a investigação dos fatos através de observações críticas, levantar hipóteses e realizar pesquisas para compreender o que pode estar influenciando os resultados.

Uma possível explicação para essa diferença está relacionada à trajetória do bico de impressão, no qual a distribuição dos filamentos para o padrão de preenchimento em linhas, se distribuem gerando espaços vazios entre as camadas, comprometendo o desempenho mecânico do corpo de prova. Em contrapartida, o padrão de preenchimento em grade distribui os filamentos gerando uma estrutura treliçada que não deixam vazios entre as camadas, proporcionando uma resistência significativamente superior.

Figura 7. Os tipos de padrão de preenchimento dos CP a serem analisadas com relação a resistência mecânica à compressão, em que se observa a semelhança entre os padrões grade e linhas



Fonte: Autores (2025).

É importante destacar que a escolha do tipo de preenchimento interno vai depender muito da funcionalidade. Parâmetros como tempo de manufatura e quantidade de material, nos permite refletir sobre a escolha da resistência adequada. Esses tipos de análises são ensinados aos discentes quando se trabalha o conteúdo de resistência de materiais teoricamente, pois um dos princípios da engenharia está na busca do equilíbrio entre o baixo custo material, em ser eficiente e viável financeiramente.

Com relação as simulações realizadas no *software FreeCAD* tem-se os resultados para tensão (σ) e deslocamento (δ), quanto que para a (ε), calcula-se utilizando a equação 3, na qual a Tabela 4 apresenta um comparativo entre os resultados teóricos, destacados em cor amarela, e simulados, destacados em cor azul. Em cor verde, apresenta-se o erro absoluto (Equação 4) para os deslocamentos e as deformações entre os métodos. Para a tensão, apresenta-se o erro relativo (Equação 5), no qual os resultados teóricos foram considerados o valor real (VR) e os dados da simulação, o valor simulado (VS).

$$\text{Erro Absoluto} = |VS - VR| \quad (4)$$

$$\text{Erro Relativo} = \frac{|VS - VR|}{|VR|} \quad (5)$$

Tabela 4. Resultados das simulações dos CPs para obtenção da Tensão Normal (σ), Deslocamento Axial (δ) e Deformação (ϵ), além do cálculo do erro absoluto e relativo entre os métodos

Material PLA	D. Teórico (mm)	D. Simulado (mm)	Erro Absoluto	T. Experimental (MPa)	T. Simulada (MPa)	%	D. Teórico (mm/mm)	D. Simulada (mm/mm)	Erro Absoluto
CP 1	0,48	0,39	0,09	87,41	91,26	4,40	0,024	0,025	0,001
CP 2	0,19	0,16	0,03	35,46	36,74	3,61	0,01	0,010	0,000
CP 3	0,59	0,41	0,18	107,08	116,83	9,11	0,029	0,032	0,003
CP 4	0,20	0,19	0,01	35,97	39,20	8,98	0,010	0,011	0,001

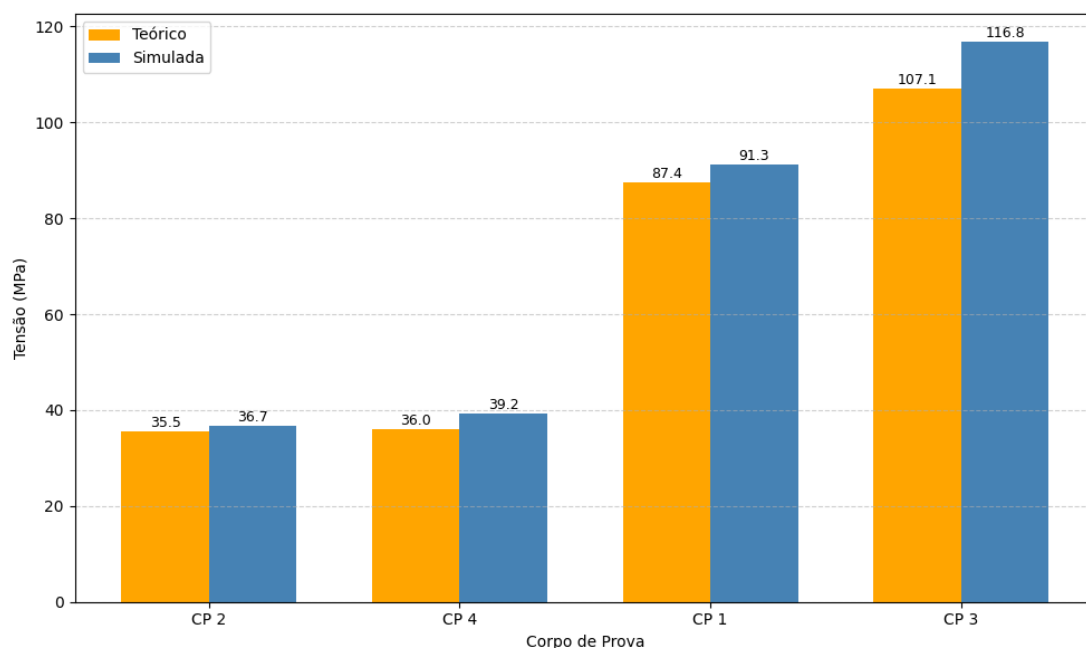
Fonte: Autores (2025). Onde: "D": Deformação; "T": Tensão.

Evidencia-se que a simulação pelo método de elementos finitos, em geral, reproduziu com boa precisão dos resultados obtidos teoricamente a todos os CPs. Ao comparar a tensão normal (σ) entre o conceito teórico e a simulação computacional, verificou-se que o CP 2 obteve o menor erro relativo (3,61%) indicando uma excelente aproximação e o CP 3 obteve o maior erro relativo (9,11%) que pode ser classificado como aceitável. Nota-se também que o CP 1 ficou entorno de 4% e CP 4 em 9%, no geral, os resultados indicam uma maior confiabilidade do modelo simulado.

Mais uma vez tem-se a abordagem prática no processo de ensino e aprendizagem. Ao vivenciar a simulação em um *software CAD*, fazer análise numérica pelo método de elementos finitos, os discentes desenvolvem a capacidade de validar modelos computacionais, relacionar a teoria com a prática e compreender a os conceitos fundamentais de resistência dos materiais.

Ainda com relação a tensão normal, observa-se no Gráfico 2 que não houve uma diferença relevante entre o método teórico e simulado, além disso, tem-se uma aproximação entre o CP 2, estrutura sem preenchimento, e o CP 4, estrutura com padrão de preenchimento em linhas. Essa aproximação sugere que o preenchimento interno do tipo linhas não exerceu esforços significativos sobre o sistema global do corpo de prova, ou seja, as paredes externas da estrutura foram as principais responsáveis por suportar as tensões durante o carregamento.

Gráfico 2. Comparação da tensão normal teórico e simulado para os diferentes padrões de preenchimento

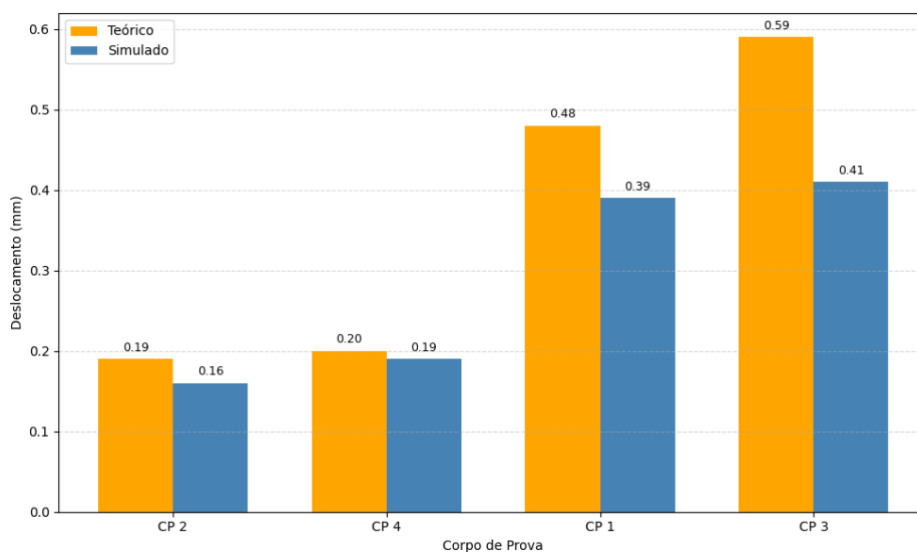


Fonte: Autores (2025).

As tensões do modelo simulado são ligeiramente maiores que o teórico, o que é muito comum em simulações devido à ausência de imperfeições físicas de construção e de materiais. Além disso, as aproximações revelam a precisão dos modelos numéricos. A análise do gráfico é explorada de forma participativa e estimula os discentes sobre as possíveis hipóteses que causam diferenças entre os métodos, além disso, integra a teoria com a prática simulada por computador.

Quanto ao deslocamento axial, observa-se no Gráfico 3 que o CP 3 apresenta a maior diferença, com deslocamento teórico de 0,59 mm e simulado de 0,41 mm, gerando uma diferença absoluta de 0,18 mm. Apesar disso, a diferença torna-se irrelevante por se tratar de deslocamentos milimétricos, o que indica que os resultados seguem satisfatórios.

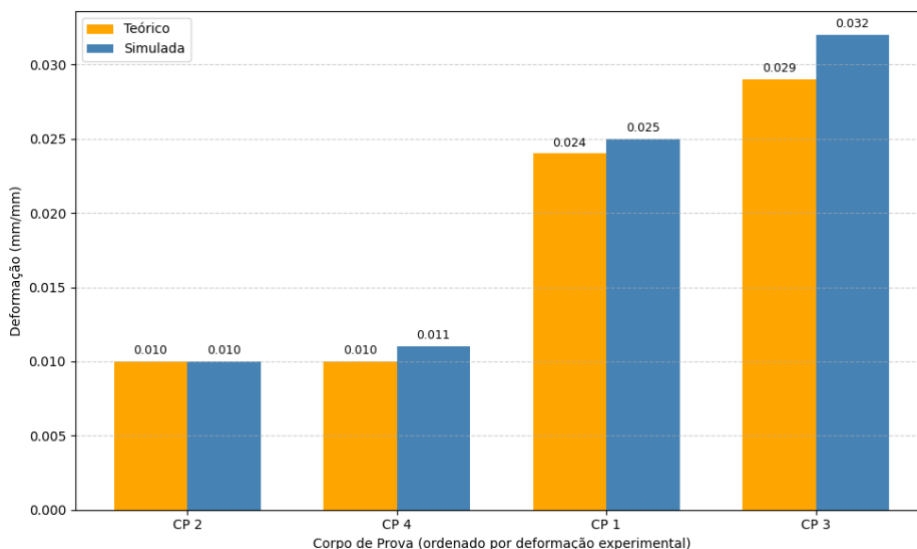
Gráfico 3. Comparação do deslocamento axial teórico e simulado em corpos de prova com diferentes padrões de preenchimento, validando os métodos com a aproximação dos resultados simulados



Fonte: Autores (2025).

No que se refere a análise das deformações entre os métodos, a excelente aproximação dos resultados para cada CP (Gráfico 4), com um erro absoluto máximo de 0,003 mm/mm, reforça a validade do modelo numérico. Além do mais, o gráfico garante uma representação do comportamento real do material PLA sob carregamento.

Gráfico 4. A deformação nominal teórico e simulado em corpos de prova com diferentes padrões de preenchimento, apresentam uma boa aproximação entre os métodos, validando o processo de simulação



Fonte: Autores (2025).

Desta forma, a sequência didática apresentada permite explorar diversos conceitos fundamentais para o estudo de resistência dos materiais, como tensão, deformação e deslocamento, promovendo uma aprendizagem ampla e integrada sobre o assunto. Com a prática de fenômenos e conceitos estudados em sala, os discentes se aproximam mais de sua profissão, vivenciando algumas das habilidades e competências do profissional de engenharia. A abordagem experimental, teórica e simulada favorece a proposta de uma pedagogia construtivista e de crescimento no ensino-aprendizagem, tornando mais significativo, contextualizado e alinhado às exigências da formação em engenharia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta uma proposta didática de ensino-aprendizagem com a utilização da simulação computacional no ensino de Resistência dos Materiais. Para alcançar esse objetivo, o estudo percorreu diversas etapas e conceitos fundamentais para a formação do estudante de engenharia. Equipamentos físicos e ferramentas digitais foram essenciais para integrar teoria e prática, favorecendo a compreensão de assuntos como tensão, deformação e deslocamento. Proporcionar um ambiente em que o discente seja protagonista em todas as etapas que vão desde a modelagem computacional, liberdade de decisão sobre os parâmetros e impressão dos corpos de provas, análise de dados experimentais até análises numéricas, cria uma aprendizagem mais ativa, investigativa e contextualizada.

A aproximação dos resultados obtidos entre o desenvolvimento teórico e a simulação, revela a confiabilidade dos modelos computacionais e, mesmo que ocorra desses resultados divergirem, possibilita aos estudantes levantar hipóteses que justifique tais diferenças, discutir sobre o método, interpretar dados, proporcionando o pensamento crítico e a prática da pesquisa. É importante destacar que tanto o método teórico quanto o simulado fortalecem a compreensão dos fenômenos físicos abordados na disciplina de resistência dos materiais.

Apesar dos resultados, a análise restringe-se a corpos de prova com uma geometria simples (cúbica) submetido somente ao carregamento de compressão em direção ao eixo z, com intuito de facilitar os procedimentos didáticos como a execução dos ensaios, modelagens e aplicação dos conceitos teóricos. Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a metodologia com geometrias complexas e explorar as demais solicitações, como tração e flexão. Além disso, como a impressão 3D por FFF (Fabricação por Filamento Fundido) cria peças anisotrópicas, realizar ensaios em outras direções, permite uma análise mais abrangente. Também se sugere uma avaliação quantitativa do aprendizado por meio de atividades antes e depois da proposta para mensurar o processo de ensino-aprendizagem, identificar pontos fortes, pontos de atenção e aprimorar a didática no ensino da disciplina.

Como sugestão, o professor pode propor aos discentes a projetar e imprimir um corpo de prova com diferentes geometrias como, cilíndricas, prismas, entre outras e com variadas dimensões. A proposta pode trabalhar tanto o conceito de compressão quanto o de tração e, como desafio adicional, permitir que os próprios discentes definam os parâmetros de impressão de modo a obter a maior capacidade de carga possível, dentro de um limite pré-estabelecido de quantidade de filamento.

O professor também pode estimular a discussão propondo perguntas como: Por que o valor máximo de força obtido no ensaio experimental foi inferior ao previsto na simulação? Liste pelo menos três fatores relacionados ao processo de fabricação (impressão 3D); por que o padrão triangular apresentou maior resistência? Relacione sua resposta aos conceitos de treliças; O erro relativo de 9% para a tensão do CP3 é aceitável em um projeto real de engenharia? Justifique.

Um aspecto importante é que a aplicação desta proposta pode ser questionada quanto ao tempo de execução dentro da carga horária da disciplina de resistência dos materiais. Vale

ressaltar que grande parte das etapas já deveriam estar contemplado no planejamento do professor, como o ensaio experimental e a análise numérica. Trata-se de um processo semelhante ao que já ocorre em outras disciplinas como por exemplo Tecnologia do Concreto, em que os corpos de prova são preparados e posteriormente ensaiados aos 3, 7 e 28 dias. Quanto a modelagem recomenda-se que seja realizada com os discentes a partir de um modelo pré-definido, otimizando o tempo. Já a impressão 3D seja feita apenas alguns corpos de prova, deixando os demais para serem produzidos posteriormente por monitores ou técnicos de laboratórios, assegurando a execução completa do projeto.

Dessa forma, conclui-se que o ensino de resistência dos materiais, com o auxílio de tecnologias acessíveis, pode ser uma abordagem pedagógica relevante para o entendimento pleno de conceitos conduzidos predominantemente de forma teórica e abstrata. As ferramentas computacionais, impressão 3D, ensaios experimentais, são capazes de tornar o ensino mais envolvente, dinâmico e significativo, indo de encontro com as metodologias tradicionais utilizando apenas recursos como quaro e giz.

REFERÊNCIAS

- Antolin, G. D. C., Antolin, M. Q., Antonio, M. M. Z., da Costa, G. C., Vista, R. C., Luiz, T. F., & Freitas, M. S. da C. (2023). Ensino de resistência de materiais a partir de simulações computacionais. *Observatório de la economia latino-americana*, 21(11), 23340-23354. <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-257>
- Araújo, C. A. O., de, Pinto, E. L., Cordeiro, C. A., Souza, G., de. (2022). Use of Ansys Workbench computational tool applied to teaching in engineering course. *International journal of geoscience, engineering and technology*, 5(1), 11-15. <https://doi.org/10.70597/ijget.v5i1.466>
- Ausubel, D. P. (2000). Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva. Lisboa.
- Bardini, V. S. S. & Spalding, M. (2017). Aplicação de metodologias ativas de ensino-aprendizagem: Experiência na área de engenharia. *Revista de Ensino de Engenharia*, 36(1), 49-58. <https://doi.org/10.5935/2236-0158.20170005>
- Brasil. Ministério da Educação. MEC. Conselho Nacional de Educação. CNE/Câmara de Educação Superior. CES. (2019). Resolução CNE/CES Nº 2, de 24 de abril de 2019. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, ano 157, n. 80, p. 43-44.
- Brasil. Ministério da Educação. MEC. Conselho Nacional de Educação. CNE/Câmara de Educação Superior. CES. (2018). Resolução CNE/CES Nº 7, de 18 de dezembro de 2018. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, ano 156, n. 243, p. 49-50.
- Hibbeler, R. C. (2010). Resistência dos materiais. 7ª ed. São Paulo. *Pearson Prentice Hall*.
- ISO 604 (2002). Plastics. Determination of compressive properties; ISO: Geneva, Switzerland.
- Kasturi, K., Rahadian P, R., Akhiriyanto, N., Hafiz, M. (2025). Open-source modeling and structural deformation analysis of a solar-powered charging station using freeCAD. *Journal Polimesin*, 23(1). <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i1.5958>
- Kraemer, F. A. & Kieckow, F. (2021). Experimentação como estratégia didática no ensino de mecânica dos sólidos na engenharia. *Revista de ensino de engenharia*, 40, 181-188. Recuperado de <https://revista.abenge.org.br/index.php/abenge/article/view/1591>.
- Nakao, O. S., Filho, J. A. A. G., & Monteiro, C. O. (2003). Os modelos físicos e o laboratório didático de resistência dos materiais. Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. COBENGE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 9p. <https://admin.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/16/artigos/NMT225.pdf>
- Oliveira, M. S. (2008). Modelo estrutural para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Paz, G. L. G. & Ruas, S. R. C. (2019). Elaboração de modelos físicos para resistência dos materiais: uma experiência didática. *Revista de Ensino de Engenharia*, 39(2), 48-54. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/335697387>
- Pazin, A. F. & Scarpelini, S. (2007). Simulação: definição. *Medicina, Ribeirão Preto*, 40(2), 162-166. <https://doi.org/10.11606/issn.21767262.v40i2p162-166>
- Santos, E. M. F., et al. (2020) Aprendizagem ativa como principal estratégia para atendimento das novas diretrizes curriculares nacionais de engenharia. In: XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Caxias do Sul. Anais. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/346573942>
- Schiontek, C. M. & Koide, R. M. (2019). Utilização de software livre na modelagem da flambagem de placas de materias compósitos. *Caderno PAIC*, 20(1), 297-314. Recuperado de <https://cadernopaic.fae.emnuvens.com.br/cadernopaic/article/view/349>
- Tseng, T. F. (2003). Applications of Computer simulation in mechanism teaching. *Computer Applications in Engineering Education*, 11, 156-165. <https://doi.org/10.1002/cae.10043>
- Wengliniski, H. (2005). Using technology wisely: the keys to success in schools. New York: *Teachers College Press*, 112p.