



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO(EMC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (PPGMEC)

VINÍCIUS HIROSHI SOUZA MIWA

**Estudo experimental de parâmetros de impressão e
otimização de peças em manufatura aditiva**

GOIÂNIA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Vinicius Hiroshi Souza Miwa

3. Título do trabalho

Estudo Experimental de Parâmetros de Impressão e Otimização de Peças em Manufatura Aditiva

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Hiroshi Souza Miwa, Discente**, em 29/08/2025, às 14:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5613650** e o código CRC **BAC465B0**.

VINÍCIUS HIROSHI SOUZA MIWA

**Estudo experimental de parâmetros de impressão e
otimização de peças em manufatura aditiva**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre(a) em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Mecânicas

Linha de pesquisa: Materiais e Manufatura Avançada

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Miwa, Vinícius Hiroshi Souza
Estudo Experimental de Parâmetros de Impressão e Otimização de Peças em Manufatura Aditiva [manuscrito] / Vinícius Hiroshi Souza Miwa. - 2025.
123 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha; co-orientador Dr. Marcelo Sampaio Martins.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Manufatura aditiva. 2. Otimização topológica. 3. Fabricação por filamento fundido. 4. Ensaio de tração. I. Cunha, Daniel Fernandes da, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **05** da sessão de Defesa de Dissertação de **Vinícius Hiroshi Souza Miwa**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Ao **vigésimo nono dia do mês de julho de dois mil e vinte e cinco**, a partir das **08h**, em sala virtual, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**Estudo Experimental de Parâmetros de Impressão e Otimização de Peças em Manufatura Aditiva**". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Daniel Fernandes da Cunha (UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Rhander Viana (UnB Gama)**, membro titular externo; Professor Doutor **Everton Coelho de Medeiros (SENAI SP)**, membro titular externo; **cujas participações ocorreram através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Daniel Fernandes da Cunha**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao **vigésimo nono dia do mês de julho de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 12:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rhander Viana, Usuário Externo**, em 29/08/2025, às 13:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Everton Coelho de Medeiros, Usuário Externo**, em 29/08/2025, às 14:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Sampaio Martins, Usuário Externo**, em 01/09/2025, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5613638** e o código CRC **B5A75B1E**.

Referência: Processo nº 23070.033173/2025-42

SEI nº 5613638

Dedico este trabalho ao meu avô Zenon, que, na ânsia de me ensinar o básico da Matemática, acabou me ensinando algo ainda mais valioso: o amor pela Ciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial São Paulo (SENAI-SP) pela bolsa de estímulo à inovação e estrutura cedidas. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante os primeiros meses do curso. Ao ANSYS, Inc. pelas imagens disponibilizadas. Ao meu orientador, Daniel Fernandes da Cunha, pelo auxílio e material concedido. Ao Everton Coelho de Medeiros, pela confiança e oportunidade que me foi depositada, além de todo o esforço para viabilização da minha pesquisa. Ao meu amigo e companheiro de mestrado, Cristiano Faria de Oliveira, pelos momentos de aconselhamento e apoio. À Fernanda Martins Queiroz, pelos ensinamentos e suporte durante todo o desenvolvimento dos testes mecânicos. Ao Caue Rodrigues Cezari Patucci, pela assistência na impressão das amostras. À minha namorada, Kemily Rodrigues Pires, pelo apoio durante todo o desenvolvimento do trabalho. Finalmente, aos meus amigos e colegas de trabalho, Lucas Yokoyama Justino e Vitor Palombarini, pelo auxílio nas impressões e testes das últimas amostras. Esse trabalho só foi possível pela contribuição de todos vocês.

RESUMO

A otimização topológica, que sofre com as limitações da manufatura tradicional, tem ganho cada vez mais aplicações devido à manufatura aditiva. Dessa forma, o objetivo principal do presente trabalho foi desenvolver uma comparação entre os métodos de otimização oriundos da manufatura aditiva por fabricação por filamento fundido (variação de preenchimento) com a otimização topológica (método SIMP). Para isso, inicialmente foram desenvolvidos testes de tração com variação de ângulo de impressão, fornecedor do material, taxa de extrusão, velocidade de impressão e largura de filamento, em corpos obtidos por esse método de fabricação. Em seguida, após encontrar os melhores parâmetros para os níveis considerados, foi desenvolvida uma peça otimizada e impressa para teste em ensaio de compressão. Finalmente, utilizaram-se os resultados experimentais para o desenvolvimento de uma análise numérica das peças. Ficou claro que os melhores parâmetros foram os filamentos direcionados em paralelo ao carregamento, o material do fornecedor 1, a largura de extrusão menor, a menor velocidade de impressão e a maior taxa de extrusão. Sendo assim, o corpo de prova com os melhores níveis enunciados obteve valor de resistência à tração de 62,78 MPa, enquanto o de menor obteve um valor de 31,85 MPa. Notoriamente, a taxa de extrusão foi o parâmetro que mais influenciou no comportamento mecânico, seguido pelo ângulo de impressão dos filamentos. A análise das otimizações demonstrou uma clara superioridade de resistência mecânica das peças otimizadas por otimização topológica em relação aos outros tipos de otimização; sendo que a peça em que foi aplicada a otimização topológica obteve um valor de força máxima acima de 12 kN, enquanto a obtida utilizando o preenchimento grid obteve valor em torno de 9 kN e a obtida utilizando o gyroid obteve valor menor que 6 kN. Por fim, as simulações numéricas demonstraram a confiabilidade da metodologia empregada, em que as marcações de concentração de tensão foram onde houve o rompimento da estrutura durante a análise experimental, além disso, ela evidenciou a suavização ocorrida pela manufatura aditiva em relação a geometrias irregulares.

Palavras-chaves: manufatura aditiva; otimização topológica; fabricação por filamento fundido; ensaio de tração.

ABSTRACT

Topological optimization, which suffers from the limitations of traditional manufacturing, has been increasingly applied due to additive manufacturing. Thus, the main objective of the present work was to develop a comparison between optimization methods derived from additive manufacturing through fused filament fabrication (infill variation) and topological optimization (SIMP method). For this purpose, tensile tests were initially carried out with variation of printing angle, material supplier, extrusion rate, printing speed, and filament width, on specimens obtained by this manufacturing method. Then, after finding the best parameters for the levels considered, an optimized part was developed and printed for testing under compression. Finally, the experimental results were used for the development of a numerical analysis of the parts. It became clear that the best parameters were filaments oriented parallel to the loading direction, the material from supplier 1, the smaller extrusion width, the lower printing speed, and the higher extrusion rate. Accordingly, the specimen with the best levels achieved a tensile strength of 62.78 MPa, while the one with the lowest levels obtained 31.85 MPa. Notably, the extrusion rate was the parameter that most influenced the mechanical behavior, followed by the printing angle of the filaments. The optimization analyses demonstrated a clear superiority in the mechanical strength of parts optimized by topological optimization compared to other optimization types; the part to which topological optimization was applied reached a maximum force value above 12 kN, while the one obtained using grid infill achieved around 9 kN, and the one obtained using gyroid infill reached less than 6 kN. Finally, the numerical simulations demonstrated the reliability of the methodology employed, as the stress concentration markings coincided with the rupture locations during experimental testing. In addition, they highlighted the smoothing effect caused by additive manufacturing in relation to irregular geometries.

Keywords: additive manufacturing; topology optimization; fused filament fabrication; tensile test.

LISTA DE FIGURAS

| | | | |
|-------------|---|--|----|
| Figura 2.1 | – | Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes densidades de preenchimento | 5 |
| Figura 2.2 | – | Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes velocidades de impressão | 7 |
| Figura 2.3 | – | Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes espessuras de camada | 7 |
| Figura 2.4 | – | Orientação dos filamentos. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 45°/135° | 8 |
| Figura 2.5 | – | Força-deslocamento com variação no ângulo de impressão | 9 |
| Figura 2.6 | – | Padrão de preenchimento. (a) grid, (b) gyroid. | 10 |
| Figura 2.7 | – | Tensão de Von-Mises de peça otimizada por Wang, Li e Wang (2025) | 17 |
| Figura 3.1 | – | Resumo gráfico da metodologia | 19 |
| Figura 3.2 | – | Extensômetro - MTS Advange Optical Extensometer | 20 |
| Figura 3.3 | – | Corpo de prova tipo 4 ASTM D638-22 | 20 |
| Figura 3.4 | – | Direções de filamentos. | 22 |
| Figura 3.5 | – | Ultimaker S5 | 22 |
| Figura 3.6 | – | Máquina de ensaios MTS Criterion Model 43 | 23 |
| Figura 3.7 | – | Ponte - desenho 2D | 26 |
| Figura 3.8 | – | Ponte original | 27 |
| Figura 3.9 | – | Força e restrições - posição iso | 27 |
| Figura 3.10 | – | Força e restrições - posição inferior | 28 |
| Figura 3.11 | – | Esquemático da simulação | 28 |
| Figura 3.12 | – | Posicionamento das pontes | 30 |
| Figura 3.13 | – | Adaptação para utilização do extensômetro em compressão | 31 |
| Figura 4.1 | – | Corpos de prova de posição 5: a - PLA 1 b - PLA 2 | 33 |
| Figura 4.2 | – | Ensaio de tração CPs A com célula de 50 KN | 34 |
| Figura 4.3 | – | Ensaio de tração CPs A com célula de 5 KN | 35 |
| Figura 4.4 | – | Resistência à tração em função da direção de impressão | 36 |
| Figura 4.5 | – | Influência da interação entre célula e ângulo na resistência à tração | 37 |
| Figura 4.6 | – | Influência da interação entre célula e ângulo na tensão de ruptura | 38 |
| Figura 4.7 | – | Tensão de escoamento em função da direção de impressão - ensaios A 5 kN | 39 |
| Figura 4.8 | – | Massa em função da interação entre ângulo e material | 40 |
| Figura 4.9 | – | Espessura em função da interação entre ângulo e material | 41 |
| Figura 4.10 | – | Ensaio de tração CPs B | 42 |
| Figura 4.11 | – | Camadas em decorrência do método FFF | 44 |

| | | | |
|-------------|---|--|-----|
| Figura 4.12 | – | Influência da interação entre taxa e velocidade de impressão na resistência à tração | 44 |
| Figura 4.13 | – | Variação percentual média da massa em função da taxa de extrusão | 46 |
| Figura 4.14 | – | Ponte otimizada | 47 |
| Figura 4.15 | – | Força máxima | 48 |
| Figura 4.16 | – | Ensaio de compressão - Shimadzu | 49 |
| Figura 4.17 | – | Força máxima - Shimadzu | 50 |
| Figura 4.18 | – | Ensaio de compressão - MTS | 51 |
| Figura 4.19 | – | Força máxima - MTS | 52 |
| Figura 4.20 | – | Ensaio de compressão completo - MTS | 53 |
| Figura 4.21 | – | Força por deformação - MTS | 54 |
| Figura 4.22 | – | Tensão equivalente em 85 kN | 55 |
| Figura 4.23 | – | Máxima tensão principal em 85 kN | 56 |
| Figura 4.24 | – | Deformação em 48 kN | 56 |
| Figura 4.25 | – | Tensão equivalente | 57 |
| Figura 4.26 | – | Ponte TO após ensaio | 58 |
| Figura 4.27 | – | Máxima tensão principal | 58 |
| Figura 4.28 | – | Deformação | 59 |
| Figura A.1 | – | <i>Toe compensation</i> | 69 |
| Figura I.1 | – | Ponte <i>standard</i> | 111 |
| Figura I.2 | – | Ponte TO | 111 |
| Figura I.3 | – | Ponte <i>grid</i> | 112 |
| Figura I.4 | – | Ponte <i>gyroid</i> | 112 |
| Figura J.1 | – | Corpos de prova AA sem extensômetro e célula de 50 kN | 113 |
| Figura J.2 | – | Corpos de prova AA com extensômetro e célula de 5 kN | 114 |
| Figura J.3 | – | Corpos de prova AB/BA sem extensômetro e célula de 50 kN | 114 |
| Figura J.4 | – | Corpos de prova AB/BA com extensômetro e célula de 5 kN | 114 |
| Figura J.5 | – | Corpos de prova AC sem extensômetro e célula de 50 kN | 115 |
| Figura J.6 | – | Corpos de prova AC com extensômetro e célula de 5 kN | 115 |
| Figura J.7 | – | Corpos de prova AD sem extensômetro e célula de 50 kN | 115 |
| Figura J.8 | – | Corpos de prova AD com extensômetro e célula de 5 kN | 116 |
| Figura J.9 | – | Corpos de prova AE sem extensômetro e célula de 50 kN | 116 |
| Figura J.10 | – | Corpos de prova AE com extensômetro e célula de 5 kN | 116 |
| Figura J.11 | – | Corpos de prova AF sem extensômetro e célula de 50 kN | 117 |
| Figura J.12 | – | Corpos de prova AF com extensômetro e célula de 5 kN | 117 |
| Figura J.13 | – | Corpos de prova BB sem extensômetro e célula de 50 kN | 117 |
| Figura J.14 | – | Corpos de prova BC sem extensômetro e célula de 50 kN | 118 |
| Figura J.15 | – | Corpos de prova BD sem extensômetro e célula de 50 kN | 118 |
| Figura J.16 | – | Corpos de prova BE sem extensômetro e célula de 50 kN | 118 |

| | | | |
|-------------|---|---|-----|
| Figura J.17 | – | Corpos de prova BF sem extensômetro e célula de 50 kN | 119 |
| Figura J.18 | – | Corpos de prova BG sem extensômetro e célula de 50 kN | 119 |
| Figura J.19 | – | Corpos de prova BH sem extensômetro e célula de 50 kN | 119 |
| Figura K.1 | – | Ponte <i>standard</i> - MTS | 120 |
| Figura K.2 | – | Ponte <i>standard</i> - Shimadzu | 121 |
| Figura K.3 | – | Ponte TO - MTS | 121 |
| Figura K.4 | – | Ponte TO - Shimadzu | 121 |
| Figura K.5 | – | Ponte <i>grid</i> | 122 |
| Figura K.6 | – | Ponte <i>gyroid</i> | 122 |
| Figura K.7 | – | Ponte original - MTS | 122 |
| Figura K.8 | – | Ponte original - Shimadzu | 123 |

LISTA DE TABELAS

| | | | |
|-------------|---|--|-----|
| Tabela 2.1 | – | Propriedades mecânicas em função do preenchimento para os materiais PLA e acrilonitrila butadieno estireno (ABS) | 6 |
| Tabela 3.1 | – | Principais parâmetros de impressão | 21 |
| Tabela 3.2 | – | Planejamento experimental A | 24 |
| Tabela 3.3 | – | Planejamento experimental B | 24 |
| Tabela 3.4 | – | Planejamento completo | 25 |
| Tabela 3.5 | – | Parâmetros de impressão das pontes | 30 |
| Tabela 4.1 | – | Resultados Planejamento A - Ensaio mecânico | 36 |
| Tabela 4.2 | – | Resultados Planejamento A com célula de carga de 5 kN - Ensaio mecânico | 39 |
| Tabela 4.3 | – | Resultados Planejamento A - Dimensional | 40 |
| Tabela 4.4 | – | Resultados Planejamento B - Ensaio mecânico | 43 |
| Tabela 4.5 | – | Resultados Planejamento B - Dimensional | 45 |
| Tabela 4.6 | – | Resultados pontes otimizadas - força máxima | 48 |
| Tabela 4.7 | – | Resultados Shimadzu | 50 |
| Tabela 4.8 | – | Resultados Shimadzu - Geometrias sem otimização | 51 |
| Tabela 4.9 | – | Resultados MTS - Força Máxima | 53 |
| Tabela 4.10 | – | Resultados MTS - força por deformação | 54 |
| Tabela H.1 | – | Massas pontes (g) | 110 |
| Tabela J.1 | – | Resultado dos ensaios de tração | 113 |
| Tabela K.1 | – | Resultado dos ensaios das pontes | 120 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|---|
| AM | <i>Additive manufacturing</i> |
| CAD | <i>Computer aided design</i> |
| STL | Formato de arquivo nativo de software CAD |
| FFF | <i>Fused filament fabrication</i> |
| SLA | <i>Stereolithography</i> |
| SLS | <i>Selective laser sintering</i> |
| SLS | <i>Material jetting</i> |
| TO | <i>Topology optimization</i> |
| CAE | <i>Computer-aided engineering</i> |
| ESO | <i>Evolutionary structural optimization</i> |
| LSM | <i>Level set method</i> |
| CP | Corpo de prova |
| FEM | <i>Finite element method</i> |
| SIMP | <i>Solid isotropic material with penalization</i> |
| 3D | Tridimensional |
| PLA | Ácido polilático |
| ABS | Acrilonitrila butadieno estireno |
| ANOVA | Análise de variância |
| SQ | Soma dos quadrados |
| R^2 | Coefficiente de determinação |
| R^2 ajustado | Coefficiente de determinação ajustado |
| $L^{(a)}$ | Espaço de Lebesgue |
| DfAM | <i>Design for additive manufacturing</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---------------------------------------|
| μ | Média global |
| τ | Efeito referente ao tratamento |
| ε | Erro aleatório |
| α | Número de tratamentos |
| η | Número de observações por tratamentos |
| ρ | Pseudo-densidade |
| Ω | Volume discretizado |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Justificativa | 3 |
| 1.2 | Objetivos | 3 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 3 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 2.1 | Manufatura aditiva | 4 |
| 2.1.1 | Parâmetros de impressão | 5 |
| 2.1.1.1 | Preenchimento | 5 |
| 2.1.1.2 | Velocidade de impressão | 6 |
| 2.1.1.3 | Largura de extrusão | 7 |
| 2.1.1.4 | Ângulo | 8 |
| 2.1.1.5 | Taxa de extrusão | 9 |
| 2.1.1.6 | Padrão de preenchimento | 10 |
| 2.1.1.7 | Diâmetro de saída dos filamentos | 11 |
| 2.1.2 | Material | 11 |
| 2.2 | Análise de variância | 12 |
| 2.3 | Método dos Elementos Finitos | 14 |
| 2.4 | Otimização topológica | 15 |
| 3 | METODOLOGIA | 19 |
| 3.1 | Ensaio de tração e modelagem do Corpo de Prova | 20 |
| 3.1.1 | Planejamento Experimental | 23 |
| 3.2 | Análise e otimização das pontes | 26 |
| 3.2.1 | Otimização topológica | 26 |
| 3.2.2 | Simulação numérica | 29 |
| 3.2.3 | Fabricação das pontes | 29 |
| 3.2.4 | Ensaio de compressão | 31 |
| 4 | RESULTADOS | 33 |
| 4.1 | Ensaio de tração | 33 |
| 4.1.1 | Experimento A | 34 |
| 4.1.1.1 | Análise estatística | 35 |
| 4.1.2 | Experimento B | 42 |
| 4.1.2.1 | Análise estatística | 43 |
| 4.2 | Otimização topológica | 47 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2.1 | Ponte otimizada | 47 |
| 4.3 | Ensaio das Pontes | 48 |
| 4.3.1 | Varição entre máquinas - otimização topológica | 48 |
| 4.3.2 | Ensaio Shimadzu | 49 |
| 4.3.3 | Ensaio MTS | 51 |
| 4.3.3.1 | Força Máxima | 52 |
| 4.3.3.2 | Força por deformação | 53 |
| 4.4 | Simulação em PLA | 55 |
| 4.4.1 | Ponte original | 55 |
| 4.4.2 | Ponte por otimização topológica | 57 |
| 5 | CONCLUSÃO | 60 |
| 5.1 | Trabalhos Futuros | 60 |
| | REFERÊNCIAS | 62 |
| | APÊNDICES | 66 |
| | APÊNDICE A – CÓDIGO E ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON | 67 |
| | APÊNDICE B – CÓDIGO PRINCIPAL DE ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO | 76 |
| | APÊNDICE C – CÓDIGO DE FUNÇÕES AUXILIARES PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO | 90 |
| | APÊNDICE D – CÓDIGO DA FUNÇÃO ESTATÍSTICA DESENVOLVIDA EM PYTHON PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO | 92 |
| | APÊNDICE E – CÓDIGO PRINCIPAL DE ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NAS PONTES | 96 |
| | APÊNDICE F – CÓDIGO DE CLASSES E FUNÇÕES AUXILIARES PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO NAS PONTES | 101 |

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE G – CÓDIGO DA FUNÇÃO ESTATÍSTICA DESENVOLVIDA EM PYTHON PARA OS ENSAIOS NAS PONTES | 106 |
| APÊNDICE H – MASSAS DAS PONTES | 110 |
| APÊNDICE I – PONTES ENSAIADAS | 111 |
| APÊNDICE J – ENSAIOS DE TRAÇÃO | 113 |
| APÊNDICE K – ENSAIOS DAS PONTES | 120 |

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (AM, do inglês *additive manufacturing*) se trata de um método de fabricação que tem crescido de forma acelerada nos últimos anos. Suas características únicas têm causado uma facilitação no desenvolvimento de estruturas cada vez mais complexas. Essa capacidade tem-se alinhado com diferentes tecnologias para o desenvolvimento de peças mais eficientes (GOH *et al.*, 2019).

Esse tipo de manufatura refere-se a um método de produção de peças, em que o material é adicionado camada a camada. Ela se inicia com um desenho criado por um *software* CAD (desenho assistido por computador ou, em inglês, *computer aided design*) e seguido pela exportação em formato STL. A partir desse arquivo, o *software* fatiador é utilizado para configurar os parâmetros e importá-los para a impressora, que, finalmente, faz a produção da peça.

O mercado de AM em 2023 apresentava estimativa de valor em torno de 20,37 bilhões de dólares e estima-se que a taxa de crescimento anual composta de 2024 a 2030 seja de 23,5% (Grand View Research, 2023). Toda essa estrutura e cenário otimista culminaram no desenvolvimento de diversas pesquisas na área.

Existem variados métodos de manufatura aditiva polimérica, entre eles pode-se citar: fabricação por filamento fundido (FFF, do inglês *fused filament fabrication*), estereolitografia (SLA, do inglês *stereolithography*), sinterização seletiva por laser (SLS, do inglês *selective laser sintering*), jateamento de material (MJ, do inglês *material jetting*) (JIHONG *et al.*, 2021). Essas tecnologias têm certa sensibilidade à variação de parâmetros, o que faz com que a peça impressa tenha uma menor capacidade mecânica que a injetada, normalmente apresentando comportamento anisotrópico. A FFF, em especial, é uma das mais utilizadas, devido ao seu baixo custo e simplicidade (LIU *et al.*, 2019).

Essas características relacionadas com a capacidade mecânica e baixo preço presente na FFF fizeram com que ela fosse amplamente empregada no desenvolvimento de brinquedos e protótipos (MATSUZAKI *et al.*, 2016). No entanto, a diminuição da capacidade mecânica intrínseca ao método não o torna inaplicável. Ao se atingirem os melhores parâmetros e alinhar esse processo com outras tecnologias, a FFF pode ser empregada de forma prática em peças finais.

Uma metodologia que pode ser empregada simultaneamente ao processo de FFF e que vem contribuindo para sua popularização é a otimização topológica (TO, do inglês *topology optimization*). Essa abordagem computacional de otimização, desenvolvida por meio de *softwares* CAE (engenharia assistida por computador ou, em inglês *computer-aided engineering*), tem como objetivo, a partir de uma geometria inicial e um alvo percentual

de massa inferior ao original, maximizar ou minimizar determinada função para aquela configuração em questão. A função de flexibilidade (*compliance*) é geralmente a função de minimização utilizada, já que ela apresenta características únicas que facilitam sua resolução. Sendo assim, esse método tem como resultado, geralmente, uma peça de rigidez menor, mas para aquela configuração de massa em específico, tende a ser o melhor resultado de rigidez.

A TO já tem sido aplicada nas mais diversas áreas, entre elas, Aeroespacial (ZHU; ZHANG; XIA, 2016), Automotiva (JANKOVICS; BARARI, 2019) e Arquitetura (JEWETT; CARSTENSEN, 2019). Desde o desenvolvimento do trabalho seminal por Bendsøe e Kikuchi (BENDSØE; KIKUCHI, 1988) ela tem se desenvolvido de forma acelerada, com soluções que iniciaram na área Mecânica, mas se ramificaram para diversas outras.

Nas últimas três décadas, diferentes propostas de otimização topológica foram desenvolvidas, cita-se, entre elas, a otimização estrutural evolucionária (ESO, do inglês *evolutionary structural optimization*), e o método do conjunto de nível (LSM, do inglês *level set method*). Originalmente, os métodos propostos tinham uma complexidade matemática difícil de ser implementada (JEWETT; CARSTENSEN, 2019). A otimização topológica só passou a ser viável após a proposta desenvolvida por Bendsøe e Kikuchi chamada material isotrópico sólido com penalização (SIMP, do inglês *solid isotropic material with penalization*) (BENDSØE; SIGMUND, 1999). Esse método, a princípio, tinha uma complexidade acima das capacidades de manufatura tradicionais; em consequência, existiam poucas aplicações. No entanto, a manufatura aditiva se alinhou ao processo de TO para sua viabilização (JIHONG *et al.*, 2021).

A partir do desenvolvimento da manufatura aditiva, suas características únicas de fabricação proporcionaram aos engenheiros a possibilidade de dar menor valor para a manufatura da peça e uma maior atenção ao desenvolvimento dela. Já que, ao se adicionar material camada a camada, é possível criar uma peça com menos restrições de fabricação se comparado à manufatura convencional (JIHONG *et al.*, 2021).

É importante destacar que a AM possui métodos de otimização próprios do processo, os quais envolvem a variação do preenchimento da peça, permitindo que ela seja fabricada de forma parcial ou totalmente oca.

O estabilizador vertical do Airbus A350 XWB é um exemplo da utilização dessas duas tecnologias trabalhando de forma simultânea. Essa peça, inicialmente, se tratava de um conjunto de 30 partes; a solução otimizada resultou em uma única peça com uma massa 30 % menor. Outro exemplo se trata do suporte de antena para satélite sentinela da RUAG, que também foi desenvolvido utilizando, em conjunto, essas duas tecnologias (JIHONG *et al.*, 2021).

1.1 Justificativa

A manufatura aditiva e a otimização topológica já vêm sendo aplicadas de forma simultânea em diferentes projetos industriais. Exemplo disso é o estabilizador vertical do Airbus A350 XWB. Essa peça, inicialmente, tratava-se de um conjunto de 30 partes; a solução otimizada resultou em uma única peça com uma massa 30 % menor. Outro exemplo trata-se do suporte de antena para satélite sentinelado da RUAG, que também foi desenvolvido utilizando, em conjunto, essas duas tecnologias (JIHONG *et al.*, 2021).

Dessa forma, o presente trabalho tem como justificativa contribuir nos campos de otimização topológica e AM. Desenvolvendo uma exploração da variação da resposta mecânica de peças impressas em razão dos parâmetros de impressão. Além de analisar de forma experimental o comportamento de uma estrutura otimizada e observar as vantagens de como essas duas tecnologias reagem ao serem empregadas simultaneamente.

1.2 Objetivos

Este estudo tem como foco principal o desenvolvimento e a análise do comportamento mecânico de uma peça otimizada e fabricada por AM. Desenvolvendo uma comparação mecânica entre os métodos de otimização oriundos da FFF e a otimização topológica.

1.2.1 Objetivos específicos

- observar a variação da capacidade mecânica em tração e dimensional dos corpos de prova (CPs) normatizados e impressos em função do fornecedor de material e variação da direção de impressão;
- considerando o melhor material e melhor direção de impressão analisados, observar a variação da capacidade mecânica em tração e dimensional dos CPs normatizados e impressos em função da velocidade de impressão, largura de extrusão e taxa de extrusão;
- encontrar, entre valores e níveis analisados, a melhor condição de impressão;
- desenvolver uma peça por otimização topológica e imprimir na melhor condição encontrada nos ensaios de tração;
- comparar a variação de comportamento mecânico da peça original e otimizada através de um ensaio por compressão;
- simular, por meio do método dos elementos finitos (FEM, do inglês *finite element method*), as peças desenvolvidas e comparar com os resultados experimentais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva se trata de um método de criação de peças que ocorre a partir de um modelo 3D (tridimensional). É feita a adição sequencial de material até a formação da estrutura final. Essa tecnologia tem sido empregada em várias áreas da engenharia industrial, além de outras aplicações, como na medicina, em brinquedos e na arquitetura (ISO/ASTM, 2021).

Estruturas com formatos complexos têm ganhado notoriedade nos últimos anos, muito pela capacidade disruptiva que a manufatura aditiva consegue alcançar. Um desses métodos, um tipo de produção mais orgânica, é justamente a otimização topológica. Dessa forma, a AM se tornou um dos principais avanços que a indústria 4.0 produziu (GROSSMAN *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2025).

No entanto, a criação da peça é apenas um passo de todos os necessários para a formação do objeto desejado. O processo de impressão por FFF completo pode ser dividido da seguinte forma:

1. inicialmente, desenvolve o modelo numérico através de um *software* CAD;
2. o projeto é salvo em formato STL (nessa etapa é importante se atentar ao refinamento de malha do arquivo), formato, esse, reconhecido pelos softwares de fatiamento;
3. importa-se esse arquivo para o software que fatiará a peça em camadas;
4. ajusta-se os parâmetros de impressão;
5. posiciona-se a peça a ser fabricada na área de trabalho da impressora;
6. é gerado e salvo um arquivo em código G ou envia-se o arquivo diretamente à impressora;
7. adiciona-se o material à impressora 3D;
8. a depender do material impressora, prepara-se a base com alguma substância capaz de aderir os objetos;
9. inicia-se a processo de impressão;
10. finalizado a impressão, retira-se a peça;
11. pós tratamento, quando necessário, do produto final.

2.1.1 Parâmetros de impressão

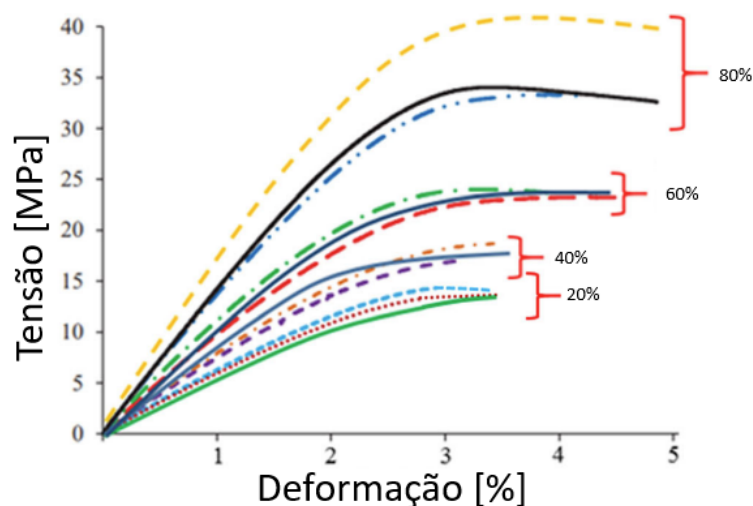
Os parâmetros de impressão têm grande influência no comportamento mecânico e dimensional das peças; isso já foi estudado por diversos autores. Essa parte do trabalho busca fazer uma breve revisão bibliográfica acerca desses estudos e nortear as escolhas de parâmetros e os prováveis resultados encontrados.

2.1.1.1 Preenchimento

Estudos de base foram amplamente desenvolvidos pensando na variação das propriedades mecânicas em decorrência dos parâmetros de impressão. Alagumalai *et al.* (2025), Farazin e Mohammadimehr (2022), Samykano *et al.*, 2019, Muhamedagic, Cekic e Begic-Hajdarevic (2020) e Rodríguez-Reyna *et al.* (2022), por exemplo, demonstraram que um maior percentual de preenchimento da amostra a torna mais resistente ao ensaio de tração, como esperado, já que existe um aumento na densidade do corpo.

Especificamente Farazin e Mohammadimehr (2022) observaram o comportamento de corpos de prova impressos em ácido polilático (PLA) com variação da porcentagem de preenchimento em 20%, 40%, 60% e 80%. A Figura 2.1 mostra as curvas tensão-deformação desses CPs; ressalva-se que a presença de 3 curvas para cada porcentagem de preenchimento faz referência à repetição de ensaios para aquela condição, em específico.

Figura 2.1: Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes densidades de preenchimento



Fonte: Farazin e Mohammadimehr (2022)

Essas curvas deixam evidente que, quanto maior o preenchimento, maior será a resistência à tração do material, assim como sua tenacidade e rigidez. Isso pode ser visto,

também, pelos resultados encontrados por Rodríguez-Reyna *et al.* (2022), elucidados pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas em função do preenchimento para os materiais PLA e acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

| Material | Preenchimento | Resistência à tração (MPa) | | Módulo de Elasticidade (GPa) | |
|----------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão |
| PLA | 33% | 31,0 | 0,00 | 1,02 | 0,05 |
| | 66% | 39,5 | 0,71 | 1,31 | 0,03 |
| | 100% | 43,5 | 0,71 | 1,25 | 0,02 |
| | | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão |
| ABS | 33% | 13,0 | 1,41 | 0,44 | 0,01 |
| | 66% | 23,5 | 0,71 | 0,68 | 0,00 |
| | 100% | 34,5 | 0,71 | 0,99 | 0,01 |

Fonte: Rodríguez-Reyna *et al.* (2022)

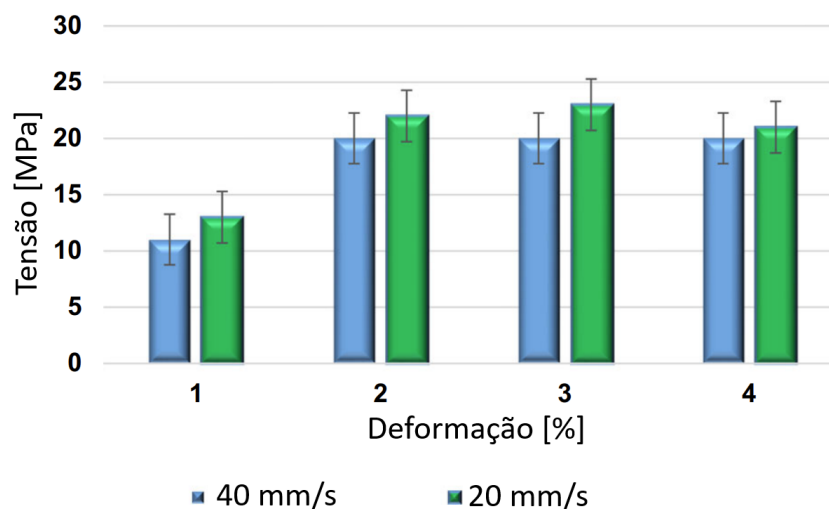
Tal tabela deixa claro, novamente, um aumento na resistência à tração em função do aumento de preenchimento. Além disso, também foi possível observar uma tendência de crescimento na rigidez da peça em função do aumento do preenchimento.

2.1.1.2 Velocidade de impressão

Khosravani *et al.* (2022) avaliaram a velocidade de impressão, considerando os níveis de 20 mm/s e 80 mm/s; os autores conseguiram evidenciar uma diferença significativa entre os níveis. Em que, a 20 mm/s, obteve melhores resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade. Nota-se, no entanto, uma grande variação de velocidade entre ambos.

Farazin e Mohammadimehr (2022), assim como Khosravani *et al.* (2022), avaliaram a variação de velocidade no comportamento mecânico dos corpos de prova. Como pode ser vista pela Figura 2.2. Os autores mostraram uma tendência de que, quanto menor a velocidade de impressão, maior a rigidez e tensão suportada pelo corpo de prova. Entretanto, essa variação pode ser insignificante e, ao considerar o aumento no tempo de impressão, dependendo da complexidade do projeto, pode não justificar a sua adoção.

Figura 2.2: Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes velocidades de impressão

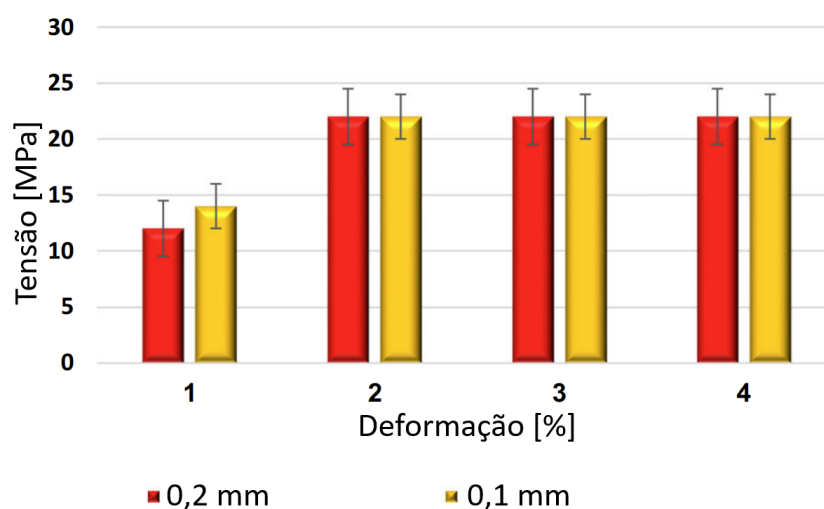


Fonte: Farazin e Mohammadimehr (2022)

2.1.1.3 Largura de extrusão

Farazin e Mohammadimehr (2022) também observaram o comportamento mecânico em relação à largura de extrusão, eles perceberam que tal parâmetro tem pouca influência na resposta, como pode ser visto pela Figura 2.3. Apesar disso, eles ressaltaram também que quanto menor a largura, maior o peso.

Figura 2.3: Curvas de tensão-deformação de espécimes de PLA com diferentes espessuras de camada



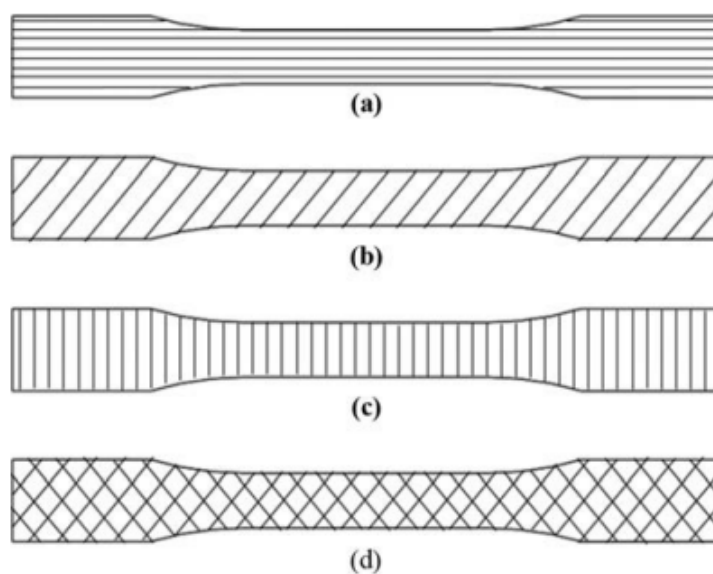
Fonte: Farazin e Mohammadimehr (2022)

Novamente se torna evidente a necessidade de ponderar a mudança de parâmetros de impressão com o objetivo de melhores resultados de resistência mecânica. Já que ao diminuir a largura de extrusão, a peça não tem mudança relevante no comportamento, mas o tempo de impressão aumenta de forma significativa.

2.1.1.4 Ângulo

A Figura 2.4 demonstra a nomenclatura utilizada no presente trabalho para o direcionamento dos filamentos.

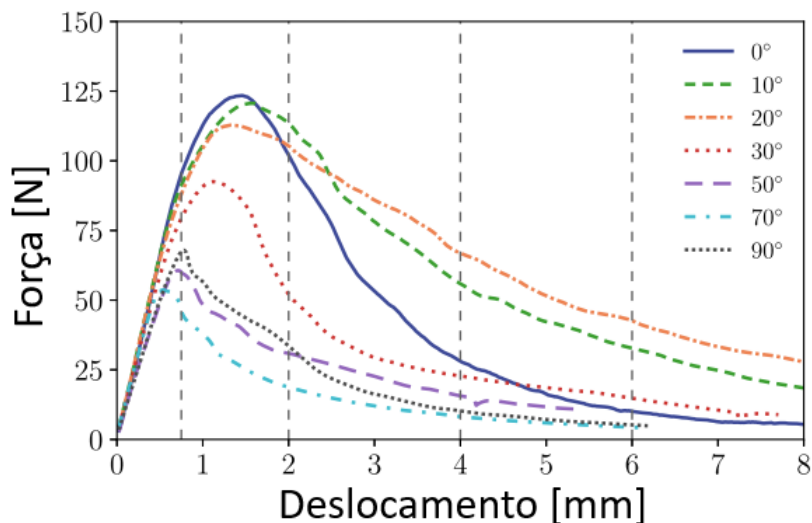
Figura 2.4: Orientação dos filamentos. (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) $45^\circ/135^\circ$



Fonte: Ziemian, Okwara e Ziemian (2015)

Lampron *et al.* (2023) demonstraram uma tendência de crescimento na tenacidade, resistência à tração e módulo de elasticidade em função de ângulos direcionados mais paralelos ao carregamento, como pode ser visto pela Figura 2.5. Em raros casos, no entanto, ângulos menos paralelos apresentam melhores resultados, principalmente em relação à tenacidade. Isso pode ser em função tanto das diferenças pontuais devido à baixa amostragem exibida, como pode ser algo semelhante ao que foi observado por Miwa *et al.* (2023), em que camadas mais paralelas apresentam falhas de fabricação causadas por curvas geométricas e limitação da tecnologia de FFF.

Figura 2.5: Força-deslocamento com variação no ângulo de impressão



Fonte: Lampron *et al.* (2023)

Khosravani *et al.* (2022), por sua vez, observaram um padrão sólido, em que quanto mais paralelo ao carregamento, maior a resistência à tração e maior o módulo de elasticidade. Autores que buscaram observar a resistência mecânica de corpos impressos em PLA por FFF, com variação na velocidade e ângulo de impressão.

Já Zhen *et al.* (2023) estudaram a influência de diferentes fatores no comportamento mecânico do PEEK. Especificamente para o caso da tração, o autor chegou à conclusão de uma melhor resistência à tração para os corpos com direção de filamentos mais próximos do paralelismo em relação à carga.

Doshi *et al.* (2022) fizeram uma revisão bibliográfica extensa, consequentemente aumentando o número de amostras totais, resultando em uma análise mais confiável. Os autores, em questão, encontraram um resultado semelhante ao observado pelos quatro outros trabalhos: uma tendência de filamentos mais paralelos ao carregamento demonstrar maiores valores de resistência máxima e módulo de elasticidade.

2.1.1.5 Taxa de extrusão

Zhen *et al.* (2023), além do ângulo de impressão, também fizeram uma análise acerca da taxa de extrusão. Os autores concluíram que, até o nível de 100% de taxa, existe um aumento da capacidade mecânica quanto à resistência à tração.

Lendvai *et al.* (2025) também observaram a variação da capacidade mecânica, dimensional e térmica em relação ao aumento da taxa de extrusão, em específico no PLA impresso. Os autores constataram um aumento da rigidez e da resistência à tração

máxima dos corpos de prova, além de uma maior aderência entre as camadas da impressão. Entretanto, quanto à dimensionalidade das peças, ao ultrapassar valores de 100% de extrusão, houve uma grande variação em relação ao esperado.

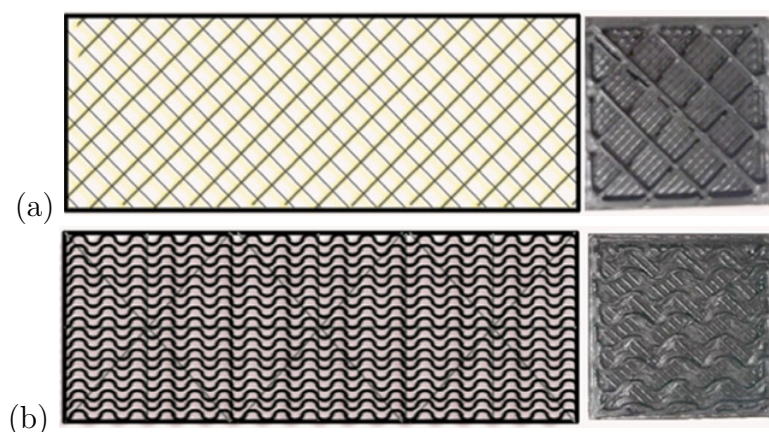
2.1.1.6 Padrão de preenchimento

Alagumalai *et al.* (2025) evidenciou valores similares em absorção de energia entre peças em compressão, tanto do *gyroid* quanto do *grid* para o caso de poliamida com fibra de carbono em 100% de preenchimento. Entretanto, em valores de 80% de preenchimento, os valores referentes ao *grid* se mantiveram próximos a 100%, enquanto no caso do *gyroid* houve um afastamento negativo. Ao se diminuir a porcentagem, essa comparação continuou a variar; em 40% o *gyroid* passa a ter um comportamento superior ao do *grid*, enquanto em 20% eles apresentam valores similares; notou-se, entretanto, uma deformação maior do *gyroid* e um pico maior em *grid*.

Mangla *et al.* (2023), além de analisar os padrões de preenchimento em compressão, também avaliou-os em tração. Os resultados demonstraram pouca diferença para a resistência à compressão entre *grid* e *gyroid*, com leve superioridade para o *grid*. De forma contrária, em tração, houve uma leve preferência para o *gyroid*, tanto para resistência à tração quanto à rigidez das amostras. Vale ressaltar que houve a utilização de um planejamento estatístico para o desenvolvimento dessas análises, e esses valores estão referenciando apenas o comportamento principal, negligenciando a interferência dos outros parâmetros avaliados em cada um dos níveis.

A Figura 2.6 evidencia os dois padrões de preenchimento citados.

Figura 2.6: Padrão de preenchimento. (a) grid, (b) gyroid.



Fonte: Gonabadi, Yadav e Bull (2020)

2.1.1.7 Diâmetro de saída dos filamentos

O processo de manufatura aditiva por FFF sofre com delimitações de dimensões, no geral, essa tecnologia é deficitária ao se falar de criação de pequenos objetos. Isso é corroborado pela baixa quantidade de trabalhos na área de filetes de rosca, assim como o resultado encontrado neles.

Tronvoll, Elverum e Welo (2018) e Budzik *et al.* (2023) apresentaram em seus trabalhos o desenvolvimento de filetes de roscas externas, eles perceberam que não existe capacidade da tecnologia alcançar as dimensões necessárias em norma. Ambos levantaram a hipótese da possibilidade do próprio arquivo em formato STL contribuir para o processo de defasagem dimensional, já que ele apresenta uma simplificação em relação ao CAD original. Apesar disso, ao se diminuir o diâmetro dos filamentos, foi possível perceber um melhor resultado dimensional.

Prado (2023), diferentemente dos outros dois autores, buscou entender o comportamento dimensional e de resistência mecânica de roscas internas impressas em 3D. Sua análise buscou, ainda, demonstrar a influência de diferentes fatores na capacidade dos CPs. Ficou claro que uma menor altura de camada, uma maior quantidade de paredes, um maior preenchimento e o material PLA apresentaram os melhores resultados mecânicos dos testes. Ele demonstrou, também, que nenhum dos níveis dos parâmetros foi capaz de demonstrar resultado satisfatório quanto ao dimensionamento dos filetes.

2.1.2 Material

Rodríguez-Reyna *et al.* (2022) também realizou uma comparação da capacidade mecânica entre o PLA e o ABS. Os resultados indicaram que o PLA possui maior resistência à tração em relação ao ABS. No entanto, essa superioridade não implica necessariamente que o PLA seja mais adequado para aplicações reais, pois apresenta baixa estabilidade química e térmica. Ainda assim, o PLA é amplamente utilizado no processo de FFF, devido à sua facilidade de impressão e menor toxicidade em comparação com outros materiais disponíveis. Um diferencial relevante, embora nem sempre considerado, é o fato de o PLA ser um polímero biodegradável. Os resultados obtidos por Rodríguez-Reyna *et al.* (2022) estão apresentados na Tabela 2.1.

O PLA se trata de um polímero feito, especificamente, para a AM. Dessa forma, as mesmas propriedades que o tornam um material de fácil impressão, também o tornam um material de difícil empregabilidade com alto requisito mecânico. Sua baixa temperatura de transição vítrea é exemplo de propriedade que beneficia a manufatura aditiva, mas prejudica seu leque de aplicações. No entanto, essa facilidade fez com que o material ganhasse alta popularidade. Dessa forma, apesar de suas desvantagens, ele segue sendo viável para a demonstração da tecnologia de manufatura aditiva. Especialmente ao levar

em consideração os desafios enfrentados na manufatura de corpos impressos com variação de ângulo de impressão, como evidenciado por Miwa *et al.* (2023) que pode ser facilitado pela facilidade de impressão do PLA.

2.2 Análise de variância

Esta seção busca introduzir o leitor acerca das ferramentas estatísticas utilizadas no trabalho. De forma que haja uma melhor compreensão dos experimentos e resultados alcançados.

Análise de Variância (ANOVA) se trata de um método estatístico que busca comparar a média de diferentes grupos, de forma a evidenciar a diferença de resultados entre eles, quando, assim, houver. A ANOVA busca separar a variabilidade total em componentes atribuíveis a diferentes fontes de variação, como o efeito dos tratamentos, erros experimentais ou a interação entre fatores. Para isso, ela se utiliza do modelo enunciado pela Equação 2.1 (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,\alpha \\ j=1,2,\dots,\eta \end{matrix} \quad (2.1)$$

No qual:

- Y_{ij} - variável aleatória denotando a ij -ésima observação;
- μ - média global;
- τ_i - parâmetro associado ao i -ésimo tratamento, chamado efeito do i -ésimo tratamento;
- ε_{ij} - componente do erro aleatório;
- α - número de tratamentos;
- η - número de observações por tratamento (considerando um número igual de leitura, para cada tratamento).

Através da Equação 2.1 é possível desenvolver as hipóteses de diferenciação das médias dos diferentes grupos através das Equações 2.2 e 2.3 (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (2.2)$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad \text{para pelo menos um } i \quad (2.3)$$

No qual H_0 representa a hipótese de igualdade entre médias e H_1 de diferenciação para pelo menos um resultado (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

A comparação da variação dos resultados se dá pela divisão em duas partes da variabilidade do experimento. Sendo uma ligada ao erro e outra ligada ao parâmetro. Essa divisão se expressa pela Equação 2.4.

$$SQ_{total} = SQ_{tratamentos} + SQ_{erros} \quad (2.4)$$

No qual, “SQ” representa a soma dos quadrados.

Para que os tratamentos sejam considerados relevantes, é adotado o Teste de Fisher, ilustrado pela Equação 2.5.

$$F_0 = \frac{SQ_{tratamentos/\alpha(\eta-1)}}{SQ_{erros}/[\alpha(\eta-1)]} = \frac{MQ_{tratamentos}}{MQ_{erros}} \quad (2.5)$$

Dessa forma, quando o valor de F_0 é grande, o efeito do tratamento sobrepõe o efeito do erro, levando à confirmação da hipótese H_1 . Normalmente, o valor de F_0 é enunciado como uma função do valor P, em que, quando o valor de F_0 é grande o suficiente, o valor de P é menor ou igual a 0,05; rejeitando dessa forma H_0 (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

Considerando um experimento de ensaio mecânico em polímero, como exemplo, em que se avalia a resistência à tração em função dos fatores: ângulo de impressão (com os níveis: 0°, 45°/135° e 90°) e fornecedores de material (com níveis: fornecedor 1 e fornecedor 2). A combinação entre os níveis de ambos os fatores representa um tratamento, em que a ANOVA terá a função de avaliar a variação entre tais valores.

Finalmente, um coeficiente que será amplamente utilizado neste trabalho, e que se relaciona com a explicação anterior, é o R^2 . Esse coeficiente tem a função de demonstrar a capacidade do modelo de explicar a variabilidade observada no experimento. Dessa forma, quanto mais próximo de 1, melhor o modelo em questão; e quanto mais próximo de 0, pior (BAR-GERA, 2017).

O valor de R^2 se relaciona com a quantidade de variáveis explicativas e com o número de repetições do experimento, o que pode gerar uma falsa impressão de validade do modelo, já que, com um maior número de termos ou observações, o R^2 tende a crescer. Para compensar esse comportamento, o R^2 ajustado busca neutralizar esse crescimento artificial com o aumento de n , resultando em uma medida mais conservadora e confiável da qualidade do ajuste (BAR-GERA, 2017).

2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é um método numérico de resolução de problemas de Engenharia e Física; seu uso pode ser aplicado em análise estrutural, transferência de calor, mecânica dos fluidos, transporte de massa e potencial eletromagnético. Normalmente, em problemas simples, existe a possibilidade de resolvê-los de forma analítica; entretanto, quando tais problemas ganham certa complexidade, a resolução analítica se torna inviável. Dessa forma, o FEM surge como facilitador, no qual um espaço, que teria como resultado um problema difícil para as resoluções convencionais, é discretizado e cada nó, ou seja, cada ponto que divide dois elementos do sistema, terá seu próprio número de graus de liberdade, no qual as variáveis do problema são calculadas. No caso de uma análise estrutural, existe o desenvolvimento de uma matriz de rigidez global (K), derivada de matrizes regionais situadas em cada um dos pontos; tal matriz é utilizada para calcular as deformações (d) e forças nodais (F) e está representada pelas Equações 2.6 e 2.7. Em função disso, a utilização de computadores para a resolução deste tipo de problema se torna crucial, já que, apesar de serem problemas simplificados, requerem um alto nível de repetição de cálculos quando a matriz se torna grande; dessa forma, um algoritmo computacional consegue lidar com tal problema (LOGAN, 2011).

$$F = Kd \quad (2.6)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ \vdots \\ F_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & & & \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ \vdots \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Apesar do tema já ser bastante conhecido pela comunidade acadêmica, a adaptação do método de elementos finitos em peças fabricadas por FFF, com o intuito de resultados mais realistas, ainda é pouco explorada; isso acontece, provavelmente, em função da grande quantidade de dados necessária para o desenvolvimento de um modelo mais realista, já que seria fundamental a elaboração de diferentes testes mecânicos, com diferentes configurações de corpo de prova. Paul (2021) realizou uma revisão bibliográfica acerca do assunto. A conclusão do trabalho evidencia a dependência do mecanismo de falha com os parâmetros de impressão, a relevância da qualidade de malha para resultados mais fidedignos, além da importância da consideração de que as peças impressas apresentam comportamento anisotrópico. Finalmente, o trabalho evidencia a lacuna geral na área, com poucos trabalhos desenvolvidos que buscaram se preocupar com o efeito de porosidade e espaço entre filamentos.

A otimização topológica tem como base o método dos elementos finitos para a melhoria de seu espaço de trabalho.

2.4 Otimização topológica

A otimização topológica se trata de uma das principais estratégias de redução de massa; ela, alinhada à manufatura aditiva, desenvolve estruturas mais leves e com alta capacidade mecânica (CHANTARAPANICH *et al.*, 2014). Podendo ser definida como uma aproximação matemática que otimiza a distribuição de material dado um espaço e as condições de contorno de modo que a resultante atenda a metas de desempenho predeterminadas (GODA *et al.*, 2019). Entre os vários métodos de otimização topológica, o SIMP – é um dos mais utilizados, inclusive entre os softwares comerciais, como o Ansys.

Esse método de otimização utiliza-se de coeficientes chamados de pseudo-densidades (ρ), em função da variável x , pertencente ao volume discretizado (Ω), como pode ser visto pelas Equações 2.8 e 2.9.

$$\begin{aligned} x &\in \Omega, \\ \rho(x) &\in L^{(a)}(\Omega), \\ E_{ijkl}(x) &= \rho^p(x)E_{ijkl}^0, \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$0 \leq \rho(x) \leq 1, x \in \Omega \tag{2.9}$$

No qual $L^{(a)}$ se trata do espaço de Lebesgue, e E_{ijkl} se trata do módulo de elasticidade, fator constituinte da matriz rigidez (K), como mostrado na Equação 2.10.

$$K = \sum_{e=1}^n K_e(E_e) \tag{2.10}$$

Através da variação de ρ , dado entre 0 e 1, ocorre a neutralização ou não do elemento do domínio. Essa neutralização é dada através da minimização da Equação 2.11, equação, essa, que representa a flexibilidade da geometria. Logo, sua minimização representa uma maior rigidez total.

$$C = F^T d = d^T K d = \sum_{e=1}^N (d_e)^T K_e d_e \tag{2.11}$$

Finalmente, constata-se que o método de otimização topológica utilizado tem como objetivo a minimização média da flexibilidade da estrutura em função da variação de material em cada elemento. Para isso, agrega-se a pseudo densidade como variável de

projeto na Equação 2.11, tendo como resultado a Equação 2.12 (BENDSOE; SIGMUND, 2013).

$$C = \sum_{e=1}^N (\rho^p) (d_e)^T K_e d_e \quad (2.12)$$

Em que p representa o fator de penalização.

O desenvolvimento desse tipo de otimização, em estreita relação com a Manufatura Aditiva, promoveu avanços significativos em ambos os campos. Exemplo disso, trata-se do *design* para manufatura aditiva (DfAM, do inglês *design for additive manufacturing*). Essa abordagem objetiva a AM em sua melhor condição. Dessa forma, pensa-se nos melhores parâmetros para o desenvolvimento de novas peças, assim como em geometrias que não inviabilizem a impressão. Entre vários parâmetros levantados, alguns que valem a citação são: suporte estrutural, complexidade geométrica, otimização de material e personalização. O entrelaçamento dessas tecnologias representa a nova abordagem para o desenvolvimento de peças que não têm como pressuposto a produção em massa. Dessa forma, algumas indústrias tendem a se beneficiar mais delas; a indústria aeroespacial é exemplo disso (PLOCHER; PANESAR, 2019).

Esse cenário otimista em relação a essa tecnologia culminou, também, no consequente crescimento de pesquisas na área. Algumas, em específico, com foco na aplicação da manufatura aditiva em conjunto à otimização topológica e ensaios mecânicos. Hu *et al.* (2019), por exemplo, demonstrou a superioridade da otimização topológica sobre a convencional (paramétrica). Para isso, ele fez a otimização da mandíbula de uma pessoa em três formatos diferentes; na primeira, ele desenvolveu uma série de furos circulares; na segunda, furos quadrados; por fim, na terceira, uma otimização topológica. Esses três espécimes foram, então, impressos em FFF e comparados a partir de um ensaio de flexão de três pontos. O resultado da pesquisa demonstrou um maior módulo de elasticidade relacionado ao corpo topologicamente otimizado em relação aos demais, apesar de que, em uma orientação específica de impressão, houve uma resistência à flexão superior à relacionada com a otimização quadricular. Apesar disso, foi possível validar essa metodologia para aplicação no desenvolvimento de órteses. O que demonstra, ainda, o potencial de aplicação na área biomédica, na qual existe o desenvolvimento de peças personalizadas e de pouca escalabilidade.

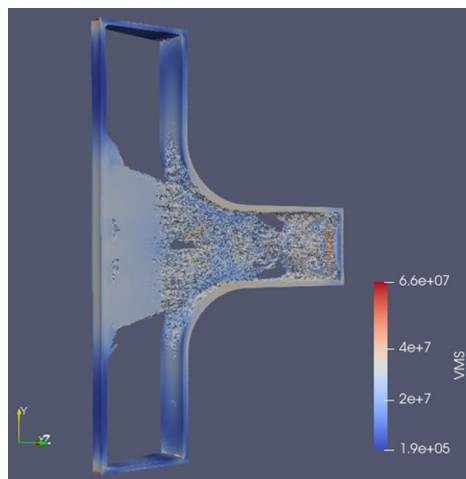
Park, Goo e Park (2019) desenvolveram uma otimização do suporte de um equipamento de rifle, os autores ainda fizeram uma comparação por compressão do objeto otimizado por TO e a peça original. Eles encontraram uma superioridade de 40% em relação à força máxima, demonstrando a capacidade do método de desenvolver peças eficientes e com alta capacidade mecânica.

Yap *et al.* (2023) realizou um estudo sobre a otimização topológica de um drone utilizando o software ANSYS Workbench 2020 e impresso em Nylon 12 por SLS, com ênfase na validação da metodologia utilizada e no desenvolvimento do projeto. Ele adaptou um método de ensaio para o objeto em específico. Em tal ensaio, ele demonstrou a alta capacidade do modelo MEF de prever o comportamento do corpo otimizado, o que, por sua vez, evidencia a confiabilidade do software empregado na otimização e no cálculo do desempenho da estrutura do drone.

Goh *et al.* (2021) desenvolveu um estudo preliminar, semelhante ao desenvolvido no presente trabalho, em que investigou o comportamento mecânico do material. Nesse caso, um termoplástico reforçado com fibra de carbono. Ele estudou, ainda, o efeito da variação de orientação dos filamentos e fibras no comportamento mecânico do material. Em sequência, foi realizado o desenvolvimento de um protótipo, com base na otimização topológica do trem de pouso de um veículo aéreo não tripulado, em que foi aplicada a melhor condição encontrada nos testes mecânicos.

Wang, Li e Wang (2025) buscaram validar um código aberto de otimização topológica. Para isso, os autores avaliaram diferentes estruturas para a otimização. Entre elas, um caso clássico e o resultado convergiu com a bibliografia. Ficou evidente, ainda, que o método utilizado pode provocar discontinuidades, o que gerou o surgimento de alguns concentradores de tensão, possíveis de serem identificados pelo gráfico da tensão de Von-Mises, como pode ser visto pela Figura 2.7.

Figura 2.7: Tensão de Von-Mises de peça otimizada por Wang, Li e Wang (2025)



Fonte: Wang, Li e Wang (2025)

Soydaş, Iyibilgin e Saraç (2024) buscaram otimizar um *bracket* de ligação de amortecimento de um automóvel. Para isso, eles desenvolveram a otimização utilizando o software Ansys e a reinterpreteram por meio de um software CAD. Os resultados

encontrados demonstraram um aumento da capacidade mecânica e diminuição da massa da peça.

A otimização topológica aplicada em pontes se trata de um caso clássico e existem alguns trabalhos na área. Vantyghem *et al.* (2020), por exemplo, desenvolveu uma otimização em uma ponte em que avaliou o comportamento experimental em função dos resultados numéricos. Para isso, a ponte foi otimizada e impressa utilizando uma tecnologia de impressão de concreto; os resultados obtidos demonstraram alta capacidade do método de prever o comportamento experimental. Além disso, ele demonstrou a aplicabilidade da otimização topológica em pontes reais.

Nota-se que, apesar de haver diversos trabalhos que buscam aplicar a otimização topológica com a manufatura aditiva, existem poucos que se propõem a comparar a otimização convencional da AM (variação de preenchimento) com o método de TO.

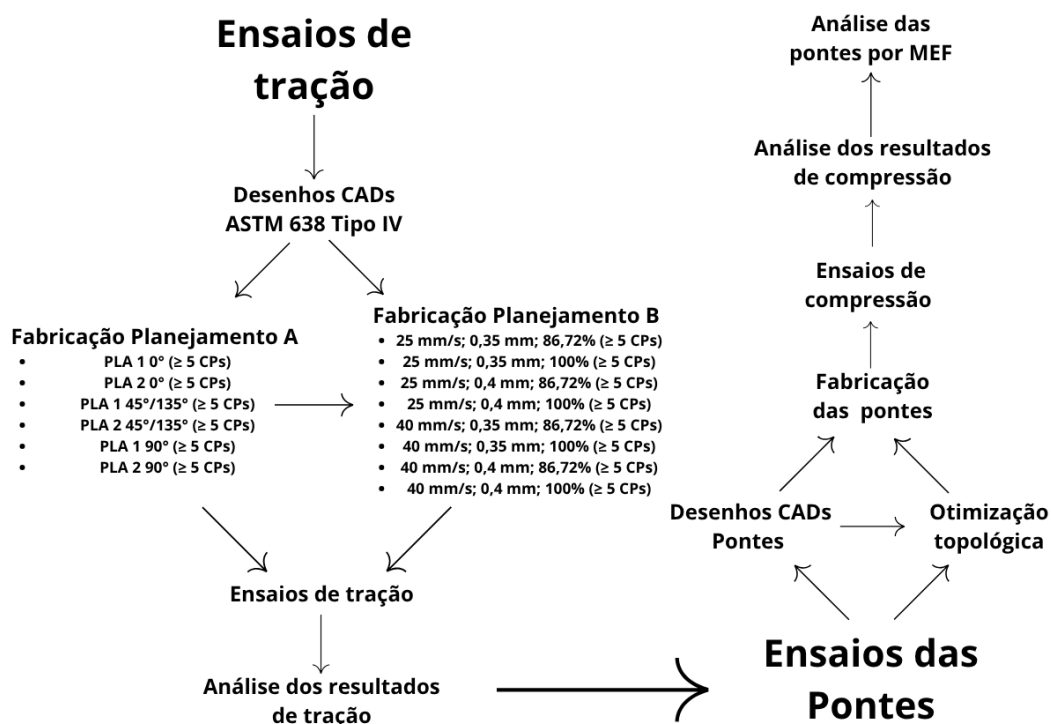
3 METODOLOGIA

O presente trabalho iniciou-se com a busca das melhores propriedades de impressão do material PLA, obtido por FFF, por meio de ensaios de tração. Esses ensaios foram divididos em duas etapas: a primeira avaliou o ângulo de impressão e o fornecedor do material; a segunda investigou a largura de extrusão, a velocidade e a taxa de impressão. Os resultados foram analisados por meio de ANOVA, e as melhores condições foram selecionadas para a etapa seguinte.

Na segunda parte, com o objetivo de avaliar a capacidade da Otimização Topológica em comparação aos métodos tradicionais de otimização do processo de AM por FFF, foi desenvolvida uma ponte seguindo a metodologia de Design para Manufatura Aditiva. Essa estrutura foi otimizada por TO e comparada a geometrias obtidas pela variação de preenchimento. Os resultados também foram analisados por ANOVA e utilizados no desenvolvimento de uma simulação numérica.

A metodologia será detalhada nos textos seguintes, mas o resumo gráfico pode ser visto pela Figura 3.1.

Figura 3.1: Resumo gráfico da metodologia

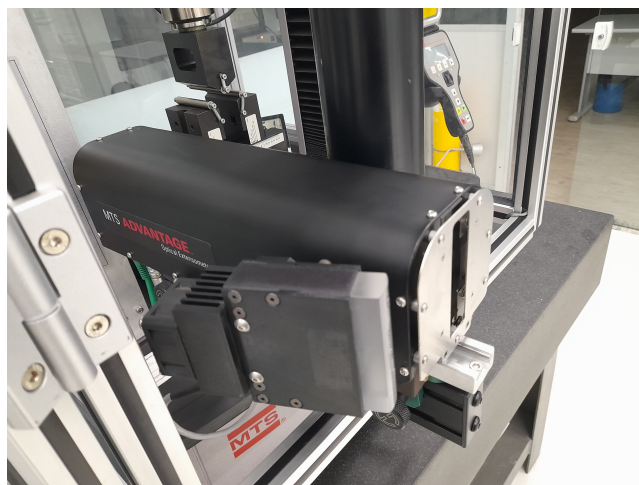


Fonte: Produzido pelo autor

3.1 Ensaios de tração e modelagem do Corpo de Prova

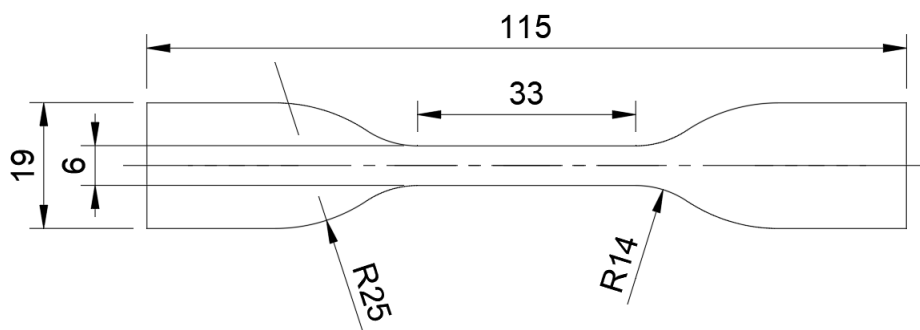
Os ensaios de tração desenvolvidos foram utilizados para validar e avaliar o comportamento dos CPs em diferentes condições de impressão. Para isso, foi utilizada a norma ASTM D638-22 como norteadora. O corpo de prova escolhido foi o tipo IV da norma em questão. Essa escolha se deu devido à distância limitada do extensômetro óptico MTS Advantage Optical Extensometer, utilizado; tal extensômetro pode ser visualizado pela Figura 3.2, o que tornou necessário optar por corpos de prova com menores comprimentos entre os pontos de medição da deformação. Como o tipo IV é normatizado por uma distância de 25 mm entre esses pontos, ele foi selecionado para o experimento. Tal corpo pode ser visto pela Figura 3.3.

Figura 3.2: Extensômetro - MTS Advange Optical Extensometer



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 3.3: Corpo de prova tipo 4 ASTM D638-22



Unidades em mm. Fonte: ASTM (2022)

A partir do formato do CP pode-se seguir para a impressão dele. Foi necessário, então, fazer o desenho em ambiente CAD. Para tal, foi utilizado o software Autodesk Fusion Student. Em sequência, para a impressão propriamente dita desses espécimes, utilizou-se o software fatiador Cura, responsável pela programação do código .G que faz o controle da impressora 3D. Nesse momento, é necessário escolher uma série de parâmetros para impressão. No presente trabalho, alguns deles foram estudados com o objetivo de observar seu efeito no comportamento mecânico das peças impressas. Os parâmetros principais, que foram mantidos fixos, podem ser vistos pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Principais parâmetros de impressão

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Altura de camada | 0,2 mm |
| Tipo de preenchimento | Linhas |
| Porcentagem de preenchimento | 100% |
| Temperatura de impressão | 210°C |
| Temperatura na mesa | 60°C |

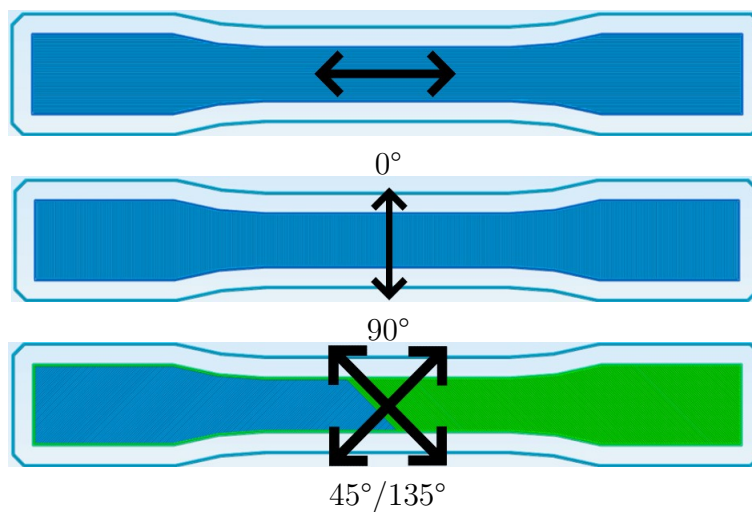
Fonte: Produzido pelos autor

Em contrapartida aos parâmetros fixos, e com o objetivo de observar melhores condições de impressão, foi feita a variação da velocidade de impressão, fornecedor de PLA, direção de impressão, largura de extrusão e taxa de extrusão. Nota-se que tais parâmetros foram escolhidos pensando em seus efeitos no comportamento mecânico dos CPs; espera-se que eles sejam, especialmente, influentes.

O material PLA foi escolhido em função da sua facilidade de impressão. Em comparação com as demais possibilidades, como, por exemplo, o ABS e o PETG, o PLA não necessita de ambientes fechados para manter a temperatura, além de não apresentar características tóxicas.

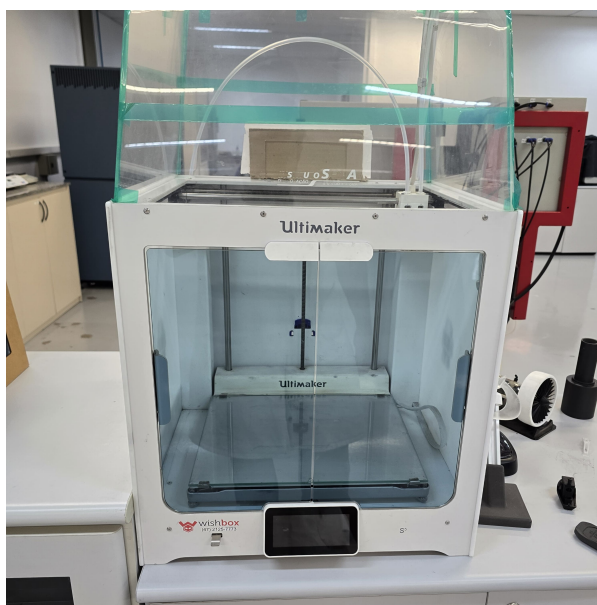
A partir da finalização da definição dos parâmetros, seguiu-se para a validação do corpo de prova em 0°, ilustrado pela Figura 3.4. Tal corpo, assim como os demais desenvolvidos, foi impresso utilizando a Ultimaker S5, ilustrada pela Figura 3.5. Como uma das variações de parâmetros estudadas no trabalho foi a direção do ângulo dos filamentos de impressão, torna-se necessária essa validação.

Figura 3.4 – Direções de filamentos.



Fonte: Miwa (2022)

Figura 3.5: Ultimaker S5



Fonte: Produzido pelo autor

A validação foi realizada a partir da alteração de parâmetros, seguida de testes de tração no corpo de prova. Para isso, foram seguidas as diretrizes contidas na norma ASTM D638-22, que, entre outras definições, atribuiu o valor de 5 mm/min para a velocidade dos testes e 25 mm para a distância entre as marcações do extensômetro. A utilização de CPs repetidos, prevista em norma, foi desconsiderada nessa etapa e utilizou-se da máquina de ensaios mecânicos universal MTS Criterion Model 43 sem extensômetro, ilustrada pela Figura 3.6. O corpo de prova considerado válido seria aquele que apresentasse falha

consistente na seção estreita da amostra, uma vez que esse critério está em conformidade com as instruções e reflete a concentração de tensão fora dessa seção.

Figura 3.6: Máquina de ensaios MTS Criterion Model 43



Fonte: Produzido pelo autor

Os parâmetros de impressão que sofreram alteração foram a velocidade, a distância de retração, a temperatura da extrusora, a velocidade de impressão, a taxa de extrusão, o número de filamentos nas paredes e a distância de desvio de percurso. Esses parâmetros foram utilizados levando em consideração a influência deles no comportamento mecânico do CP e, especialmente, o acúmulo de material na região afetada. Não houve planejamento estatístico nessa etapa, já que o objetivo era apenas a validação.

3.1.1 Planejamento Experimental

No caso do presente trabalho, no qual diferentes fatores foram avaliados, existem alguns planejamentos experimentais que podem ser adotados; o planejamento 2^k fatorial é um exemplo disso. Como esse tipo de planejamento é simples, já que trabalha com apenas dois valores, ou níveis, para cada parâmetro estudado, ele é bastante utilizado, principalmente em casos exploratórios. No entanto, como o objetivo foi observar a variação

em três diferentes ângulos, foi necessário fazer uma alteração do planejamento, em que, no caso desse parâmetro, utilizou-se três níveis.

A validação dos corpos de prova em 0° serviu para a continuidade do projeto. A ideia central era avaliar, entre os níveis testados, a melhor condição de impressão; para isso, levou-se em consideração a variação de parâmetros que possivelmente mais influenciaria no comportamento mecânico do material. Foi feita, então, a divisão dos experimentos em duas partes.

A primeira parte experimental, intitulada como Planejamento A, seguiu um planejamento fatorial, em que foram considerados dois fatores: o material e a direção de impressão. O fator material foi definido com dois níveis, utilizando-se filamentos de PLA de diferentes fornecedores, a saber, Voolt 3D e 3D Lab. O segundo fator, a direção de impressão, apresentou três níveis, com diferentes orientações de disposição dos filamentos no processo de manufatura. Todos os ensaios foram conduzidos com parâmetros fixos, mantendo-se a velocidade de extrusão dos filamentos em 25 mm/s, a largura de extrusão em 0,4 mm e a taxa de extrusão em 100%. A Tabela 3.2 apresenta as variações de ângulo e de material consideradas nesta etapa.

Tabela 3.2: Planejamento experimental A

| Material | Direção de impressão |
|------------------|-----------------------------|
| PLA 1 (3D Lab) | 0° |
| - | $45^\circ/135^\circ$ |
| PLA 2 (Voolt 3D) | 90° |

Fonte: Produzido pelos autor

A segunda etapa experimental, intitulado Planejamento B, utilizou-se das melhores condições encontradas na primeira e fez uma variação da velocidade de extrusão, largura de extrusão e taxa de extrusão. No caso da taxa, foi levado em consideração em 100% da impressora e 86,72% que foi o valor encontrado ao se calibrar a espessura de camada. Essa variação de parâmetros pode ser visualizada pela Tabela 3.3. Como utiliza-se de dois níveis para cada fator, esse planejamento assumiu o formato de um planejamento experimental 2^k fatorial.

Tabela 3.3: Planejamento experimental B

| Velocidade (mm/s) | Largura de extrusão (mm) | Taxa de extrusão |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 25 | 0,35 | 86,72% |
| 40 | 0,4 | 100% |

Fonte: Produzido pelos autor

A planilha unificada das duas etapas, juntamente com os códigos de cada configuração, pode ser vista pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Planejamento completo

| Código | Material | Ângulo | Vel. (mm/s) | Lar. de extrusão (mm) | Taxa de extrusão |
|--------|----------|----------|-------------|-----------------------|------------------|
| AA | PLA 1 | 0° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| AB/BA | PLA 1 | 45°/135° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| AC | PLA 1 | 90° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| AD | PLA 2 | 0° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| AE | PLA 2 | 45°/135° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| AF | PLA 2 | 90° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| BA/AB | PLA 1 | 45°/135° | 25 | 0,4 | 100,00% |
| BB | PLA 1 | 45°/135° | 25 | 0,4 | 86,72% |
| BC | PLA 1 | 45°/135° | 25 | 0,35 | 100,00% |
| BD | PLA 1 | 45°/135° | 25 | 0,35 | 86,72% |
| BE | PLA 1 | 45°/135° | 40 | 0,4 | 100,00% |
| BF | PLA 1 | 45°/135° | 40 | 0,4 | 86,72% |
| BG | PLA 1 | 45°/135° | 40 | 0,35 | 100,00% |
| BH | PLA 1 | 45°/135° | 40 | 0,35 | 86,72% |

Fonte: Produzido pelos autor

Vel.: Velocidade;

Lar.: Largura.

Em função das condições da máquina de tração adotada, em que inicialmente não possuía o extensômetro, houve a divisão do trabalho em duas etapas. Em primeira instância, os testes foram feitos sem a medição da deformação, apenas do deslocamento, e com célula de carga de 50 kN, ocorrendo um lote de pelo menos cinco corpos de prova para cada configuração. Em seguida, foram feitos novos testes, dessa vez utilizando o extensômetro MTS Advange Optical Extensometer, como pode ser visto pela Figura 3.2, e com célula de carga de 5 kN. Isso, no entanto, só aconteceu para o planejamento experimental A. O planejamento B seguiu, apenas, a configuração sem extensômetro e com célula de carga de 50 kN. Dessa forma, o planejamento A foi utilizado para validar essa condição para o planejamento B.

As respostas observadas foram a tensão máxima, tensão de ruptura, e nos casos em que se utilizou o extensômetro, foi medido, também, o módulo de elasticidade. Além de respostas mecânicas, também foi medido o dimensional das peças, onde houve a observação do peso, espessura e largura na parte estreita dos CPs. Para a medição da espessura e largura, foi utilizado o paquímetro digital da fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,01

mm e faixa nominal de 150 mm. Vale lembrar que, em peças com uso estrutural efetivo, o dimensional da peça pode ser importante.

O Apêndice A demonstra o tratamento de dados e análise estatística dos ensaios de tração e os códigos completos estão ilustrados pelos Apêndices B e C.

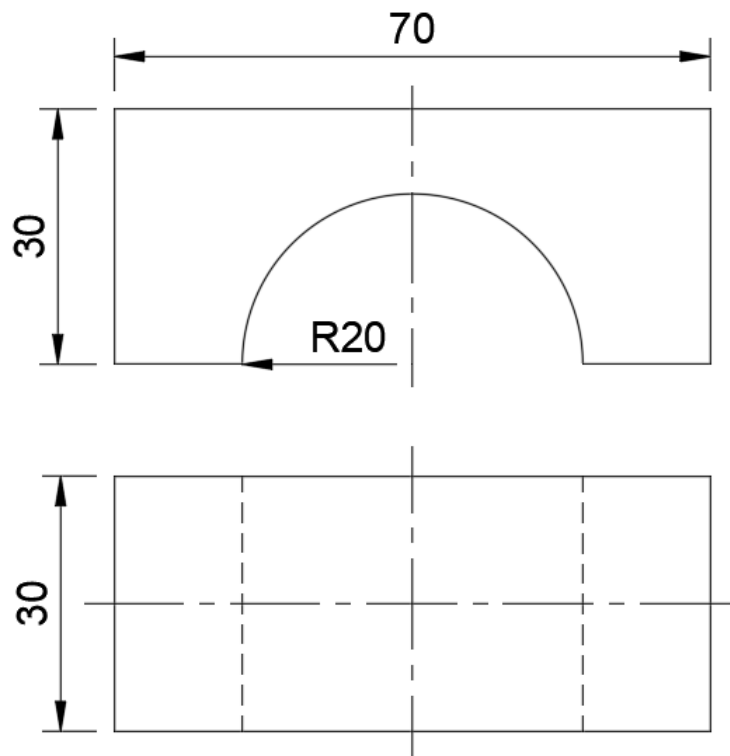
3.2 Análise e otimização das pontes

3.2.1 Otimização topológica

O presente trabalho se propõe a fazer uma análise em estrutura de ponte, de forma a comparar o comportamento da otimização em função da variação de preenchimento, nativa da FFF, e a própria otimização topológica. A escolha do formato da estrutura foi feita em função da sua facilidade de impressão e de ensaio mecânico. Dessa forma, princípios de DfAM foram aplicados para sua concepção.

O resultado pode ser visto pelas Figuras 3.7 e 3.8. Nota-se que a ponte escolhida apresenta medidas de um paralelepípedo de 70 mm x 30 mm x 30 mm, com um furo passante de raio de 20 mm. Essas medidas foram escolhidas de forma a favorecer o limite da mesa de ensaio de compressão, algo em torno de 110 mm de diâmetro.

Figura 3.7: Ponte - desenho 2D



Unidades em mm. Fonte: Produzido pelo autor

Figura 3.8: Ponte original

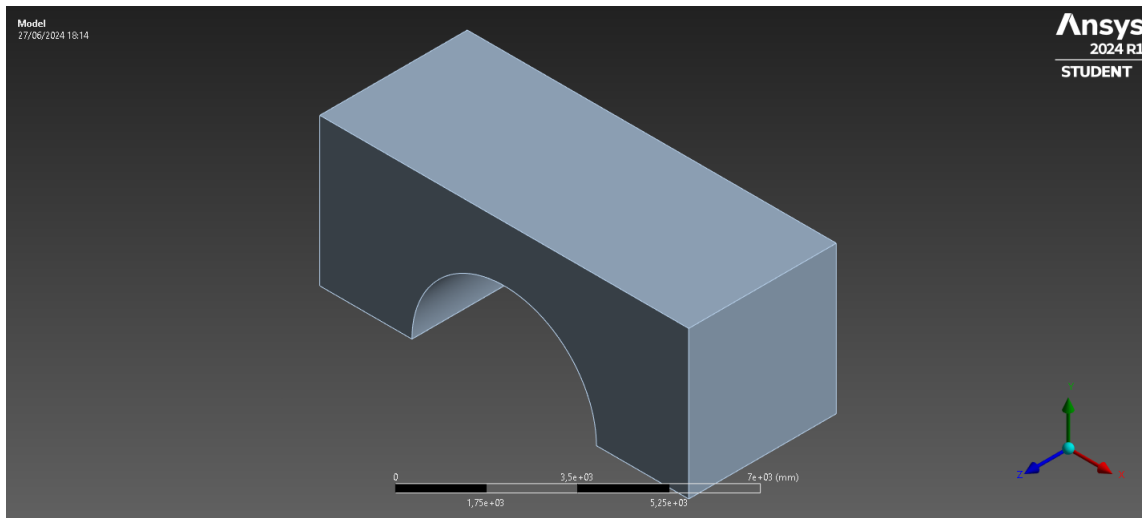


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Essa ponte então foi simulada, utilizando, para isso, o software Ansys Workbench Student 2024 R1, com sua base restrita do tipo fixa e uma força de 5 kN distribuída na direção “-Y” em sua superfície superior. Como simplificação do problema, o material foi considerado isotrópico para a simulação, já que o presente trabalho não tem como objetivo propor uma simulação que mostre as condições reais de uma peça obtida por AM. A implantação da força e das restrições pode ser vista pelas Figuras 3.9 e 3.10.

Figura 3.9: Força e restrições - posição iso

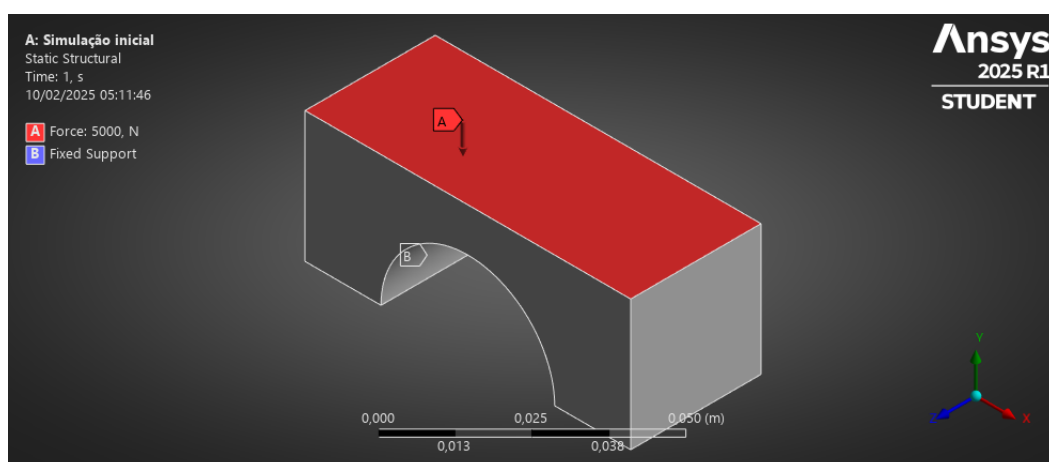


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Figura 3.10: Força e restrições - posição inferior

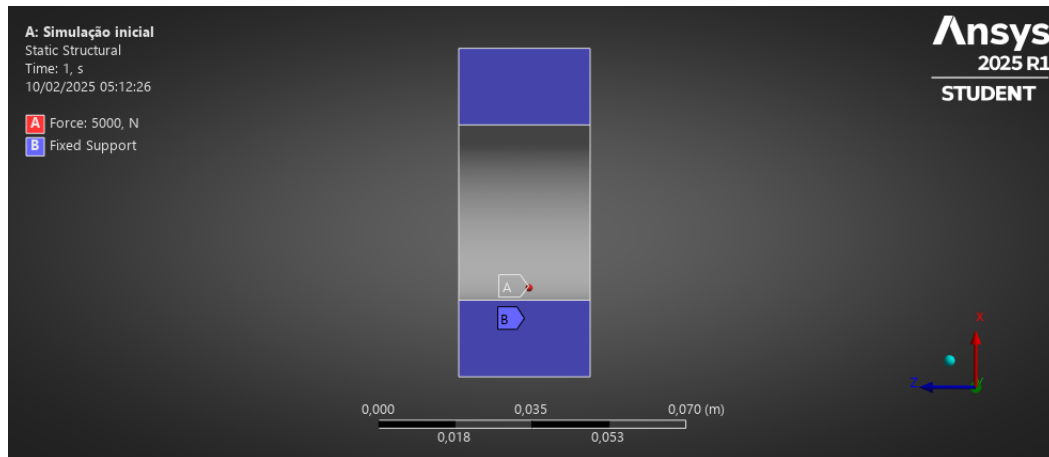


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Utilizando como base a simulação com maior número de nós, foi feita, então, a otimização topológica. A escolha da malha mais refinada se deve ao fato de que o resultado da otimização se torna mais contínuo com um número maior de nós. Além disso, foi adotada a minimização do *compliance*, a manutenção da superfície superior da ponte na otimização, já que é uma área de interesse na aplicação dela, e um valor alvo de 15% de massa final, valor escolhido de forma a demonstrar a capacidade da TO. O resultado obtido foi, então, tratado e novamente simulado com as mesmas condições apresentadas no corpo original. O esquemático da simulação pode ser visto pela Figura 3.11.

Figura 3.11: Esquemático da simulação

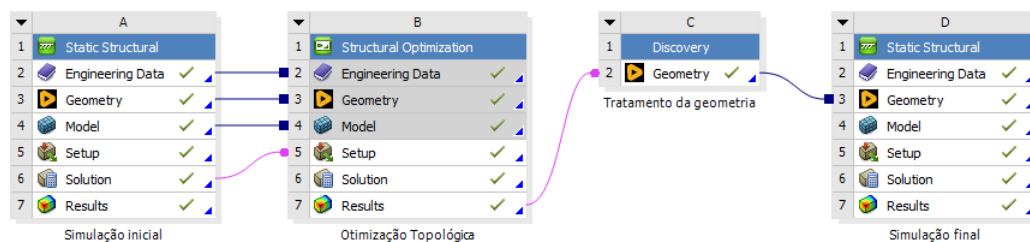


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que todos os passos narrados anteriormente, sobre a simulação, podem ser vistos pela Figura 3.11, em que no primeiro bloco, em “Simulação inicial”, existe a escolha da malha e a primeira simulação. Já no bloco de otimização, intitulado “Otimização topológica” escolheram-se todos os parâmetros da otimização e desenvolveu-a. No

tratamento da geometria, foram realizados o arredondamento dos polígonos e a junção daqueles necessários para o desenvolvimento da simulação final, especialmente os fixados na parte inferior da peça, onde ocorre sua fixação. Por fim, em “Simulação final”, ocorre a simulação da geometria resultante.

3.2.2 Simulação numérica

Os resultados encontrados nos ensaios de tração foram utilizados para a caracterização do material e simulação dos ensaios das pontes. Para isso, foi criado um material intitulado PLA no *software* Ansys, com os resultados obtidos em tração para os parâmetros de impressão utilizados nas pontes. As simulações foram feitas, então, de forma semelhante ao mostrado durante a metodologia da otimização topológica, diferenciando pela magnitude da força, em que adotou-se a força máxima que as pontes suportaram, de forma a comparar com os resultados experimentais. Foi adotada uma simplificação para materiais isotrópicos, já que o foco dessas simulações não foi reproduzir com perfeição os resultados experimentais e, sim, validar a utilização dos valores de tração para o desenvolvimento de projetos de impressão 3D, especialmente para o caso de otimização topológica e peças maciças. A máxima tensão principal, a tensão de Von-Mises e a deformação foram, então, analisadas.

3.2.3 Fabricação das pontes

Assim como nos corpos de prova de tração, as pontes também foram impressas utilizando a impressora Ultimaker S5, como pode ser visto pela Figura 3.5. Também utilizou-se o software Cura como fatiador e o material PLA.

As pontes foram impressas considerando cinco condições diferentes de impressão. Sendo elas:

- Peça original e com parâmetros de impressão *standard* do software Cura;
- Peça original e com os melhores parâmetros encontrados nos ensaios de tração;
- Peça otimizada e com os melhores parâmetros encontrados nos ensaios de tração;
- Peça original e com os melhores parâmetros de impressão encontrados nos ensaios de tração, mas com preenchimento *grid* e com uma porcentagem objetivando mesmo peso da peça otimizada;
- Peça original e com os melhores parâmetros de impressão encontrados nos ensaios de tração, mas com preenchimento *gyroid* e com uma porcentagem objetivando mesmo peso da peça otimizada;

Os parâmetros de impressão de cada uma delas podem ser vistos pela Tabela 3.5.

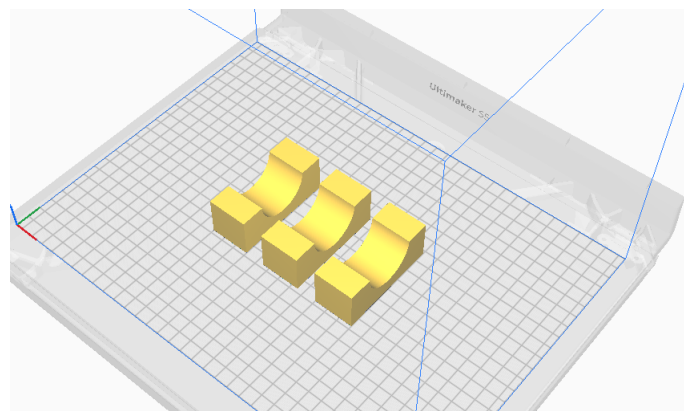
Tabela 3.5: Parâmetros de impressão das pontes

| Parâmetros/Ponte | <i>Standard</i> | <i>Original</i> | <i>Grid</i> | <i>Gyroid</i> | Otimizada |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|---------------|-----------|
| Altura de camada | 0,15 mm | 0,2 mm | 0,2 mm | 0,2 mm | 0,2 mm |
| Largura de extrusão | 0,4 mm | 0,35 mm | 0,35 mm | 0,35 mm | 0,35 mm |
| Número de filetes nas paredes | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Tipo de preenchimento | linhas | linhas | <i>grid</i> | <i>gyroid</i> | linhas |
| Porcentagem de preenchimento | 100% | 100% | 8,49% | 8,96% | 100% |
| Temperatura de impressão | 200°C | 210°C | 210°C | 210°C | 210°C |
| Temperatura na mesa | 60°C | 60°C | 60°C | 60°C | 60°C |
| PLA | 3DLab | 3DLab | 3DLab | 3DLab | 3DLab |
| Direção de impressão | 45°/135° | 45°/135° | 45°/135° | 45°/135° | 45°/135° |
| Velocidade | 30 mm/s | 25 mm/s | 25 mm/s | 25 mm/s | 25 mm/s |
| Taxa de extrusão | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Fonte: Produzido pelo autor

O posicionamento das pontes na mesa da impressora pode ser visto pela Figura 3.12. Note que o formato das pontes, além de ser planejado para otimização topológica e para os ensaios mecânicos, também foi pensado para a impressão, já que tal geometria não apresenta a necessidade de suportes, o que demonstra a aplicação do DfAM.

Figura 3.12: Posicionamento das pontes



Fonte: Produzido pelo autor

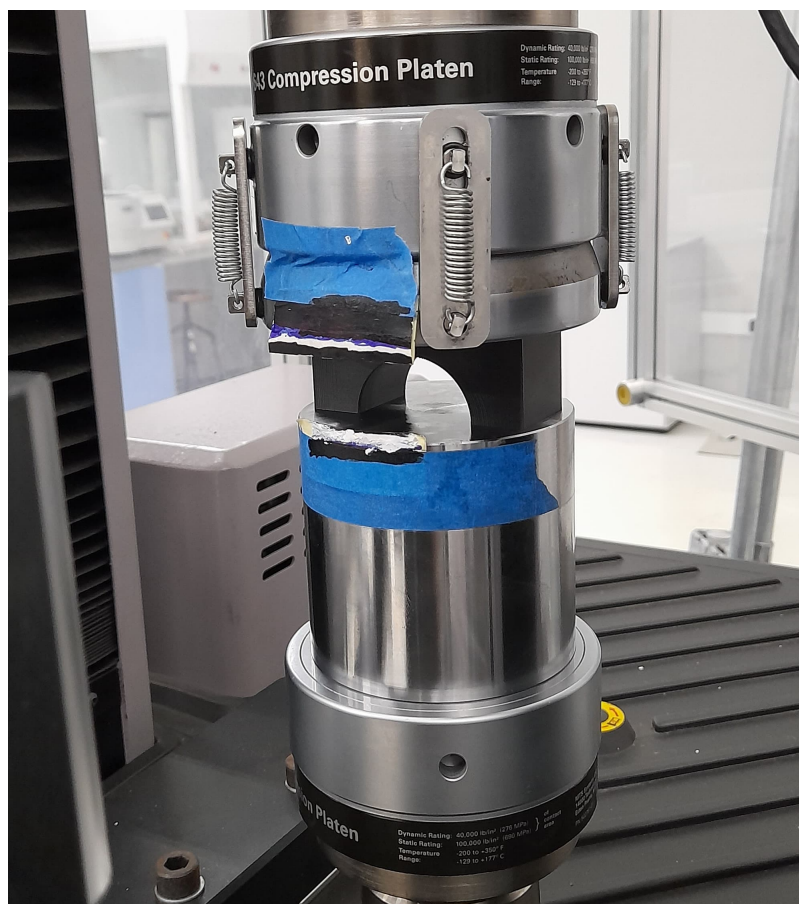
O posicionamento de todas as versões seguiu o demonstrado pela Figura 3.12.

3.2.4 Ensaios de compressão

O ensaio de compressão foi desenvolvido com base na norma ASTM D695-15. Vale ressaltar, no entanto, que a norma apresenta um formato específico de corpo de prova que se diferencia da estrutura desenvolvida no presente trabalho, mas a velocidade de 1,3 mm/min foi baseada na norma em questão.

O extensômetro foi adaptado para avaliar a deformação ocorrida no corpo de prova. Isso se torna relevante para o projeto, já que o método de otimização usa como base a função *compliance*, que está intimamente ligada à rigidez do material. A Figura 3.13 ilustra isso.

Figura 3.13: Adaptação para utilização do extensômetro em compressão



Fonte: Produzido pelo autor

Um cilindro metálico foi adicionado à base inferior para elevar o corpo de prova, alinhando-o à altura do extensômetro. As fitas brancas foram utilizadas para demarcar o início e o fim do CP, garantindo sua correta identificação pelo equipamento. Com essa marcação, a aproximação entre os suportes pôde ser medida, possibilitando o cálculo da deformação da ponte sem a influência da deformação da máquina.

Os ensaios de compressão nos corpos de prova não apresentaram tensão máxima das pontes maciças; isso aconteceu em função de uma célula de carga de 50 kN, menor que o CP suporta. Dessa forma, foi utilizada a máquina Shimadzu UHF 600kNx, com uma célula de carga de 600 kN, com o objetivo de atingir a tensão máxima da amostra, para os casos em questão. Para isso, foram utilizados os corpos *Standard* e *Original*, já ensaiados na primeira máquina, mas que não atingiram a parte plástica do ensaio. Além desses, três corpos de prova otimizados através do método de otimização topológica foram ensaiados, com o objetivo de observar a variação em função da diferença das máquinas. Ressalta-se que, no caso da segunda máquina, não se utilizou extensômetro, o que inviabilizou a medida de tensão de escoamento e módulo de elasticidade, mas não a de tensão máxima.

A análise de resultados foi feita de forma semelhante aos ensaios de tração, diferenciando principalmente na utilização de orientação a objeto, o que auxiliou na organização do código.

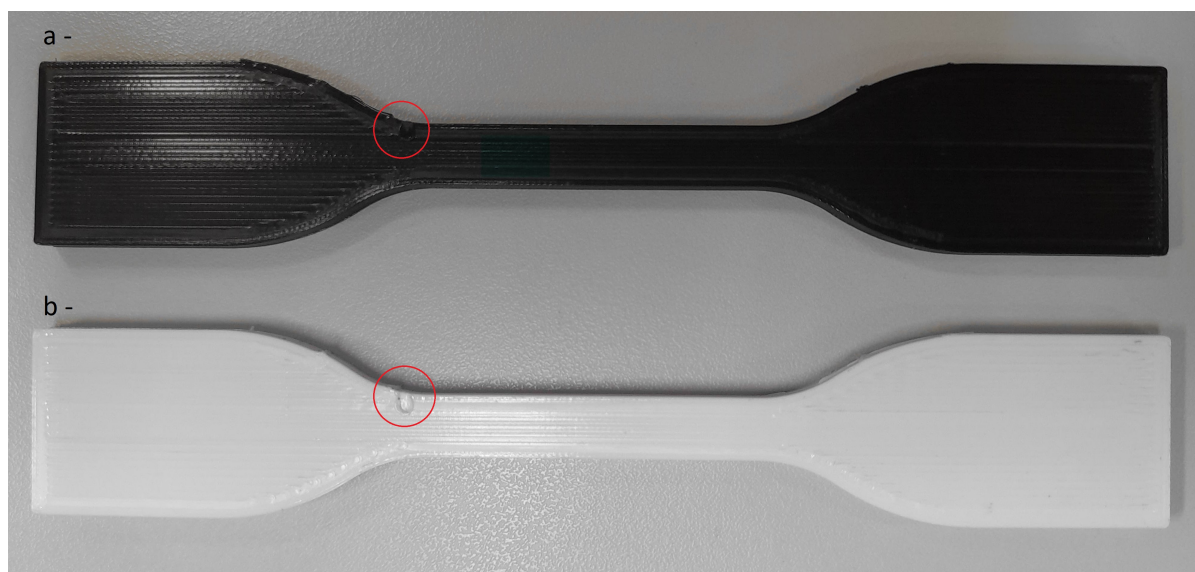
4 RESULTADOS

4.1 Ensaios de tração

Com o objetivo de validar o corpo de prova em 0° , avaliou-o empregando diferentes parâmetros de impressão. Entre os parâmetros de estudo, o que teve maior influência na diminuição da concentração de tensão foi o aumento do número de filetes nas paredes. Nota-se que isso acontece devido à diferenciação da mudança de espessura do corpo de prova, no momento em que ele passa da região útil para a de fixação. Isso ocorre devido ao processo de manufatura aditiva por FFF, no qual o bico deposita o material em trajetórias retas. Dessa forma, em curvas, como ocorre na geometria, o bico realiza um retorno ou finalização nesse ponto, o que pode resultar em um acúmulo ou déficit de material. Essa variação na deposição gera uma descontinuidade geométrica, criando um concentrador de tensão. A função do aumento do número de filetes é dar uma maior resistência estrutural ao corpo de prova; apesar de não solucionar diretamente o problema, ela diminuiu a quebra nesse ponto.

Após a validação do CP em 0° foi feito um total de 5 testes por condição e por impressão. Percebeu-se, no entanto, que devido à passagem do bico sobre o corpo de prova na lateral direita da mesa, na condição de 0° acontecia uma concentração de tensão, como pode ser vista pela Figura 4.1.

Figura 4.1: Corpos de prova de posição 5: a - PLA 1 b - PLA 2



Fonte: Produzido pelo autor

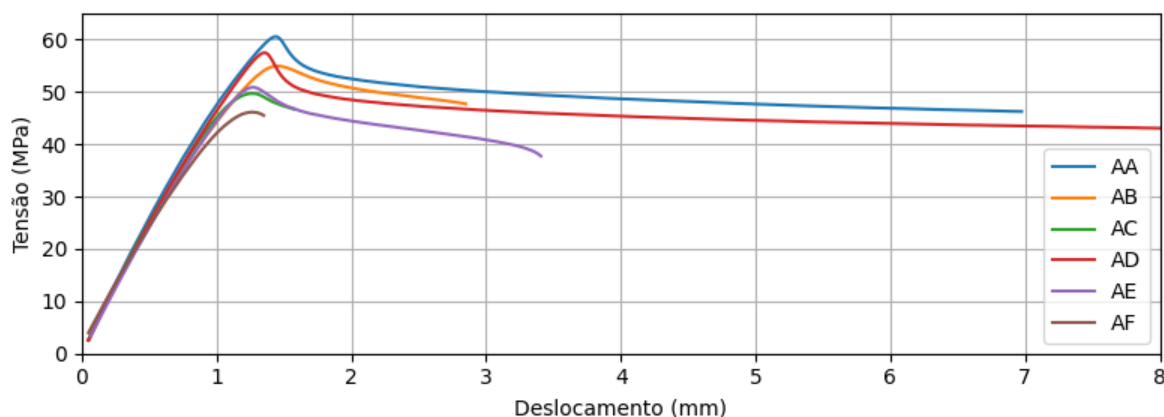
Os concentradores citados estão circulados em vermelho. Dessa forma, como solução, foi adotada a confecção sempre de mais de um lote nessa condição, ou quando houvesse algum problema significativo durante os testes. É interessante ressaltar que esse concentrador também é possível de se observar nos gráficos, ilustrados no apêndice em corpos de prova em 0° e múltiplos de 5, sendo, então, as Figuras J.1, J.2, J.7 e J.8. No qual o comportamento do material se torna mais frágil em relação aos demais e a curva cessa no início do comportamento plástico.

Após a validação da metodologia de fabricação do corpo de prova em 0° , seguiu-se para os ensaios mecânicos de tração com a variação dos parâmetros de impressão.

4.1.1 Experimento A

O experimento A, como dito anteriormente, foi marcado pela variação da direção de impressão, sendo essas: $45^\circ/135^\circ$, 90° e 0° , e do material. As retas mostradas nas Figuras 4.2 e 4.3 ilustram os resultados encontrados pelos ensaios. Vale ressaltar que tais retas foram escolhidas de forma aleatória entre as repetições dos ensaios desenvolvidos.

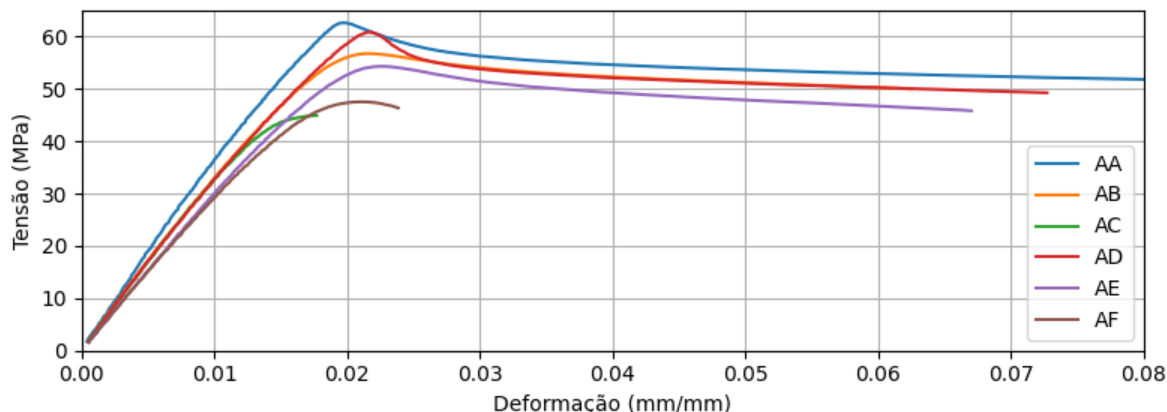
Figura 4.2: Ensaio de tração CPs A com célula de 50 KN



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que a curva AA obteve maior resistência à tração; ela representa a condição de PLA 1 e 0° . Logo após, a curva AD representa o caso de PLA 2 e 0° . Esse comportamento já demonstra uma possível maior contribuição do ângulo de impressão sobre o fornecedor, já que as duas retas em 0° obtiveram melhores resultados de resistência à tração. Em seguida, a curva AB representa o caso de $45^\circ/135^\circ$ e PLA 1; em sequência a ela, a curva AE apresenta a configuração de $45^\circ/135^\circ$ e PLA 2.

Figura 4.3: Ensaio de tração CPs A com célula de 5 KN



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se ainda a diferença entre o gráfico em que foi utilizada a célula de carga de 50 kN sem extensômetro e 5 kN com extensômetro. Os ângulos de inclinação das retas no caso de 50 kN apresentam maiores similaridades. Isso pode ser em função da dependência maior do operador no caso do uso do extensômetro, já que por se tratar de um extensômetro óptico, é necessário fazer marcações para a captação da deformação do CP e isso pode ter influenciado no resultado de rigidez das amostras; outra possibilidade é pela forma como a máquina mede o deslocamento, em que existe a composição, tanto do deslocamento estrutural da máquina quanto do CP, isso faz com que exista um mascaramento da variação de inclinação das retas no caso ilustrado pela Figura 4.2. Ressalta-se ainda um comportamento, aparentemente, mais tenaz entre os ensaios com célula de carga de 5 kN em relação ao de 50 kN. Isso deve estar relacionado com o método de armazenagem dos espécimes, que foi melhorando no decorrer do trabalho. Dessa forma, os CPs que tiveram uma melhor armazenagem, ficaram menos suscetíveis à umidade do ar, o que resultou em um comportamento mais elastoplástico. Sendo assim, é importante ter cuidado ao analisar os resultados que dependem disso, por exemplo, a tensão de ruptura.

4.1.1.1 Análise estatística

A partir dos dados obtidos pelos ensaios de tração, sendo eles: resistência à tração, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura, analisou-se, juntamente com medidas dimensionais, de forma estatística. Como existiu um seccionamento entre os resultados, em função da mudança da célula de carga, as medidas de resistência mecânica também foram seccionadas para análise estatística. Em contrapartida, os dados de resistência à tração e tensão de ruptura, considerando suas presenças em todos os

seccionamentos, foram analisados com todos os ensaios do planejamento A. Tal análise pode ser vista pela Tabela 4.1.

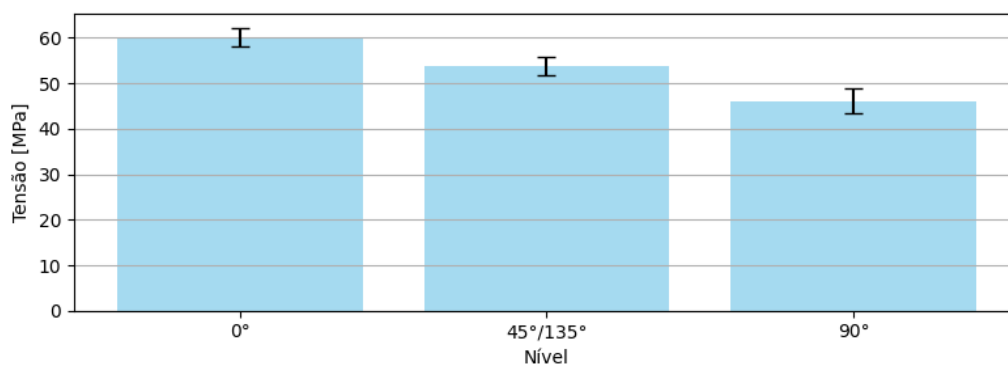
Tabela 4.1: Resultados Planejamento A - Ensaio mecânicos

| Fatores | Resistência à tração | | Tensão de ruptura | |
|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| | Contribuição | Valor-P | Contribuição | Valor-P |
| Material | 7,13% | $6,24 \cdot 10^{-14}$ | 34,88% | $1,32 \cdot 10^{-11}$ |
| Ângulo | 86,66% | $2,20 \cdot 10^{-36}$ | 16,56% | $1,27 \cdot 10^{-6}$ |
| Célula | 0,02% | $5,56 \cdot 10^{-1}$ | 12,08% | $4,72 \cdot 10^{-6}$ |
| Material:Ângulo | 0,05% | $6,95 \cdot 10^{-1}$ | 4,43% | $1,21 \cdot 10^{-2}$ |
| Material:Célula | 0,39% | $2,02 \cdot 10^{-2}$ | 2,43% | $2,58 \cdot 10^{-2}$ |
| Ângulo:Célula | 2,18% | $3,88 \cdot 10^{-6}$ | 6,10% | $2,76 \cdot 10^{-3}$ |
| Material:Ângulo:Célula | 0,20% | $2,44 \cdot 10^{-1}$ | 0,58% | $5,37 \cdot 10^{-1}$ |
| Erro | 3,37% | - | 22,95% | - |
| R^2 | 96,65% | | 76,26% | |
| R^2 ajustado | 95,91% | | 71,04% | |

Fonte: Produzido pelo autor

A hipótese levantada nos gráficos dos ensaios de tração, sobre a possível sobreposição do comportamento relacionado com os ângulos de impressão em detrimento do material, se reforça. Já que ao analisarmos os resultados obtidos de resistência à tração, percebe-se uma contribuição de 86,66% do comportamento relacionado com a mudança do ângulo. Nota-se, entretanto, que isso não é válido para o caso da tensão de ruptura, que, diferentemente da resistência à tração, apresenta um comportamento mais dependente do material e da célula de carga. A Figura 4.4 ilustra a média da resistência à tração em função do ângulo de impressão.

Figura 4.4: Resistência à tração em função da direção de impressão

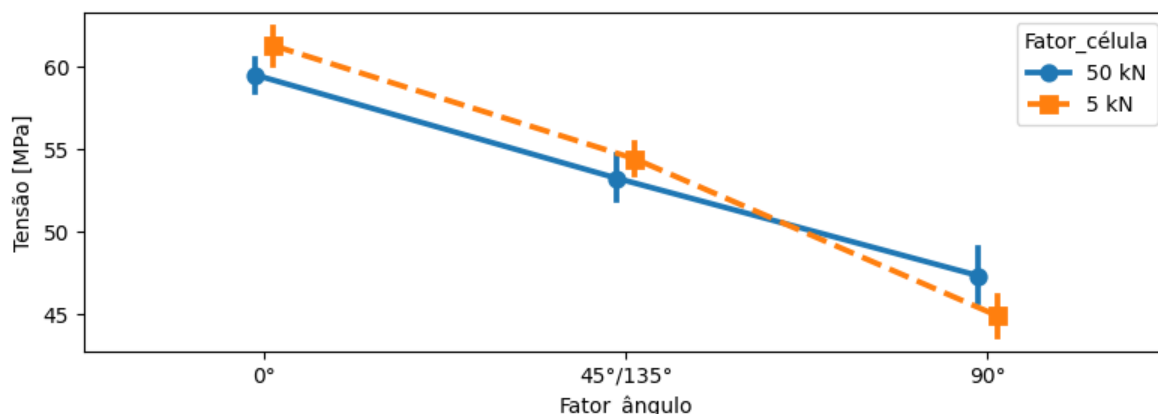


Fonte: Produzido pelo autor

O ângulo de 0° apresentou o melhor resultado, seguido pelo $45^\circ/135^\circ$ e 90° . Assim como observado por Doshi *et al.* (2022), Khosravani *et al.* (2022), Lampron *et al.* (2023) e Miwa *et al.* (2023), em que os direcionamentos alinhados com o carregamento tendem a apresentar melhores resultados. Isso ocorre em função da fragilidade gerada entre os filamentos poliméricos; essa interface fragiliza a peça, já que a união entre elas não acontece totalmente. Dessa forma, corpos de prova que apresentam filamentos paralelos à força têm vantagem sobre os demais. Nota-se que a escolha da melhor direção deve levar em consideração outros fatores, como, por exemplo, a facilidade de impressão. Apesar do CP em 0° apresentar os melhores resultados, ele apresenta uma alta dificuldade de impressão, considerando a eliminação de concentradores de tensão.

Entre a influência dos parâmetros relacionados com a resistência à tração, a influência da célula se limitou à interação entre ela e o ângulo de impressão; esse resultado pode ser visto pela Figura 4.5.

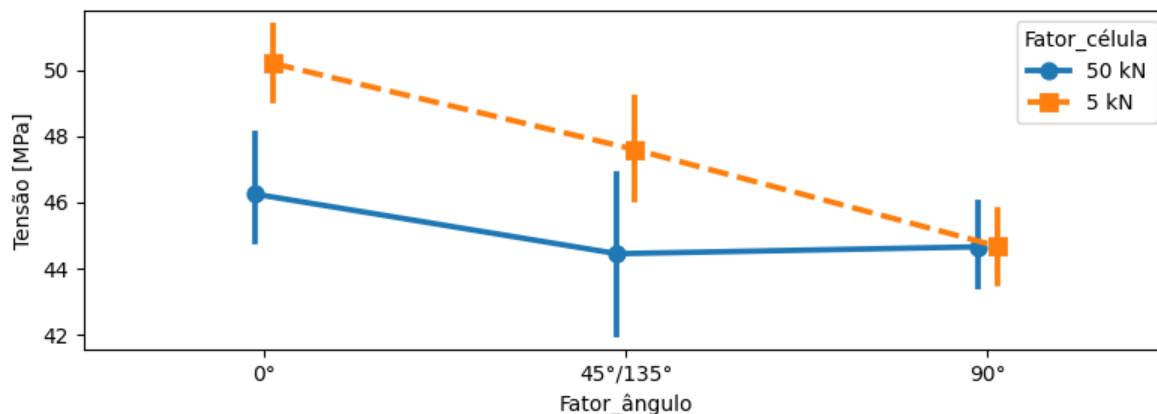
Figura 4.5: Influência da interação entre célula e ângulo na resistência à tração



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que em 90° a diferença, aparentemente, constante entre as respostas encontradas nos demais ângulos se diferencia, tornando o resultado da célula de 5 kN mais frágil se comparado ao de 50 kN. Esse comportamento pode estar relacionado com o erro atrelado a células maiores, já que o nível de carga do CP de 90° é menor se comparado aos demais, o que pode ter representado um desafio para ela. Tal tendência pode ser observada, em uma maior intensidade, nos resultados de tração de ruptura, como visto pela figura 4.6.

Figura 4.6: Influência da interação entre célula e ângulo na tensão de ruptura



Fonte: Produzido pelo autor

A tensão de ruptura, por se tratar do fim da curva de tração, apresenta dependência da tenacidade do material (capacidade de absorção de energia até a falha). Isso explica essa maior contribuição desse fator para o comportamento estatístico. Já em relação à influência da célula, existem duas hipóteses que podem explicar tal comportamento: o erro atrelado a uma célula de carga maior teve influência no comportamento dos ensaios com a célula de 50 kN, o que levou a uma leitura errônea da máquina; ou a melhoria do armazenamento dos corpos de prova durante o trabalho levou a um menor nível de umidade, o que induziu a um comportamento mais frágil no caso de 50 kN. Ambas as hipóteses explicam também erro de 22,95%, alto se comparado ao erro atrelado à resistência à tração.

Nota-se, ainda, que os resultados apresentaram valores de R^2 e R^2 ajustado aceitáveis, demonstrando a capacidade do método estatístico de prever o comportamento do modelo. Além disso, é possível alegar que a resistência à tração demonstra uma maior confiabilidade se comparada à ruptura, já que demonstra menor dependência da célula, uma maior capacidade de previsão do comportamento e menor erro.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos através da utilização do extensômetro, foi possível aferir os valores de módulo de elasticidade e tensão de escoamento.

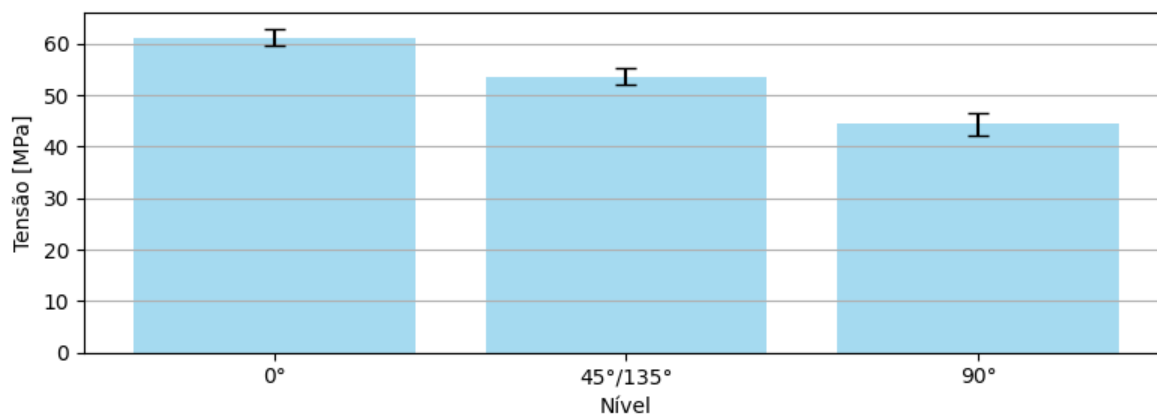
Tabela 4.2: Resultados Planejamento A com célula de carga de 5 kN - Ensaio mecânicos

| Fatores | Módulo de elasticidade | | Tensão de escoamento | |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P | Contribuição | Valor-P |
| Material | 11,50% | $8,28 \cdot 10^{-2}$ | 1,20% | $2,91 \cdot 10^{-1}$ |
| Ângulo | 6,01% | $4,35 \cdot 10^{-1}$ | 94,05% | $2,06 \cdot 10^{-5}$ |
| Material:Ângulo | 5,87% | $4,44 \cdot 10^{-1}$ | 0,08% | $7,36 \cdot 10^{-1}$ |
| Erro | 76,61% | - | 2,95% | - |
| R² | 23,39% | | 97,05% | |
| R² ajustado | 5,97% | | 96,38% | |

Fonte: Produzido pelo autor

Apesar dos resultados insatisfatórios decorrentes da variação do ângulo de inclinação da reta, a análise estatística da tensão de escoamento apresentou capacidade em prever o comportamento experimental, como está ilustrado pela Tabela 4.2. Isso ocorre em função da forma como a tensão de escoamento é encontrada; ela se relaciona de forma indireta com tal inclinação e depende do maior resultado da reta, o que fez com que o modelo fosse capaz de prever, parcialmente, seu comportamento. A tensão de escoamento média em função da direção do filamento pode ser vista pela Figura 4.7.

Figura 4.7: Tensão de escoamento em função da direção de impressão - ensaios A 5 kN



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que os resultados acompanharam o que foi observado na resistência à tração, em que corpos de prova que apresentam os filamentos mais paralelos ao carregamento resultam em um maior pico de tensão.

Além das análises mecânicas dos corpos de prova, outra análise importante que foi desenvolvida se trata da análise dimensional. Corpos de prova impressos por polímeros são suscetíveis à variação dimensional em função da variação térmica que ocorre no desenvolvimento de tais peças. Dessa forma, tal investigação é imprescindível para qualquer desenvolvimento de projeto mecânico em que tal tecnologia for aplicada. A Tabela 4.3 mostra a análise estatística dos resultados dimensionais.

Tabela 4.3: Resultados Planejamento A - Dimensional

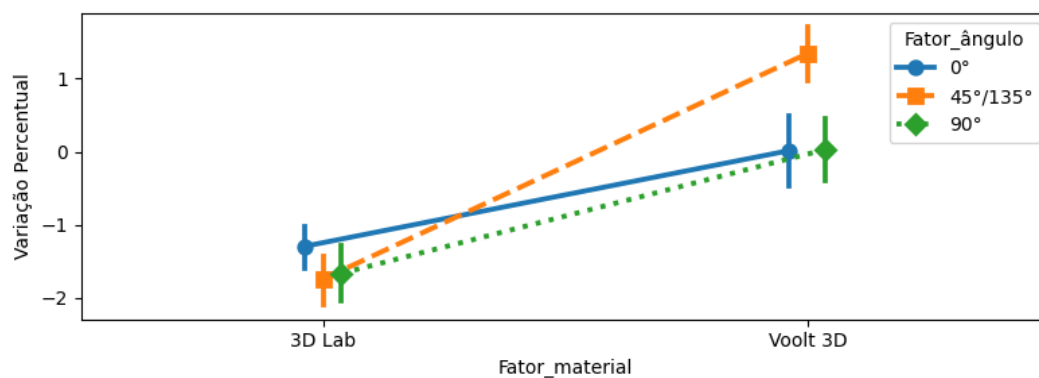
| Fatores | Massa | | Largura | | Espessura | |
|-------------------------------|--------|------------------------|---------|-----------------------|-----------|------------------------|
| | Cont. | Valor-P | Cont. | Valor-P | Cont. | Valor-P |
| Material | 62,08% | $7,94 \times 10^{-17}$ | 18,90% | $5,19 \times 10^{-4}$ | 8,07% | $1,89 \times 10^{-4}$ |
| Ângulo | 4,04% | $1,49 \times 10^{-2}$ | 2,05% | $4,83 \times 10^{-1}$ | 44,41% | $3,29 \times 10^{-12}$ |
| Material:Ângulo | 8,94% | $1,88 \times 10^{-4}$ | 1,06% | $6,86 \times 10^{-1}$ | 19,24% | $4,86 \times 10^{-7}$ |
| R² | 75,06% | | 22,01% | | 71,73% | |
| R² ajustado | 72,83% | | 15,05% | | 69,20% | |

Fonte: Produzido pelo autor

Cont.: Contribuição

O modelo estatístico foi capaz de prever, de forma aceitável, o comportamento tanto do peso quanto da espessura; a largura, no entanto, não apresentou uma boa adaptação. Ambos os materiais possuem densidade de $1,24 \text{ g/cm}^3$, logo, a dependência da massa com o parâmetro material, apesar de esperado, em uma situação ideal não aconteceria. Sabe-se, no entanto, que o arredondamento de algarismos significativos, a variação natural da densidade do material e características que se relacionam com o processo de produção da manufatura aditiva podem influenciar o peso final. Dessa forma, a Figura 4.8 ilustra a interação dos fatores para o caso do resultado de massa.

Figura 4.8: Massa em função da interação entre ângulo e material

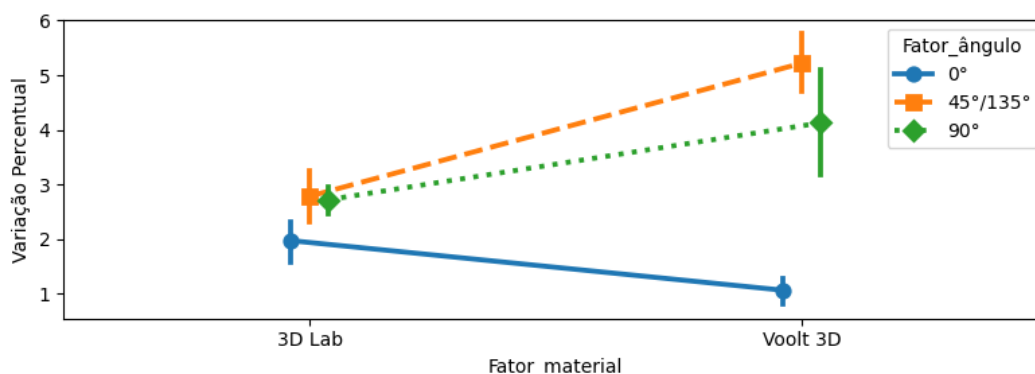


Fonte: Produzido pelo autor

Evidencia-se uma média maior da massa do material fornecido pela Voolt 3D. Além disso, a direção de filamentos de $45^\circ/135^\circ$ apresentou maior massa, o que demonstra possível melhor densidade de impressão nessa direção. Isso ocorre em função da maior capacidade dessa direção em adaptar-se a variações geométricas da peça, resultando em melhores preenchimentos, o que não acontece no caso da 3D Lab.

O resultado da interação dos fatores para a espessura apresentou similaridades com a massa, como pode ser visto pela Figura 4.9.

Figura 4.9: Espessura em função da interação entre ângulo e material



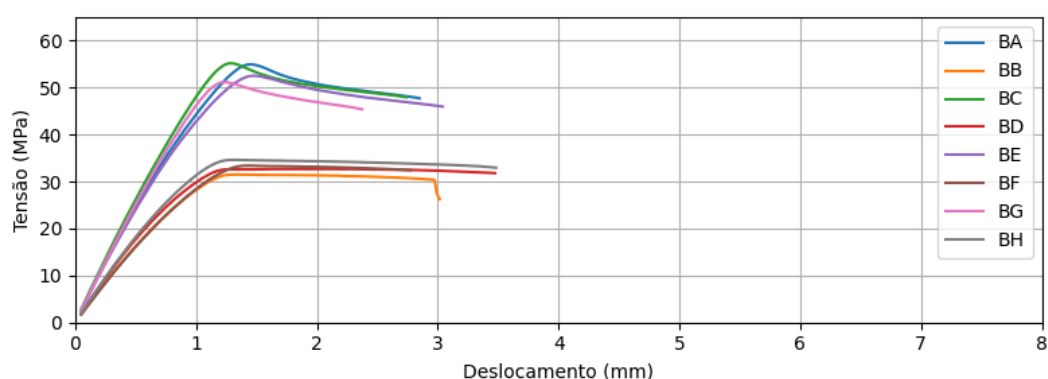
Fonte: Produzido pelo autor

Observa-se que o ângulo de $45^\circ/135^\circ$ e o fornecedor Voolt 3D apresentaram maiores resultados, assim como no caso da massa. Isso, no entanto, em aplicações mecânicas, pode causar problemas de encaixe da peça. Levando esse quesito em consideração, o melhor resultado seria o de 0° e Voolt 3D, por apresentar um valor mais próximo do 0% de variação dimensional. Esse menor valor de 0° em comparação aos outros direcionamentos, provavelmente se deve ao fato de que a direção do filamento está na mesma direção das paredes do corpo de prova; isso resulta em espaços na interface entre os filamentos internos e a parede, algo semelhante ao encontrado por Miwa *et al.* (2023). Demonstrando uma melhor capacidade, novamente, do ângulo $45^\circ/135^\circ$ em adaptar-se à geometria da peça, nesse caso, em contrapartida, ocasionando pior resultado dimensional. Dessa forma, apesar do ângulo 0° apresentar melhores resultados dimensionais e mecânicos, o de $45^\circ/135^\circ$ apresentou resultados mecânicos intermediários, maior facilidade de impressão e adaptação; em função disso, o corpo de $45^\circ/135^\circ$ foi o escolhido para o desenvolvimento do experimento B, além do material fornecido pela 3D Lab, já que ele apresenta maiores valores de resistência à tração.

4.1.2 Experimento B

O experimento B, assim como discorrido na metodologia, fez a variação de três parâmetros, sendo eles: velocidade de impressão (25 mm/s e 40 mm/s), largura de filamento (0,35 mm e 0,4 mm) e taxa de extrusão (86,72% e 100,00%). Os resultados obtidos pelos ensaios de tração estão ilustrados pela Figura 4.10; a escolha das curvas para tal figura, assim como no experimento A, foi feita de forma aleatorizada.

Figura 4.10: Ensaio de tração CPs B



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que existe uma divisão clara entre dois grupos, sendo o primeiro composto pelas curvas BA, BC, BE e BG, já o segundo por BB, BD, BF e BH; a diferença entre esses dois grupos está na taxa de extrusão, em que o primeiro foi impresso em 100,00% e o segundo em 86,72%. Com isso, é possível concluir uma clara influência predominante desse parâmetro sobre os demais, demonstrando uma maior resistência à tração relacionada a maiores valores dessa taxa (LENDVAI *et al.*, 2025; ZHEN *et al.*, 2023); isso, no entanto, ficará mais claro durante a análise estatística. Ao comparar os resultados do planejamento A e célula de carga de 50 kN, ilustrado pela Figura 4.2, existe uma piora aparente na tenacidade do material no planejamento B; esse comportamento se dá em função da exclusão dos CPs obtidos em 0°, já que essa maior tenacidade foi característica desse nível de parâmetro. Dessa forma, em casos em que a tenacidade é mais importante para o projeto, a escolha da direção paralela ao carregamento, apesar de desafiadora para se imprimir, pode ser a melhor opção.

Assim como no caso do experimento A, as curvas do experimento B tiveram ângulos de inclinação, na seção linear, similares. O que, novamente, levanta duas hipóteses: a de que o deslocamento estrutural da máquina está mascarando o deslocamento dos corpos de prova, ou existe uma rigidez parecida entre eles; infelizmente, nenhuma das duas hipóteses foi validada, já que para isso necessitaria de valores obtidos por extensômetro e,

como no caso em que foi utilizado esse instrumento, os resultados não demonstraram boa convergência estatística, não é possível fazer tal validação.

4.1.2.1 Análise estatística

A análise estatística confirmou a dominância da taxa sobre os demais fatores na resistência à tração. Observa-se, contudo, a contribuição dos outros parâmetros, pois tanto a velocidade quanto a largura apresentam valor P inferior a 0,05, indicando influência no resultado final, como ilustrado pela Tabela 4.4. Em contrapartida, essa influência é tão pequena se comparada com a taxa, que representa menos de 1% do comportamento total, enquanto a contribuição da taxa, sozinha, representa 97,03%. Sendo assim, durante a manufatura de peças por impressão 3D, é importante atentar-se à taxa em que elas estão sendo feitas.

Tabela 4.4: Resultados Planejamento B - Ensaio mecânicos

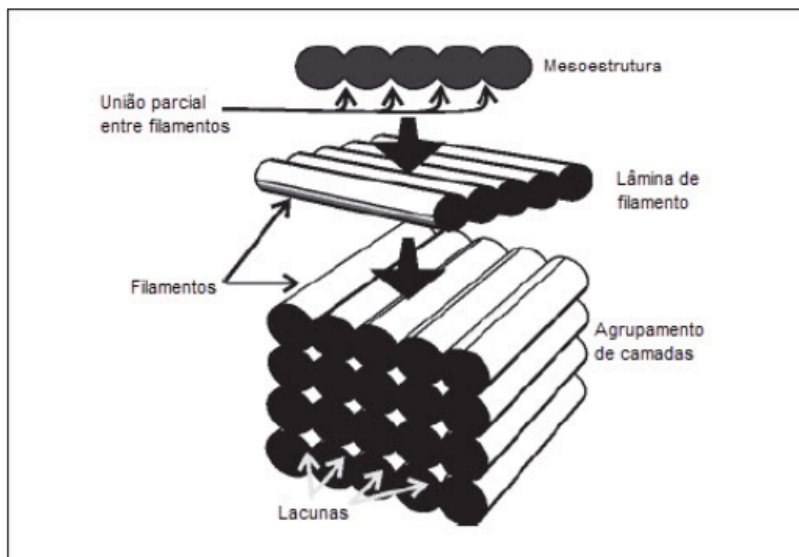
| Fatores | Resistência à tração | | Tensão de ruptura | |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| | Contribuição | Valor-P | Contribuição | Valor-P |
| Velocidade | 0,28% | $6,90 \cdot 10^{-4}$ | 0,06% | $3,34 \cdot 10^{-1}$ |
| Largura | 0,14% | $1,08 \cdot 10^{-2}$ | 0,27% | $5,45 \cdot 10^{-2}$ |
| Taxa | 97,03% | $1,75 \cdot 10^{-36}$ | 94,59% | $6,63 \cdot 10^{-28}$ |
| Velocidade:Largura | 0,08% | $5,55 \cdot 10^{-2}$ | 0,17% | $1,20 \cdot 10^{-1}$ |
| Velocidade:Taxa | 1,69% | $1,77 \cdot 10^{-10}$ | 1,86% | $1,06 \cdot 10^{-5}$ |
| Largura:Taxa | 0,12% | $1,97 \cdot 10^{-2}$ | 0,70% | $3,02 \cdot 10^{-3}$ |
| Velocidade:Largura:Taxa | 0,00% | $8,29 \cdot 10^{-1}$ | 0,14% | $1,60 \cdot 10^{-1}$ |
| Erro | 0,64% | - | 2,19% | - |
| R² | 99,36% | | 97,81% | |
| R² ajustado | 99,22% | | 97,33% | |

Fonte: Produzido pelo autor

Esse resultado, referente à dominância da taxa de extrusão, provavelmente se deve à sobreposição de filamentos que acontece com uma maior quantidade de material sendo extrudada, resultando em uma melhor interface entre camadas e menores lacunas, como observado por Lendvai *et al.* (2025), ilustradas pela Figura 4.11. A interação da velocidade e taxa de extrusão foi o segundo fator que mais contribuiu para o resultado, ao que tudo indica, essa interação acontece na forma em que a impressora faz o cálculo e controle dessa extrusão, já que ambos os parâmetros influenciam na quantidade de material extrudado; a Figura 4.12 ilustra tal interação. Observa-se que, no caso de uma maior taxa, o aumento da velocidade ocasiona a diminuição da resistência, mas no caso da menor taxa o oposto ocorre; dessa forma, levanta-se a possibilidade de que, em uma menor taxa de extrusão,

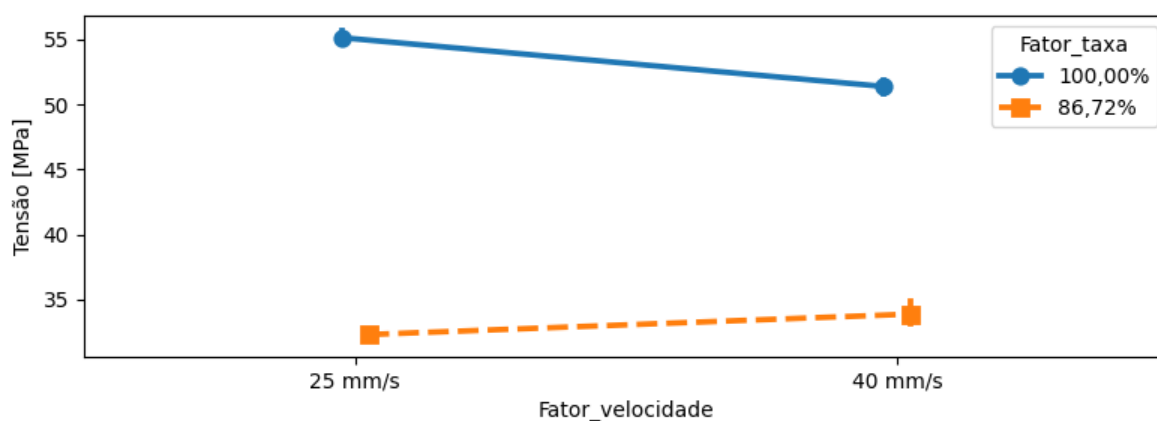
o aumento da velocidade representa um aumento, também, na quantidade de material extrudado; tal hipótese será averiguada na análise de massa dos CPs. Nota-se, ainda, que os resultados de R^2 e R^2 ajustado demonstraram alta convergência do modelo, com valores de 99,36% e 99,22%, respectivamente.

Figura 4.11: Camadas em decorrência do método FFF



Fonte: Foggiatto *et al.* (2004)

Figura 4.12: Influência da interação entre taxa e velocidade de impressão na resistência à tração



Fonte: Produzido pelo autor

Resultados similares foram encontrados no caso da tensão de ruptura, que, diferentemente do observado no planejamento A, obteve, comparativamente, alta convergência do

modelo, com R^2 e R^2 ajustado de 97,81% e 97,33%, respectivamente. Essa alta convergência se deve, possivelmente, a dois eventos ocorrendo de forma simultânea: o desenvolvimento dos testes ocorrendo em um período de tempo aproximado e resultando em menor variação na armazenagem e umidade, e o mascaramento do erro em função da dominância do parâmetro taxa de extrusão. Finalmente, seguiu-se para a análise estatística dos resultados dimensionais das amostras do Planejamento B, como pode ser visto pela Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultados Planejamento B - Dimensional

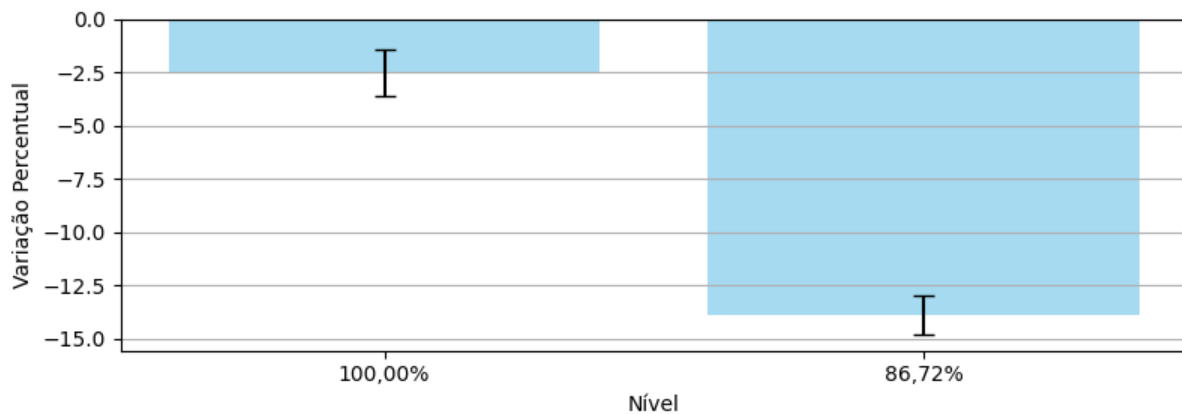
| Fatores | Massa | | Largura | | Espessura | |
|----------------------------------|--------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| | Cont. | Valor-P | Cont. | Valor-P | Cont. | Valor-P |
| Velocidade | 2,02% | $2,40 \cdot 10^{-10}$ | 14,47% | $1,13 \cdot 10^{-4}$ | 3,78% | $1,79 \cdot 10^{-3}$ |
| Largura | 0,12% | $3,61 \cdot 10^{-2}$ | 0,56% | $3,92 \cdot 10^{-1}$ | 1,71% | $2,87 \cdot 10^{-2}$ |
| Taxa | 97,06% | $4,28 \cdot 10^{-35}$ | 56,33% | $6,45 \cdot 10^{-10}$ | 42,66% | $7,46 \cdot 10^{-13}$ |
| Velocidade:Largura | 0,00% | $7,84 \cdot 10^{-1}$ | 0,01% | $9,05 \cdot 10^{-1}$ | 0,12% | $5,43 \cdot 10^{-1}$ |
| Velocidade:Taxa | 0,01% | $5,71 \cdot 10^{-1}$ | 4,61% | $1,84 \cdot 10^{-2}$ | 15,86% | $6,54 \cdot 10^{-8}$ |
| Largura:Taxa | 0,00% | $6,66 \cdot 10^{-1}$ | 0,03% | $8,35 \cdot 10^{-1}$ | 23,76% | $9,12 \cdot 10^{-10}$ |
| Velocidade:Largura:Taxa | 0,01% | $5,63 \cdot 10^{-1}$ | 0,04% | $8,12 \cdot 10^{-1}$ | 1,71% | $2,87 \cdot 10^{-2}$ |
| Erro | 0,79% | - | 23,94% | - | 10,41% | - |
| R^2 | 99,21% | | 76,06% | | 89,59% | |
| R^2 ajustado | 99,04% | | 70,83% | | 87,31% | |

Cont.: Contribuição

Fonte: Produzido pelo autor

Os resultados de massa das amostras, assim como a resposta mecânica, demonstraram dominância no comportamento da taxa de extrusão sobre os demais parâmetros. Nota-se que existe um total de 97,03% de contribuição do parâmetro taxa de extrusão sobre o peso. Esperava-se que a interação de velocidade e taxa apresentasse influência no modelo como a hipótese formulada anteriormente; entretanto, tal suposição não foi confirmada. Em contrapartida, a velocidade isolada teve contribuição de mais de 2% no comportamento do modelo. Por outro lado, a largura de extrusão, apesar de ser um parâmetro que parece influenciar na densidade do CP e logo na massa, teve contribuição, apenas, de 0,12% do resultado. Finalmente, as interações entre fatores não apresentaram influência na massa do corpo de prova, o que é inesperado, já que imagina-se que a quantidade de material extrudado estivesse sendo influenciada pela interação da velocidade e taxa, assim como houvesse outras interações acontecendo. O que demonstra alta capacidade de controle da impressora 3D em manter os valores nominais dos parâmetros de impressão. A variação percentual média da massa pode ser vista pela Figura 4.13.

Figura 4.13: Variação percentual média da massa em função da taxa de extrusão



Fonte: Produzido pelo autor

O resultado ilustrado pela Figura 4.13 demonstra o desvio do valor em relação à massa nominal esperada. Essa variação pode ocorrer por vários motivos, por exemplo, a variação da densidade do material, a incapacidade da FFF em manter o volume total preenchido em função de limitações geométricas do processo, entre outros. O que, por sua vez, confirma que uma maior taxa de deposição, considerando os níveis escolhidos, contribui para maiores valores dimensionais (LENDVAI *et al.*, 2025).

A largura do CP, diferentemente do observado no Planejamento A, teve melhor adaptabilidade do modelo estatístico, em que R^2 e R^2 ajustado obtiveram valores maiores que 70%. Além disso, diferentemente da massa, o resultado mostrou influência de interação entre fatores, em especial, a interação entre velocidade e taxa de extrusão, semelhante ao encontrado nos ensaios mecânicos e, também, na espessura da amostra. O que demonstra que, apesar de essa interação não resultar em variação de massa, houve interação o suficiente para alterar, provavelmente, formatos geométricos da peça e na interface entre filamentos, resultando em mudanças geométricas e de resultado mecânico.

Esperava-se que os resultados de largura e espessura do CP apresentassem certa dependência, já que a expansão do material em uma dessas direções resulta na retração da outra. No entanto, isso não aconteceu, apesar de os parâmetros terem influência em ambas as medidas dimensionais, não parece haver uma relação entre as duas. A espessura teve maior influência da largura de extrusão e das interações entre fatores, e menor influência da velocidade de impressão e da taxa de extrusão. Nota-se que para o caso, houve grande influência das interações, o que demonstra a complexidade da variação de parâmetros de impressão, já que tais parâmetros estão interagindo e influenciando nas peças. Todos os resultados dimensionais para o Planejamento B obtiveram melhor previsão do modelo em

relação ao Planejamento A; tal comportamento pode estar relacionado com a variação no modo de armazenagem dos corpos de prova durante o trabalho, outra hipótese é que a grande influência da taxa criou uma alta variação dos resultados entre os diferentes parâmetros, resultando em um modelo mais fácil de ser previsto.

Por fim, através dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração, seguiu-se para o desenvolvimento e ensaio da estrutura otimizada.

4.2 Otimização topológica

4.2.1 Ponte otimizada

O resultado logo após a otimização pode ser visualizado pela figura 4.14. O volume total da peça representa 19,46% da original.

Figura 4.14: Ponte otimizada

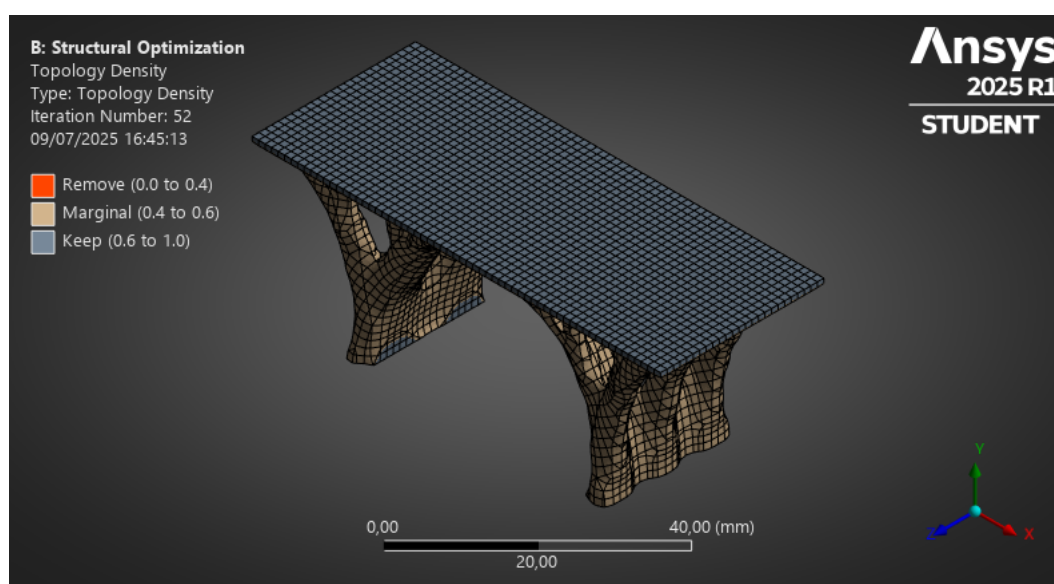


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

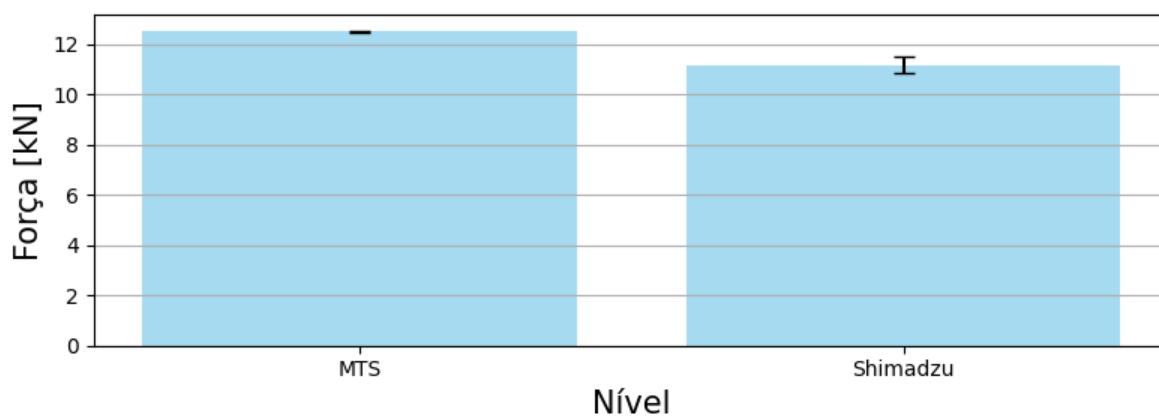
É possível perceber o aparecimento de estruturas orgânicas, que lembram árvores, na parte inferior do corpo. O que é esperado, já que esses seres vivos adaptaram-se de forma a suportar maiores pesos e deformações, algo simulado pelo modelo escolhido. A parte superior e inferior da amostra foram ainda tratadas para permanecer lisas e permitir, tanto as simulações quanto os posteriores ensaios.

4.3 Ensaio das Pontes

4.3.1 Variação entre máquinas - otimização topológica

A primeira avaliação dos resultados das pontes foi feita com o objetivo de comparar as máquinas de ensaio, já que a não variação entre as respostas significaria a possibilidade de uma comparação direta entre os corpos de prova, independente da máquina utilizada. A Figura 4.15 e a Tabela 4.6 mostram os resultados encontrados da ANOVA em relação à variação da força máxima dos corpos de prova otimizados por TO em função das máquinas de ensaio.

Figura 4.15: Força máxima



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 4.6: Resultados pontes otimizadas - força máxima

| Fatores | Força máxima | |
|----------------|--------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P |
| Máquina | 92,52% | $2,78 \cdot 10^{-3}$ |
| Erro | 8,48% | - |
| R^2 | 91,52% | |
| R^2 ajustado | 89,40% | |

Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se uma diferença significativa entre os resultados, já que o valor P é menor que 0,05. O que faz com que a comparação direta entre os corpos de prova ensaiados em diferentes máquinas não possa ser feita; isso, no entanto, não atrapalhou as análises, já

que o nível de carga entre os CPs maciços e otimizados é grande a ponto de essa diferença relacionada com as máquinas não alterar a comparação entre eles.

Os resultados obtidos com a MTS apresentaram uma variação menor que os resultados da Shimadzu, isso pode estar relacionado com a diferença de valores entre as células de carga utilizadas. Como a MTS utilizou uma célula mais de 10 vezes menor que a Shimadzu, pode ter levado a resultados mais fidedignos. Isso pode se relacionar também com a variação dos resultados médios.

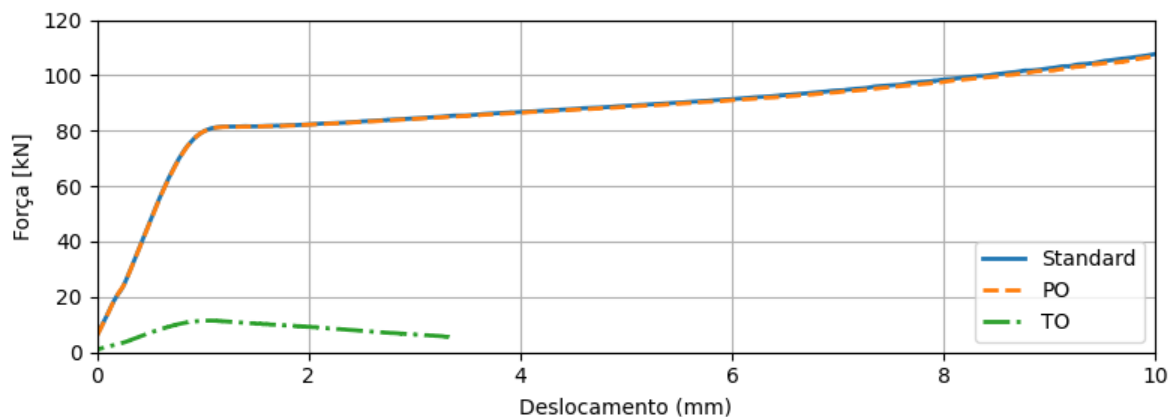
Como as máquinas apresentaram relevância no comportamento dos resultados, as análises foram agrupadas considerando isso.

4.3.2 Ensaio Shimadzu

Foram ensaiados três diferentes corpos de prova na Shimadzu, sendo eles o *standard* — 100% com parâmetros padrão do Cura - a maciça com parâmetros otimizados (PO) e a otimizada por otimização topológica.

Os resultados encontrados podem ser vistos pelas Figuras 4.16 e 4.17. Vale ressaltar que as avaliações relacionadas com essa máquina foram todas realizadas utilizando a força máxima, já que não foi adotado o extensômetro, o que limitou a avaliação de demais resultados.

Figura 4.16: Ensaio de compressão - Shimadzu

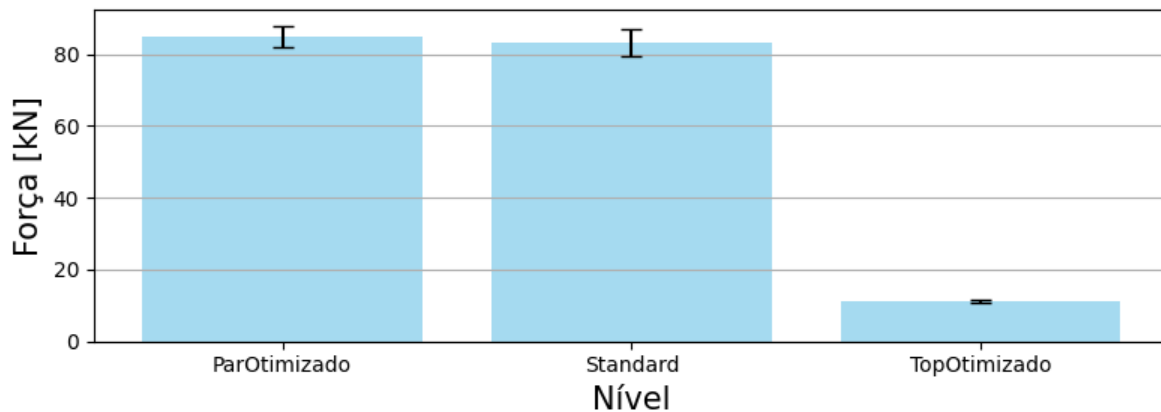


Fonte: Produzido pelo autor

A resposta da TO apresenta distanciamento em relação às outras duas, o que já era esperado, em função da grande diferença de massa entre elas, como pode ser visto pela Tabela H.1. As curvas da máquina apresentaram uma sobreposição entre os resultados da PO e *Standard*, mostrando uma possível irrelevância entre a variação dos níveis de

parâmetros de impressão escolhidos. Os resultados estatísticos podem ser vistos pela Tabela 4.7.

Figura 4.17: Força máxima - Shimadzu



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 4.7: Resultados Shimadzu

| Fatores | Força máxima | |
|----------------------|--------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P |
| Tipo de ponte | 99,57% | $8,14 \cdot 10^{-8}$ |
| Erro | 0,43% | - |
| R² | 99,57% | |
| R² | 99,42% | |

Fonte: Produzido pelo autor

A figura das médias reforça a falta de diferenciação entre a *Standard* e PO. O que não é possível perceber pela ANOVA feita entre os três casos, já que a TO, por apresentar grande diferenciação, faz com que os valores do parâmetro avaliado se tornem relevantes para a resposta. Dessa forma, a Tabela 4.8 busca avaliar o comportamento isolado entre essas duas pontes maciças por meio de outra ANOVA.

Tabela 4.8: Resultados Shimadzu - Geometrias sem otimização

| Fatores | Força máxima | |
|----------------------|--------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P |
| Tipo de ponte | 8,99% | $5,63 \cdot 10^{-1}$ |
| Erro | 91,01% | - |
| R² | 0,09% | |
| R² | -0,14% | |

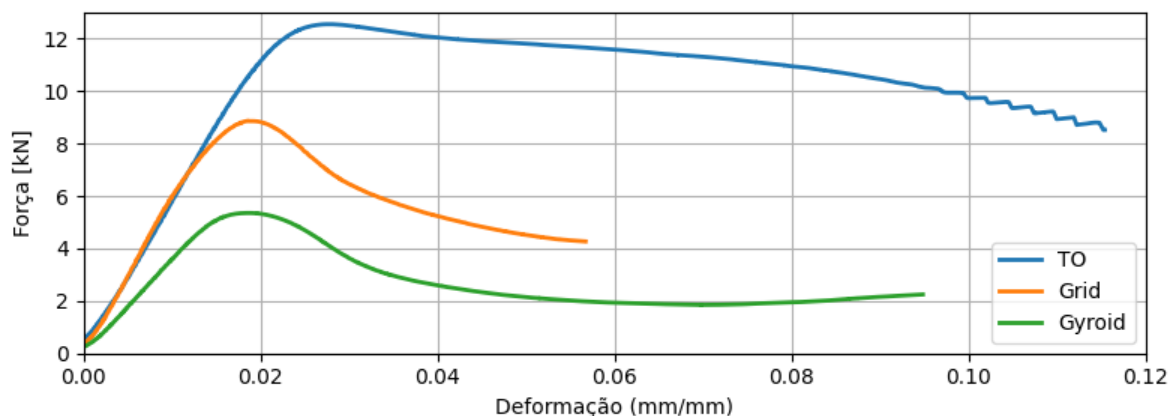
Fonte: Produzido pelo autor

A suspeita entre os comportamentos iguais para a força máxima corrobora a partir desse resultado, em que o Valor-P apresentou um resultado maior que 0,05, mostrando que a variação de parâmetros adotada não resultou em variação dos resultados dessas duas pontes. A hipótese levantada é que, como existe uma linearidade geométrica dessas pontes, houve uma facilidade maior de impressão, o que fez com que, mesmo com piores parâmetros, a *Standard* apresentasse a mesma tensão máxima.

4.3.3 Ensaios MTS

No caso da MTS, foram feitos todos os padrões de pontes impressas. No entanto, em função do limite da célula de carga de 50 kN, as pontes maciças não chegaram à força máxima. Dessa forma, os primeiros resultados foram agrupados de forma a contemplar apenas os três modelos de menor massa, como pode ser visto nas retas da Figura 4.18.

Figura 4.18: Ensaios de compressão - MTS



Fonte: Produzido pelo autor

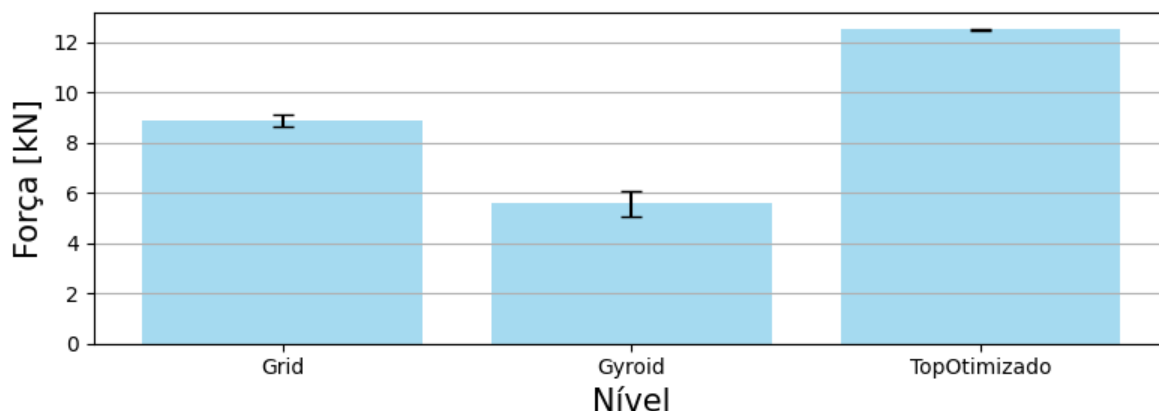
Nota-se que mesmo com os três modelos apresentando massas similares, como

demonstrado pelas medidas da Tabela H.1, a otimização topológica atingiu resultados de força máxima e absorção de energia consideravelmente maiores, o que demonstra sua superioridade em relação à utilização de preenchimento variável disponível nos softwares de fatiamento. Essa capacidade da otimização topológica gerar peças eficientes converge com a bibliografia (PARK; GOO; PARK, 2019; WANG; LI; WANG, 2025; SOYDAŞ; IYIBILGIN; SARAÇ, 2024). Os resultados convergiram com o encontrado por Alagumalai *et al.* (2025), em que, em valores menores de preenchimento, o *grid* apresentou maiores picos de tensão em relação ao *gyroid*. Assim como os resultados avaliados por Mangla *et al.* (2023), com valores de resistência à compressão maiores do *grid* em relação ao *gyroid*. Em seguida, foi feita uma ANOVA considerando os resultados de força máxima desses três tipos.

4.3.3.1 Força Máxima

A média das forças pode ser vista pela Figura 4.19.

Figura 4.19: Força máxima - MTS



Fonte: Produzido pelo autor

Assim como na avaliação das retas puras, a força máxima apresenta grande diferença em benefício da otimização topológica, o que já era esperado, considerando o potencial de geração de estruturas com alta capacidade mecânica, algo que já foi observado pelos autores: Park, Goo e Park (2019) e Hu *et al.* (2019). Nota-se ainda uma maior variação dos resultados encontrados nas pontes de menor valor máximo; isso pode estar relacionado com a alta célula de carga, que cria uma maior confiança nos resultados ao atingir cargas mais próximas de 50 kN. Os resultados da ANOVA podem ser vistos pela Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resultados MTS - Força Máxima

| Fatores | Força máxima | |
|-------------------------------|--------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P |
| Tipo de ponte | 99,10% | $7,33 \cdot 10^{-7}$ |
| Erro | 0,90% | - |
| R² | 99,10% | |
| R² ajustado | 98,80% | |

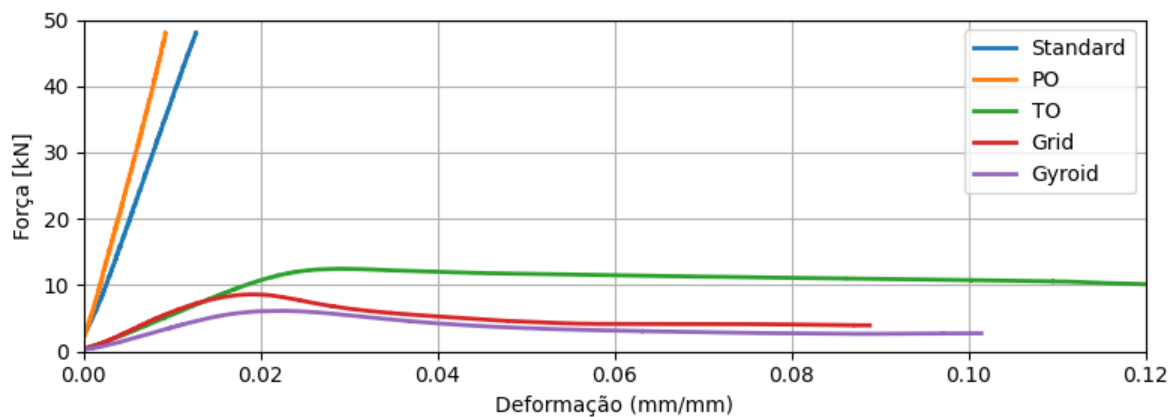
Fonte: Produzido pelo autor

Em função do baixo valor P e erro, e altos valores de R^2 e R^2 ajustado, é possível afirmar uma grande relação entre a variação dos modelos das pontes com o resultado de força máxima.

4.3.3.2 Força por deformação

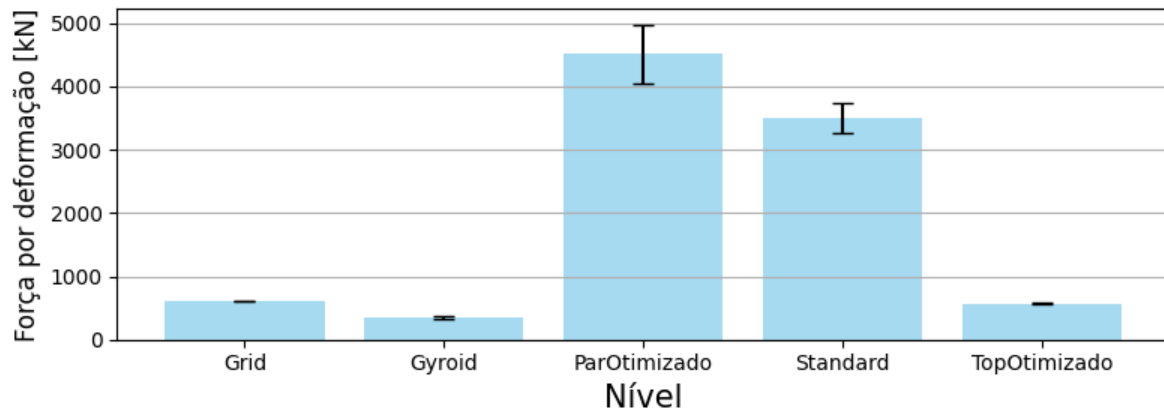
A força por deformação foi utilizada como uma medida de rigidez do material, vale ressaltar que como a PO e a *Standard* apresentam a mesma geometria, é possível utilizar essa medida para fazer uma comparação direta entre elas, mas tal valor deve ser interpretado com cautela, já que a comparação só se torna válida quando não existe uma dependência do formato estrutural. Assim como no caso das pontes maciças, as três pontes com menos massa podem ser comparadas de forma direta, já que foi objetivado um mesmo volume geométrico entre elas. A Figura 4.20 ilustra todos os resultados desenvolvidos na MTS, assim como a Figura 4.21, que ilustra os resultados de Força por deformação.

Figura 4.20: Ensaio de compressão completo - MTS



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 4.21: Força por deformação - MTS



Fonte: Produzido pelo autor

Nota-se que, apesar das forças máximas encontradas nas pontes maciças dos ensaios realizados na Shimadzu não apresentarem diferenciação, existe uma variação de rigidez entre ambas, mapeadas nos ensaios da MTS. Isso é possível de ser observado tanto pelas retas quanto pelas médias. Em contrapartida, não existe uma diferença aparente entre a rigidez da *grid* em relação a ponte obtida por otimização topológica.

Tabela 4.10: Resultados MTS - força por deformação

| Fatores | Força por deformação | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Contribuição | Valor-P |
| Tipo de ponte | 98,84% | $1,26 \cdot 10^{-9}$ |
| Erro | 1,16% | - |
| R² | 98,83% | |
| R² ajustado | 98,37% | |

Fonte: Produzido pelo autor

Assim como na seção anterior. É possível notar, novamente, uma dependência dos resultados relacionados com o fator observado, no caso a rigidez. Isso em função dos altos valores de R^2 e R^2 ajustado. Finalmente, foram desenvolvidas simulações com o objetivo de observar a convergência dos resultados das pontes.

4.4 Simulação em PLA

A simulação em PLA foi feita com o objetivo de validar o modelo adotado, além de acrescentar no entendimento do comportamento em compressão das pontes ensaiadas. Para isso, os dados obtidos nos ensaios de tração foram adotados para o desenvolvimento dessas simulações.

4.4.1 Ponte original

Foi realizada a análise de tensões, para isso, as cargas e fixações foram aplicadas nos mesmos locais que a primeira simulação, feita focada na otimização topológica. Dessa vez, no entanto, a magnitude da carga foi escolhida em 85 kN, valor próximo ao que ocorreu a falha da peça. A tensão de Von-Mises na peça pode ser vista pela Figura 4.22.

Figura 4.22: Tensão equivalente em 85 kN

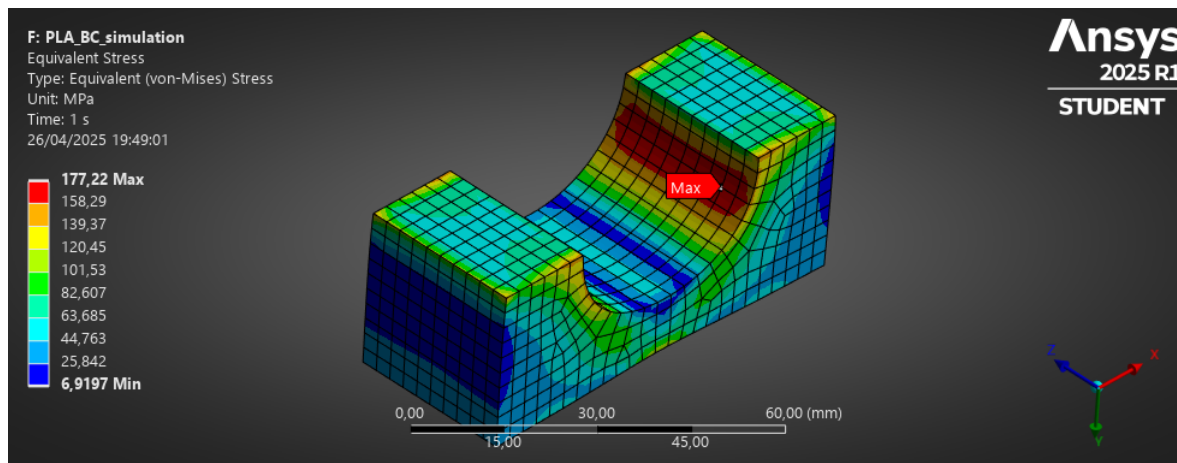


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Note que o valor máximo apresenta resultado mais de três vezes maior que a capacidade máxima do material encontrado no ensaio de tração, algo em torno de 55 MPa nas melhores condições de impressão. Considerando a simplicidade e linearidade da peça e o resultado distante do valor esperado, foi feito o cálculo numérico da máxima tensão principal, como pode ser visto pela Figura 4.23.

Figura 4.23: Máxima tensão principal em 85 kN

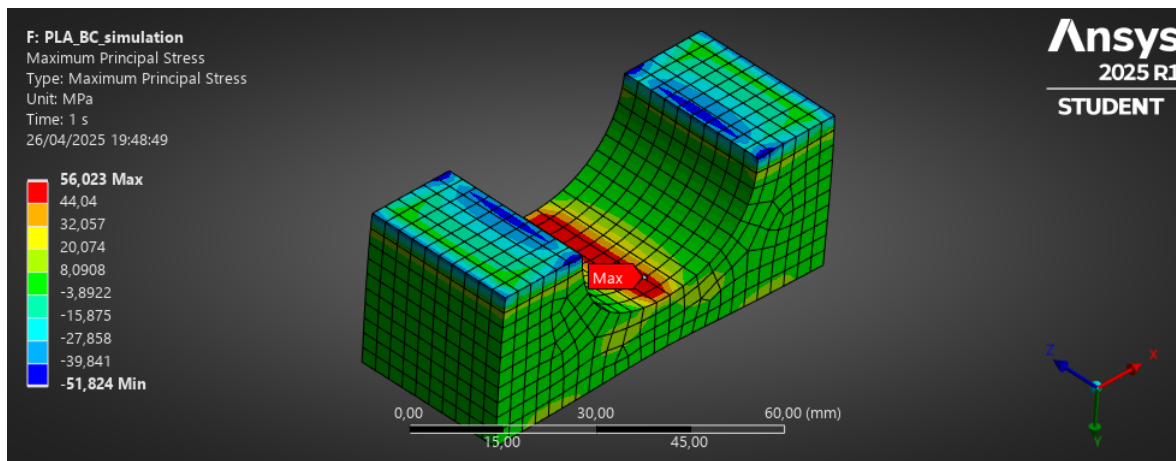


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

O resultado encontrado teve grande aproximação do observado nos ensaios de tração, com variação menor que 2%, validando, dessa forma, o modelo adotado. Enfim, foi feita uma análise que buscou observar a deformação total da amostra e comparar com os resultados alcançados nos ensaios da MTS, em que foi utilizado o extensômetro. Essa avaliação pode ser vista pela Fig. 4.24. Vale ressaltar, no entanto, que a simplificação para os ensaios de tração, apesar de não coincidir com perfeição com os resultados experimentais, confirmou o comportamento esperado; como em comparação à resistência à compressão, a resistência à tração costuma ser inferior, sua utilização gerou uma resposta de tensão numérica maior, mostrando que a utilização desse valor geraria projetos confiáveis.

Figura 4.24: Deformação em 48 kN

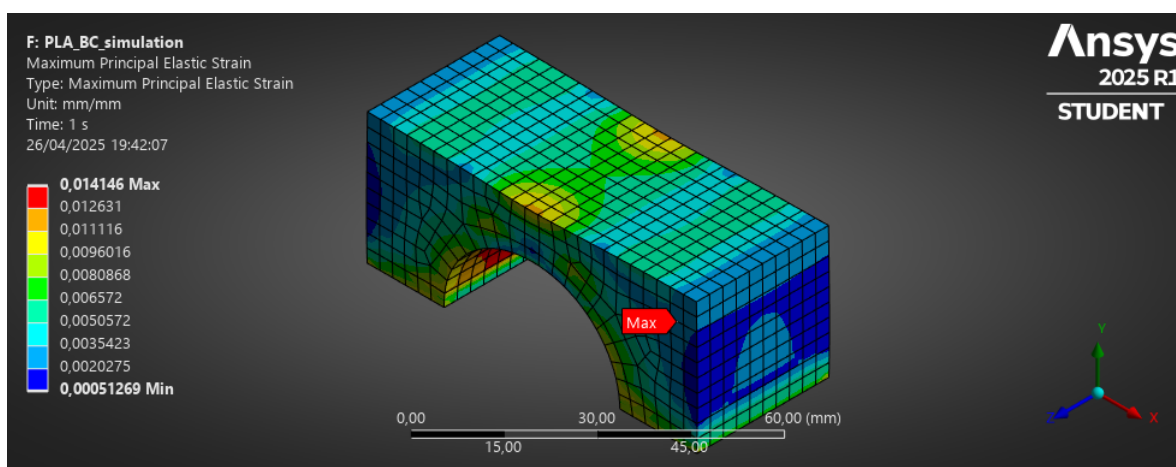


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

O valor da máxima tensão se aproximou mais do resultado encontrado na ponte *standard*.

Em seguida, foi feita a simulação das pontes otimizadas.

4.4.2 Ponte por otimização topológica

A Figura 4.25 mostra o resultado da Tensão de Von-Mises.

Figura 4.25: Tensão equivalente

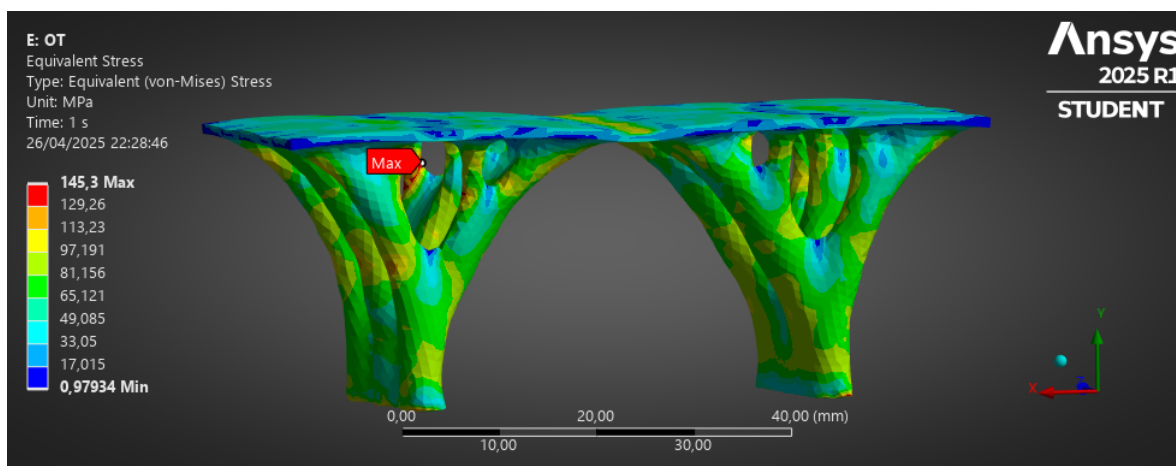


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

A estrutura, por ter origem em uma otimização, apresenta característica de malha, o que cria certas irregularidades estruturais, semelhante ao que ocorreu com a otimização obtida por Wang, Li e Wang (2025). É possível perceber que onde ocorre a ruptura da ponte otimizada — como ilustrado pela Figura 4.26, pelos círculos vermelhos — parece se assemelhar bastante com as marcações de maiores tensões no resultado de Von-Mises. Entretanto, existe um distanciamento relevante entre o valor máximo de tensão e a tensão experimental dos ensaios de tração; isso provavelmente ocorreu em função das irregularidades que acontecem no CAD da ponte, que criam pontos de concentração de tensão; essas concentrações, em contrapartida, não são mapeadas pelos ensaios, já que a limitação geométrica da FFF causa restrição de desenvolvimento de pequenos detalhes, o que leva a uma regularidade maior da estrutura em comparação com o CAD utilizado, motivo que levou, inclusive, a não utilizar um maior refinamento da geometria antes de sua impressão. Isso também pode ter acontecido em função da utilização dos ensaios de tração, que costumam apresentar picos menores que os de compressão, como discutido.

Figura 4.26: Ponte TO após ensaio



Fonte: Produzido pelo autor

A máxima tensão principal também foi avaliada, com o objetivo de observar se a hipótese levantada em relação à tensão de Von-Mises é verdadeira, além de mapear melhor o comportamento. Tal resultado pode ser visto pela Figura 4.27.

Figura 4.27: Máxima tensão principal

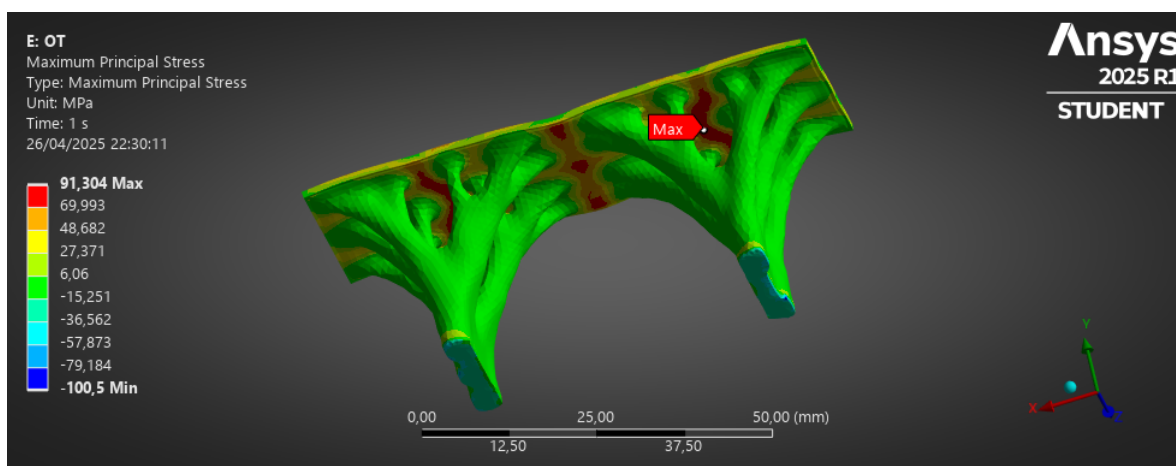


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Note que o resultado não consegue mapear o posicionamento experimental do rompimento, o que leva a reforçar a hipótese levantada anteriormente, de que a tensão de Von-Mises conseguiu mapear o posicionamento das tensões que levam a quebra da estrutura.

Finalmente, buscou-se observar o comportamento de deformação da ponte otimizada, assim como foi feito para a original, com o objetivo de comparar com os resultados experimentais. Tal resultado pode ser visto pela Figura 4.28.

Figura 4.28: Deformação

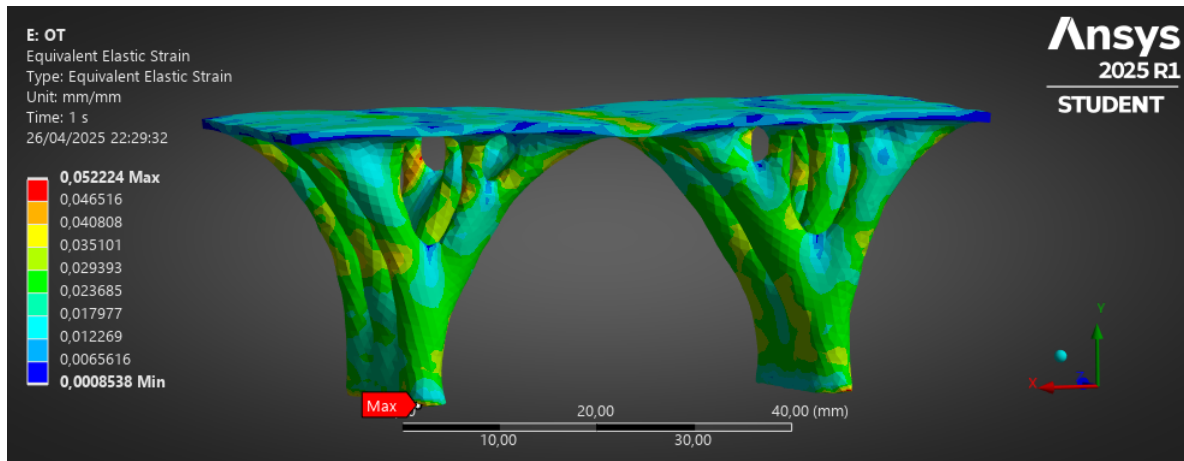


Imagem utilizada em cortesia da ANSYS, Inc. Fonte: Produzido pelo autor

Note que, assim como o resultado de tensão, a deformação ultrapassou o resultado experimental, o que já era esperado, considerando as concentrações de tensão ocorridas pela irregularidade geométrica.

5 CONCLUSÃO

- A manufatura aditiva demonstrou alta capacidade de desenvolvimento de peças complexas. No entanto, tal tecnologia pode levar a criação de concentradores de tensão;
- A impressão em 45° apresentou maior quantidade de material e aparente melhor união entre filamentos;
- A taxa de extrusão, velocidade e o fornecedor também influenciaram no dimensional das peças. Especialmente, a taxa de extrusão resultou em grande variação dimensional;
- Ângulos de impressão mais paralelos ao carregamento apresentam maiores valores de resistência à tração, tensão de ruptura e tensão de escoamento. Sendo que a melhor configuração em 0° obteve um valor de resistência à tração de 62,78 MPa, enquanto no caso de 45°/135° o valor foi de 55,70 MPa, no caso de totalmente paralelo (90°) esse valor diminuiu para 45,96 MPa;
- O valor de maior taxa apresentou a melhor resposta mecânica em níveis de tensão. Em 100,00% de taxa, o melhor resultado obtido de tensão máxima foi de 62,78 MPa, enquanto para o caso de 86,72% esse valor caiu para 34,93 MPa;
- A variação entre os fornecedores se mostrou demasiado influente na resposta mecânica, representando uma diferença em torno de 3 MPa de resistência à tração, em que o material do fornecedor 3DLab representou uma capacidade superior para esse valor;
- A velocidade e a largura de extrusão se mostraram menos influentes;
- As pontes obtidas por otimização topológica apresentou grande superioridades em termos de nível de tensão em relação aos demais tipos de otimização. Em que, a ponte obtida por TO apresentou um valor de força máxima igual à 12,05 kN, seguida pela grid, com valor de 8,88 kN e a gyroid, com valor de 5,57 kN;
- As simulações foram capazes de validar a metodologia de desenvolvimento de peças utilizada pelo trabalho.

5.1 Trabalhos Futuros

O estudo desenvolvido tornou possível o entendimento de diferentes assuntos envolvendo simulação por FEM, otimização topológica e manufatura aditiva. Existe,

entretanto, a possibilidade de aprofundamento em diferentes vias. Dessa forma, essa seção busca levantar a possibilidade de desdobramentos que podem contribuir para o avanço do entendimento dos fenômenos estudados. Segue tais possibilidades:

- Investigação do efeito de fadiga para peças impressas e otimizadas;
- Avaliação de outros arquivos de CAD para impressão de peças menos simplificadas e mais realistas;
- Avaliar o comportamento mecânico do material e de peças otimizadas sob outros tipos de ensaios mecânicos, como: flexão e compressão;
- Estudo de outros materiais de manufatura aditiva, especialmente compósitos;
- Utilização de microscopia ótica para averiguação do comportamento microestrutural das amostras;
- Um maior estudo acerca da anisotropia do material, com intuito de considerar tal comportamento nas simulações FEM;
- Comparação de outros tipos de preenchimento e meios de otimização.

REFERÊNCIAS

- ALAGUMALAI, V. *et al.* Effect of infill structures on compressive properties of additively manufactured nylon carbon fibre composite cylinders. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, p. 07316844251332323, 2025. Citado 3 vezes nas páginas 5, 10 e 52.
- ASTM. *Standard test method for tensile properties of plastics*. [S.l.]: ASTM international, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 69.
- BAR-GERA, H. The target parameter of adjusted r-squared in fixed-design experiments. *The American Statistician*, Taylor & Francis, v. 71, n. 2, p. 112–119, 2017. Citado na página 13.
- BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Elsevier, v. 71, n. 2, p. 197–224, 1988. Citado na página 2.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. Material interpolation schemes in topology optimization. *Archive of applied mechanics*, Springer, v. 69, p. 635–654, 1999. Citado na página 2.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado na página 16.
- BUDZIK, G. *et al.* Geometrical accuracy of threaded elements manufacture by 3d printing process. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, v. 17, n. 1, 2023. Citado na página 11.
- CHANTARAPANICH, N. *et al.* Fabrication of three-dimensional honeycomb structure for aeronautical applications using selective laser melting: a preliminary investigation. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 6, p. 551–558, 2014. Citado na página 15.
- DOSHI, M. *et al.* Printing parameters and materials affecting mechanical properties of fdm-3d printed parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 50, p. 2269–2275, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 37.
- FARAZIN, A.; MOHAMMADIMEHR, M. Effect of different parameters on the tensile properties of printed polylactic acid samples by fdm: experimental design tested with mds simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 118, n. 1, p. 103–118, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 7.
- FOGGIATTO, J. A. *et al.* Moldes de abs construidos pelo processo de modelagem por fusão e deposição para injeção de pp e pebd. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 14, p. 349–353, 2004. Citado na página 44.
- GODA, I. *et al.* Topology optimization of bone using cubic material design and evolutionary methods based on internal remodeling. *Mechanics Research Communications*, Elsevier, v. 95, p. 52–60, 2019. Citado na página 15.

- GOH, G. D. *et al.* Additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic for topology optimized unmanned aerial vehicle structures. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 216, p. 108840, 2021. Citado na página 17.
- GOH, G. D. *et al.* Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*, Wiley Online Library, v. 4, n. 1, p. 1800271, 2019. Citado na página 1.
- GONABADI, H.; YADAV, A.; BULL, S. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of pla produced by a 3d fff printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 111, n. 3, p. 695–709, 2020. Citado na página 10.
- Grand View Research. *3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services), By Printer Type, By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030*. 2023. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>. Citado na página 1.
- GROSSMAN, M. *et al.* Mineral nano-interconnectivity stiffens and toughens nacre-like composite materials. *Advanced Materials*, v. 29, n. 8, p. 1605039, 2017. Citado na página 4.
- HU, J. *et al.* Analysis of biomechanical behavior of 3d printed mandibular graft with porous scaffold structure designed by topological optimization. *3D Printing in Medicine*, Springer, v. 5, p. 1–14, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 52.
- ISO/ASTM. *Additive manufacturing—General principles—Fundamentals and vocabulary*. [S.l.]: ASTM International West Conshohocken, 2021. Citado na página 4.
- JANKOVICS, D.; BARARI, A. Customization of automotive structural components using additive manufacturing and topology optimization. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 52, n. 10, p. 212–217, 2019. Citado na página 2.
- JEWETT, J. L.; CARSTENSEN, J. V. Topology-optimized design, construction and experimental evaluation of concrete beams. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 102, p. 59–67, 2019. Citado na página 2.
- JIHONG, Z. *et al.* A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 91–110, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- KHOSRAVANI, M. *et al.* Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. *Sci Rep 12: 1016*. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 6, 9 e 37.
- LAMPRON, O. *et al.* Characterization of the non-isotropic tensile and fracture behavior of unidirectional polylactic acid parts manufactured by material extrusion. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 61, p. 103369, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 37.
- LENDVAI, L. *et al.* Experimental study on the effect of filament-extrusion rate on the structural, mechanical and thermal properties of material extrusion 3d-printed polylactic

acid (pla) products. *Progress in Additive Manufacturing*, Springer, v. 10, n. 1, p. 619–629, 2025. Citado 4 vezes nas páginas 9, 42, 43 e 46.

LIU, Z. *et al.* A critical review of fused deposition modeling 3d printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 102, p. 2877–2889, 2019. Citado na página 1.

LOGAN, D. L. *A first course in the finite element method*. [S.l.]: Thomson, 2011. v. 4. Citado na página 14.

MANGLA, S. K. *et al.* Optimizing fused deposition modelling parameters based on the design for additive manufacturing to enhance product sustainability. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 145, p. 103833, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 52.

MARTINS, M. S. *et al.* Topological optimization and generative design for additive manufacturing: Software, trends and opportunities. *Journal of Mechanical Design*, p. 1–19, 2025. Citado na página 4.

MATSUZAKI, R. *et al.* Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 6, n. 1, p. 23058, 2016. Citado na página 1.

MIWA, V. H. S. *Análise numérica e experimental da vida em fadiga do polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno impresso em 3D*. 2022. Citado na página 22.

MIWA, V. H. S. *et al.* Influence of printing parameters and mean stress on the fatigue behavior of abs samples obtained by fff. *27th International Congress of Mechanical Engineering*, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2023. Citado 4 vezes nas páginas 8, 12, 37 e 41.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

MUHAMEDAGIC, K.; CEKIC, A.; BEGIC-HAJDAREVIC, D. Experimental investigation and modelling of fdm process parameters for tensile strength improvement using rsm method. In: *Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Mostar, Bosnia and Herzegovina*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 21–24. Citado na página 5.

PARK, J.-H.; GOO, B.; PARK, K. Topology optimization and additive manufacturing of customized sports item considering orthotropic anisotropy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Springer, v. 20, p. 1443–1450, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 52.

PAUL, S. Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review. *Measurement*, Elsevier, v. 178, p. 109320, 2021. Citado na página 14.

PLOCHER, J.; PANESAR, A. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, Elsevier, v. 183, p. 108164, 2019. Citado na página 16.

PRADO, T. M. d. *Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica de elementos de fixação por rosca fabricados através de manufatura aditiva*. 2023. Citado na página 11.

RODRÍGUEZ-REYNA, S. *et al.* Mechanical properties optimization for pla, abs and nylon+ cf manufactured by 3d fdm printing. *Materials Today Communications*, Elsevier, v. 33, p. 104774, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 11.

SAMYKANO, M. *et al.* Mechanical property of fdm printed abs: influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 102, p. 2779–2796, 2019. Citado na página 5.

SOYDAŞ, S.; IYIBILGIN, O.; SARAÇ, H. I. Finite element analysis study: Topology optimization for the front lower arm with innovative double and complex phase materials. *Sustainable Engineering and Innovation*, v. 6, n. 1, p. 131–140, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 52.

TRONVOLL, S. A.; ELVERUM, C. W.; WELO, T. Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 26, p. 763–773, 2018. Citado na página 11.

VANTYGHM, G. *et al.* 3d printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 112, p. 103084, 2020. Citado na página 18.

WANG, Y.; LI, R.; WANG, K. An open-source parallel topology optimization framework based on unstructured 3d fea using petsc and eigen. *SoftwareX*, Elsevier, v. 30, p. 102129, 2025. Citado 4 vezes nas páginas 3, 17, 52 e 57.

YAP, Y. L. *et al.* Topology optimization and 3d printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, v. 237, p. 107771, 2023. Citado na página 17.

ZHEN, H. *et al.* Effect of 3d printing process parameters and heat treatment conditions on the mechanical properties and microstructure of peek parts. *Polymers*, MDPI, v. 15, n. 9, p. 2209, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 42.

ZHU, J.-H.; ZHANG, W.-H.; XIA, L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of computational methods in engineering*, Springer, v. 23, p. 595–622, 2016. Citado na página 2.

ZIEMIAN, S.; OKWARA, M.; ZIEMIAN, C. W. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, 2015. Citado na página 8.

Apêndices

APÊNDICE A – CÓDIGO E ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON

O valor de cada ensaio de tração foi salvo em formato “.txt”. Esses dados, então, foram todos importados para o código em Python, onde houve o cálculo da tensão de escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade quando possível. Todo esse tratamento foi feito a partir do código enunciado pelo Apêndice B. Além da parte de recebimento e tratamento inicial das retas, foi feito o cálculo estatístico enunciado pelo Apêndice C. A escolha do Python foi em função de sua generalidade, em que foi possível tratar os dados desde a saída da máquina até a análise estatística.

O código foi dividido em duas partes. A primeira é a análise e tratamento dos dados recebidos da máquina, já a segunda trata-se da função desenvolvida para o tratamento e análise estatística dos dados.

Inicialmente foram chamados todos os pacotes que serão necessários no decorrer do trabalho. Tais pacotes podem ser vistos a seguir:

```

1      import matplotlib.pyplot as pp
2      import numpy as np
3      import pandas as pd
4      from TratExp import analisar_experimento

```

Nota-se que a função responsável pela análise estatística foi salva no arquivo “TratExp.py” e, também, está sendo chamada, juntamente com os pacotes necessários.

Em sequência, o documento com os dados dos códigos dos testes e os valores dimensionais dos CPs foi adicionado. No qual é utilizada a biblioteca pandas e a função “read_excel” para acessar as informações da planilha, nomeada de “CPs.xlsx”, ao Python.

```

1      caminho_arquivo = 'CPs.xlsx'
2      df = pd.read_excel(caminho_arquivo, skiprows=1)

```

Os dados dessa planilha foram, então, atribuídos, cada um, a uma lista.

```

1      # Recebe os códigos dos CPs
2      ensaios = df.iloc[:, 0].tolist()
3      pesoA = df.iloc[0:70, 14].tolist()
4      espessuraA = df.iloc[0:70, 9].tolist()

```

```

5     larguraA = df.iloc[0:70, 4].tolist()
6     pesoB = df.iloc[15:20, 14].tolist() + df.iloc[70:,
    ↪ 14].tolist()
7     espessuraB = df.iloc[15:20, 9].tolist() + df.iloc[70:,
    ↪ 9].tolist()
8     larguraB = df.iloc[15:20, 4].tolist() + df.iloc[70:,
    ↪ 4].tolist()
9

```

Dessa forma, iniciou-se um laço de repetição em que os ensaios foram adicionados e tratados um a um.

```

1     for i in ensaios:
2         data = np.loadtxt(fname = i + '.txt', skiprows=4) #
    ↪  carrega o txt
3         data_ = np.loadtxt(fname = i + '_.txt', skiprows=4) #
    ↪  carrega o txt

```

Existem dois documentos sendo adicionados por ensaio, isso acontece porque os dados demarcados por “_” se tratam da reta força-deslocamento, e os sem demarcação se tratam da reta tensão-deformação.

Os valores das retas de cada ensaio foram atribuídos a uma variável.

```

1     x = data[:,0]
2     y = data[:,1]

```

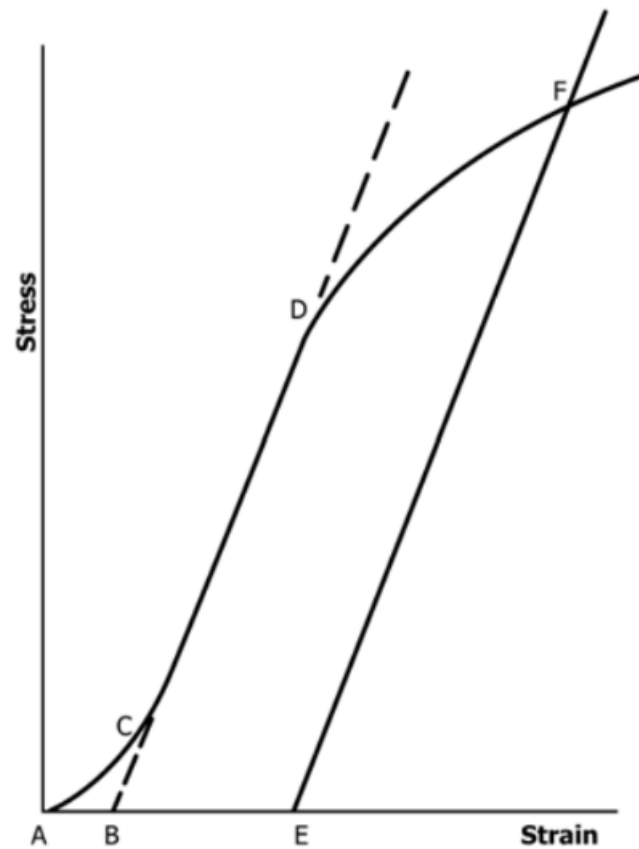
Os valores dos ensaios de tração apresentam certo deslocamento na abscissa, isso devido a condições iniciais e cargas residuais. Para contornar tal problema, é necessário acompanhar a parte linear da reta e deslocar a abscissa para zero, quando a ordenada for zero. Isso é previsto pela norma, como pode ser visto pela Figura A.1.

Nota-se que o ponto B seria a continuidade da reta, em que se cruza a abscissa. Acontece que esse ponto deveria ser em (0,0). Para isso, foi desenvolvida uma função com o objetivo de calibrar a reta, como pode ser visto a seguir.

```

1     def toe_compensation(x, y, I0, IF):
2         x_a, y_a = x[I0], y[I0] # identificar pontos na região
    ↪  linear
3         x_b, y_b = x[IF], y[IF]

```

Figura A.1: *Toe compensation*

Fonte: ASTM (2022)

```

4      k = (y_b - y_a) / (x_b - x_a) # calcular a inclinação da
      ↪ linha na região linear
5      delta_x = x_a - (y_a / k) # determinar o deslocamento
      ↪ necessário para compensar a região não linear
6      x = [i - delta_x for i in x]
7      return x

```

Calculou-se, então, a tensão máxima.

```

1      rt = max(y) # resistencia a tracao

```

A tensão de quebra foi observada a partir do quinto ponto antes de finalizar a matriz. Dessa forma, foi possível excluir efeitos incongruentes relacionados ao final do ensaio.

```

1      tq = y[-5] # tensao de quebra

```

Já para o módulo de elasticidade, considerou do décimo ponto até o ponto que representa por volta de 80% do valor máximo alcançado no teste. Isso pode ser visto pelo código a seguir.

```

1         while y[cont] < 0.8 * rt:
2             cont += 1
3
4         a = (sum(y[11:(cont+1)])-sum(y[10:cont])) /
           ↪ (sum(x[11:(cont+1)])-sum(x[10:cont])) # modulo de
           ↪ elasticidade

```

Já para a tensão de escoamento, sabendo do formato da reta linear, sendo ele:

$$y = a * x + b \quad (\text{A.1})$$

O valor de “a” é o mesmo encontrado pelo módulo de elasticidade. Já para “b”, foi necessário encontrar o valor de “y” quando $x = 0,002$. Isso foi feito da seguinte maneira.

```

1         cont2 = 0 # contador
2         x_b = 0.002 # valor para calculo da tensao de escoamento,
           ↪ comumnete 0.002
3         while x_b > x[cont2]: # encontrar valor de y para x_b
4             cont2 += 1
5
6         if x[cont2] == x_b:
7             b = y[cont2]
8         else:
9             b = y[cont2] - (((y[cont2] - y[cont2-1]) / (x[cont2] -
           ↪ x[cont2-1])) * (x[cont2] - x_b)) # calculo de b

```

A tensão de escoamento é representada pelo ponto em que uma reta deslocada para $x = 0,002$ e paralela à parte linear da curva de tração, cruza-a. Para encontrar tal ponto, foi feito o seguinte algoritmo:

```

1         x_reta = np.linspace(0,x[rt_indice],100) # atribui 100
           ↪ valores entre 0 e rt
2         y_reta = a * x_reta - b # funcao da reta
3
4         cont3 = 0

```

```

5     while a * x[cont3] - b < y[cont3]: # conferindo o valor da
      ↪ tensão de escoamento
6         cont3 += 1
7     te = y[cont3]

```

Em que na primeira linha existe a atribuição de 100 valores entre zero e a tensão máxima da curva para o x da reta criada. O cálculo do valor de “y” é feito na segunda linha. Em seguida, já na quinta linha, foi desenvolvido um laço de repetição com o objetivo de observar quando o valor da reta ultrapassaria o valor do ensaio de tração. Por fim, o valor é atribuído à variável “te”, que representa a tensão de escoamento.

Essa parte do trabalho finaliza com a apresentação e salvamento dos gráficos. Sendo um dos salvamentos dentro do laço de repetição que corre entre os ensaios e outro em um novo laço de repetição, que separa os ensaios por grupos, levando em consideração cada condição do corpo de prova. Segue o código responsável por apresentar os gráficos.

```

1     pp.plot(indices[j]['x'][0:ultimos_numeros],
      ↪ indices[j]['y'][0:ultimos_numeros], label = (j))

```

Em que “indices” representa um dicionário que contém todos os ensaios de tração, tanto “x” quanto “y”. Já “j” representa os ensaios, sendo que existe ainda uma lógica responsável por separar as curvas de cada gráfico. Isso é possível de observar com mais detalhes no Apêndice B.

A partir dos resultados obtidos na primeira parte, foi possível desenvolver a análise estatística propriamente dita. Para isso, foi feita uma função que recebe as variáveis: “resposta”, “nome”, “exp” e “matriz_niveis”, como pode ser visto no código seguinte.

```

1     def analisar_experimento(resposta, nome, exp, matriz_niveis):

```

Cada variável terá um significado no código, como pode ser visto a seguir:

- resposta - se trata de uma lista com todos os resultados do experimento;
- nome - se trata de um *string* com o nome dado ao experimento;
- exp - se trata de um dicionário com a descrição da variação de níveis dos parâmetros avaliados;
- matriz_niveis - apresenta uma matriz com os níveis de cada um dos parâmetros para cada resposta do experimento.

Então, é desenvolvida a preparação para ANOVA através do seguinte código:

```

1      nomes_fatores = [chave.capitalize() for chave in
2      ↪ exp['fatores'].keys()]
3      df = pd.DataFrame(matriz_niveis, columns = nomes_fatores) #
4      ↪ Criar um DataFrame com os experimentos
5      df['Resposta'] = resposta
6      df['indice'] = df.index
7      # ANOVA
8      ajs_mod = 'Resposta ~ C(' + nomes_fatores[0] + ')'
9      for i in nomes_fatores[1:]:
10         ajs_mod = ajs_mod + ' * C(' + i + ')'

```

A primeira linha do código anterior cria uma variável com os nomes dos fatores com a primeira letra maiúscula. Já na linha seguinte, utilizando o pacote “pandas”, é construída uma tabela com os valores de cada nível, resposta e índice. Em sequência, das linhas 6 a 8, existe a construção da variável “ajd_mod”, ela é responsável por definir qual interação entre os parâmetros que serão avaliados, no caso do presente trabalho, ao utilizar o operador “*”, ela faz com que o modelo mostre a interação entre todos os fatores.

Após a preparação, existe o desenvolvimento da ANOVA propriamente dita:

```

1      modelo = ols(ajd_mod, data=df).fit() # Ajustar o modelo
2      resultados = sm.stats.anova_lm(modelo, typ=2) # Resultados do
3      ↪ modelo
4      r_squared = modelo.rsquared # valor R2
5      r_squared_adj = modelo.rsquared_adj # valor R2 ajustado

```

Na primeira linha existe o ajuste do modelo utilizando a função “ols”, natural do pacote “statsmodels.formula.api”. Em sequência, com o auxílio desse mesmo pacote, é feita a ANOVA, na linha 2. Por fim, calcula-se os valores de R^2 e R^2 ajustado.

Em sequência, de forma a agregar os resultados, fez-se, ainda, o cálculo da porcentagem de relevância de cada fator.

```

1      # Porcetagem de relevância
2      soma_quadrados_total = resultados['sum_sq'].sum()
3      resultados['Porcentagem_Relevancia'] = (resultados['sum_sq']
4      ↪ / soma_quadrados_total) * 100

```

```

5      # Calcular média por fator
6      media = dict()
7      desvio = dict()
8      for i in nomes_fatores:
9          media[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].mean())
10         desvio[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].std())

```

Inicia-se, então, o desenvolvimento dos gráficos. O gráfico das médias em função dos parâmetros é o primeiro deles.

```

1      # Calcular média por fator
2      media = dict()
3      desvio = dict()
4      for i in nomes_fatores:
5          media[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].mean())
6          desvio[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].std())
7
8      # Plotar o gráfico de barras das médias com barras de erro
9      ↪ (desvio padrão)
10     for i in nomes_fatores:
11         pp.bar(media[i].index, media[i].values,
12              ↪ yerr=desvio[i].values, capsize=5, color='skyblue',
13              ↪ alpha=0.75)

```

O início do código anterior demonstra o cálculo das médias em função de um dos fatores. Em sequência, existe o desenvolvimento do gráfico na linha 10. Ressalta-se que as linhas de estilização foram omitidas.

Já o gráfico de Pareto é feito da seguinte forma:

```

1      # Gráfico de Pareto
2      p_values = resultados['PR(>F)']
3
4      # Ordenar os valores p em ordem decrescente
5      sorted_p_values = p_values.sort_values(ascending=True)
6      sorted_fatores = sorted_p_values.index
7
8
9      fig, ax = pp.subplots(figsize=(14, 6))

```

```

10     bars = ax.barh(sorted_fatores, -np.log10(sorted_p_values),
    ↪     color='skyblue')
11     ax.axvline(x=-np.log10(0.05), color='red', linestyle='--',
    ↪     label='Significância 0.05 (-log10(p-valor))')

```

Na linha dois do código, a variável “p_values” recebe a coluna dos resultados referentes a “PR(>F)”. As linhas cinco e seis ordenam os valores e fatores de forma crescente. Por fim, o gráfico é desenvolvido a partir dos resultados ordenados e em escala logarítmica, juntamente com a linha que demarca os parâmetros relevantes para o processo.

Em seguida, inicia-se o desenvolvimento dos gráficos referentes aos resíduos, como pode ser visto pelo código a seguir.

```

1         # Gráfico de resíduos
2
3         residuos = modelo.resid
4         ajustados = modelo.fittedvalues
5
6
7         pp.figure(num = f'Gráfico de resíduos {nome}')
8         pp.scatter(ajustados, residuos)

```

Tanto a função “.resid” quanto a função “.fittedvalues” são nativas do pacote “statsmodels.api”. Sendo que a primeira faz o cálculo dos resíduos do modelo e a segunda dos resultados ajustados. Por fim, existe a criação do gráfico nas linhas sete e oito.

Já os gráficos quantis-quantis são gerados a partir dos resíduos normalizados, a linha de código responsável está ilustrada a seguir.

```

1         stats.probplot(modelo.resid, dist='norm', plot=pp)

```

Finalmente, o último gráfico desenvolvido pelo código, o gráfico de interação, é feito utilizando as seguintes linhas.

```

1         # Gráficos de Interação
2         for i in range(len(nomes_fatores)):
3             for j in range(i + 1, len(nomes_fatores)):
4                 fig, ax = pp.subplots(figsize=(10, 6))
5                 sns.pointplot(x=nomes_fatores[i], y='Resposta',
    ↪                 hue=nomes_fatores[j], data=df, dodge=True,
    ↪                 markers=['o', 's', 'D'], linestyles=['-',
    ↪                 '--', ':'])

```

Nota-se que os códigos apresentados aqui estão ilustrados de forma simplificada; para um entendimento melhor dos mesmos, é necessário acessar os Apêndices B e C.

APÊNDICE B – CÓDIGO PRINCIPAL DE ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

```
1 import matplotlib.pyplot as pp
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 from TratExp import analisar_experimento
5 from function import toe_compesation
6 from function import general_graph
7 from function import change_lvl
8
9 indices = dict() # declaracao do dicionário
10 resultado = dict()
11
12 response_tracmax_BC = []
13 response_tracmax_AB = []
14 response_tenesco_AB = []
15 response_modelas_AB = []
16
17 response_tracmax_A = []
18 response_tracrup_A = []
19 response_tracmax_A_50k = []
20 response_tracrup_A_50k = []
21 response_tracmax_B_50k = []
22 response_tracrup_B_50k = []
23 response_tracmax_A_5k = []
24 response_tracrup_A_5k = []
25 retirar_valores = []
26 numero_ensaios = {}
27 response_tenesco_A_5k = []
28 response_modelas_A_5k = []
29 testando = []
30
31 ultimos_numeros = -5 # números a retirar do final de cada gráfico
32
33 A_planejamento_experimental_global = np.empty((0, 3))
34 B_planejamento_experimental_global = np.empty((0,3))
```

```

35 A_planejamento_experimental_5kN = np.empty((0, 2))
36 A_planejamento_experimental_50kN = np.empty((0, 2))
37
38 # Carrega o arquivo Excel
39 caminho_arquivo = 'CPs.xlsx'
40 df = pd.read_excel(caminho_arquivo, skiprows=1)
41
42 # Recebe os códigos dos CPs
43 ensaios = df.iloc[:, 0].tolist()
44 pesoA = [100*(variavel - 1.24*4.813)/(1.24*4.813) for variavel in
↪ df.iloc[0:70, 14].tolist()]
45 espessuraA = [100*(variavel - 3.2)/3.2 for variavel in df.iloc[0:70,
↪ 9].tolist()]
46 larguraA = [100*(variavel - 6)/6 for variavel in df.iloc[0:70,
↪ 4].tolist()]
47 pesoB = [100*(variavel - 1.24*4.813)/(1.24*4.813) for variavel in
↪ (df.iloc[15:20, 14].tolist() + df.iloc[70:, 14].tolist())]
48 espessuraB = [100*(variavel - 3.2)/3.2 for variavel in (df.iloc[15:20,
↪ 9].tolist() + df.iloc[70:, 9].tolist())]
49 larguraB = [100*(variavel - 6)/6 for variavel in (df.iloc[15:20,
↪ 4].tolist() + df.iloc[70:, 4].tolist())]
50
51 generalgraphA50 = []
52 generalgraphA05 = []
53 generalgraphB50 = []
54 cont_peso = 0
55 for i in ensaios:
56     data = np.loadtxt(fname = i + '.txt', skiprows=4) # carrega o txt
57     data_ = np.loadtxt(fname = i + '_.txt', skiprows=4) # carrega o txt
58
59     if i[0:1] == 'A':
60         if i != 'AA2' and i != 'AD2' and i != 'AA5' and i != 'AA10' and
↪ i != 'AA15' and i != 'AD5' and i != 'AD10' and i != 'AD15':
61             if i[0:2] == 'AA' and int(i[2:]) <= 10:
62                 A_planejamento_experimental_global =
↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
↪ 1, -1]])

```

```

63     A_planejamento_experimental_50kN =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [1,
        ↳ 1]])
64     x = data[:, 0]
65     if int(i[2:]) == 9:
66         generalgraphA50.append(i)
67     elif i[0:2] == 'AA' and int(i[2:]) > 10:
68         A_planejamento_experimental_global =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
        ↳ 1, 1]])
69     A_planejamento_experimental_5kN =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [1, 1]])
70     x = data[:, 0]
71     if int(i[2:]) == 14:
72         generalgraphA05.append(i)
73     elif i[0:2] == 'AB' and int(i[2:]) <= 5:
74         A_planejamento_experimental_global =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
        ↳ 0, -1]])
75     A_planejamento_experimental_50kN =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [1,
        ↳ 0]])
76     B_planejamento_experimental_global =
        ↳ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [-1,
        ↳ 1, 1]])
77     x = data[:, 0]
78     if int(i[2:]) == 4:
79         generalgraphA50.append(i)
80         generalgraphB50.append('BA4')
81     elif i[0:2] == 'AB' and int(i[2:]) > 5:
82         A_planejamento_experimental_global =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
        ↳ 0, 1]])
83     A_planejamento_experimental_5kN =
        ↳ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [1, 0]])
84     x = data[:, 0]
85     if int(i[2:]) == 7:
86         generalgraphA05.append(i)
87     elif i[0:2] == 'AC' and int(i[2:]) <= 5:

```

```

88     A_planejamento_experimental_global =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
      ↪ -1, -1]])
89     A_planejamento_experimental_50kN =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [1,
      ↪ -1]])
90     x = data[:, 0]
91     if int(i[2:]) == 4:
92         generalgraphA50.append(i)
93     elif i[0:2] == 'AC' and int(i[2:]) > 5:
94         A_planejamento_experimental_global =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [1,
      ↪ -1, 1]])
95         A_planejamento_experimental_5kN =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [1,
      ↪ -1]])
96         x = data[:, 0]
97         if int(i[2:]) == 10:
98             generalgraphA05.append(i)
99     elif i[0:2] == 'AD' and int(i[2:]) <= 10:
100        A_planejamento_experimental_global =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
      ↪ 1, -1]])
101        A_planejamento_experimental_50kN =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [-1,
      ↪ 1]])
102        x = data[:, 0]
103        if int(i[2:]) == 9:
104            generalgraphA50.append(i)
105        elif i[0:2] == 'AD' and int(i[2:]) > 10:
106            A_planejamento_experimental_global =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
      ↪ 1, 1]])
107            A_planejamento_experimental_5kN =
      ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [-1,
      ↪ 1]])
108            x = data[:, 0]
109            if int(i[2:]) == 12:
110                generalgraphA05.append(i)

```

```

111     elif i[0:2] == 'AE' and int(i[2:]) <= 5:
112         A_planejamento_experimental_global =
113             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
114                 ↪ 0, -1]])
115         A_planejamento_experimental_50kN =
116             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [-1,
117                 ↪ 0]])
118         x = data[:, 0]
119         if int(i[2:]) == 4:
120             generalgraphA50.append(i)
121     elif i[0:2] == 'AE' and int(i[2:]) > 5:
122         A_planejamento_experimental_global =
123             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
124                 ↪ 0, 1]])
125         A_planejamento_experimental_5kN =
126             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [-1,
127                 ↪ 0]])
128         x = data[:, 0]
129         if int(i[2:]) == 7:
130             generalgraphA05.append(i)
131     elif i[0:2] == 'AF' and int(i[2:]) <= 5:
132         A_planejamento_experimental_global =
133             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
134                 ↪ -1, -1]])
135         A_planejamento_experimental_50kN =
136             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_50kN, [-1,
137                 ↪ -1]])
138         x = data[:, 0]
139         if int(i[2:]) == 4:
140             generalgraphA50.append(i)
141     elif i[0:2] == 'AF' and int(i[2:]) > 5:
142         A_planejamento_experimental_global =
143             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_global, [-1,
144                 ↪ -1, 1]])
145         A_planejamento_experimental_5kN =
146             ↪ np.vstack([A_planejamento_experimental_5kN, [-1,
147                 ↪ -1]])
148         x = data[:, 0]
149         if int(i[2:]) == 7:

```

```

134         generalgraphA05.append(i)
135     else:
136         retirar_valores.append(cont_peso)
137         if int(i[2:]) > 10:
138             x = data[:, 0]
139         else:
140             x = data_[:, 0]
141     cont_peso += 1
142 else:
143     x = data_[:, 0]
144     if i[0:2] == 'BB':
145         B_planejamento_experimental_global =
146         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [-1, 1,
147         ↪ -1]])
148     elif i[0:2] == 'BC':
149         B_planejamento_experimental_global =
150         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [-1, -1,
151         ↪ 1]])
152     elif i[0:2] == 'BD':
153         B_planejamento_experimental_global =
154         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [-1, -1,
155         ↪ -1]])
156     elif i[0:2] == 'BE':
157         B_planejamento_experimental_global =
158         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [1, 1,
159         ↪ 1]])
160     elif i[0:2] == 'BF':
161         B_planejamento_experimental_global =
162         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [1, 1,
163         ↪ -1]])
164     elif i[0:2] == 'BG':
165         B_planejamento_experimental_global =
166         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [1, -1,
167         ↪ 1]])
168     elif i[0:2] == 'BH':
169         B_planejamento_experimental_global =
170         ↪ np.vstack([B_planejamento_experimental_global, [1, -1,
171         ↪ -1]])
172 y = data[:,1]

```

```

159
160     if i[0:1] == 'B' and int(i[2:]) == 4:
161         generalgraphB50.append(i)
162
163     if i == 'AF3': # os valores de tensão X deformação do CP AF3 estão
164         ↪ incorretos, por isso foi necessário adaptar
165         y = (data_[:,1])/(6.14*3.28) # tensão do corpo de prova AF3
166
167     indices[i] = {'x' : x, 'y' : y}
168
169     rt = max(y) # resistencia a tracao
170     rt_indice = np.argmax(y) # indice do valor maximo de tensao
171
172     if i[0:2] == 'AE':
173         tq = y[-25]
174     else:
175         tq = y[-5] # tensao de quebra
176
177     cont = 0
178
179     while y[cont] < 0.8 * rt:
180         cont += 1
181
182     x = toe_compesation(x,y, 10, cont)
183
184     a = (sum(y[11:(cont+1)])-sum(y[10:cont]))/
185     ↪ (sum(x[11:(cont+1)])-sum(x[10:cont])) # modulo de elasticidade
186
187     cont2 = 0 # contador
188     x_b = 0.002 # valor para calculo da tensao de escoamento, comunnete
189     ↪ 0.002
190
191     while x_b > x[cont2]: # encontrar valor de y para x_b
192         cont2 += 1
193
194     if x[cont2] == x_b:
195         b = y[cont2]
196     else:

```



```

225         response_tracrup_B_50k.append(tq)
226         response_tracmax_AB.append(rt)
227
228     else:
229         response_tracmax_B_50k.append(rt)
230         response_tracrup_B_50k.append(tq)
231
232     if i[0:2] == 'BC':
233         response_tracmax_BC.append(rt)
234
235
236     pp.plot(x[0:ultimos_numeros], y[0:ultimos_numeros]) # plota o
    ↪ grafico sem reta do escoamento menos os últimos 5 pontos
237     if ((i[0:2] == 'AA' or i[0:2] == 'AD') and (int(i[2:]) >= 11)) or
    ↪ ((i[0:2] == 'AB' or i[0:2] == 'AC' or i[0:2] == 'AE' or i[0:2]
    ↪ == 'AF') and (int(i[2:]) >= 6)):
238         pp.xlabel('Deformação (mm/mm)')
239     else:
240         pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
241         pp.xlim(0,13) #limitacao do grafico em x
242         pp.ylim(0,65) #limitacao do grafico em y
243     pp.grid(True) # grid on
244     pp.ylabel('Tensão (MPa)')
245     pp.title('Corpo de Prova ' + i)
246     pp.savefig(i + '.png')
247     pp.close()
248
249     ensaio_passado = 'AA'
250     for j in ensaios:
251         if int(j[2:]) == 1:
252             pp.figure(num = f'Gráfico {j[0:2]} 50kN', figsize=(8,3)) # forma
    ↪ a figura do gráfico
253         elif ((j[0:2] != 'AA' and j[0:2] != 'AD') and (int(j[2:]) == 6)) or
    ↪ (int(j[2:]) == 11):
254             pp.figure(num = f'Gráfico {j[0:2]} 5kN', figsize=(8,3)) # forma
    ↪ a figura do gráfico
255     pp.plot(indices[j]['x'][0:ultimos_numeros],
    ↪ indices[j]['y'][0:ultimos_numeros], label = (j)) # plota o
    ↪ grafico sem reta do escoamento menos os últimos 5 pontos

```

```

256 #         pp.xlim(0,13) #limitacao do grafico em x
257 pp.ylim(0,65) #limitacao do grafico em y
258 pp.grid(True) # grid on
259 pp.ylabel('Tensão (MPa)')
260 pp.title('Corpo de Prova ' + j[0:2])
261 pp.legend()
262 pp.xlim(0)
263 if ((j[0:2] != 'AA' and j[0:2] != 'AD') and (int(j[2:]) == 5)) or
    ↪ ((j[0:2] == 'AA' or j[0:2] == 'AD') and (int(j[2:]) == 10)):
264     pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
265     pp.tight_layout()
266     pp.savefig(j[0:2] + '50kN.png')
267     pp.close()
268 elif ((j[0:2] != 'AA' and j[0:2] != 'AD') and (int(j[2:]) == 10)) or
    ↪ (int(j[2:]) == 15):
269     pp.xlabel('Deformação (mm/mm)')
270     pp.tight_layout()
271     pp.xlim(0, 0.12)
272     pp.savefig(j[0:2] + '5kN.png')
273     pp.close()
274
275 indices['BA4'] = indices['AB4']
276
277 print(f'A média da resistência à tração do ensaio BC é
    ↪ {np.mean(response_tracmax_BC):.2f}')
278 print(f'A média da resistência à tração do ensaio AB é
    ↪ {np.mean(response_tracmax_AB):.2f}')
279 print(f'A média da tensão de escoamento do ensaio AB é
    ↪ {np.mean(response_tenesco_AB):.2f}')
280 print(f'A média da módulo de elasticidade do ensaio AB é
    ↪ {np.mean(response_modelas_AB):.2f}')
281
282 te_estimada_BC =
    ↪ (np.mean(response_tracmax_BC)*np.mean(response_tenesco_AB))/
    ↪ np.mean(response_tracmax_AB)
283
284 print(f'A tensão de escoamento estimada do ensaio BC é
    ↪ {te_estimada_BC:.2f} MPa')
285

```

```

286
287 general_graph(generalgraphA50, indices, ultimos_numeros,
↳ 'GeneralGraphA50')
288 general_graph(generalgraphA05, indices, ultimos_numeros,
↳ 'GeneralGraphA05')
289 general_graph(generalgraphB50, indices, ultimos_numeros,
↳ 'GeneralGraphB50')
290
291
292 expA_global = {'fatores': {'fator_material': [1, -1], 'fator_ângulo':
↳ ['0°', '45°/135°', '90°'], 'fator_célula': ['50 kN', '5 kN']}}
293 expA = {'fatores': {'fator_material': [1, -1], 'fator_ângulo': [1, 0,
↳ -1]}}
294 expB = {'fatores': {'fator_velocidade': [-1, 1], 'fator_largura': [1,
↳ -1], 'fator_taxa': [1, -1]}}
295
296
297 retirar_valores.reverse()
298
299 for j in retirar_valores:
300     pesoA.pop(int(j))
301     larguraA.pop(int(j))
302     espessuraA.pop(int(j))
303
304 cont_nivel = 0
305 A_planejamento_experimental_global =
↳ A_planejamento_experimental_global.astype('str')
306 for j in A_planejamento_experimental_global[:,1]:
307     if j == '1.0':
308         A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,1] = '0°'
309     elif j == '0.0':
310         A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,1] = '45°/135°'
311     else:
312         A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,1] = '90°'
313     A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,1]
314     cont_nivel += 1
315
316 cont_nivel = 0
317 for j in A_planejamento_experimental_global[:,2]:

```

```

318     if j == '-1.0':
319         A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,2] = '50 kN'
320     else:
321         A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,2] = '5 kN'
322     A_planejamento_experimental_global[cont_nivel,2]
323     cont_nivel += 1
324
325 A_planejamento_experimental_5kN_AC = A_planejamento_experimental_5kN
326 response_modelas_A_5k_AC = response_modelas_A_5k
327 response_tenesco_A_5k_AC = response_tenesco_A_5k
328 for i in range(5):
329     A_planejamento_experimental_5kN_AC =
330     ↪ np.delete(A_planejamento_experimental_5kN_AC, 9, axis=0)
331     response_modelas_A_5k_AC = np.delete(response_modelas_A_5k_AC, 9,
332     ↪ axis=0)
333     response_tenesco_A_5k_AC = np.delete(response_tenesco_A_5k_AC, 9,
334     ↪ axis=0)
335
336 A_planejamento_experimental_SCelula =
337 ↪ np.delete(A_planejamento_experimental_global, 2, axis=1)
338
339 A_planejamento_experimental_5kN =
340 ↪ change_lvl(A_planejamento_experimental_5kN, 0, ['1.0', '-1.0'], ['3D
341 ↪ Lab', 'Voolt 3D'])
342
343 A_planejamento_experimental_5kN =
344 ↪ change_lvl(A_planejamento_experimental_5kN, 1, ['1.0',
345 ↪ '0.0', '-1.0'], ['0°', '45°/135°', '90°'])
346
347 A_planejamento_experimental_SCelula =
348 ↪ change_lvl(A_planejamento_experimental_SCelula, 0, ['1.0', '-1.0'],
349 ↪ ['3D Lab', 'Voolt 3D'])
350
351 A_planejamento_experimental_SCelula =
352 ↪ change_lvl(A_planejamento_experimental_SCelula, 1, ['1.0',
353 ↪ '0.0', '-1.0'], ['0°', '45°/135°', '90°'])
354
355 B_planejamento_experimental_global =
356 ↪ change_lvl(B_planejamento_experimental_global, 0, ['-1.0', '1.0'],
357 ↪ ['25 mm/s', '40 mm/s'])

```

```

342 B_planejamento_experimental_global =
    ↪ change_lvl(B_planejamento_experimental_global, 1, ['1.0', '-1.0'],
    ↪ ['0,40 mm', '0,35 mm'])
343 B_planejamento_experimental_global =
    ↪ change_lvl(B_planejamento_experimental_global, 2, ['-1.0', '1.0'],
    ↪ ['86,72%', '100,00%'])
344
345 #analisar_experimento(pesoB, 'PesoB', expB,
    ↪ B_planejamento_experimental_global)
346 #analisar_experimento(larguraB, 'LarguraB', expB,
    ↪ B_planejamento_experimental_global)
347 #analisar_experimento(espessuraB, 'EspessuraB', expB,
    ↪ B_planejamento_experimental_global)
348 #analisar_experimento(response_tracmax_B_50k, 'ResTracB50k', expB,
    ↪ B_planejamento_experimental_global)
349 #analisar_experimento(response_tracrup_B_50k, 'TraRupB50k', expB,
    ↪ B_planejamento_experimental_global)
350 #analisar_experimento(pesoA, 'PesoA', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_SCelula)
351 #analisar_experimento(larguraA, 'LarguraA', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_SCelula)
352 #analisar_experimento(espessuraA, 'EspessuraA', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_SCelula)
353 #analisar_experimento(response_tracmax_A, 'ResTracAGlobal',
    ↪ expA_global, A_planejamento_experimental_global)
354 #analisar_experimento(response_tracrup_A, 'TraRupAGlobal', expA_global,
    ↪ A_planejamento_experimental_global)
355 #analisar_experimento(response_tracmax_A_50k, 'ResTracA50k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_50kN)
356 #analisar_experimento(response_tracrup_A_50k, 'TraRupA50k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_50kN)
357 #analisar_experimento(response_tracmax_A_5k, 'ResTracA5k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN)
358 #analisar_experimento(response_tracrup_A_5k, 'TraRupA5k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN)
359 #analisar_experimento(response_modelas_A_5k, 'ModElasA5k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN)
360 #analisar_experimento(response_tenesco_A_5k, 'TenEscoA5k', expA,
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN)

```

```
361 #analisar_experimento(response_modelas_A_5k_AC, 'ModElasA5k', expA,  
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN_AC)  
362 #analisar_experimento(response_tenesco_A_5k_AC, 'TenEscoA5k', expA,  
    ↪ A_planejamento_experimental_5kN_AC)
```

APÊNDICE C – CÓDIGO DE FUNÇÕES AUXILIARES PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as pp
4
5 def call_csv(nome):
6     tabela = pd.read_csv(nome + '.csv', encoding='latin1', skiprows=2)
7     x = tabela.iloc[:,2].tolist()
8     y = tabela.iloc[:,1].tolist()
9     return(x, y)
10
11 def toe_compensation(x, y, IO, IF):
12     x_a, y_a = x[IO], y[IO] # identificar pontos na região linear
13     x_b, y_b = x[IF], y[IF]
14     k = (y_b - y_a) / (x_b - x_a) # calcular a inclinação da linha na
    ↪ região linear
15     delta_x = x_a - (y_a / k) # determinar o deslocamento necessário
    ↪ para compensar a região não linear
16     x = [i - delta_x for i in x]
17     return x
18
19 def yield_strength(E, x, y):
20     cont = 0
21     while E*x[cont] - 0.002*E < y[cont]:
22         cont += 1
23     return y[cont]
24
25 def graph_ss(x, y, n, l):
26     pp.figure(n)
27     pp.plot(x, y, label = l)
28
29 def graph_config(t, l, sa):
30     pp.xlim(0, 0.4)
31     pp.ylim(0, 45)
32     pp.title(t)

```

```

33     pp.xlabel('Strain (mm/mm)')
34     pp.ylabel('Stress (MPa)')
35     if l != 0:
36         pp.legend()
37     pp.grid()
38     pp.savefig(sa)
39
40 def general_graph(names, indices, ultimos_numeros, nome):
41     pp.figure(nome, figsize=(8,3))
42
43     for z in names:
44         pp.plot(indices[z]['x'][0:ultimos_numeros],
45                ↪ indices[z]['y'][0:ultimos_numeros], label = (z[0:2]))
46
47     pp.grid(True) # grid on
48     pp.ylabel('Tensão (MPa)')
49     if int(nome[-2:]) == 5:
50         pp.xlabel('Deformação (mm/mm)')
51         pp.xlim(0)
52     else:
53         pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
54         pp.xlim(0,13)
55
56     pp.ylim(0,65)
57     pp.legend()
58     pp.tight_layout()
59     pp.savefig(nome)
60
61 def change_lvl(planejamento_experimental, coluna, lvl_num, lvl_name):
62     cont_nivel = 0
63     planejamento_experimental = planejamento_experimental.astype('str')
64     for j in planejamento_experimental[:,coluna]:
65         for i in range(len(lvl_num)):
66             if lvl_num[i] == j:
67                 planejamento_experimental[cont_nivel, coluna] =
68                 ↪ lvl_name[i]
69         cont_nivel += 1
70     return planejamento_experimental

```

APÊNDICE D – CÓDIGO DA FUNÇÃO ESTATÍSTICA DESENVOLVIDA EM PYTHON PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import statsmodels.api as sm
4 import scipy.stats as stats
5 import seaborn as sns
6 from statsmodels.formula.api import ols
7 import matplotlib.pyplot as pp
8
9 def analisar_experimento(resposta, nome, exp, matriz_niveis):
10     print('')
11     print(nome)
12
13     nomes_fatores = [chave.capitalize() for chave in
14     ↪ exp['fatores'].keys()]
15
16     df = pd.DataFrame(matriz_niveis, columns = nomes_fatores) # Criar um
17     ↪ DataFrame com os experimentos
18
19     df['Resposta'] = resposta
20
21     df['indice'] = df.index
22
23     # ANOVA
24     ajs_mod = 'Resposta ~ C(' + nomes_fatores[0] + ')'
25     for i in nomes_fatores[1:]:
26         ajs_mod = ajs_mod + ' * C(' + i + ')'
27
28     modelo = ols(ajs_mod, data=df).fit() # Ajustar o modelo
29
30     resultados = sm.stats.anova_lm(modelo, typ=2) # Resultados do
31     ↪ modelo
32
33     r_squared = modelo.rsquared # valor R2
```

```

31 r_squared_adj = modelo.rsquared_adj # valor R2 ajustado
32
33 print(f'R2: {r_squared}')
34 print(f'R2 Ajustado: {r_squared_adj}')
35
36 # Porcetagem de relevância
37 soma_quadrados_total = resultados['sum_sq'].sum()
38 resultados['Porcentagem_Relevancia'] = (resultados['sum_sq'] /
    ↪ soma_quadrados_total) * 100
39
40 # Calcular média por fator
41 media = dict()
42 desvio = dict()
43 for i in nomes_fatores:
44     media[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].mean())
45     desvio[i] = (df.groupby(i)['Resposta'].std())
46
47 print(resultados)
48
49 # Plotar o gráfico de barras das médias com barras de erro (desvio
    ↪ padrão)
50 for i in nomes_fatores:
51     pp.figure(figsize=(8, 3))
52     pp.bar(media[i].index, media[i].values, yerr=desvio[i].values,
    ↪ capsize=5, color='skyblue', alpha=0.75)
53     pp.xlabel('Nível')
54     if nome[0:3] == 'Esp' or nome[0:3] == 'Lar' or nome[0:3] ==
    ↪ 'Pes':
55         pp.ylabel('Variação Percentual')
56     else:
57         pp.ylabel('Média')
58     pp.xticks(rotation=0)
59     pp.grid(axis='y')
60     pp.tight_layout()
61     pp.savefig('Media' + i[6:].capitalize() + nome + '.png')
62     pp.close()
63
64 # Gráfico de Pareto
65 p_values = resultados['PR(>F)']

```

```

66     fatores = resultados.index
67
68     # Ordenar os valores p em ordem decrescente
69     sorted_p_values = p_values.sort_values(ascending=True)
70     sorted_fatores = sorted_p_values.index
71
72     pp.figure(num = f'Gráfico de Pareto {nome}') # forma a figura do
73     ↪ gráfico
74     fig, ax = pp.subplots(figsize=(14, 6))
75     bars = ax.barh(sorted_fatores, -np.log10(sorted_p_values),
76     ↪ color='skyblue')
77     ax.axvline(x=-np.log10(0.05), color='red', linestyle='--',
78     ↪ label='Significância 0.05 (-log10(p-valor))')
79     ax.set_xlabel('-log10(p-valor)')
80     ax.set_ylabel('Fatores e Interações')
81     ax.set_title('Gráfico de Pareto')
82     ax.legend()
83     pp.tight_layout()
84     pp.savefig('GraficoDePareto' + nome + '.png')
85     pp.close()
86
87     # Gráfico de resíduos
88
89     residuos = modelo.resid
90     ajustados = modelo.fittedvalues
91
92     pp.figure(num = f'Gráfico de resíduos {nome}')
93     pp.scatter(ajustados, residuos)
94     pp.axhline(0, color='red', linestyle='--')
95     pp.xlabel('Valores Ajustados')
96     pp.ylabel('Resíduos')
97     pp.title('Gráfico de Resíduos')
98     pp.savefig('GraficoDeResiduos' + nome + '.png')
99     pp.close()
100
101     # Resíduos Quantil-Quantil
102     residuos_padronizados =
103     ↪ modelo.get_influence().resid_studentized_internal

```

```
101 pp.figure(num = f'Gráfico Q-Q {nome}')
102 stats.probplot(modelo.resid, dist="norm", plot=pp)
103 pp.title('Gráfico Q-Q dos Resíduos')
104 pp.savefig('GraficoQQ' + nome + '.png')
105 pp.close()
106
107 # Gráficos de Interação
108 for i in range(len(nomes_fatores)):
109     for j in range(i + 1, len(nomes_fatores)):
110         fig, ax = pp.subplots(figsize=(8, 3))
111         sns.pointplot(x=nomes_fatores[i], y='Resposta',
112                     ↪ hue=nomes_fatores[j], data=df, dodge=True, markers=["o",
113                     ↪ "s", "D"], linestyle=["-", "--", ":"])
114         if nome[0:4] == 'Espe' or nome[0:4] == 'Larg' or nome[0:4]
115         ↪ == 'Peso':
116             pp.ylabel('Variação Percentual')
117             #ax.set_title(f'Interação entre
118             ↪ {nomes_fatores[i][6:].capitalize()} e
119             ↪ {nomes_fatores[j][6:].capitalize()}')
120         pp.tight_layout()
121         pp.savefig(f'Interacao{nomes_fatores[i]}
122                 ↪ {nomes_fatores[j]}{nome}.png')
123         pp.close()
```

APÊNDICE E – CÓDIGO PRINCIPAL DE ANÁLISE DE DADOS EM PYTHON DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NAS PONTES

```

1  import numpy as np
2  import pandas as pd
3  import matplotlib.pyplot as pp
4
5  from testes_pontes import teste, conjunto, graph_3
6  from TratExp import analisar_experimento
7
8  nom = ['S', 'P', 'O', 'I', 'R']
9  nomes = []
10
11 Exp = []
12
13 Conj = {}
14 Ponte = {}
15
16 for i in nom:
17     for j in range(3):
18         # Adição dos dados de x e y
19         data = np.loadtxt(i + str(j+1) + '.txt', skiprows=2)
20         data_ = np.loadtxt(i + str(j+1) + '_.txt', skiprows=2)
21
22         Ponte[i+str(j+1)] = teste((data[:, 0] * (-1)), (data[:, 1]))
23         Conj[i] = conjunto(np.array([Ponte[i+'1'], Ponte[i+'2'],
24         ↪ Ponte[i+'3']])), i)
25
26 for i in nom[0:3]:
27     for j in range(3):
28         dataufg = []
29         if i == nom[0] or i == nom[1]:
30             for k in range(4):
31                 dataufg.append(pd.read_csv('testes_ufg/' + i + str(j+1)
32                 ↪ + '-' + str(k+1) + '.csv', encoding='latin1'))

```

```

31     Ponte[i+str(j+1)+'_2'] = teste( np.array(
        ↪ dataufg[0].iloc[2:,2].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[1].iloc[2:,2].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[2].iloc[2:,2].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[3].iloc[2:,2].astype(float).tolist() ),
        ↪ np.array(dataufg[0].iloc[2:,1].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[1].iloc[2:,1].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[2].iloc[2:,1].astype(float).tolist() +
        ↪ dataufg[3].iloc[2:,1].astype(float).tolist()*1000, 1)
32     else:
33         dataufg.append(pd.read_csv('testes_ufg/' + i + str(j+1) +
        ↪ '.csv', encoding='latin1'))
34     Ponte[i+str(j+1)+'_2'] = teste(
        ↪ np.array(dataufg[0].iloc[2:,2].astype(float).tolist() ),
        ↪ np.array(
        ↪ dataufg[0].iloc[2:,1].astype(float).tolist()*1000, 2 )
35
36     Conj[i+'_2'] = conjunto(np.array([Ponte[i+'1_2'], Ponte[i+'2_2'],
        ↪ Ponte[i+'3_2']])), i+'_2')
37
38     #Conj['0'].graph()
39
40     print(Conj['P_2'].for_max_med)
41     print(Ponte['S1'].x[-1])
42
43     nomes_2 = nom + ['S_2', 'P_2', 'O_2']
44
45     FMax_0 = []
46     experimental_plan = np.empty((0,1))
47
48     FMax_Shimadzu = []
49     experimental_planShimadzu = np.empty((0,1))
50
51     FMax_ShimadzuMac = []
52     experimental_planShimadzuMac = np.empty((0,1))
53
54     Fesc_MTS = []
55     Frup_MTS = []
56     FMax_MTS = []

```

```

57 ModE_MST = []
58 experimental_planMTS = np.empty((0,1))
59
60 ModE_MST = []
61 experimental_planMTS_Total = np.empty((0,1))
62
63 for i in nomes_2:
64     for j in range(3):
65         if i == 'I':
66             FMax_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_max)
67             Fesc_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_esc)
68             Frup_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_rup)
69             experimental_planMTS = np.vstack([experimental_planMTS,
70 → ['Giroyd']])
71             ModE_MST.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].mod_ela)
72             experimental_planMTS_Total =
73 → np.vstack([experimental_planMTS_Total, ['Giroyd']])
74
75         elif i == 'R':
76             FMax_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_max)
77             Fesc_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_esc)
78             Frup_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_rup)
79             experimental_planMTS = np.vstack([experimental_planMTS,
80 → ['Grid']])
81             ModE_MST.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].mod_ela)
82             experimental_planMTS_Total =
83 → np.vstack([experimental_planMTS_Total, ['Grid']])
84
85         elif i == 'O':
86             FMax_0.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_max)
87             experimental_plan = np.vstack([experimental_plan, ['MTS']])
88             FMax_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_max)
89             Fesc_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_esc)
90             Frup_MTS.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].for_rup)
91             experimental_planMTS = np.vstack([experimental_planMTS,
92 → ['Top0timizado']])
93             ModE_MST.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].mod_ela)
94             experimental_planMTS_Total =
95 → np.vstack([experimental_planMTS_Total,
96 → ['Top0timizado']])
97
98         elif i == 'S':

```

```

89     ModE_MST.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].mod_ela)
90     experimental_planMTS_Total =
91     ↪ np.vstack([experimental_planMTS_Total, ['Standard']])
92     elif i == 'P':
93     ModE_MST.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)].mod_ela)
94     experimental_planMTS_Total =
95     ↪ np.vstack([experimental_planMTS_Total,
96     ↪ ['Par0otimizado']])
97     elif i == 'S_2':
98     FMax_Shimadzu.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
99     experimental_planShimadzu =
100     ↪ np.vstack([experimental_planShimadzu, ['Standard']])
101     FMax_ShimadzuMac.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
102     experimental_planShimadzuMac =
103     ↪ np.vstack([experimental_planShimadzuMac, ['Standard']])
104     elif i == 'P_2':
105     FMax_Shimadzu.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
106     experimental_planShimadzu =
107     ↪ np.vstack([experimental_planShimadzu, ['Par0otimizado']])
108     FMax_ShimadzuMac.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
109     experimental_planShimadzuMac =
110     ↪ np.vstack([experimental_planShimadzuMac,
111     ↪ ['Par0otimizado']])
112     elif i == 'O_2':
113     FMax_0.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
114     experimental_plan = np.vstack([experimental_plan,
115     ↪ ['Shimadzu']])
116     FMax_Shimadzu.append(Ponte[i[0:1]+str(j+1)+'_2'].for_max)
117     experimental_planShimadzu =
118     ↪ np.vstack([experimental_planShimadzu, ['Top0otimizado']])
119
120 #analisar_experimento(FMax_0, 'FMax0', {'fatores': {'local': ['MTS',
121 ↪ 'Shimadzu']}}, experimental_plan, 'Response ~ Local')
122 #analisar_experimento(FMax_Shimadzu, 'FMaxShimadzu', {'fatores':
123 ↪ {'preenchimento': ['Standard', 'Par0otimizado', 'Top0otimizado']}},
124 ↪ experimental_planShimadzu, 'Response ~ Preenchimento')
125 #analisar_experimento(FMax_MTS, 'FMaxMTS', {'fatores':
126 ↪ {'preenchimento': ['Top0otimizado', 'Giroyd', 'Grid']}},
127 ↪ experimental_planMTS, 'Response ~ Preenchimento')

```

```

113 #analisar_experimento(FMax_ShimadzuMac, 'FMaxShimadzu_Mac', {'fatores':
    ↪ {'preenchimento': ['Standard', 'ParOtimizado']}},
    ↪ experimental_planShimadzuMac, 'Response ~ Preenchimento')
114 #analisar_experimento(Fesc_MTS, 'FEscMTS', {'fatores':
    ↪ {'preenchimento': ['TopOtimizado', 'Giroyd', 'Grid']}},
    ↪ experimental_planMTS, 'Response ~ Preenchimento')
115 #analisar_experimento(Frup_MTS, 'FRupMTS', {'fatores':
    ↪ {'preenchimento': ['TopOtimizado', 'Giroyd', 'Grid']}},
    ↪ experimental_planMTS, 'Response ~ Preenchimento')
116 #analisar_experimento(ModE_MST, 'ModEMST', {'fatores':
    ↪ {'preenchimento': ['TopOtimizado', 'Giroyd', 'Grid', 'Standard',
    ↪ 'ParOtimizado']}}, experimental_planMTS_Total, 'Response ~
    ↪ Preenchimento')
117
118 # graph_3(Ponte, ['O', 'R', 'I'], ['OT', 'Grid', 'Giroyd'],
    ↪ 'graph_MTS', 'Deformação (mm/mm)')
119 graph_3(Ponte, ['S_2', 'P_2', 'O_2'], ['Standard', 'PO', 'TO'],
    ↪ 'graph_Shimadzu', 'Deslocamento (mm)', limx = 10, limy = 120000, v =
    ↪ 3)
120 # graph_3(Ponte, ['S', 'P', 'O', 'R', 'I'], ['Standard', 'PO', 'TO',
    ↪ 'Grid', 'Giroyd'], 'graph_MTS_Total', 'Deformação (mm/mm)', limx =
    ↪ 0.12, limy = 50000, v = 3)
121

```

APÊNDICE F – CÓDIGO DE CLASSES E FUNÇÕES AUXILIARES PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO NAS PONTES

```
1 import matplotlib.pyplot as pp
2 import numpy as np
3
4 class teste():
5
6     def __init__(self, x, y, c = 0):
7         self.x = x
8         self.c = c
9         self.y = y
10
11         self.for_max = self.for_maxf()
12         self.mod_ela = self.mod_elaf()
13         self.x = self.toe_compensation()
14         self.for_rup = y[-5]
15         self.for_esc = self.for_escf()
16
17     def linear_region(self):
18         # Força por deformação
19         cont = 0
20         while self.y[cont] < 0.65 * self.for_max:
21             cont += 1
22         vinf = 0
23         while self.y[vinf] < 0.4 * self.for_max:
24             vinf += 1
25
26         return cont, vinf
27
28     def graph(self):
29         pp.plot(self.x, self.y)
30         pp.ylabel('Força(N)')
31         if self.c == 0:
32             pp.xlabel('Deformação (mm/mm)')
33             pp.ylim(0,13000)
```

```

34         pp.xlim(0,0.1)
35     elif self.c == 2:
36         pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
37         pp.ylim(0,13000)
38         pp.xlim(0,5)
39     else:
40         pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
41         pp.ylim(0,120000)
42         pp.xlim(0,10)
43 pp.tight_layout()
44 pp.grid()
45 pp.show()
46
47 def toe_compensation(self):
48     cont, vinf = self.linear_region()
49     # toe compesation
50     x_a, y_a = self.x[vinf], self.y[vinf] # identificar pontos na
51     ↪ região linear
52     x_b, y_b = self.x[cont], self.y[cont]
53     k = (y_b - y_a) / (x_b - x_a) # calcular a inclinação da linha
54     ↪ na região linear
55     delta_x = x_a - (y_a / k) # determinar o deslocamento
56     ↪ necessário para compensar a região não linear
57
58     return self.x - delta_x
59
60 def for_escf(self):
61     ### Força no escoamento ###
62     cont2 = 0 # contador
63     x_b = 0.002 # valor para calculo da tensao de escoamento,
64     ↪ comumnete 0.002
65     while x_b > self.x[cont2]: # encontrar valor de y para x_b
66         cont2 += 1
67     if self.x[cont2] == x_b:
68         b = self.y[cont2]
69     else:
70         b = self.y[cont2] - (((self.y[cont2] - self.y[cont2-1]) /
71     ↪ (self.x[cont2] - self.x[cont2-1])) * (self.x[cont2] -
72     ↪ x_b)) # calculo de b

```

```

67     cont3 = 0
68     while ((self.mod_ela * self.x[cont3] - b) < (self.y[cont3])) and
        ↪ (cont3 < len(self.y)-1): # conferindo o valor da tensão de
        ↪ escoamento
69         cont3 += 1
70
71     return self.y[cont3]
72
73     def mod_elaf(self, c = 0):
74         if c == 0:
75             cont, vinf = self.linear_region()
76         else:
77             cont, vinf = c[0], c[1]
78
79         return ((sum(self.y[vinf:cont])-sum(self.y[vinf-1:cont-1]))/
        ↪ (sum(self.x[vinf:cont])-sum(self.x[vinf-1:cont-1]))) #
        ↪ modulo de elasticidade
80
81     def for_maxf(self):
82         if self.c == 0 or self.c == 2:
83             return max(self.y)
84         else:
85             tes_fm = 0
86             coeficiente = 100000
87             for i in range(len(self.y)):
88                 if self.y[i] >= 10000:
89                     der = self.mod_elaf([i + 100, i])
90                     if der > tes_fm:
91                         tes_fm = der
92                     if tes_fm > coeficiente*der:
93                         return max(self.y[0:i])
94
95
96
97     class conjunto():
98         def __init__(self, dados, chave):
99             self.for_max_med, self.for_esc_med = self.medias(dados)
100             self.chave = chave
101

```

```
102     self.dados = dados
103
104     def medias(self, dados):
105         for_max_med = 0
106         for_esc_med = 0
107         for i in range(len(dados)):
108             for_max_med = for_max_med + dados[i].for_max
109             for_esc_med = for_esc_med + dados[i].for_esc
110
111         return for_max_med/len(dados), for_esc_med/len(dados)
112
113     def graph(self):
114         for i in range(3):
115             if len(self.chave) ==1:
116                 pp.plot(self.dados[i].x, self.dados[i].y, label=
117                     ↪ self.chave + str(i+1))
118             else:
119                 pp.plot(self.dados[i].x, self.dados[i].y, label=
120                     ↪ self.chave[0:1] + str(i+1) + '_2')
121         pp.ylabel('Força(N)')
122         if self.dados[1].c == 0:
123             pp.xlabel('Deformação (mm/mm)')
124             pp.ylim(0,13000)
125             pp.xlim(0,0.1)
126         elif self.dados[1].c == 2:
127             pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
128             pp.ylim(0,13000)
129             pp.xlim(0,5)
130         else:
131             pp.xlabel('Deslocamento (mm)')
132             pp.ylim(0,120000)
133             pp.xlim(0,10)
134         pp.legend()
135         pp.tight_layout()
136         pp.grid()
137         pp.show()
138
139     def graph_3(l3, n3, n3_real, nome, nx, limx = 0.12, limy = 13000, v=2):
140         pp.figure(figsize=(8, 3))
```

```
139     for i in range(len(n3)):
140         if n3[i][-2:] == '_2':
141             ch = n3[i][0:1]+str(v)+'_2'
142         else:
143             ch = n3[i]+str(v)
144         if i == 0:
145             ln = '-'
146         elif i == 1:
147             ln = '--'
148         else:
149             ln = '-.'
150         pp.plot(l3[ch].x, l3[ch].y, label = n3_real[i], linestyle=ln,
151               ↪ linewidth=3)
152     pp.legend()
153     pp.grid()
154     pp.ylim(0, limy)
155     pp.xlim(0, limx)
156     pp.xlabel(nx)
157     pp.ylabel('Força(N)')
158     pp.legend()
159     pp.tight_layout()
160     pp.savefig(nome + '.png')
161     pp.close()
```

APÊNDICE G – CÓDIGO DA FUNÇÃO ESTATÍSTICA DESENVOLVIDA EM PYTHON PARA OS ENSAIOS NAS PONTES

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import statsmodels.api as sm
4 import scipy.stats as stats
5 import seaborn as sns
6 from statsmodels.formula.api import ols
7 import matplotlib.pyplot as pp
8
9 def analisar_experimento(response, nome, exp, matriz_niveis, mod):
10     print('')
11     print(nome)
12
13     nomes_fatores = [chave.capitalize() for chave in
14     ↪ exp['fatores'].keys()]
15
16     df = pd.DataFrame(matriz_niveis, columns = nomes_fatores) # Criar um
17     ↪ DataFrame com os experimentos
18
19     df['Response'] = response
20
21     df['indice'] = df.index
22
23     modelo = ols(mod, data=df).fit() # Ajustar o modelo
24     resultados = sm.stats.anova_lm(modelo, typ=2) # Resultados do
25     ↪ modelo
26
27     r_squared = modelo.rsquared # valor  $R^2$ 
28     r_squared_adj = modelo.rsquared_adj # valor  $R^2$  ajustado
29
30     print(f'R2: {r_squared}')
31     print(f'R2 Ajustado: {r_squared_adj}')
32
33     # Porcetagem de relevância
```

```

31 soma_quadrados_total = resultados['sum_sq'].sum()
32 resultados['Porcentagem_Relevancia'] = (resultados['sum_sq'] /
    ↪ soma_quadrados_total) * 100
33
34 # Calcular média por fator
35 media = dict()
36 desvio = dict()
37 for i in nomes_fatores:
38     media[i] = (df.groupby(i)['Response'].mean())
39     desvio[i] = (df.groupby(i)['Response'].std())
40
41 print(resultados)
42
43 # Plotar o gráfico de barras das médias com barras de erro (desvio
    ↪ padrão)
44 for i in nomes_fatores:
45     print(i)
46     pp.figure(figsize=(8, 3))
47     pp.bar(media[i].index, media[i].values, yerr=desvio[i].values,
    ↪ capsiz=5, color='skyblue', alpha=0.75)
48     pp.xlabel('Nível', fontsize=15)
49     pp.ylabel('Média', fontsize=15)
50     #pp.title('Mean ' + i[:-7].capitalize() + ' ' + nome,
    ↪ fontsize=20)
51     pp.xticks(rotation=0)
52     pp.tight_layout()
53     pp.grid(axis='y')
54     pp.savefig('Mean' + i[:-6].capitalize() + nome + '.png')
55     pp.close()
56
57 # Gráfico de Pareto
58 p_values = resultados['PR(>F)']
59 fatores = resultados.index
60
61 # Ordenar os valores p em ordem decrescente
62 sorted_p_values = p_values.sort_values(ascending=True)
63 sorted_fatores = sorted_p_values.index
64

```

```

65 pp.figure(num = f"Pareto's Graph {nome}") # forma a figura do
    ↪ gráfico
66 fig, ax = pp.subplots(figsize=(18, 6))
67 bars = ax.barh(sorted_fatores, -np.log10(sorted_p_values),
    ↪ color='skyblue')
68 ax.axvline(x=-np.log10(0.05), color='red', linestyle='--',
    ↪ label='Significance 0.05 (-log10(p-valor))')
69 ax.set_xlabel('-log10(p-valor)', fontsize=24)
70 ax.set_ylabel('Factors and Interactions', fontsize=24)
71 # ax.set_title("Pareto's Graph", fontsize=20)
72 ax.legend(fontsize=12)
73 ax.tick_params(axis='both', labelsize=15)
74 pp.tight_layout()
75 pp.savefig('GraficoDePareto' + nome + '.png')
76 pp.close()
77
78 # Gráfico de resíduos
79
80 residuos = modelo.resid
81 ajustados = modelo.fittedvalues
82
83 pp.figure(num = f'Residual Graph {nome}')
84 pp.scatter(ajustados, residuos)
85 pp.axhline(0, color='red', linestyle='--')
86 pp.title('Residuals graph', fontsize=20)
87 pp.xlabel('Adjusted Values', fontsize=15)
88 pp.ylabel('Residuals', fontsize=15)
89 # pp.title('Waste')
90 pp.savefig('GraficoDeResiduos' + nome + '.png')
91 pp.close()
92
93 # Resíduos Quantil-Quantil
94 residuos_padronizados =
    ↪ modelo.get_influence().resid_studentized_internal
95
96 pp.figure(num = f'Q-Q Graph{nome}')
97 stats.probplot(modelo.resid, dist="norm", plot=pp)
98 pp.title('Q-Q Graph', fontsize=20)
99 pp.xlabel('Theoretical quantiles', fontsize=15)

```

```
100 pp.ylabel('Ordered Values', fontsize=15)
101 pp.savefig('GraficoQQ' + nome + '.png')
102 pp.close()
103
104 # Gráficos de Interação
105 for i in range(len(nomes_fatores)):
106     for j in range(i + 1, len(nomes_fatores)):
107         fig, ax = pp.subplots(figsize=(10, 6))
108         sns.pointplot(x=nomes_fatores[i], y='Response',
109                     ↪ hue=nomes_fatores[j], data=df, dodge=True, markers=["o",
110                     ↪ "s", "D"], linestyle=["-", "--", ":"])
111         ax.set_title(f'Interection between {nomes_fatores[i]} and
112                     ↪ {nomes_fatores[j]}')
113         pp.savefig(f'Interacao{nomes_fatores[i]}
114                 ↪ {nomes_fatores[j]}{nome}.png')
115         pp.close()
116
117 pp.close('all')
```

APÊNDICE H – MASSAS DAS PONTES

Tabela H.1: Massas pontes (g)

| Ponte | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|--------------|----------------------|
| Otimizada | 11,833 | 0,020 |
| <i>Gyroid</i> | 12,103 | 0,174 |
| <i>Grid</i> | 12,052 | 0,050 |
| Original | 58,662 | 1,059 |
| <i>Standard</i> | 56,759 | 1,127 |

Fonte: Produzido pelo autor

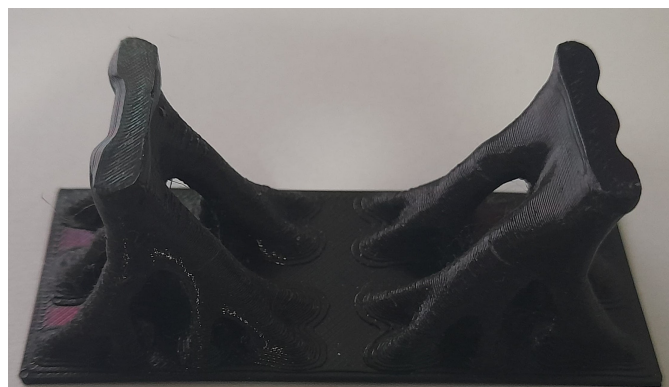
APÊNDICE I – PONTES ENSAIADAS

Figura I.1: Ponte *standard*



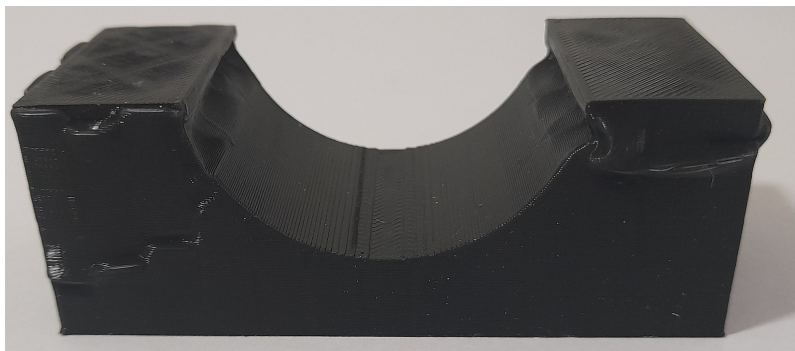
Fonte: Produzido pelo autor

Figura I.2: Ponte TO



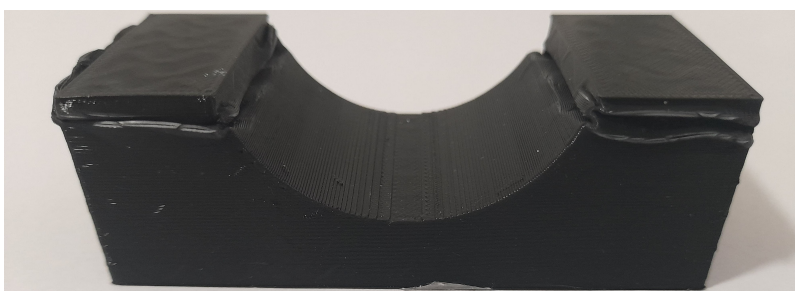
Fonte: Produzido pelo autor

Figura I.3: Ponte *grid*



Fonte: Produzido pelo autor

Figura I.4: Ponte *gyroid*



Fonte: Produzido pelo autor

APÊNDICE J – ENSAIOS DE TRAÇÃO

Tabela J.1: Resultado dos ensaios de tração

| Código | Res. Tra. (MPa) | Mod. Ela. (GPa) | Ten. Esc. (MPa) | Ten. Rup. (MPa) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| AA | 62,78 ± 0,46 | 3,060 ± 0,248 | 62,62 ± 0,49 | 51,21 ± 1,18 |
| AB/BA | 55,70 ± 0,59 | 2,973 ± 0,145 | 54,90 ± 0,62 | 49,70 ± 1,80 |
| AC | 45,96 ± 1,47 | 3,031 ± 0,430 | 45,27 ± 1,64 | 45,82 ± 1,54 |
| AD | 59,82 ± 0,84 | 3,043 ± 0,084 | 59,79 ± 0,85 | 49,17 ± 1,44 |
| AE | 53,16 ± 0,96 | 2,828 ± 0,021 | 52,36 ± 0,96 | 45,48 ± 1,04 |
| AF | 43,92 ± 3,03 | 2,787 ± 0,072 | 43,41 ± 1,82 | 43,54 ± 1,52 |
| BB | 31,85 ± 0,78 | - | - | 29,82 ± 2,02 |
| BC | 54,92 ± 0,84 | - | - | 46,61 ± 1,63 |
| BD | 32,71 ± 0,38 | - | - | 31,80 ± 0,31 |
| BE | 51,09 ± 1,17 | - | - | 44,65 ± 0,70 |
| BF | 32,78 ± 0,84 | - | - | 31,42 ± 0,86 |
| BG | 51,68 ± 0,45 | - | - | 45,37 ± 0,46 |
| BH | 34,93 ± 1,03 | - | - | 33,53 ± 1,01 |

Fonte: Produzido pelos autor

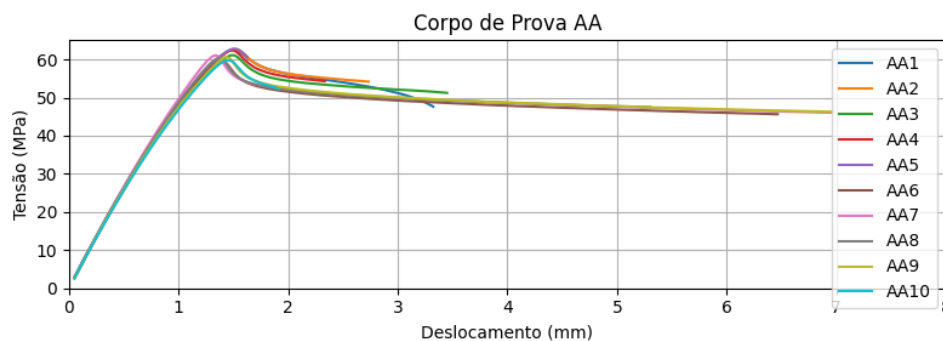
Res. Tra.: Resistência à tração;

Mod. Ela.: Módulo de elasticidade;

Ten. Esc.: Tensão de escoamento;

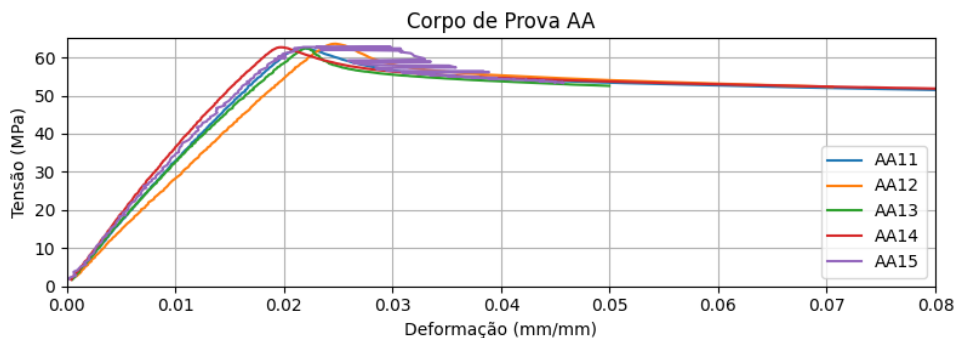
Ten. Rup.: Tensão de ruptura.

Figura J.1: Corpos de prova AA sem extensômetro e célula de 50 kN



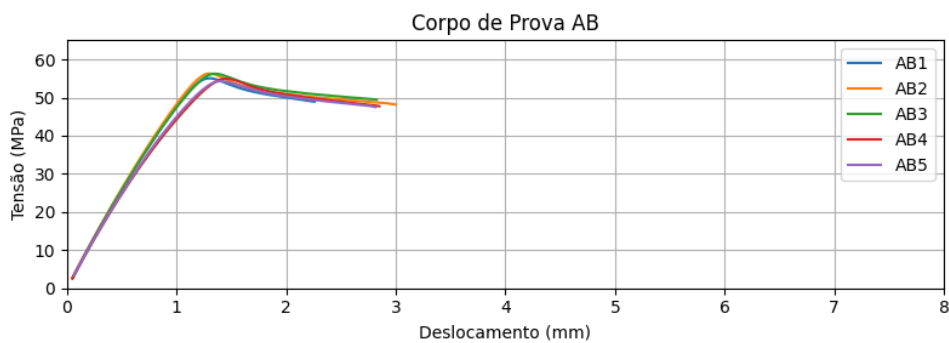
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.2: Corpos de prova AA com extensômetro e célula de 5 kN



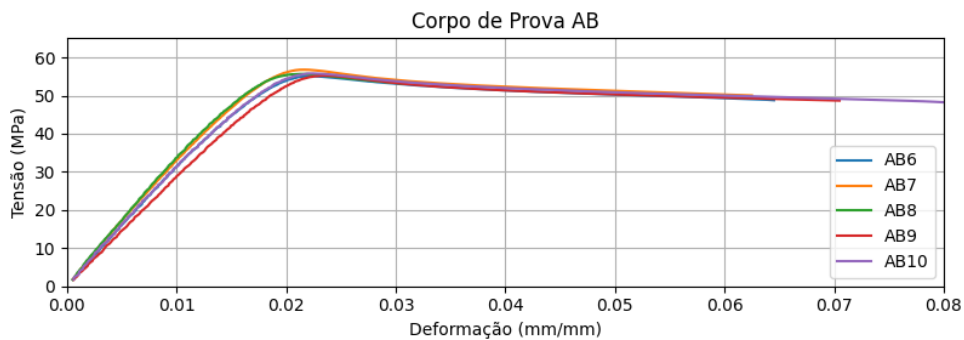
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.3: Corpos de prova AB/BA sem extensômetro e célula de 50 kN



Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.4: Corpos de prova AB/BA com extensômetro e célula de 5 kN



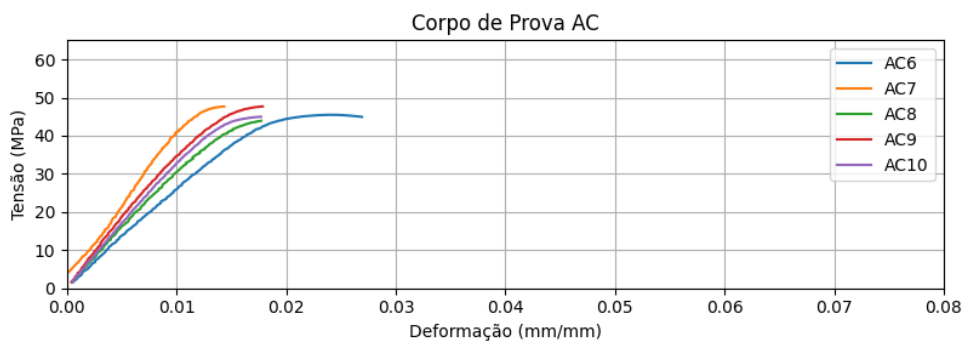
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.5: Corpos de prova AC sem extensômetro e célula de 50 kN



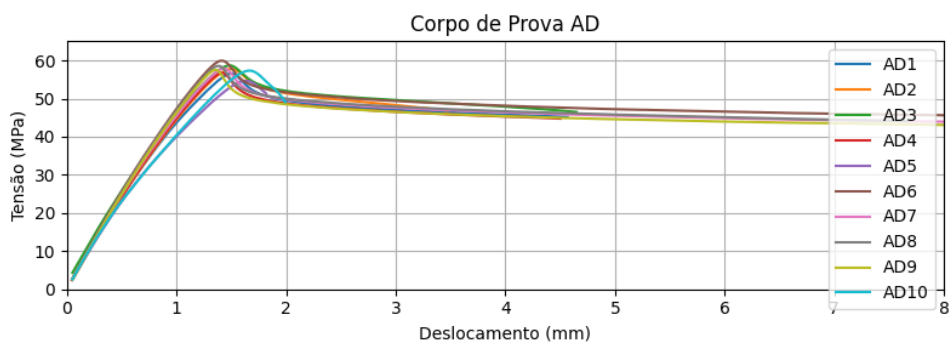
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.6: Corpos de prova AC com extensômetro e célula de 5 kN



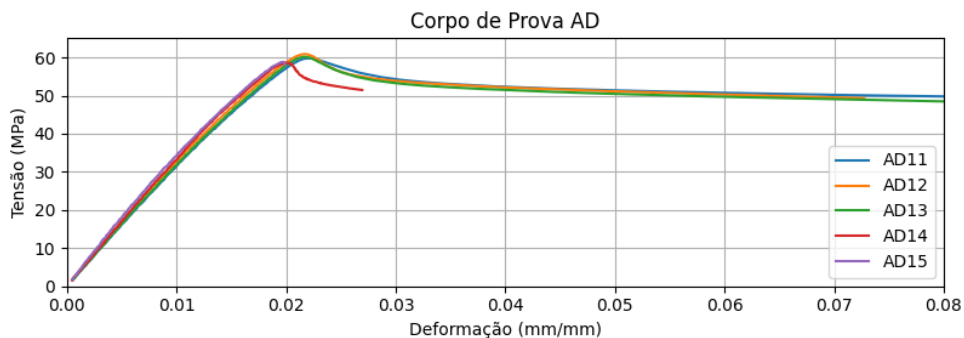
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.7: Corpos de prova AD sem extensômetro e célula de 50 kN



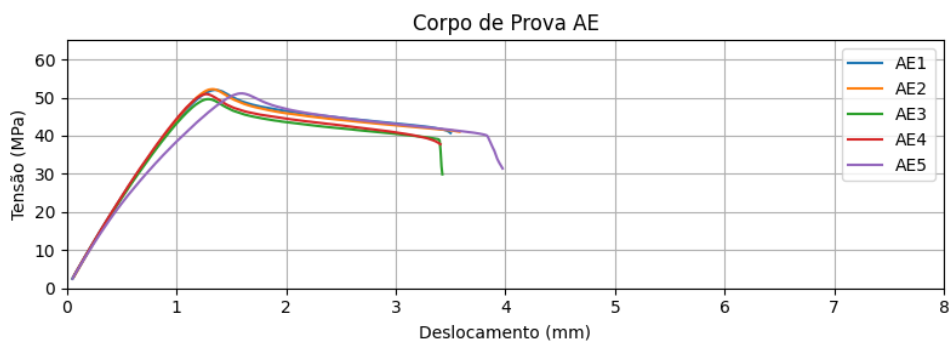
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.8: Corpos de prova AD com extensômetro e célula de 5 kN



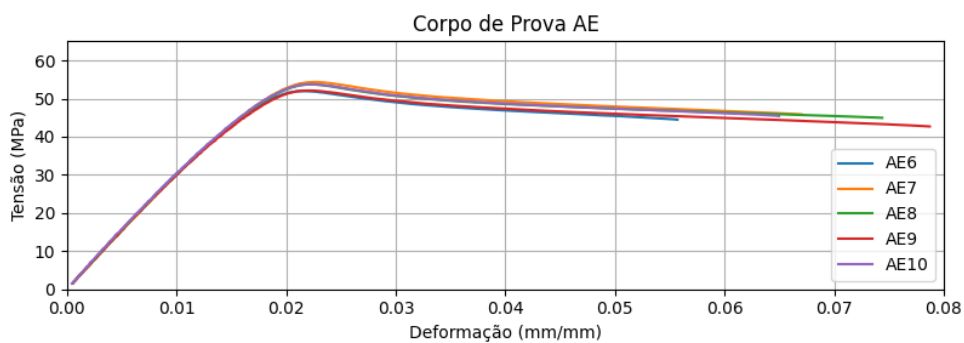
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.9: Corpos de prova AE sem extensômetro e célula de 50 kN



Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.10: Corpos de prova AE com extensômetro e célula de 5 kN



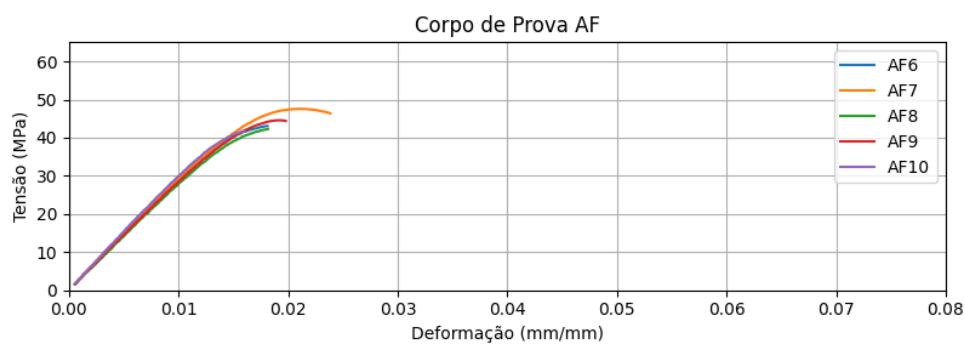
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.11: Corpos de prova AF sem extensômetro e célula de 50 kN



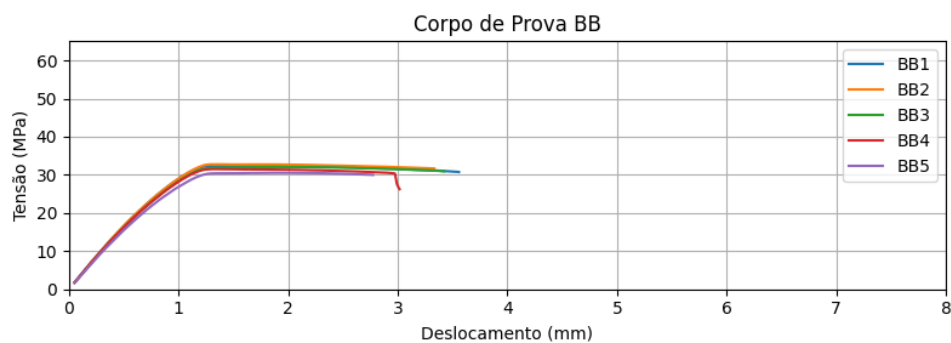
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.12: Corpos de prova AF com extensômetro e célula de 5 kN



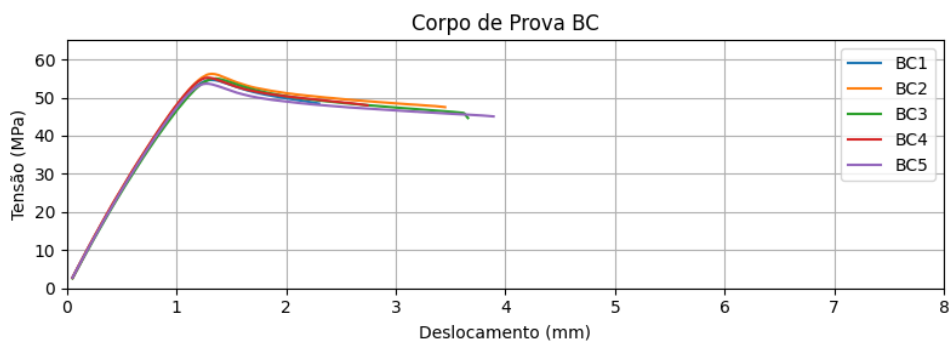
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.13: Corpos de prova BB sem extensômetro e célula de 50 kN



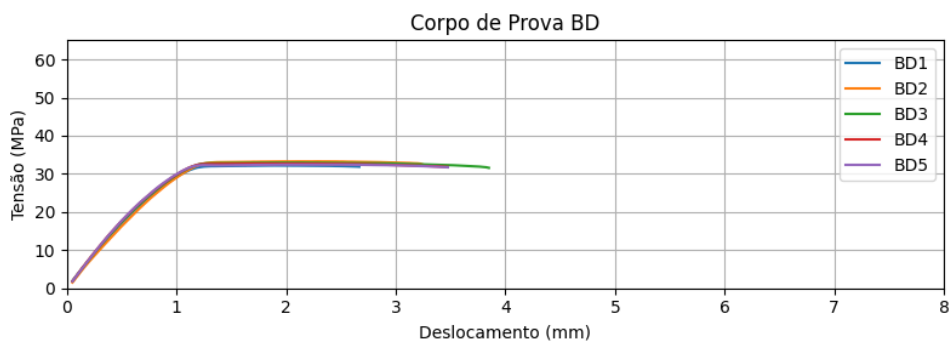
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.14: Corpos de prova BC sem extensômetro e célula de 50 kN



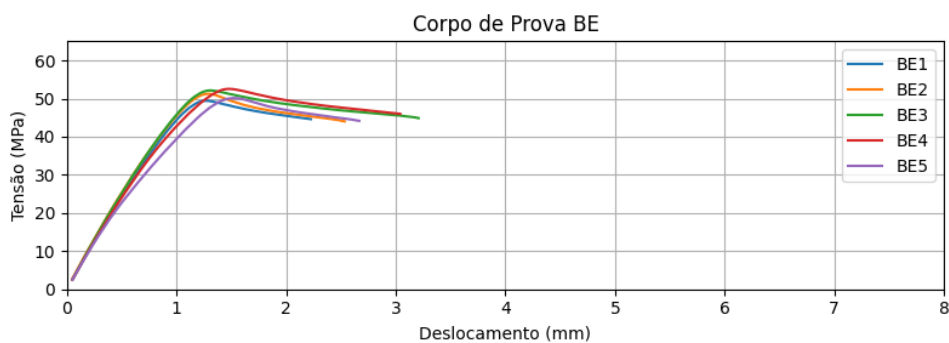
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.15: Corpos de prova BD sem extensômetro e célula de 50 kN



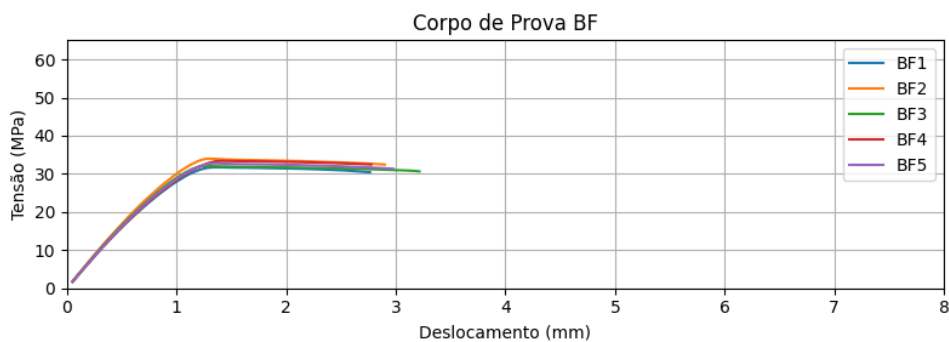
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.16: Corpos de prova BE sem extensômetro e célula de 50 kN



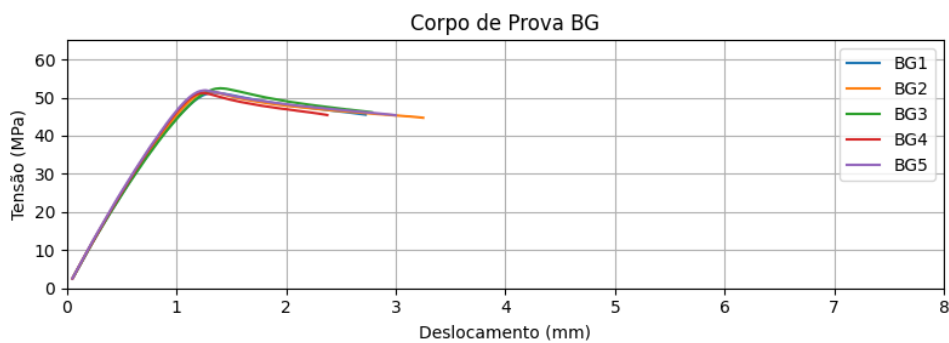
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.17: Corpos de prova BF sem extensômetro e célula de 50 kN



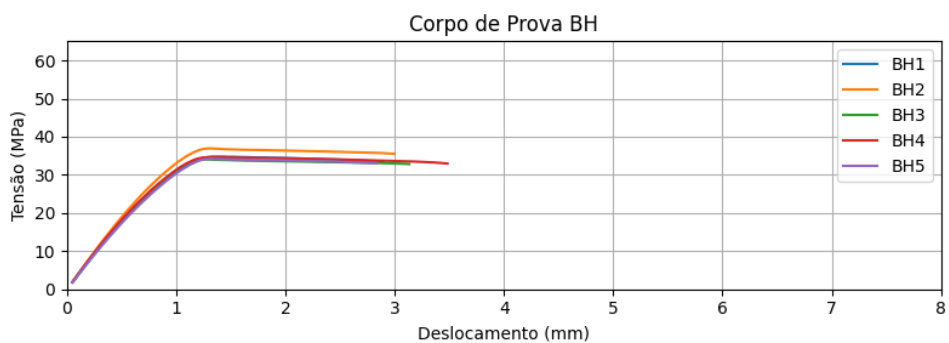
Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.18: Corpos de prova BG sem extensômetro e célula de 50 kN



Fonte: Produzido pelo autor

Figura J.19: Corpos de prova BH sem extensômetro e célula de 50 kN



Fonte: Produzido pelo autor

APÊNDICE K – ENSAIOS DAS PONTES

Tabela K.1: Resultado dos ensaios das pontes

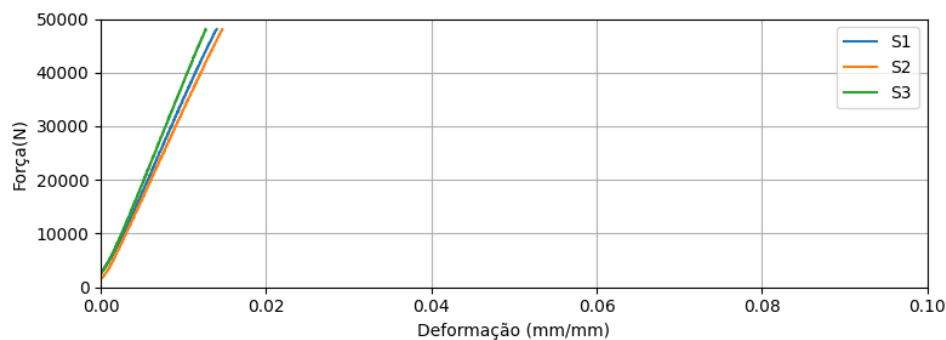
| Código | Força máxima (kN) | For. por deformação (kN) | For. por des. (kN/mm) |
|-----------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| Otimizada | 12,05 ± 0,05 | 571,07 ± 15,41 | 14,04 ± 0,08 |
| <i>Gyroid</i> | 5,57 ± 0,41 | 354,68 ± 17,35 | - |
| <i>Grid</i> | 8,88 ± 0,21 | 606,21 ± 3,89 | - |
| Original | 84,86 ± 2,52 | 4516,14 ± 379,86 | 99,53 ± 4,03 |
| <i>Standard</i> | 83,12 ± 2,99 | 3499,83 ± 184,78 | 96,40 ± 4,93 |

Fonte: Produzido pelos autor

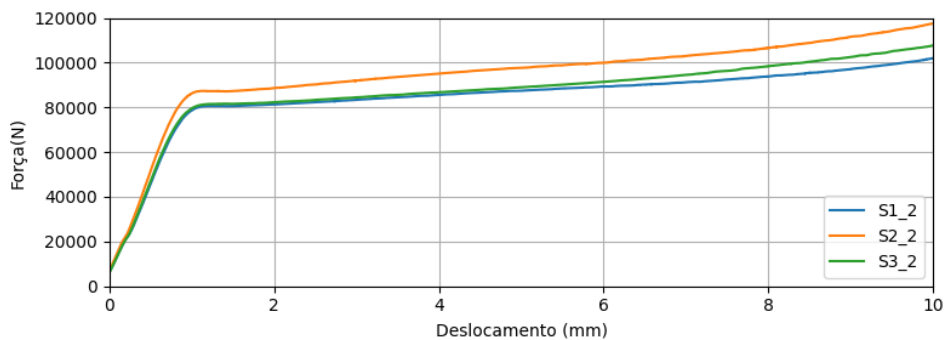
For.: Força;

des.: deslocamento.

Figura K.1: Ponte *standard* - MTS

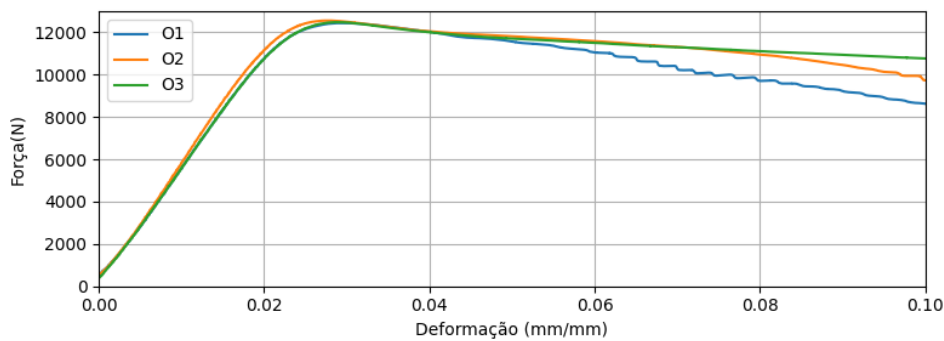


Fonte: Produzido pelo autor

Figura K.2: Ponte *standard* - Shimadzu

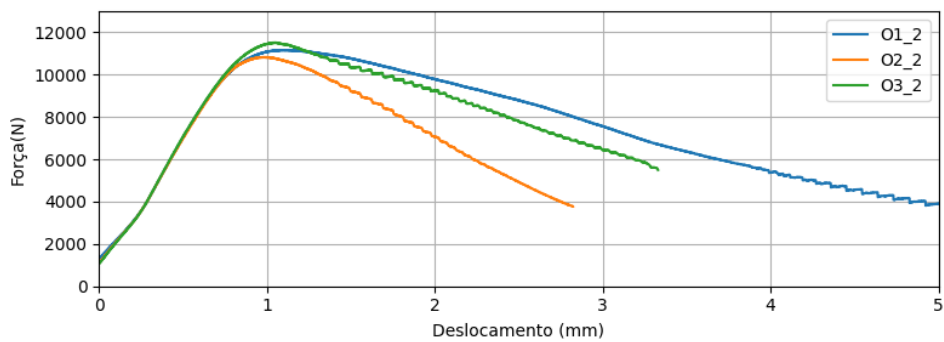
Fonte: Produzido pelo autor

Figura K.3: Ponte TO - MTS

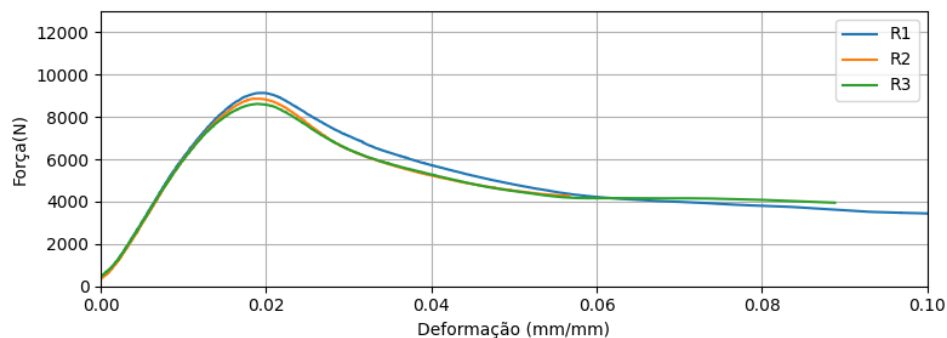


Fonte: Produzido pelo autor

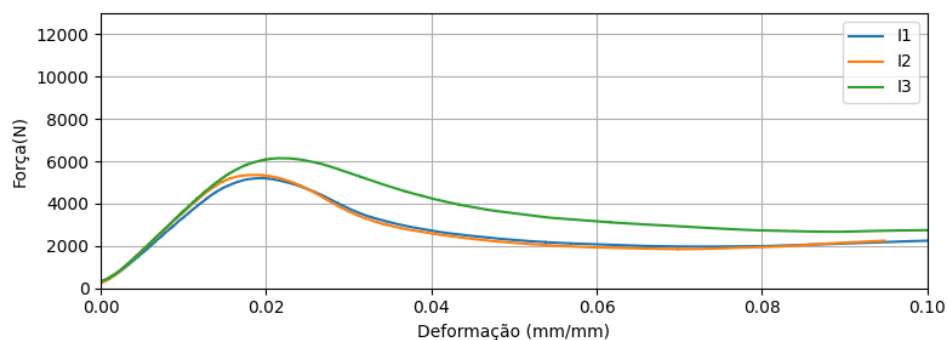
Figura K.4: Ponte TO - Shimadzu



Fonte: Produzido pelo autor

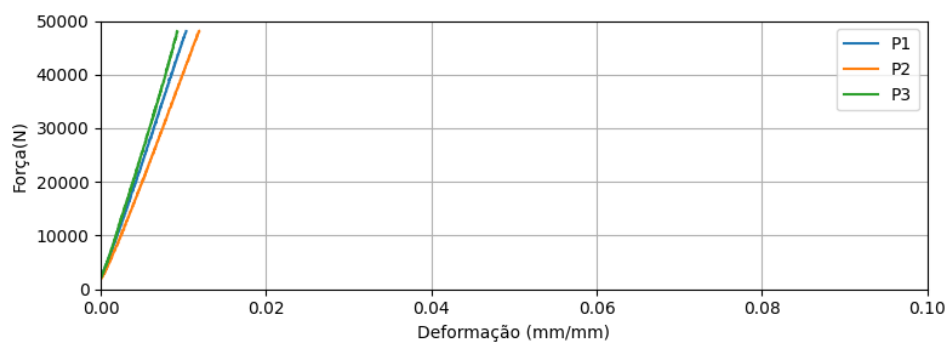
Figura K.5: Ponte *grid*

Fonte: Produzido pelo autor

Figura K.6: Ponte *gyroid*

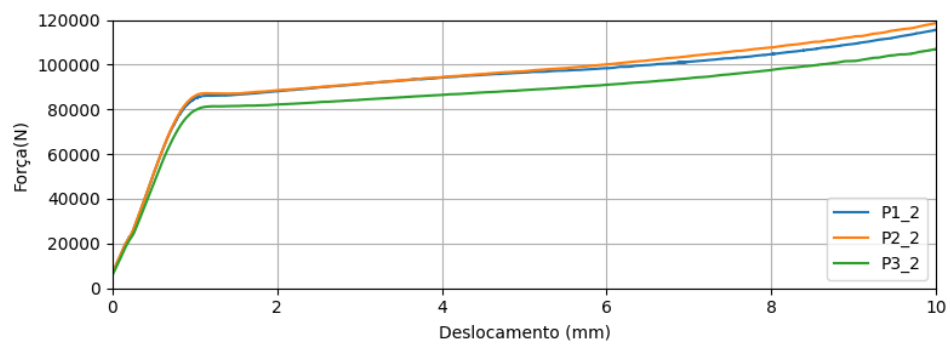
Fonte: Produzido pelo autor

Figura K.7: Ponte original - MTS



Fonte: Produzido pelo autor

Figura K.8: Ponte original - Shimadzu



Fonte: Produzido pelo autor