



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

THIAGO PENSO BEVILACQUA

**Sistemas de isolamento para máquinas elétricas de baixa tensão utilizando manufatura
aditiva**

UBERABA

2026



THIAGO PENSO BEVILACQUA

Sistemas de isolamento para máquinas elétricas de baixa tensão utilizando manufatura aditiva

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovações e Tecnologias da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - PMPIT/UFTM, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Inovações e Tecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano

UBERABA

2026

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade
Federal do Triângulo Mineiro**

B467s Bevilacqua, Thiago Penso
Sistemas de isolamento para máquinas elétricas de baixa tensão utilizando
manufatura aditiva / Thiago Penso Bevilacqua. -- 2026.
110 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2026
Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao Shimano

1. Máquinas elétricas. 2. Isolamento térmico. 3. Motores elétricos -
Controle eletrônico. I. Shimano, Marcos Massao. II. Universidade Federal do
Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 621.313

THIAGO PENSO BEVILACQUA

SISTEMAS DE ISOLAÇÃO PARA MÁQUINAS ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Inovações e Tecnologias da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 27 de fevereiro de 2026

Banca Examinadora:

Dr. Marcos Massao Shimano – Orientador
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Vinicius Abrão da Silva Marques
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Raphael Silva Lins
Instituto Federal de Goiás



Documento assinado eletronicamente por VINICIUS ABRAO DA SILVA MARQUES, Professor do Magistério Superior, em 27/02/2026, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



Documento assinado eletronicamente por MARCOS MASSAO SHIMANO, Professor do Magistério Superior, em 27/02/2026, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



Documento assinado eletronicamente por Raphael Silva Lins, Usuário Externo, em 10/03/2026, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1698482 e o código CRC 3C54E3F2.

À minha esposa, que nos momentos de maior incerteza foi minha âncora. Obrigado por acreditar no meu potencial mesmo quando eu deixei de fazê-lo e por **não me deixar desistir quando o cansaço parecia maior que o sonho**

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Mestrado Profissional em Inovações e Tecnologias, bem como à instituição de ensino, pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico e pelo suporte institucional que permitiram a viabilização desta pesquisa.

À equipe da Bevilacqua Eletrotécnica, pelo suporte técnico e disponibilidade. Agradeço nominalmente a Hernani Elias Costa e Matheus Santos Silva, cujas contribuições na montagem e avaliação da proposta foram fundamentais para a execução deste trabalho.

Ao Sr. Clovis Paiva Bevilacqua, pela generosidade ao ceder a infraestrutura da estufa e permitir as adaptações necessárias para a realização dos ensaios térmicos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Massao Shimano, por transcender o papel acadêmico. Sua mentoria, paciência e apoio humano foram o alicerce necessário para que eu superasse os desafios desta jornada, tornando-se uma referência que vai além da orientação técnica.

Aos meus pais, pelo exemplo de integridade e pelo incentivo constante. Se hoje concluo esta etapa, é fruto da base sólida e dos valores que me transmitiram ao longo de toda a vida.

À minha esposa, Mariana Gabriel da Silva por ser minha companheira incansável. Agradeço pela compreensão diante das horas de ausência, pelo apoio nos momentos de incerteza e por caminhar ao meu lado em cada passo desta conquista. Esta vitória é, também, sua.

RESUMO

Motores elétricos são de grande importância para indústria, sendo a forma motriz mais utilizada. Após algum tempo podem ocorrer falhas, ocasionando o reparo dessas máquinas elétricas, sendo uma das etapas a troca do sistema de isolamento. Atualmente, em grande parte das oficinas de reparo é utilizado um processo manual, que causa baixa produtividade e pouca repetibilidade. Dentre as tecnologias que tem potencial e podem contribuir para automação dos processos de fabricação que não tem escala, é a manufatura aditiva. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar a aplicação da manufatura aditiva (MA) na construção de sistemas de isolamento, especialmente da isolamento de ranhura. Para isso, foi feita a prototipagem de isolantes fabricados usando a técnica *Fused Filament Fabrication* (FFF), posteriormente, foi feita a avaliação da montagem dos isolantes em conjunto com as bobinas. Os materiais selecionados foram ABS, poliamida 6 (PA6), PETG e TRITAN®. Esses materiais tiveram sua estabilidade térmica avaliada através do estudo da alteração do módulo de elasticidade, do limite de escoamento e do limite de resistência à tração quando expostos à temperatura de 105 °C por 500, 1000 e 2000 horas. Foi constatado que o PA6 foi o único material aprovado na prototipagem, entretanto ele apresentou um envelhecimento das características mecânicas e de massa severas, essa mesma degradação foi encontrada para o ABS. Portanto os materiais avaliados não são adequados para aplicação em sistema de isolamento de máquinas elétricas. Apesar de falhar no ensaio de montagem o TRITAN® apresentou uma excelente estabilidade térmica, indicando uma possível aplicação em outros tipos de máquinas.

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva, Máquinas elétricas, Sistemas de Isolação.

ABSTRACT

Electric motors are a key asset in modern industry; they are the most used driving form. After time, failures may occur, thus making it necessary to repair these electrical machines, one of the steps being the replacement of the insulation system. Currently, most repair shops use a manual process, which results in low productivity and little repeatability. Among the technologies that have the potential to contribute to the automation of manufacturing processes is additive manufacturing. Therefore, the objective of this work was to verify the application of additive manufacturing (3D printing) in the construction of insulation systems, especially slot insulation. For this, prototyping of insulators was conducted using the Fused Filament Fabrication (FFF) technique, and subsequently, the assembly of the insulators together with the coils was evaluated. The selected materials were ABS, **polyamide 6 (PA6)**, PETG, and TRITAN®. These materials had their thermal stability studied by examining changes in the modulus of elasticity, yield strength, and tensile strength when exposed for 500, 1000, and 2000 hours at 105 °C. It was found that PA6 was the only material approved for prototyping and that TRITAN® has excellent thermal stability.

Keywords: Additive manufacturing, Electrical Machines, Insulation Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – VISTA EM CORTE DO MOTOR.	18
FIGURA 2 - FILME ISOLANTE CLASSE F.....	19
FIGURA 3 - MÉTODO DE FABRICAÇÃO ATUAL.	20
FIGURA 4 - ISOLANTES INSTALADOS NO MOTOR.	21
FIGURA 5- VISTA EM CORTE DE RANHURA DO ESTATOR	21
FIGURA 6 – ESTATOR DE MÁQUINA ELÉTRICA.....	28
FIGURA 7- DOBRA EXECUTADA NO ISOLANTE TRADICIONAL.	29
FIGURA 8 – VISTA GERAL DA PRIMEIRA VERSÃO.....	30
FIGURA 9 -DETALHE DO ENCAIXE EIXO PLANO XY A DIREITA E XZ ESQUERDA	30
FIGURA 10 – DETALHE DO CAMINHO DE IMPRESSÃO DA VERSÃO 1.....	31
FIGURA 11 – VERSÃO 4 DO ISOLANTE.	32
FIGURA 12 – VERSÃO 4 ISOLANTE FABRICADO EM ABS.	32
FIGURA 13 – AMOSTRA IMPRESSA INCORRETAMENTE.	33
FIGURA 14 - ESTUFA REFORMADA.	36
FIGURA 15 - ESQUEMA DE IMPLEMENTAÇÃO ARDUINO	37
FIGURA 16 - ARDUINO MONTADO NA ESTUFA.....	37
FIGURA 17 - VEDAÇÃO ADICIONAL NA ESTUFA	39
FIGURA 18 - DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS NA ESTUFA E SENSOR DE TEMPERATURA.	40
FIGURA 19 - DIMENSIONAL DAS AMOSTRAS USADAS	41
FIGURA 20 - ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO UPRIGHT, ON-EDGE E FLAT.	42
FIGURA 21 - AMOSTRAS DE CORPOS DE PROVAS DE ABS NUMERADAS NO SUPORTE.	44
FIGURA 22 - MONTAGEM DAS GARRAS NA MÁQUINA DE TESTE UNIVERSAL.	45
FIGURA 23 - ESTATOR COM ISOLANTES DE RANHURA MONTADO LADO OPOSTO A LIGAÇÃO	47
FIGURA 24 - DESCOLORAÇÃO DO MATERIAL AO SE FLEXIONAR.....	48
FIGURA 25 – MOSAICO DO TESTE DE MONTAGEM COM ABS	48
FIGURA 26 - ISOLANTE FECHADO	49
FIGURA 27 - FIOS FORA DA ISOLAÇÃO AO COLOCAR AS BOBINAS.....	49
FIGURA 28 - ISOLANTE ROMPIDO.....	50
FIGURA 29 - DETALHE DO ISOLANTE QUE FALHOU.	50
FIGURA 30 - GRUPO DE BOBINAS MONTADO COM PA6	51
FIGURA 31 - TRÊS GRUPOS MONTADOS COM PA6.....	51
FIGURA 32 - PARTE INFERIOR COM PA6	52
FIGURA 33 – DEFORMAÇÃO PERMANENTE DO PETG.....	52

FIGURA 34 - FALHA PETG.....	53
FIGURA 35 - TRAVAS EM PETG.....	53
FIGURA 36 - DETALHE DAS TRAVAS EM PETG.....	54
FIGURA 37 - TRAVAS TRITAN®.....	55
FIGURA 38 - PARTE INFERIOR TRITAN®	55
FIGURA 39 - COMPARATIVO VISUAL PA6	57
FIGURA 40 - COMPARATIVO VISUAL ABS.....	57
FIGURA 41 - COMPARATIVO VISUAL TRITAN®	58
FIGURA 42 - COMPARATIVO VISUAL PETG	59
GRÁFICO 1 - QQ PLOT	61
GRÁFICO 2 - BOX PLOT.....	62
GRÁFICO 3 - TENSÃO X DEFORMAÇÃO DO MATERIAL ABS	63
GRÁFICO 4 - TENSÃO X DEFORMAÇÃO PA6	64
GRÁFICO 5 - TENSÃO X DEFORMAÇÃO PETG.....	65
GRÁFICO 6 - TENSÃO X DEFORMAÇÃO TRITAN®	66
QUADRO 1 - CLASSES TÉRMICAS	22
QUADRO 2 - SÍNTESE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE MONTAGEM.	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉRMICAS DE POLÍMEROS USADOS EM FFF.	25
TABELA 2 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA O TESTE QUALITATIVO	33
TABELA 3 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO ENSAIO DE ESTABILIDADE TÉRMICA.	41
TABELA 4 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA A EXPOSIÇÃO TÉRMICA	42
TABELA 5 - DIVISÃO DOS GRUPOS EXPERIMENTAIS.	43
TABELA 6 - RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA MASSA.	59
TABELA 7 - RESULTADOS D'AGOSTINO-PEARSON	60
TABELA 8 - RESUMO DA ANOVA DOIS FATORES PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE	67
TABELA 9 – VALORES MÉDIOS PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa).	67
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS PARA LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa).	68
TABELA 11 - RESUMO DA ANOVA DOIS FATORES PARA O LIMITE DE ESCOAMENTO	69
TABELA 12 - RESUMO DA ANOVA DOIS FATORES PARA O LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ...	69
TABELA 13 - VALORES MÉDIOS PARA LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa).....	70
TABELA 14 - COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) COM A LITERATURA	73
TABELA 15 - COMPARATIVO DOS RESULTADOS DO LIMITE DA RESISTÊNCIA (MPa) COM A LITERATURA	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURA E SIGLAS

ABS	Estireno de acrilonitrilo e butadieno
DP	Descarga Parcial
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
MA	Manufatura Aditiva
PA6	Poliamida 6
PAI	Poliamida-Imida
PEEK	Poliéter-étercetona
PEI	Polyetherimide
PETG	Tereftalato de polietileno modificado com Ciclohexanodimetanol
PFA	Perfluoroalcoxi
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PI	Poliimida
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SLS	<i>Stereolithography</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO PRINCIPAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	17
2.2	MANUFATURA ADITIVA.....	24
2.3	MANUFATURA ADITIVA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	VERIFICAÇÃO QUALITATIVA DA FABRICAÇÃO E POSTERIOR MONTAGEM DOS ISOLANTES DE RANHURA	28
3.2	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DOS MATERIAIS	34
3.2.1	Adequação de uma estufa	35
3.2.2	Estudo do comportamento mecânico.....	41
3.2.3	Grupos experimentais	43
3.2.4	Ensaio mecânico	44
4	RESULTADOS.....	47
4.1	MONTAGEM DOS ISOLANTES	47
4.1.1	Material ABS.....	47
4.1.2	Material ABS recozido	48
4.1.3	Material PA6	50
4.1.4	Material PETG	52
4.1.5	Material TRITAN®.....	54
4.1.6	Síntese dos Resultados.....	56
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	56
4.2.1	Análise Visual e Macroscópica	56
4.2.2	Variação de Massa	59
4.2.3	Verificação da normalidade dos resíduos dos experimentos.	60
4.2.4	Comportamento Tensão-Deformação.....	62
4.2.5	Módulo de elasticidade.....	67
4.2.6	Limite de escoamento	68
4.2.7	Limite de resistência à tração	69
5	DISCUSSÃO	71
6	CONCLUSÃO	77

6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE DO DATALOGGER.....	84
	APÊNDICE B - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO ABS.....	88
	APÊNDICE C - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PA6.....	93
	APÊNDICE D - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PETG.....	98
	APÊNDICE E - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO TRITAN ®	103
	APÊNDICE F - DADOS AMOSTRAS ABS.....	108
	APÊNDICE G - DADOS AMOSTRAS PA6	109
	APÊNDICE H - DADOS AMOSTRAS PETG	110
	APÊNDICE I - DADOS AMOSTRAS TRITAN®.....	111
	ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA ESTUFA.....	112

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que os motores elétricos sejam responsáveis por cerca de 68% do consumo de energia elétrica no setor industrial que, por sua vez, representa a maior fatia do consumo total do país. Adicionalmente, a maior parte das fontes da energia elétrica é gerada usando máquinas elétricas rotativas, os geradores (Empresa de Pesquisa Energética, 2025; PNE 2030 - Eficiência Energética, 2007). Dada essa relevância econômica e produtiva das máquinas elétricas (motores e geradores) a garantia de disponibilidade operacional desses ativos e a eficiência dos processos de manutenção tornam-se fatores críticos para o setor e a sociedade.

Segundo a WEG (2023), o sistema de isolamento é o componente mais sensível da máquina, sendo responsável por garantir a rigidez dielétrica necessária entre os condutores e o núcleo magnético sob severas condições de operação. Wrobel *et al.* (2015) corroboram essa visão, destacando que a degradação dos materiais isolantes submetidos a estresses térmicos, elétricos e mecânicos constitui uma das principais causas de falhas prematuras em máquinas rotativas. Nesse cenário, a compreensão do comportamento desses materiais, especialmente sob regimes de temperatura elevada, dita qual será a vida útil intrínseca desse componente.

As características que definem o desempenho de um sistema de isolamento, como a rigidez dielétrica e a resistência à tração, são interdependentes e determinam a classe térmica do conjunto. Segundo a norma ABNT NBR IEC 60216 (2017b), a classe térmica estabelece a temperatura máxima de operação para uma vida útil de, no mínimo, 20.000 horas (WEG, 2023). Embora a função primária desses materiais seja elétrica, a sua integridade mecânica atua como um precursor da falha funcional; a fragilização estrutural e a perda de resistência à tração antecedem o rompimento dielétrico. Portanto, a caracterização técnica do impacto térmico sobre as propriedades mecânicas é essencial para fundamentar o conhecimento sobre a durabilidade e a confiabilidade do sistema isolante em condições reais de serviço.

Apesar da criticidade do sistema de isolamento, a sua substituição em processos de manutenção corretiva ainda enfrenta grandes desafios de padronização e eficiência. Quando ocorre uma falha elétrica que compromete a isolamento, o impacto vai além do dano técnico, resultando em paradas não programadas e elevados prejuízos financeiros (HEMMATI; WU; EL-REFAIE, 2019). Na indústria de reparos, a necessidade de reconstrução completa desses sistemas esbarra na grande variabilidade de geometrias e potências dos equipamentos, o que historicamente limitou a implementação de soluções automatizadas. Como consequência, as etapas de confecção e montagem dos novos componentes isolantes permanecem

predominantemente manuais e artesanais (TIWARI et al., 2021), introduzindo variabilidades que podem impactar a repetibilidade e a confiabilidade final do ativo reparado.

A grande dependência do trabalho manual na indústria de reparo de máquinas elétricas gera desafios tanto para a produtividade quanto para o controle de qualidade e repetibilidade do processo (Tiwari *et al.*, 2021). Por outro lado, a manufatura aditiva apresenta-se como um método de fabricação adaptável a essas condições de variabilidade. Nesse contexto, destaca-se a tecnologia *Fused Filament Fabrication* (FFF) por ser a modalidade mais acessível de impressão 3D (Kafle *et al.*, 2021; Szabó; Fodor, 2022). A aplicação dessa tecnologia permite a minimização da atividade manual de construção das partes da máquina elétrica, trazendo repetibilidade aos componentes fabricados. Complementarmente, a integração de ferramentas de design paramétrico possibilita a geração automatizada de geometrias a partir de variáveis dimensionais do estator.

Apesar do crescente número de pesquisas sobre a aplicação da manufatura aditiva em máquinas elétricas, a literatura concentra-se majoritariamente na fabricação de partes ativas, como núcleos ferromagnéticos e enrolamentos, ou no desenvolvimento de novos equipamentos (KAREEM; MICHAEL, 2022; SELEMA et al., 2023). Nota-se uma lacuna significativa quanto ao uso dessa tecnologia especificamente no reparo de ativos e na substituição de isolantes convencionais por componentes impressos via FDM. Além disso, embora existam estudos de caracterização mecânica e elétrica de polímeros aditivados, há escassez de relatos sobre o comportamento desses materiais sob exposição prolongada ao calor. Essa carência de dados experimentais de envelhecimento térmico representa um impedimento para a validação técnica e a implementação prática da impressão 3D em sistemas de isolamento industriais.

Considerando tal cenário, emerge a seguinte questão de pesquisa: é viável aplicar a tecnologia de Manufatura Aditiva (MA) nos processos de reparo do sistema de isolamento de máquinas elétricas? No intuito de preencher essa lacuna, este trabalho se propõe a investigar as alterações de massa e propriedades mecânicas de tração além de realizar prototipagem funcional de um estator de máquina elétrica utilizando os materiais ABS, TRITAN®, Poliamida 6 (PA6) e PETG. A escolha das propriedades mecânicas como métrica de análise justifica-se por serem indicadores precoces da degradação térmica que antecede a falha elétrica, conforme os preceitos da norma IEC 60216. Cabe ressaltar que este estudo se posiciona como uma etapa inicial, avaliando o comportamento desses materiais sob uma temperatura específica de envelhecimento. Dessa forma, busca-se fornecer dados experimentais preliminares que auxiliem na futura classificação térmica completa desses materiais, validando o potencial técnico desta tecnologia para o setor de reparos.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal desse trabalho é verificar a viabilidade da aplicação da Manufatura Aditiva tipo FFF na construção de sistemas de isolamento, aplicados no reparo de máquinas elétricas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o comportamento térmico dos polímeros ABS, Tritan, PA6 e PETG processados por tecnologia FFF, sob condições de envelhecimento em temperatura controlada
- Quantificar a degradação dos materiais por meio da análise da variação de massa e da resistência à tração
- Avaliar a precisão dimensional e a viabilidade construtiva das partes isolantes através da prototipagem funcional de um estator de máquina elétrica.
- Consolidar uma base de dados experimental preliminar que fundamente futuras etapas de classificação térmica e padronização do fluxo de reparo

2 REFERENCIAL TEÓRICO

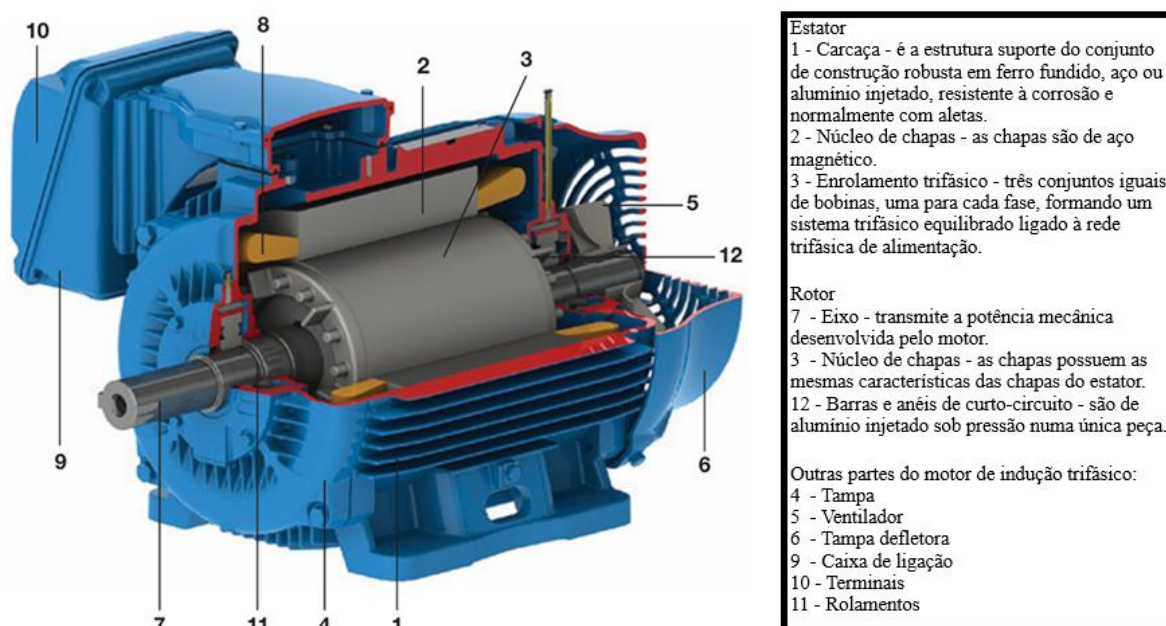
2.1 SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

As máquinas elétricas desempenham um papel central na matriz energética e industrial moderna. Fundamentalmente, são dispositivos que realizam a conversão eletromecânica de energia, operando baseado nos princípios da indução eletromagnética descritos por Faraday e Lenz. As máquinas elétricas se dividem em dois grandes grupos: as estáticas e as dinâmicas. Máquinas estáticas são dispositivos que operam baseados na indução eletromagnética sem partes móveis, tendo o transformador como principal exemplo. Já as máquinas dinâmicas são dispositivos que realizam a conversão bidirecional entre energia elétrica e mecânica. Quando a conversão ocorre do sistema elétrico para o mecânico, o dispositivo opera como motor. No sentido oposto, convertendo energia mecânica em elétrica, opera como gerador. A grande maioria das máquinas dinâmicas são rotativas (Kingsley; Umans; Fitzgerald, 2006).

Sob a ótica construtiva, o motor de indução é composto fundamentalmente por dois conjuntos coaxiais separados por um entreferro: uma parte estática, denominada estator, e uma parte móvel, o rotor. O rotor, montado sobre um eixo apoiado em mancais, é frequentemente do tipo "gaiola de esquilo" devido à sua robustez mecânica e baixo custo, consistindo em barras condutoras curto-circuitadas por anéis nas extremidades.

A Figura 1 demonstra a vista em corte onde o estator é o conjunto formado pela carcaça (1), núcleo de estator (2) e enrolamento (8). Já o rotor é formado pelo eixo (7), que faz a entrega de energia mecânica a carga acionada, pelo núcleo do rotor (3) e pela gaiola de esquilo (12). As demais marcações são referentes as peças acessórias do motor que garantem que ele opere conforme as especificações.

Figura 1 – Vista em corte do motor.



Fonte: Adaptado de WEG (2023)

No entanto, é no estator que reside a maior complexidade construtiva e a maior vulnerabilidade do equipamento. O núcleo estatórico, Figura 1(2), é formado pelo empilhamento de chapas de aço magnético (laminadas para redução de perdas), contendo ranhuras onde são alojados os enrolamentos responsáveis pela criação do campo magnético girante.

É justamente no alojamento desses enrolamentos que se encontra o sistema de isolamento, foco deste estudo. Conforme detalha o guia técnico da WEG (2023), os motores modernos são construídos utilizando fios de cobre esmaltados, onde a isolamento entre espiras adjacentes é garantida por camadas poliméricas de esmalte. Para isolar eletricamente as bobinas do núcleo de ferro (potencial de terra), utilizam-se laminados flexíveis conhecidos como "isolação de ranhura". Além disso, Wrobel *et al.* (2015) destacam que, após a inserção dos enrolamentos, todo o conjunto é submetido a um processo de impregnação com verniz ou resina. Este último componente tem função tripla: preencher os vazios de ar (evitando descargas parciais), aglutinar mecanicamente os fios (reduzindo vibração) e facilitar a troca térmica entre o cobre e o ferro.

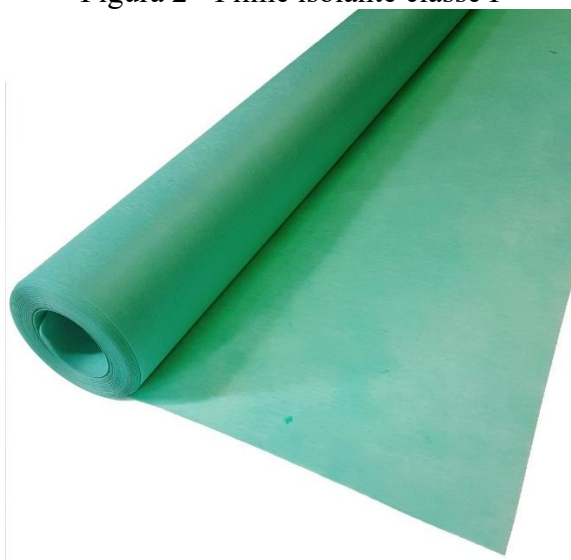
Independentemente da classificação quanto à mobilidade de suas partes, a materialização física de qualquer dispositivo eletromagnético converge para uma estrutura comum. Para viabilizar a interação entre campos elétricos e magnéticos, princípio base da

conversão de energia, é necessária a integração de materiais com propriedades físicas distintas e complementares. A definição de Stone *et al.* (2014) estabelece a tríade de materiais essenciais (cobre, aço, isolante). No contexto deste trabalho, é fundamental detalhar como o sistema de isolamento interage com os demais: ele deve suportar o calor gerado pelo cobre (térmico), as vibrações do núcleo magnético (mecânico) e os campos elétricos operacionais (dielétrico).

No trabalho feito por Hemmati *et al.* (2019), os autores reuniram informações relevantes sobre sistemas de isolamento. Outra obra é o livro “*Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*” (Stone *et al.*, 2014) que agrega muitas informações relevantes ao estado da arte. Ambas destacam que existem dois tipos de enrolamentos em máquinas elétricas, os enrolamentos aleatórios e os enrolamentos ordenados. Devido ao fato de os enrolamentos aleatórios serem de mais fácil produção, eles são usados em máquinas de baixa tensão. Entretanto, os enrolamentos aleatórios não são aplicados em máquinas de média e alta tensão devido à possibilidade de uma grande diferença de potencial elétrico em cada condutor superando a capacidade de isolamento entre uma espira e outra.

Os materiais usados na isolação de ranhura, trava e a separação de bobinas em máquinas elétricas de baixa tensão são usualmente construídas de materiais poliméricos como Poliimida (PI), Poliamida-Imida (PAI) e Polieteterimida (PEI) usualmente fornecidos em bobinas de 1 metro de comprimento, Figura 2. Apesar desses materiais serem suscetíveis a falhas devido a descargas parciais (DP) é destacado por Hemmati *et al.* (2019) que polímeros nano compostos podem melhorar essas características (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021; Hemmati; Wu; El-Refaie, 2019).

Figura 2 - Filme isolante classe F

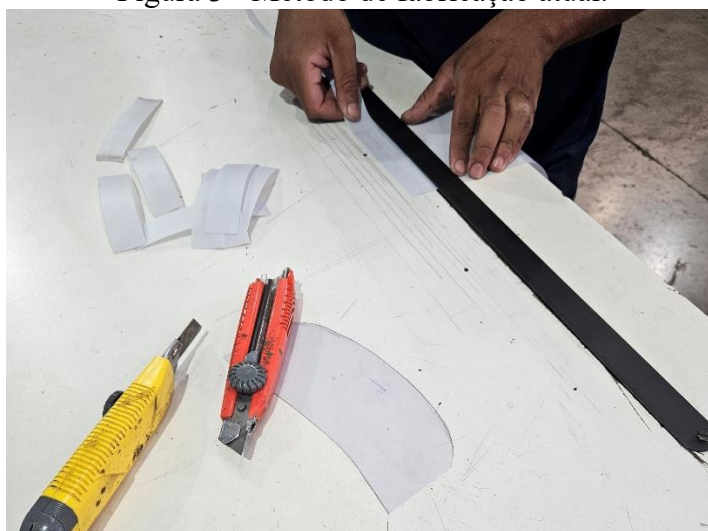


Fonte: CONDUFIO (s.d.)

Conforme descrito por Tiwari *et al.* (2021), as oficinas de reparo de máquinas elétricas raramente apresentam automação em seus processos, devido à alta variabilidade dos equipamentos recebidos (diferentes fabricantes, potências e anos de fabricação). Diante dessa heterogeneidade, o trabalho manual torna-se um requisito indispensável, permitindo que o técnico adapte o processo de reparo às especificidades de cada estator.

Esse cenário aplica-se diretamente à confecção dos componentes do sistema de isolamento (isolantes de ranhura, separadores de fase e cunhas). Atualmente, trata-se de um processo artesanal, no qual o técnico dimensiona e recorta o material a partir de rolos ou folhas de filme isolante, utilizando ferramentas de corte convencionais. A Figura 3 ilustra o ferramental típico empregado nessa etapa, que inclui desde tesouras e estiletes até guilhotinas de papel adaptadas.

Figura 3 - Método de fabricação atual.

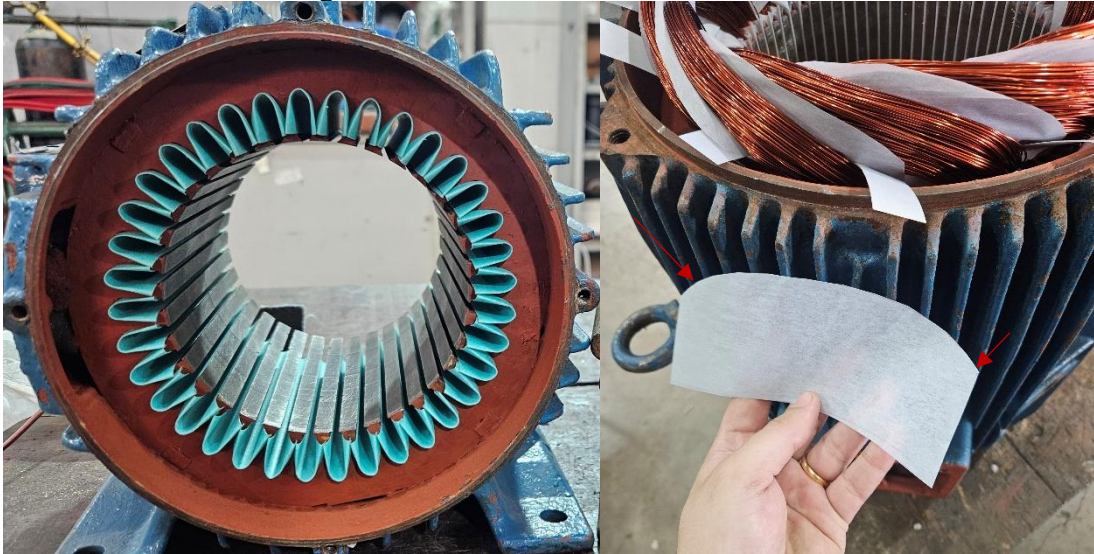


Fonte: Acervo Bevilacqua Eletrotécnica. (2025)

Devido à natureza manual do corte, muitas vezes realizado sem o auxílio de gabaritos de precisão, a variabilidade dimensional das peças é inerente ao processo. Essa inconsistência pode resultar em isolantes inaptos para a montagem, conforme demonstrado na Figura 4. Tal variabilidade não apenas gera desperdício de matéria-prima, mas também introduz riscos de falha dielétrica caso um isolante com dimensões incorretas deixe áreas do cobre expostas ou crie pontos de tensão mecânica excessiva.

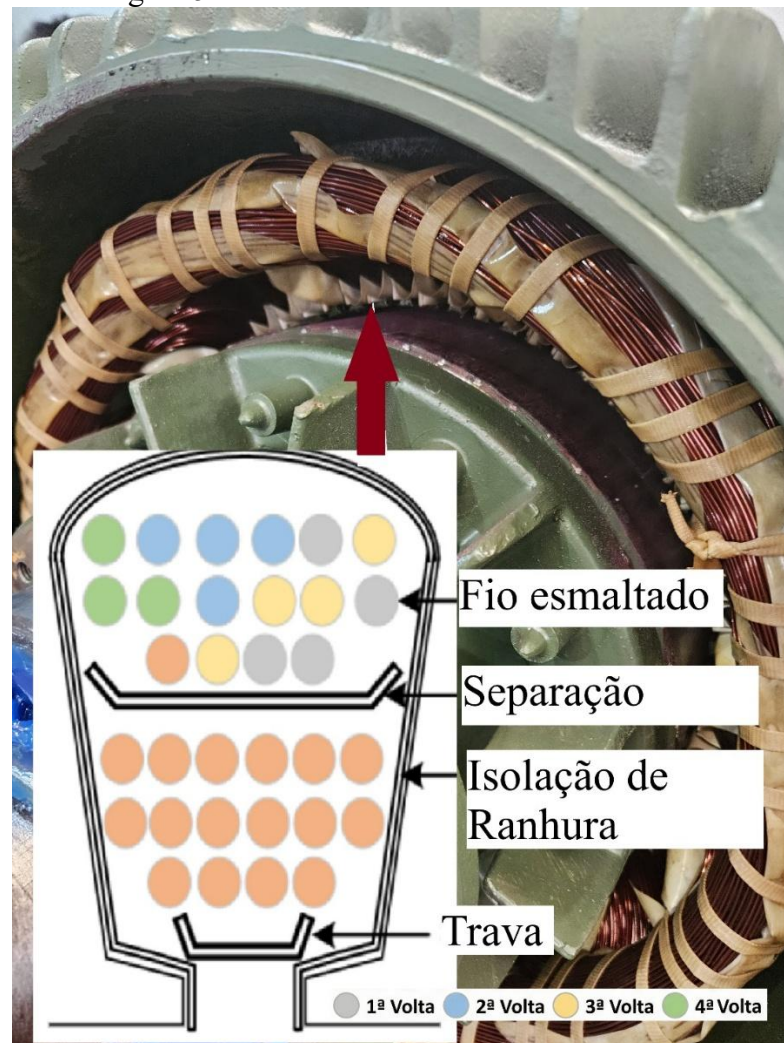
A Figura 5 mostra um estator já bobinado com detalhe nos componentes de isolamento, onde também pode ser visto o sistema de enrolamentos aleatórios citado anteriormente. Nessa imagem pode-se verificar que se as dimensões dos isolantes ficarem menores pode-se ocasionar contato entre as bobinas e o núcleo, gerando uma falha.

Figura 4 - Isolantes instalados no motor.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024. Nota, setas a direita indicam assimetria do isolante.

Figura 5- Vista em corte de Ranhura do Estator



Fonte: Adaptado de (Hemmati *et al.*, 2014)

Como sintetizado em WEG (2023), as normas que tratam de materiais de isolamento são a ABNT NBR 60216 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017b) e a UL 746B (Underwriters Laboratories, 2024). Já os sistemas de forma mais ampla são abordados nas UL 1446, IEC 60505 e IEEE 117 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015; International Electrotechnical Commission, 2011; Underwriters Laboratories, 2020). Por sua vez, a ABNT NBR IEC 60085 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017a) trata tanto de sistemas quanto de materiais de isolamento. Essas normas trazem informações sobre requisitos da isolamento que podem ser aplicados em várias áreas e estão presentes nos métodos de ensaios para esses sistemas e materiais.

A ABNT NBR IEC 60085 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017a) e a UL 1446 (Underwriters Laboratories, 2020) trazem especificações térmicas, sendo estas definidas em classes, nesse trabalho será utilizada a norma aplicável ao território brasileiro, no entanto, existe uma equivalência apresentado em WEG (2023). As classes térmicas são sintetizadas na ABNT NBR IEC 60085 e estão mostradas no Quadro 1

Quadro 1 - Classes térmicas

Temperatura (°C)	Classe de Temperatura
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R

Fonte: (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017a) Adaptado

A classe térmica do sistema de isolamento é definida pela máxima temperatura em que o equipamento pode alcançar no seu ponto mais quente, ao estar operando em carga nominal, sem diminuição da vida útil. Essa classificação é usualmente feita de acordo com os sistemas conhecidos, caso um sistema ou material novo esteja sendo estudado pode-se estimar a vida útil desse material a partir da extrapolação da curva de durabilidade térmica. O valor dessa vida útil é usualmente de 20 mil horas, sendo definido na ABNT IEC 60216 (2017b).

A base científica para a aceleração dos ensaios de durabilidade reside na cinética química, especificamente na Equação de Arrhenius. Esse princípio estabelece que a velocidade

das reações químicas que degradam o polímero aumenta exponencialmente com o acréscimo da temperatura. Na prática da engenharia de isolantes, essa correlação permite traduzir o tempo de falha em diferentes patamares térmicos, sendo expressa simplificada pela relação:

$$L = A e^{B/T} \quad (1)$$

Onde L representa a vida útil, T é a temperatura absoluta em Kelvin, e A e B são constantes características do material. Essa fundamentação matemática é o que viabiliza a realização de ensaios em temperaturas superiores à de operação (envelhecimento acelerado), permitindo a extrapolação dos dados para prever o comportamento do material em condições nominais de serviço, reduzindo drasticamente o tempo necessário para a coleta de dados experimentais.

O estudo publicado por Alghamdi (2020) demonstra a aplicação da extrapolação de Arrhenius, para determinar a durabilidade do polietileno natural reticulável (XLPE). Especificamente, a norma 60216-2 (2017c) informa os critérios de ensaios, sendo alguns deles: resistência à tração, tensão disruptiva, perda de massa e alongamento até a ruptura. A adoção de parâmetros mecânicos para a avaliação de um componente isolante justifica-se pelo fato de que a fragilização estrutural do polímero é, frequentemente, o precursor da falha elétrica. A perda de flexibilidade e o surgimento de fissuras no material isolante permitem a ocorrência de arcos elétricos e a consequente ruptura dielétrica. Por essa razão, a norma sugere pontos limites (end-points) que servem como indicativos de fim de vida útil, sendo o critério de 50% da resistência à tração inicial um dos parâmetros técnicos mais utilizados para essa caracterização.

Para a aplicação correta da extrapolação em conformidade com as diretrizes da norma ABNT NBR IEC 60216, é mandatória a seleção de, no mínimo, três temperaturas de envelhecimento distintas. A norma estabelece ainda que a temperatura mais elevada deve resultar em um tempo até o ponto final (falha) não inferior a um limite mínimo, geralmente acima de 100 ou 500 horas, a fim de evitar erros estatísticos por degradação acelerada excessiva. Consequentemente, o atendimento a esses critérios pressupõe um conhecimento prévio robusto sobre a cinética de degradação térmica do material em estudo, dados que muitas vezes inexistem na literatura para polímeros processados via manufatura aditiva. Portanto, para se avançar na questão de pesquisa é necessário entender a dinâmica de envelhecimento dos materiais de manufatura aditiva. Sendo esse avanço o objetivo da experimentação do comportamento mecânico dos materiais, visando assegurar a durabilidade dos polímeros empregados na tecnologia FFF para construção da isolação de ranhura.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura aditiva (MA), também conhecida como Impressão3D, pode ser executada de várias maneiras, ou seja, por várias técnicas diferentes. O Trabalho de Kafle *et al.* (2021) traz informações sobre os vários métodos de manufatura aditiva, focando especialmente em *Selective Laser Sintering* (SLS), *Stereolithography* (SLS) e *Fused Filament Fabrication* (FFF). De maneira geral, essas técnicas formam um objeto construindo camada sobre camada de material.

Kafle *et al.* (2021) descrevem que os materiais possíveis dentro dos vários métodos de manufatura aditiva são metais, polímeros, polímeros compostos, cerâmicas e cimento. Dependendo do material usado pode-se agrupar em três diferentes categorias: sólido, em pó e líquido. Desses materiais os polímeros se destacam pela grande aplicabilidade devido as variadas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, de resistência ao fogo e de biocompatibilidade. Sendo a tecnologia mais aplicada de MA de polímeros a FFF.

Nessa tecnologia, a orientação das camadas impressas tem grande influência nas propriedades mecânicas da peça, além disso fatores ambientais como umidade e temperatura também tem um papel relevante. Em complemento a esses fatores, aspectos de configuração da impressora como calibração da mesa, diâmetro do bico e variáveis do processo de impressão como temperatura do bico, temperatura da mesa, altura da camada, largura de extrusão, velocidade de extrusão e velocidade de movimentação afetam as propriedades dos objetos produzidos na MA. É destacado que quanto maior a altura da camada maior a resistência, esse efeito também é atingido quando se aumenta o tamanho do bico de impressão (Kafle *et al.*, 2021).

Os polímeros podem ser divididos em amorfos e semicristalinos. Os polímeros amorfos têm uma temperatura a qual se amolecem e ficam em um estado vítreo, essa temperatura é denominada de temperatura de transição vítrea. No entanto, os polímeros amorfos não têm uma temperatura fixa de fusão, já os semicristalinos possuem uma temperatura de fusão (T_f) fixa, mas não tem uma temperatura de transição vítrea (T_v) fixa. Na tecnologia FFF é favorecido o uso de polímeros amorfos, na Tabela 1 estão reunidos os filamentos termoplásticos poliméricos mais comuns para tecnologia FFF.

Tabela 1- Especificações térmicas de polímeros usados em FFF.

Material	T _f (°C)	T _v (°C)	Temperatura de Impressão (°C)
ABS	220	105	230-250
PLA	150	60	200-235
PETG	255	75	160-210
PP	165	-10	230-260
PA6	215	46	419,8
HIPS	90	180	230-250
ASA	250	100	220-250
TRITAN®	260-290	110	260-280

Fonte: (Filamento TRITAN Preto - 3D Lab - Melhores filamentos, [s. d.]; Temperaturas de transição de vidro de filamento 3D, [s. d.]; Kafle *et al.*, 2021; Portela, 2017).

Além dos parâmetros térmicos, os parâmetros elétricos são de igual importância para o sistema de isolamento, alguns estudos já foram realizados nesse aspecto. Os polímeros normalmente aplicados na tecnologia FFF geralmente são isolantes, e têm em suas folhas de dados parâmetros de resistência dielétrica. As propriedades de isolamento foram publicadas em estudos pelos autores Li *et al.*(2018) e Monzel *et al.* (2015). Esses estudos demonstram que alguns polímeros como ABS, PLA entre outros apresentam propriedades dielétricas que permitem sua aplicação, desde que respeitados os limites de rigidez do material e a orientação das camadas. Além disso, no trabalho de Monzel *et al.* (2015), é demonstrada a variação conforme a direção de impressão do material.

Os trabalhos de Li *et al.* (2018) e Sekula *et al.* (2023) mostraram que partes construídas com a técnica FFF tem rugosidade e espaços internos. Quando considerada a montagem do sistema de isolamento essas rugosidades e espaços internos podem elevar a resistência térmica do sistema, dificultando a dissipação de calor devido à baixa condutividade térmica do ar presente nos vazios internos, conforme destacado por Wrobel *et al.* (2015) em seus estudos dos materiais já usados. Esses espaços e rugosidade também podem afetar as características de desempenho elétrico como a ocorrência de descargas parciais no material impactando a vida útil do sistema de isolamento (Hemmati; Wu; El-Refaie, 2019).

No estudo de Tichy *et al.* (2019) foram ensaiados os materiais ABS, ASA, PP e PET-G para avaliar esses materiais nas aplicações de média e alta tensão. Apesar desse trabalho focar em máquinas de baixa tensão, dessa referência é possível extrair que o PLA não é um material indicado para aplicações de isolamento elétrica, essa tese é também encontrada em Li *et al.* (2023). Além disso, esse estudo de Tichy *et al.* (2019) concluiu que os materiais estudados ABS e PETG

são os mais adequados quando aplicadas tensão alternada. Outra conclusão do estudo foi que a altura da camada ideal para propriedades elétricas é de 150 μm combinado a um bico de 0,4mm.

O estudo de Veselý *et al.* (2018) aborda os parâmetros elétricos com relação à altura da camada, utilizando os materiais PLA, ABS e PETG nas alturas de 50, 100, 150 e 200 μm . Nesse estudo os autores concluem, com exceção do ABS, quanto maior a altura da camada menor a permissividade da amostra. Já a rigidez dielétrica para as amostras fabricadas com ABS não houve alteração com a altura da camada, já para o PETG quanto maior a altura da camada menor a rigidez dielétrica. Esses autores trazem como conclusões que o ABS é o material mais adequado para isolamento dos materiais estudados, ainda assim todos eles são aplicáveis como isolantes para dispositivos de baixa tensão considerando os parâmetros elétricos da aplicação. Já em relação aos parâmetros de impressão, os autores recomendam que o aumento da resolução de impressão causa um aumento da rigidez dielétrica. Dessa forma, a literatura nos indica que os polímeros de impressão FFF são aplicáveis na construção de dispositivos de isolamento elétrica.

2.3 MANUFATURA ADITIVA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Tendo em vista que a manufatura aditiva é uma tecnologia que recentemente está em difusão, vários pesquisadores estudaram as maneiras em que essa tecnologia pode ser aplicada na fabricação de máquinas elétricas. O artigo de Szabó e Fodor (2022) faz uma revisão extensa da literatura, buscando estudos sobre a aplicação de manufatura aditiva em máquinas elétricas. Os autores tratam da fabricação de todos os componentes de uma máquina elétrica, como materiais magnéticos para fabricação de núcleos, materiais com propriedades magnéticas para construção de eletroímãs para serem aplicados em máquinas síncronas, materiais condutores para fabricação das bobinas, materiais para controle térmico para controlar a temperatura e de materiais isolantes.

Encontra-se na literatura que os isolantes podem ser fabricados de materiais cerâmicos, e que a tecnologia de MA poderia facilitar a confecção de isolantes cerâmicos aplicáveis em máquinas elétricas. Também é sugerido o uso de Poliéter-étercetona (PEEK) para construção de sistemas de isolamento de máquinas, em especial a isolamento de ranhura. Apesar disso, não é citado nenhum trabalho publicado que estuda a aplicação dessa tecnologia para construção de sistemas de isolamento usando FFF (Chen *et al.*, 2019; Wu; El-Refaie, 2019; Zocca *et al.*, 2015). Já empresa (Additive Drives, [s. d.]) faz a construção de motores elétricos de alta performance usando os materiais PAI, PI, PEEK e Perfluoroalcoxi (PFA), mas não é publicado qual metodologia de MA é usada para fabricação dos componentes individuais.

O estudo de revisão de Kareem e Michael (2022) também apresenta as aplicações da MA na construção de máquinas elétricas, da mesma maneira que os estudos de Szabó e Fodor (2022). No entanto, esse estudo sugere a técnica de FFF como adequada para partes de isolamento além de partes estruturais leves. Na seção que aborda a isolamento, esses autores fazem referência a estudos que usam da tecnologia de *Multi Material Printing* em que é construída a bobina e sua isolamento simultaneamente. Para o caso do reparo de máquinas que foram construídas para receber enrolamentos de forma aleatória, essa metodologia não se aplica, conforme a Figura 5 o canal onde é inserida a bobina não permite que essa instalação seja feita, sendo possível somente quando o núcleo já é fabricado para enrolamentos rígidos. Nesse estudo não é apresentado nenhum estudo que trata da tecnologia FDM na construção de isolamento separadamente.

O estudo de Ibrahim e Sergeant (2023) faz uma análise de maturidade tecnológica das várias metodologias de MA, além de apresentar brevemente cada uma das tecnologias. Como nos estudos anteriores são citados estudos que fazem o uso de materiais cerâmicos para criar a isolamento usando a tecnologia *Multi Material Printing*, da mesma forma que nos estudos anteriores a revisão apresenta soluções para a construção integrada do sistema de isolamento junto as bobinas, e isso pode ser aplicado somente em casos em que o estator foi projetado considerando essa metodologia de construção.

Conforme observado na revisão acima, enquanto existem estudos robustos sobre a impressão das partes ativas (ferro e cobre), nota-se uma escassez de dados sobre a integridade mecânica de polímeros impressos atuando como sistema de isolamento sob estresse térmico. Diferente das abordagens que visam a impressão total do motor (citadas anteriormente), esta pesquisa se delimita à substituição dos componentes isolantes convencionais (papéis e cunhas) por polímeros impressos via FDM, mantendo-se o núcleo e enrolamentos tradicionais.

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido na empresa Bevilacqua Eletrotécnica e no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Ele foi dividido em duas grandes partes. Uma foi a verificação qualitativa da fabricação e posterior montagem dos isolantes de ranhura em uma máquina elétrica. E a segunda parte do trabalho foi a análise do comportamento físico e mecânico dos materiais ABS, PA6, PETG e TRITAN® quando expostos ao calor por tempo prolongado.

3.1 VERIFICAÇÃO QUALITATIVA DA FABRICAÇÃO E POSTERIOR MONTAGEM DOS ISOLANTES DE RANHURA

A avaliação qualitativa da fabricação foi executada em uma máquina elétrica da fabricante WEG, com comprimento de pacote eletromagnético de 100 mm, diâmetro interno de 75 mm e 24 ranhuras, comumente empregado em motores de 3 cv de dois polos. O estator usado está mostrado na Figura 6. As dimensões da peça a ser fabricada foram obtidas a partir dos materiais empregados atualmente para o estator (111x28x0,23mm). O modelo CAD foi construído usando o software gratuito Blender.

Figura 6 – Estator de máquina elétrica

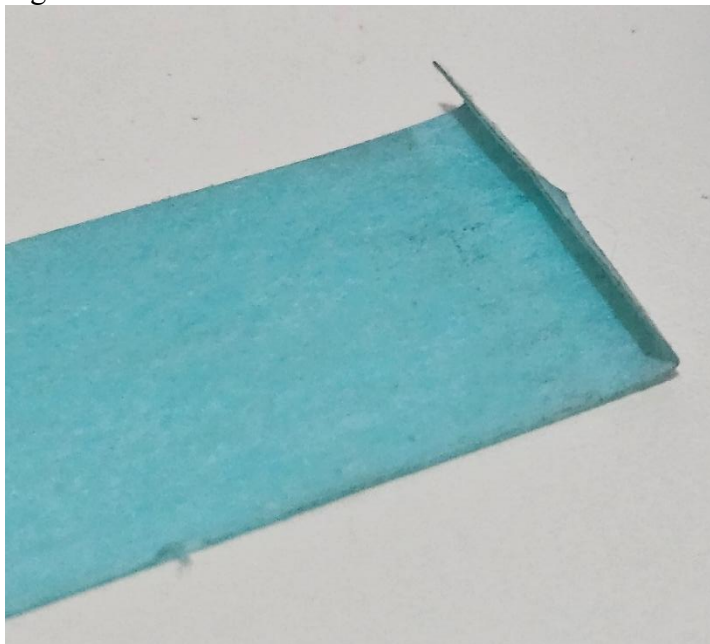


Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024

Usualmente o filme adquirido nos rolos conforme mostrado anteriormente na Figura 2, é cortado manualmente no tamanho similar ao canal. Sendo o objetivo desse trabalho propor uma inovação incremental ao estado da arte. O processo de impressão 3d será estudado de forma a produzir os isolantes de ranhura no tamanho, mas de forma plana, de maneira que será necessário flexionar para inserir na ranhura da mesma forma que atualmente é realizado. Isso foi necessário para facilitar a impressão e reduzir custos.

O primeiro desafio encontrado foi fazer com que o isolante de ranhura permaneça preso no canal no momento da colocação das bobinas. Usualmente isso é feito dobrando-se o material isolante de ranhura em ambas as extremidades conforme mostra a Figura 7. Quando inserido na ranhura essa dobra se expande e impede que o laminado se mova causando exposição do núcleo ferromagnético como mostrado na Figura 4.

Figura 7- Dobra executada no isolante tradicional.



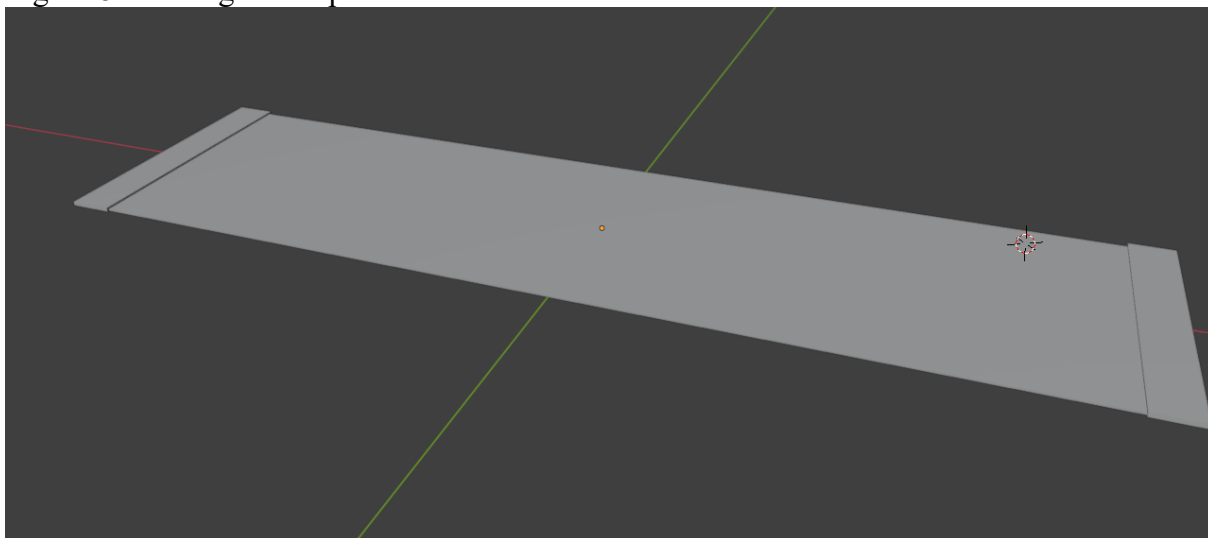
Fonte: elaborado pelo próprio autor

Para solucionar esse problema foi considerado que na parte externa da ranhura o isolante de ranhura seria mais espesso e mais largo, a ideia foi que ele ficasse preso pelas extremidades e usando liberdade da impressão para reduzir o trabalho manual de dobra. A Figura 8 mostra a primeira versão de *design* e a Figura 9 mostra os detalhes adicionados para fixar o isolante de ranhura no canal.

O fluxo de desenvolvimento dos isolantes fundamentou-se no conceito de prototipagem rápida, utilizando revisões iterativas no projeto CAD para validação física imediata. O escopo

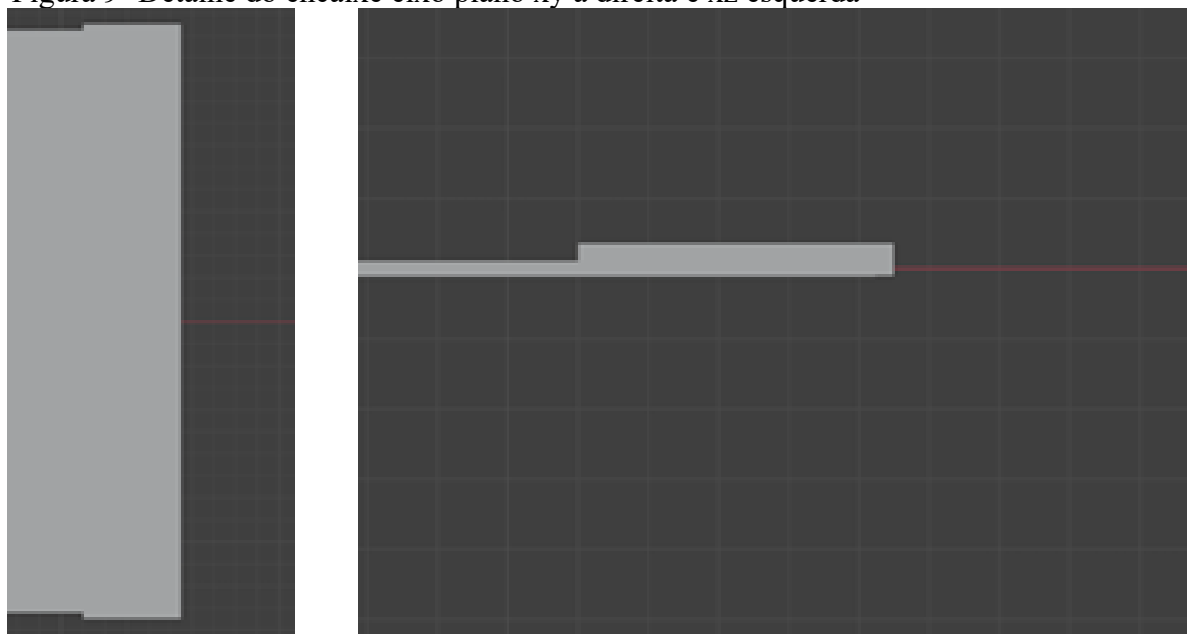
do estudo limitou-se a quatro ciclos de iteração de *design*; inconformidades remanescentes ao final deste ciclo foram registradas para posterior discussão de viabilidade.

Figura 8 – Vista geral da primeira versão



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024

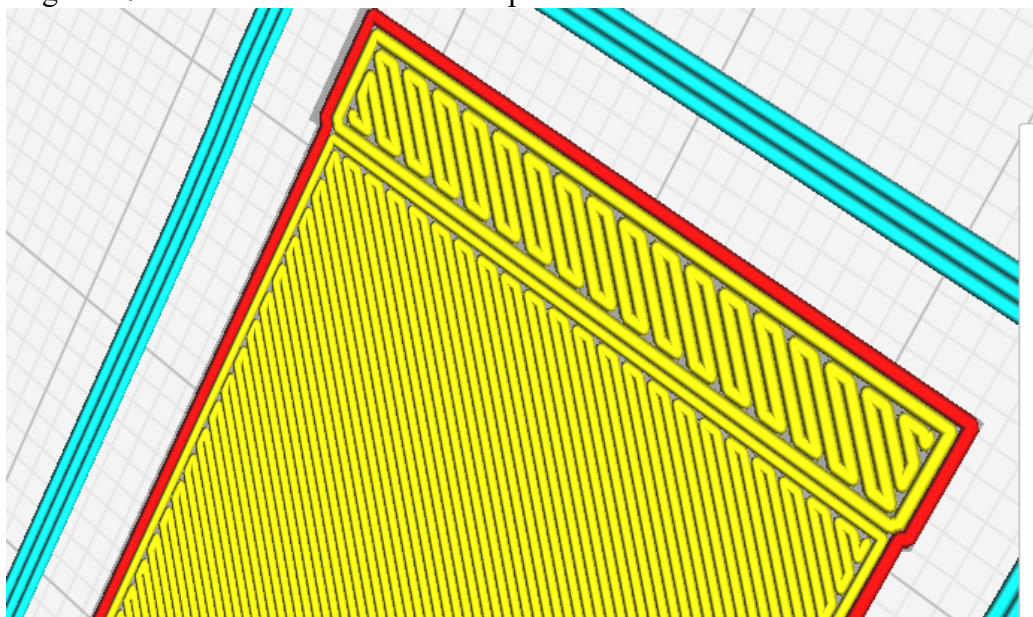
Figura 9 -Detalhe do encaixe eixo plano xy a direita e xz esquerda



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024

Esta versão do isolante mostrou um defeito que prejudica a usabilidade, os formatos feitos para se travar o isolante no canal, fazem com que o software geração do GCODE construísse dois retângulos, conforme mostrado na Figura 10. Nesse ponto, durante a colocação das bobinas é gerado um esforço que faz com que ela se quebre facilmente.

Figura 10 – Detalhe do caminho de impressão da versão 1.

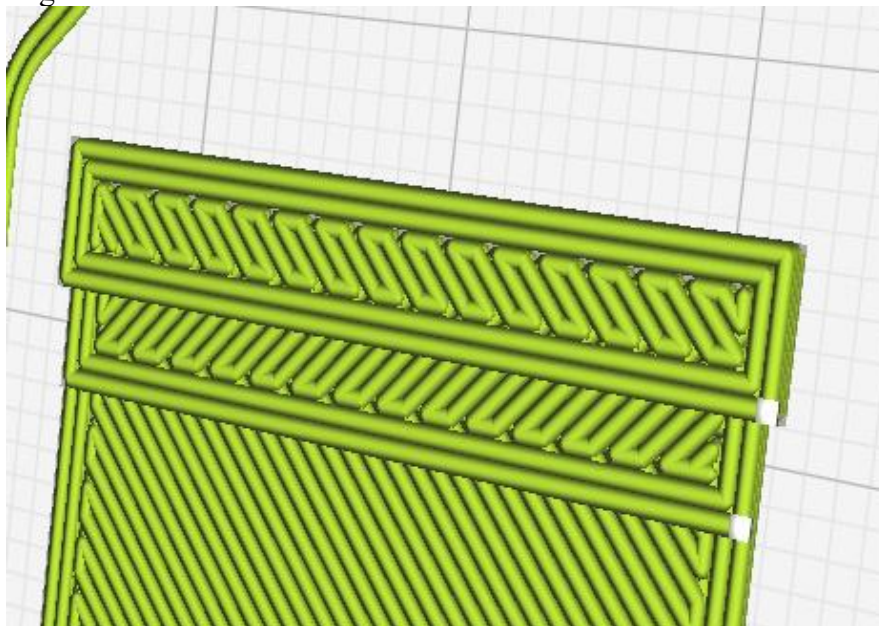


Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024

Para corrigir esse problema, a segunda e terceira versão foi feita somente com o alargamento lateral em diferentes tamanhos, que não apresentou travamento no estator do motor. A terceira versão teve o alargamento aumentado ao nível de interferir com a montagem do rotor mesmo assim não houve fixação satisfatória. Já a quarta versão, volta a trazer a elevação, mas de forma que ela fique escalonada, em uma camada até se adentra a ranhura, conforme mostra a Figura 11, onde nota-se o caminho de impressão gerado pelo fatiador e a Figura 12 mostra a versão já impressa.

Dessa forma, o formato final do isolante de ranhura foi de 111 mm de comprimento por 28 mm de largura com espessura de 0,23 mm na maior parte e de 0,46 mm na parte reforçada. A trava tem 111 mm de comprimento por 18 mm de largura com 0,23 mm de espessura.

Figura 11 – Versão 4 do isolante.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 12 – Versão 4 Isolante fabricado em ABS.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Durante o processo de impressão, observou-se que variações no ajuste do *Z-offset* alteraram a integridade estrutural das peças. Nas amostras onde este ajuste não estava otimizado, constatou-se falta de adesão entre camadas, resultando em peças não sólidas com linhas separadas, conforme observado na Figura 13.

Figura 13 – Amostra impressa incorretamente.



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Com essas considerações foram fabricados os isolantes de ranhura, separação e travas serão fabricados usando a técnica FFF com os filamentos selecionados com base na literatura e disponibilidade. Foram testados os materiais ABS fabricado pela GTMax3D® na cor vermelha, PA6 fabricado pela 3DPrime® coloração natural, TRITAN® da 3D Fila® cor *clear water* e PETG na coloração preto fabricado pela GTMax3D®. Antes de impressão, todos permaneceram por 1h no secador de filamentos da marca Creality® modelo DB-02. Os materiais de alta performance foram descartados devido ao elevado custo. Os parâmetros do processo de fabricação se derivam da recomendação de cada material de forma a garantir ao mínimo duas camadas e se aproximar dos ideais encontrados por Veselý *et al.* (2018). Os valores dos principais parâmetros de impressão estão retratados na Tabela 2. A impressora usada foi o modelo A1V1 da fabricante GTMax3D® equipada com um bico de 0,4 mm em combinação com o software CURA®.

Tabela 2 - Principais parâmetros de impressão para o teste qualitativo

Material	Temp. Mesa (°C)	Temp. Impressão (°C)	Velocidade (mm/s)	Altura de Camada (mm)	Retração (mm)	Ventilação
ABS	130	240	150	0,115	3,5	Desativada
TRITAN®	100	268	60	0,115	5	Ativada (90%)
PETG	95	240	150	0,115	4,5	Desativada
PA6	100	230	60	0,115	3,5	Desativada

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

A validação funcional foi realizada através de um Teste Qualitativo de Montagem, executado seguindo o procedimento padrão de reparo de estatores. A avaliação adotou um critério binário do tipo Passa/Não Passa (Go/No-Go), definido da seguinte forma:

- Passa (Aprovado): O isolante permite a inserção completa na ranhura sem danos estruturais e sem o uso de força excessiva, mantendo o posicionamento correto. Além de possibilitar a inserção e moldagem das bobinas sem sofrer danos que comprometam a função de isolar as bobinas do núcleo.
- Não Passa (Reprovado): Ocorre travamento, delaminação, impossibilidade de inserção na ranhura ou rompimento.

Além dos quatro materiais um quinto grupo foi formado a partir de corpos de prova fabricados em ABS submetido ao tratamento térmico a 100 °C por 1 hora, após a montagem inicial no estator (condição 'Passa'). Esse processamento adicional foi executado visando sanar o *stress whitening* encontrado nos resultados iniciais obtidos com o ABS. Sendo a avaliação final da montagem para este grupo considerada integridade da peça após o ciclo térmico.

3.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DOS MATERIAIS

Esta parte foi dividida em duas etapas, uma primeira foi a necessidade de adequação de uma estufa e a outra foi o estudo do comportamento mecânico dos materiais ABS, TRITAN®, PETG e PA6 após a exposição por longo período a altas temperaturas.

3.2.1 Adequação de uma estufa

Devido ao baixo orçamento para realização deste estudo, foi necessário reformar uma estufa usada, pois, o Laboratório de Ensaios Mecânicos não possuía este tipo de equipamento. E o longo período de permanência das amostras na estufa não possibilitou utilizar estufas de outros laboratórios, pois, iria manter elas ocupadas por muito tempo, inviabilizando o empréstimo para a realização desta pesquisa.

Visando atender aos critérios de estabilidade da norma ABNT NBR IEC 60216-4-1 (2017d), o sistema de controle original (termostato mecânico/on-off) foi substituído por um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) microprocessado (Novus N1030), atuando sobre a resistência de aquecimento através de um Relé de Estado Sólido (SSR). O sensor de controle (termopar tipo K) foi posicionado estrategicamente na câmara de mistura (plano inferior), localizado abaixo do difusor de ar, segregado do volume útil de 24 L. Esta disposição visa evitar a influência da radiação direta da resistência sobre as amostras e garantir que a leitura de controle corresponda à temperatura do ar no momento da injeção na câmara da estufa. A calibração deste sensor foi realizada por laboratório acreditado, cujo laudo consta no **ANEXO A**.

Foi necessário a instalação de uma resistência de 1500 W na parte inferior, as resistências das laterais e do fundo (500W) originalmente instaladas estavam em pleno funcionamento e foram mantidas, sendo substituída apenas a resistência inferior. Foi fabricado um novo painel para que o controlador de temperatura fosse instalado e novos fusíveis de proteção bem como um comutador para ligar e desligar a estufa (Figura 14). Também foi fabricada um suporte para que o Arduino e módulos fossem devidamente fixados a estufa sendo o resultado mostrado na Figura 16.

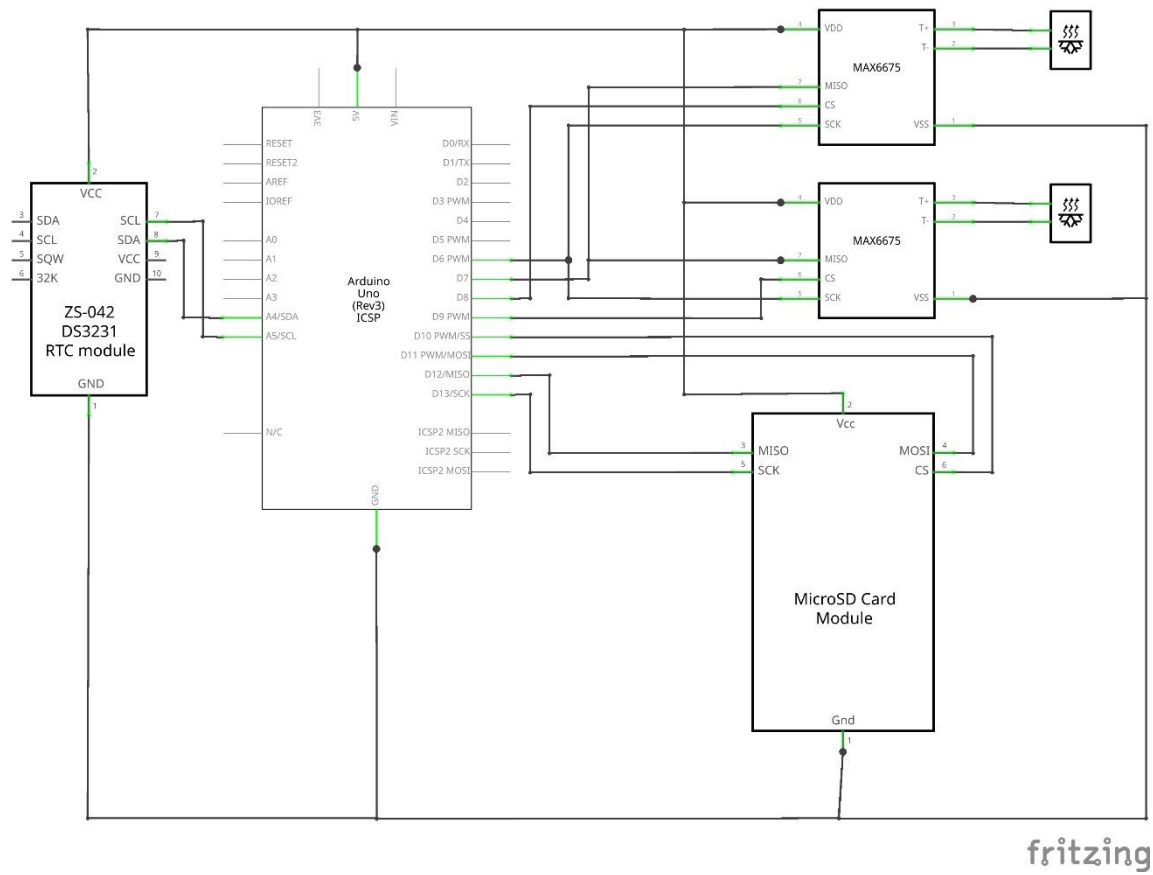
Figura 14 - Estufa Reformada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

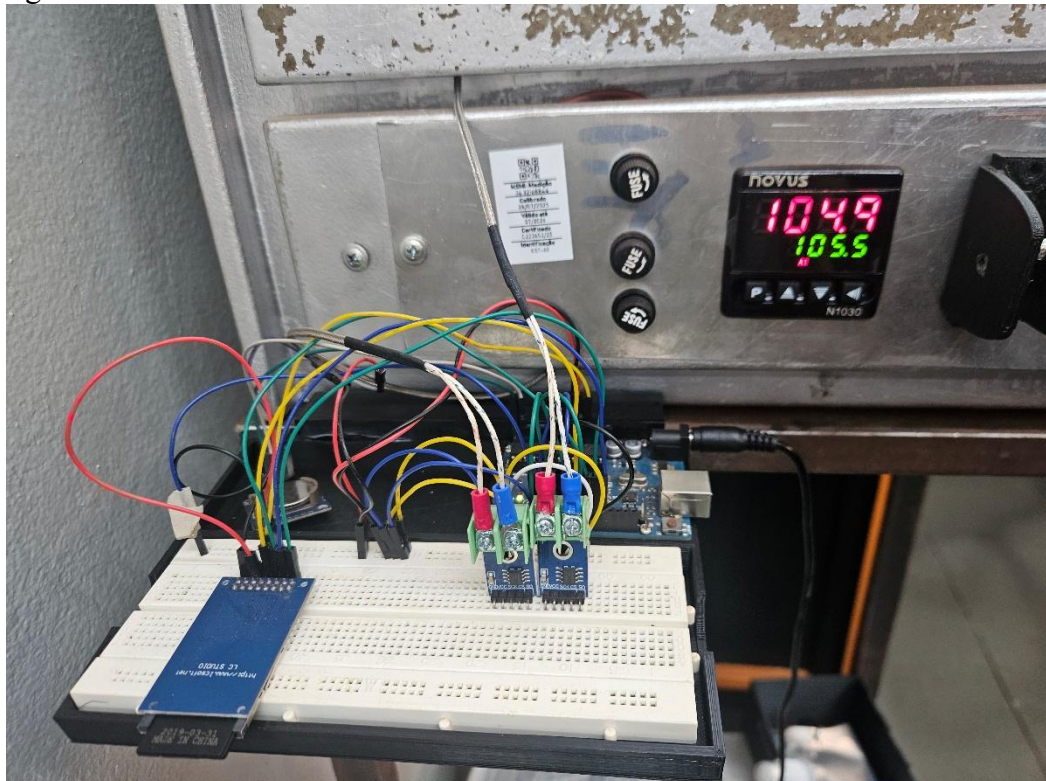
Adicionalmente, foi desenvolvido um sistema de *datalogging* redundante para o monitoramento contínuo do perfil térmico. Este sistema foi constituído por uma plataforma Arduino Uno, com dois termopares tipo K (módulos MAX6675): um posicionado junto às amostras e o outro junto ao termopar do controlador, um módulo *Real Time Clock* (RTC DS3231) para marcação temporal e um módulo de cartão SD para armazenamento não volátil dos dados. O código fonte usado está presente no APÊNDICE A. O diagrama esquemático das conexões é apresentado na Figura 15. Esse mesmo *datalogger* foi usado durante o teste de Taxa de Ventilação para registrar a temperatura ambiente durante o ensaio.

Figura 15 - Esquema de implementação ARDUINO



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 16 - Arduino montado na estufa



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Para a validação da taxa de renovação de ar, conduziu-se o método de consumo de energia especificado no Anexo A da norma ABNT 60219-4-1 com duração de 3 horas para cada configuração após uma hora de estabilização da temperatura. Para executar a medição do consumo de energia foi usado um medidor de energia com capacidade de 10 A 230 V. Este método baseia-se na diferença de potência necessária para manter a temperatura estável com as aberturas de ventilação fechadas e abertas. A taxa de trocas de ar (N) foi calculada através da Equação (2), que a norma define como aceitável entre 5 e 20.

$$N = \frac{10 (P_2 - P_1) T_a}{V_0 (T - T_a)} \quad (2)$$

Onde:

N é a taxa de ventilação

P_1 é o consumo médio de energia, em watts, da estufa não ventilada.

P_2 é o consumo médio de energia, em watts, da estufa ventilada.

V_0 é o volume do compartimento de exposição em litros.

T_a é a temperatura ambiente em kelvins.

T é a temperatura da estufa em kelvins.

A estufa originalmente já tinha um orifício superior para saída de gases e a entrada pela câmara de mistura. Para realizar a medição do consumo de energia foi necessário fazer o fechamento dessa saída de gases usando um pino de alumino, além disso, foi fechada a abertura com fita para impedir a troca de gases pela porta como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Vedação adicional na estufa

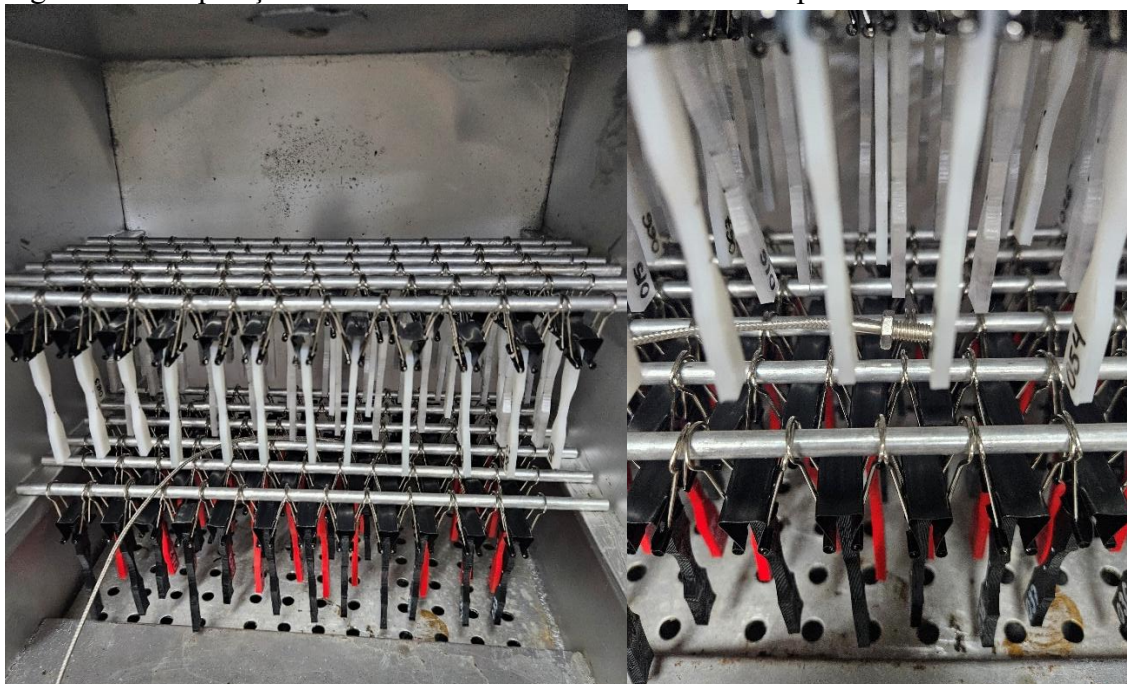


Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Os parâmetros utilizados para o cálculo da taxa de ventilação, conforme a Equação (2), foram definidos a partir das características do equipamento e das condições ambientais. Para a estufa reformada, o volume interno é $V = 24,3 \text{ l}$. A temperatura ambiente T_a foi monitorada pelo datalogger com o sensor posicionado a 2 m de distância de paredes ou fontes de calor, resultando em $T_a = 297,94 \text{ K}$ ($24,79 \text{ °C}$). A temperatura de operação da estufa foi fixada em $T = 453,15 \text{ K}$ (180 °C). Os consumos médios registrados com a ventilação aberta e fechada foram de $268,5 \text{ W}$ e $254,0 \text{ W}$, respectivamente. Com esses dados, obteve-se uma taxa de ventilação de 11,45 trocas de ar por hora, valor que assegura que o equipamento atende aos requisitos da norma ABNT NBR IEC 60216-4-1 (2017d) quanto ao critério de taxa de ventilação.

Para assegurar que os corpos de provas e suporte da estufa atendam os requisitos do item 4.4 da norma o cálculo da área dos corpos de provas foi feito considerando a área dos grampos usados no suporte, ilustrado na Figura 18. As dimensões do grampo usado são de $25 \times 10 \text{ mm}$ resultando em uma área de 250 mm^2 , como foram colocados 96 grampos em cada nível da estufa, a seção transversal da estufa ocupada com as amostras (grampos) é de 24 cm^2 . Já a área do compartimento de exposição é de 810 cm^2 ($30 \times 27 \text{ mm}$). Portanto, as amostras ocupam aproximadamente 3% da área de seção transversal estando dentro do critério de 25% da área de seção transversal.

Figura 18 - Disposição das amostras na estufa e sensor de temperatura.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Além dos critérios de taxa de ventilação a norma também especifica a máxima variação de temperatura, para realizar esse ensaio foi selecionada a temperatura de 105 °C na estufa. A norma solicita que a variação de temperatura não ultrapasse 5 °C durante 3 horas de teste, para efetuar essa medida foi usado o mesmo *datalogger* construído para o monitoramento do experimento. Os resultados da variação de temperatura ficaram dentro dos critérios da norma, pois a variação de temperatura nesse período foi de 3,75 °C, conforme pode ser constatado pelos dados de estatística descritiva contidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatística Descritiva dos dados de variação de temperatura no ensaio de estabilidade térmica.

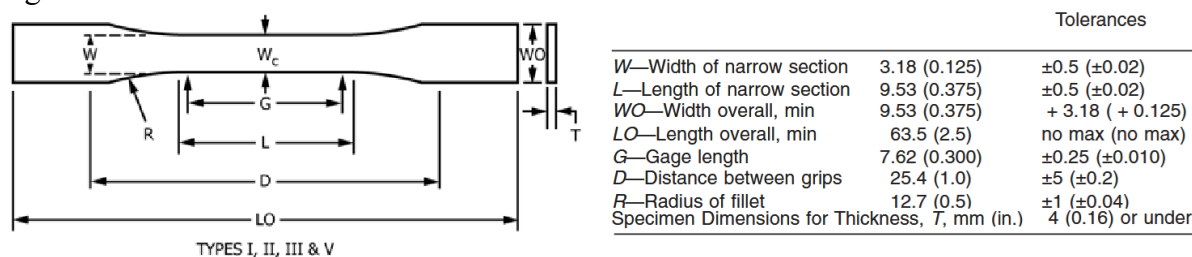
<i>Temperatura da Estufa (°C)</i>	
Média	104,293
Erro padrão	0,009
Mediana	104,250
Modo	104,500
Desvio padrão	0,429
Variância da amostra	0,184
Curtose	1,983
Assimetria	-0,629
Intervalo	3,750
Mínimo	102,250
Máximo	106,000
Soma	220683,500
Contagem	2116,000

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

3.2.2 Estudo do comportamento mecânico

Para a avaliação do comportamento mecânico, adotou-se o corpo de prova Tipo V (ASTM D638), utilizando parâmetros de impressão otimizados para a caracterização intrínseca do material. Embora a altura de camada e a velocidade de deposição do estator funcional possam variar em função da complexidade geométrica da peça, a utilização de parâmetros padronizados nos corpos de prova é necessária para isolar a cinética de degradação térmica do polímero. Dessa forma, os resultados de perda de resistência mecânica obtidos servem como um indicador conservador da integridade do material, estabelecendo um limite de segurança técnica que fundamenta a aplicação da manufatura aditiva no reparo do sistema de isolamento.

Figura 19 - Dimensional das amostras usadas



Fonte: Adaptado de (D20 Committee, 2015)

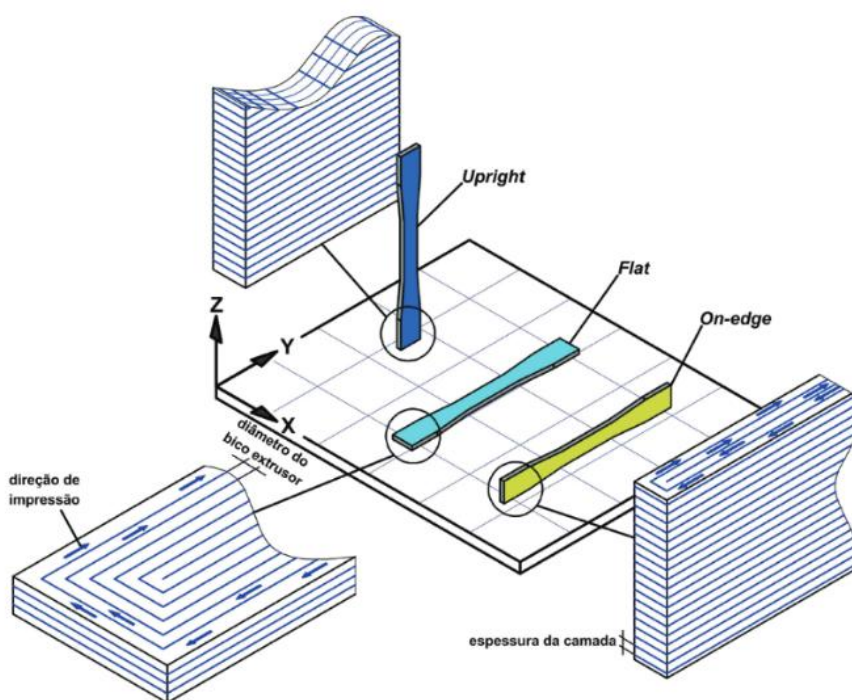
Tabela 4 - Principais parâmetros de impressão para a exposição térmica

Parâmetro	TRITAN®	PETG	ABS	PA6
Altura de Camada	0.16 mm	0.30 mm	0.30 mm	0.16 mm
Temp. do Bico (°C)	268 °C	245 °C	230 °C	230 °C
Temp. da Mesa (°C)	100 °C	95 °C	100 °C	100 °C
Ventilação	90%	30%	60%	Desligada

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Sabe-se que a orientação de impressão tem impacto nas propriedades mecânicas de peças fabricadas por FFF e que das 3 orientações, Figura 20, possíveis orientação *Flat* apresenta menor as propriedades maiores com relação as demais. Sendo esta orientação aplicada neste trabalho (Lima; Marques; Shimano, 2022).

Figura 20 - orientações de impressão upright, on-edge e flat.



Fonte: (Lima; Marques; Shimano, 2022).

Para garantir a estabilidade dimensional da PA6, utilizou-se a técnica de discos de ancoragem para reforçar a fixação à mesa, combatendo as tensões de contração. Além disso, a ordem de fabricação foi reconfigurada de simultânea para sequencial. Essa alteração foi necessária para assegurar a integridade estrutural tanto da PA6 quanto do TRITAN®; este último apresentava severa fragilidade entre as camadas quando processado no modo contínuo, devido ao resfriamento excessivo entre as passagens do bico extrusor.

A necessidade de transição para a estratégia de impressão sequencial fundamenta-se na gestão do histórico térmico das amostras. Para a PA6, o modo simultâneo prolongava o tempo de deposição entre camadas, permitindo o resfriamento excessivo e a cristalização prematura do polímero, o que intensifica as tensões internas e o empenamento. O uso de discos de ancoragem foi essencial para neutralizar o momento fletor nessas extremidades, mantendo a adesão ao leito. Já para o TRITAN®, a impressão sequencial foi adotada para reduzir o 'tempo de camada', garantindo que a deposição ocorresse com a camada subjacente ainda em temperatura próxima à transição vítrea.

3.2.3 Grupos experimentais

Foram impressos 192 corpos de provas, sendo 48 de cada material. Após as impressões dos corpos de provas, eles foram identificados, medidas suas dimensões com um paquímetro digital da marca MARBERG com resolução de 0,01 mm e suas massas obtidas por meio de uma balança de precisão da marca Marte® e modelo BL3200H.

Os corpos de provas foram divididos em 16 grupos experimentais (Tabela 5) com 12 amostras em cada grupo.

Tabela 5 - Divisão dos grupos experimentais.

Grupos experimentais	Material	Tempo de permanência da temperatura de 105°C
ABS-0h	ABS	0 horas
ABS-500h		500 horas
ABS-1000h		1.000 horas
ABS-2000h		2.000 horas
PA6-0h	PA6	0 horas
PA6-500h		500 horas
PA6-1000h		1.000 horas
PA6-2000h		2.000 horas
PETG-0h	PETG	0 horas
PETG-500h		500 horas
PETG-1000h		1.000 horas
PETG-2000h		2.000 horas
TRITAN-0h	TRITAN®	0 horas
TRITAN-500h		500 horas

TRITAN-1000h

1.000 horas

TRITAN-2000h

2.000 horas

 Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Para esse ensaio foi definido que as amostras seriam expostas a uma temperatura de 105°C por 500, 1000 e 2000 horas. As amostras foram dispostas em dois níveis na estufa, sendo PA6 e TRITAN® na parte superior e PETG e ABS na parte inferior, o sensor de temperatura foi posicionado entre essas duas camadas, conforme mostra a Figura 18. Cada um dos suportes continha apenas um tipo material, as amostras foram identificadas por numerações de 3 dígitos únicos por material, sendo que cada material tem uma cor diferente (Figura 21).

Figura 21 - Amostras de corpos de provas de ABS numeradas no suporte.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Após a retirada da estufa foram refeitas as medições de todos os corpos de provas.

3.2.4 Ensaio mecânico

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios modelo WDW-100E, equipada com uma célula de carga da marca Transcell Technology - modelo DVSL-SJ-10t. A deformação foi obtida pelos sensores de deslocamento da própria máquina, a Figura 22

mostra a montagem usada para os ensaios. A velocidade de deformação foi de 5 mm/min e o tempo de ensaio foi limitado a 60 s ou a ruptura do material. Os parâmetros analisados no ensaio foram o módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência a tração.

Figura 22 - Montagem das garras na máquina de teste universal.



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Inicialmente, foram ensaiados 12 corpos de prova para cada condição experimental. Os dados brutos de cada propriedade foram submetidos a uma análise de outliers pelo método de Boxplot (critério de $1,5 \times \text{IIQ}$), sendo os valores discrepantes removidos. A fim de garantir um delineamento experimental balanceado para a análise estatística, o conjunto de dados válidos restante foi submetido a uma seleção aleatória simples para a obtenção de uma amostra final fixa de $n=10$ por grupo experimental.

Para a validação estatística, utilizou-se predominantemente a Análise de Variância (ANOVA) de dois fatores (Material x Tempo). Entretanto, especificamente para a análise do limite de escoamento, observou-se a ocorrência de ruptura frágil prematura nas condições de envelhecimento severo para a PA6 e o ABS. Como consequência física da degradação, nestas condições o material não atinge o regime de deformação plástica necessário para o cálculo do

offset de 0,2%, Devido a esta característica do material, optou-se por utilizar o limite de escoamento sendo igual ao limite de resistência para esses casos.

Como premissa para a aplicação destes modelos, verificou-se a normalidade dos resíduos experimentais através do teste de D'Agostino-Pearson e análise gráfica de resíduos, conforme recomendado por Montgomery (2013). Para a identificação das diferenças significativas entre os pares de médias, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey HSD. Ambas as análises estatísticas foram executadas usando o software Excel com o plugin *Real Statistics*.

4 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados primeiramente das análises qualitativas da montagem e depois das propriedades mecânicas.

4.1 MONTAGEM DOS ISOLANTES

4.1.1 Material ABS

Durante a inserção inicial na ranhura, a versão final em ABS manteve sua integridade estrutural (Figura 23). No entanto, ao ser submetido à flexão necessária para o posicionamento, o material apresentou branqueamento por tensão (*stress whitening*) na região deformada, indicando deformação plástica excessiva (Figura 24). Subsequentemente, durante a inserção das bobinas e o processo de conformação, ocorreram fraturas no isolante. Diante da falha funcional, a amostra foi considerada reprovada. A Figura 25 detalha os pontos onde houve a ruptura.

Figura 23 - Estator com isolantes de ranhura montado lado oposto a ligação



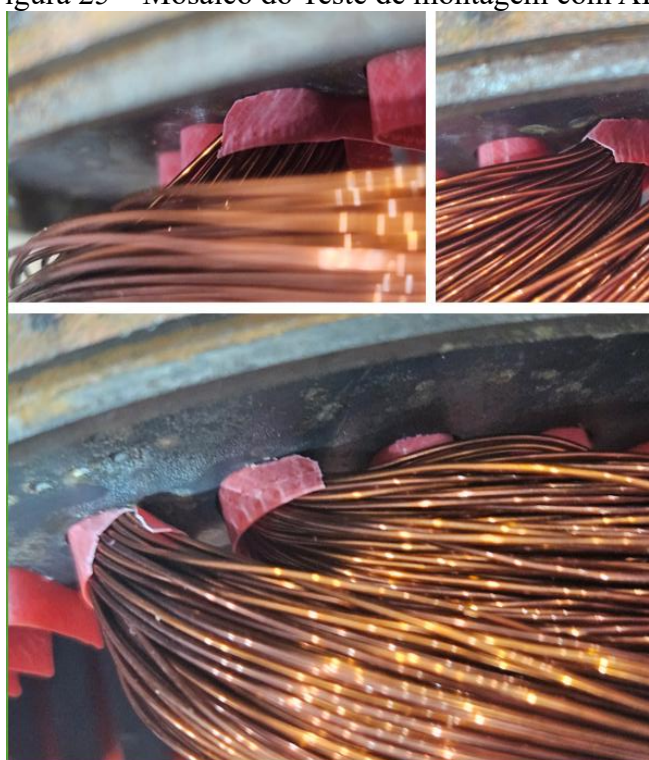
Fonte, Autor 2024

Figura 24 - Descoloração do material ao se flexionar.



Fonte, Autor 2024

Figura 25 – Mosaico do Teste de montagem com ABS



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2024

4.1.2 Material ABS recozido

Após esse isolante sair do processo de recozimento notou-se que ele não estava apresentando mais as características de branqueamento demonstradas na Figura 24. Mas esse processo fez com que o material não ficasse pressionado contra a parede do canal. Em alguns

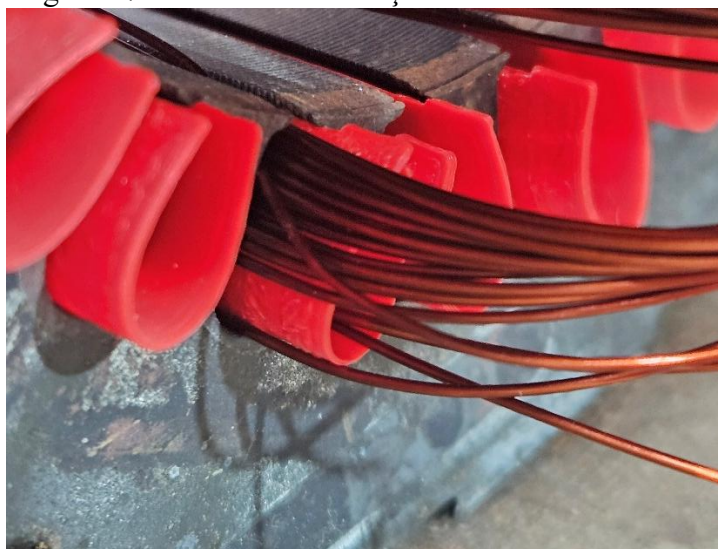
canais houve o estreitamento conforme mostrado na Figura 26. Isso trouxe dificuldade na inserção das bobinas, ocasionando o alojamento indevido dos condutores fora da proteção do isolante, conforme demonstra a Figura 27. Apesar do recozimento ter liberado tensões nas cadeias polimérica, ao se moldar a bobina o material acabou se rompendo, a Figura 28 mostra o isolante rompido, sendo esse material recozido considerado reprovado. A Figura 29 mostra o isolante que falhou após a retirada das bobinas.

Figura 26 - Isolante fechado



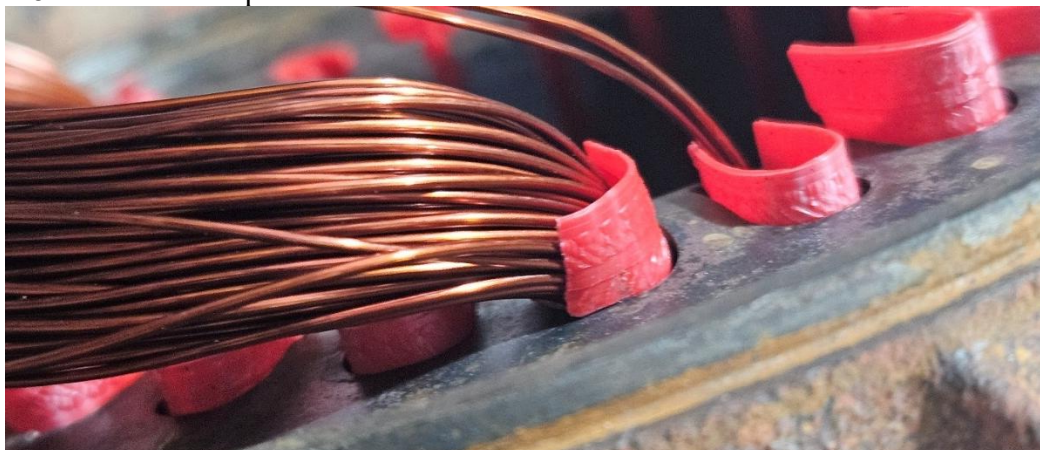
Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 27 - Fios fora da isolação ao colocar as bobinas



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 28 - Isolante Rompido



Fonte: elaborado pelo próprio autor,2025

Figura 29 - Detalhe do isolante que falhou.



Fonte: elaborado pelo próprio autor,2025

4.1.3 Material PA6

Ao utilizar a versão final do projeto, o isolante em PA6 demonstrou excelente montabilidade. Durante as etapas críticas de inserção na ranhura e acomodação das bobinas, o material suportou os esforços mecânicos e manteve sua integridade estrutural, sem apresentar falhas. A instalação do isolante superior (cunha de fechamento) também foi realizada com sucesso, exigindo um nível de esforço manual análogo ao observado com materiais isolantes convencionais. A Figura 30 ilustra a montagem concluída para o primeiro grupo de bobinas.

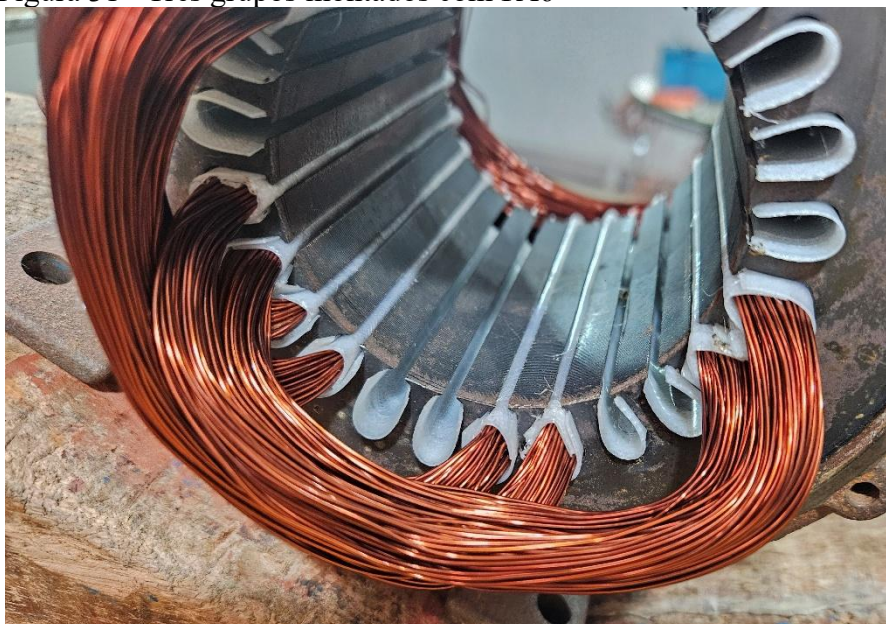
Figura 30 - Grupo de bobinas montado com PA6



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

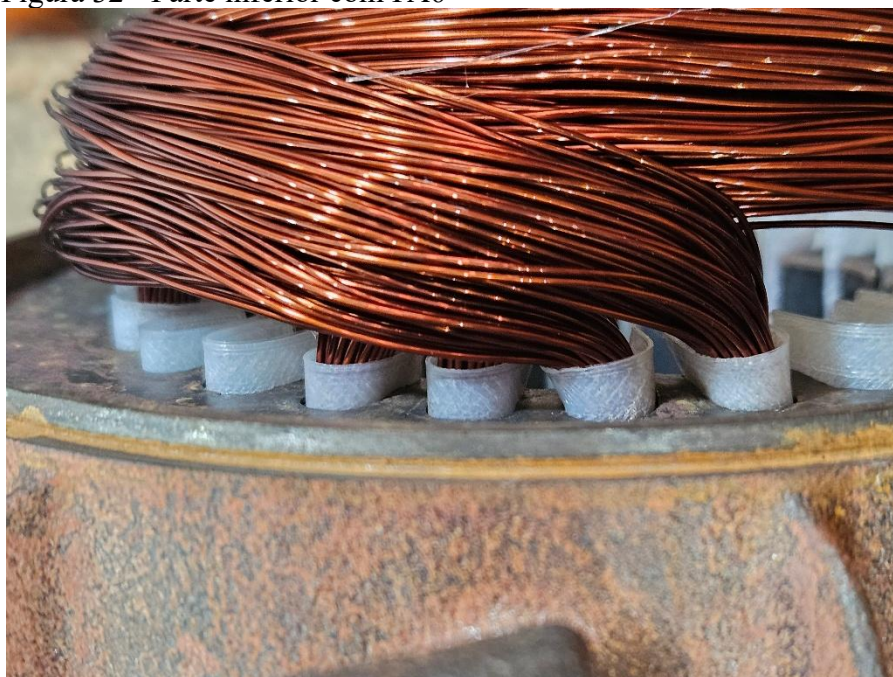
Durante a inserção das bobinas finais, onde ocorre o cruzamento e há necessidade de maior conformação espacial, o isolante manteve sua integridade estrutural. O material suportou a pressão necessária para a acomodação das espiras sem apresentar falhas, validando sua **aprovação** no ensaio. A montagem completa é apresentada na Figura 31 e a integridade da região inferior pode ser verificada na Figura 32

Figura 31 - Três grupos montados com PA6



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 32 - Parte inferior com PA6



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

4.1.4 Material PETG

Durante a montagem dos isolantes fabricados com os parâmetros definidos, observou-se uma Deformação residual/permanente. Após serem flexionadas para a inserção, as paredes laterais não retornaram à posição original para preencher completamente o perfil da ranhura (Figura 33). Essa deformação permanente replicou a dificuldade de alojamento das bobinas já relatada na seção 4.1.2.

Figura 33 – Deformação permanente do PETG.



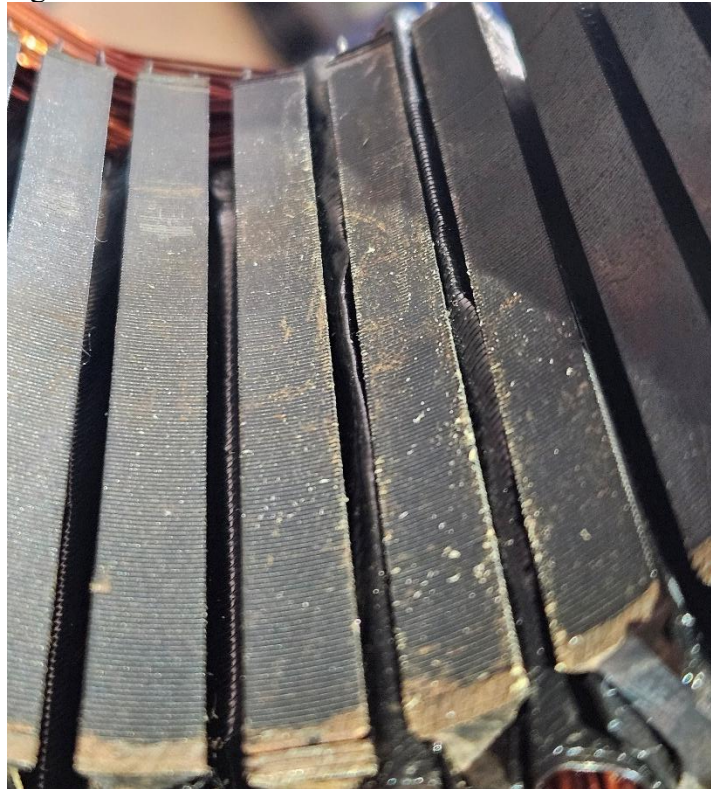
Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Adicionalmente, observou-se uma deficiência estrutural nos elementos de fixação superior (cunhas). Durante a inserção, estas peças sofreram deformação plástica acentuada, superior à registrada nos demais materiais testados (Figura 35 e Figura 36). O ensaio culminou na ruptura do componente, determinando a **reprovação** do material para esta aplicação. A falha catastrófica pode ser visualizada na Figura 34.

Figura 34 - Falha PETG

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 35 - Travas em PETG



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 36 - Detalhe das Travas em PETG



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

4.1.5 Material TRITAN®

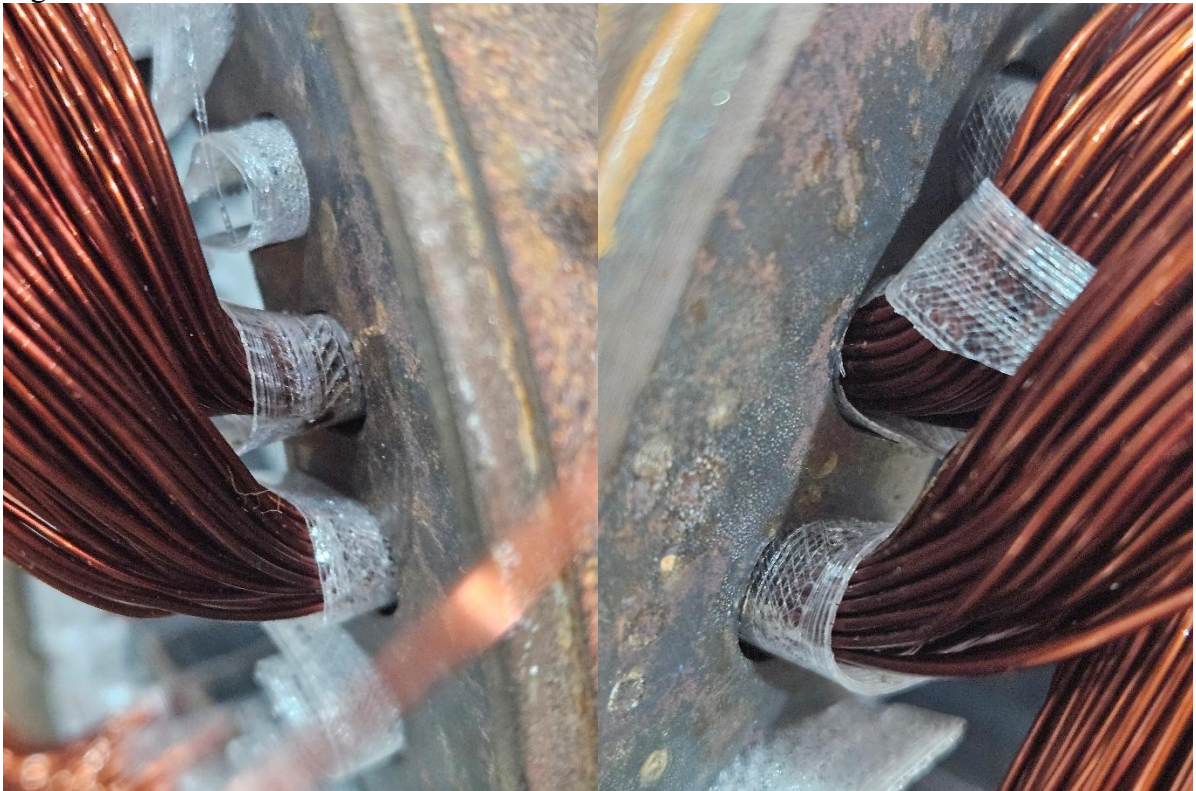
O comportamento deste material durante a montagem foi análogo ao observado no PETG. As cunhas de fechamento apresentaram deformação plástica excessiva, conforme detalhado na Figura 37. Adicionalmente, replicando a falha do caso anterior, o isolante de ranhura sofreu ruptura estrutural durante o processo. Devido à recorrência dessas falhas funcionais, o material foi classificado como **reprovado** (Figura 38).

Figura 37 - Travas TRITAN®



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

Figura 38 - Parte inferior TRITAN®



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

4.1.6 Síntese dos Resultados

Para permitir uma visualização comparativa do desempenho entre os diferentes polímeros e o processo de pós-processamento, a Quadro 2 sintetiza os resultados dos ensaios de montam.

Quadro 2 - Síntese dos Resultados do Ensaio de montagem.

Material	Resultado	Justificativa
ABS	Reprovado	Quebrou a moldar a bobina
ABS com Recozimento	Reprovado	Quebrou a moldar a bobina
PA6	Aprovado	Não apresentou nenhum problema de montagem
PETG	Reprovado	Quebrou a moldar a bobina Amassamento da trava
TRITAN®	Reprovado	Quebrou a moldar a bobina Amassamento da trava

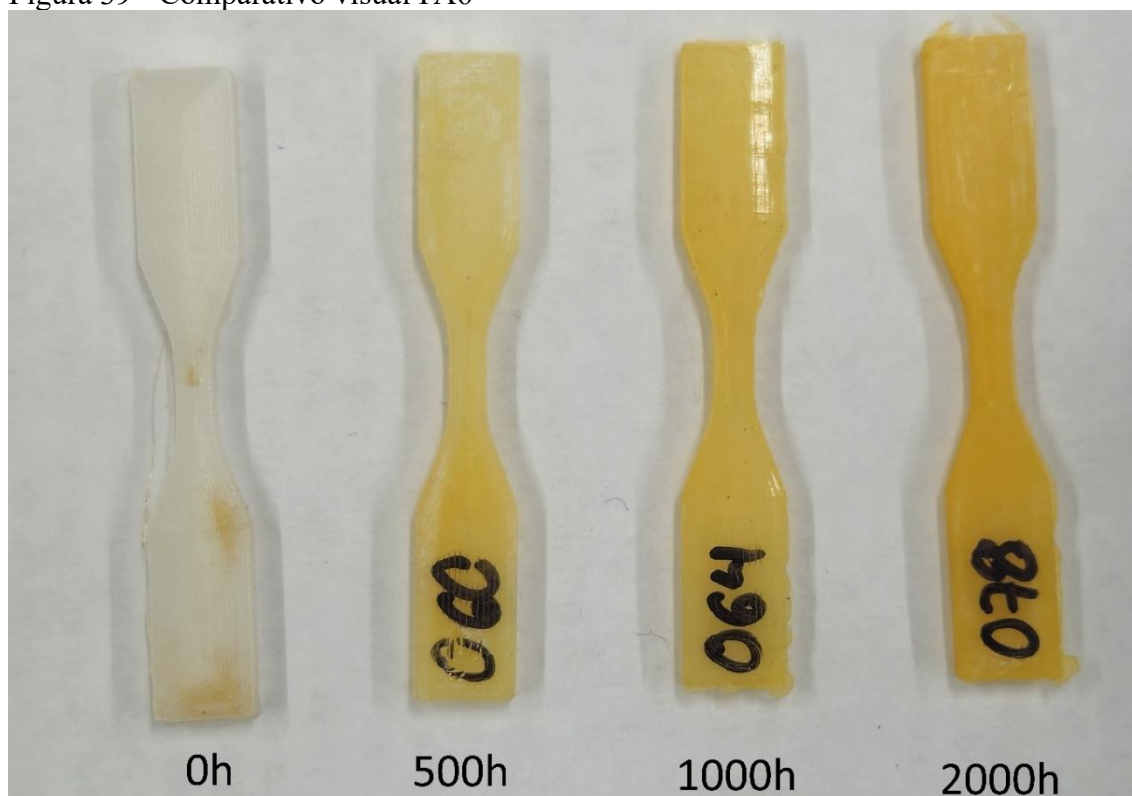
Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

4.2.1 Análise Visual e Macroscópica

Após a exposição térmica os aspectos visuais tiveram alteração. O material que houve alteração de cor foi a PA6 demonstrado na Figura 39. Os corpos desse material apresentaram um amarelamento gradual.

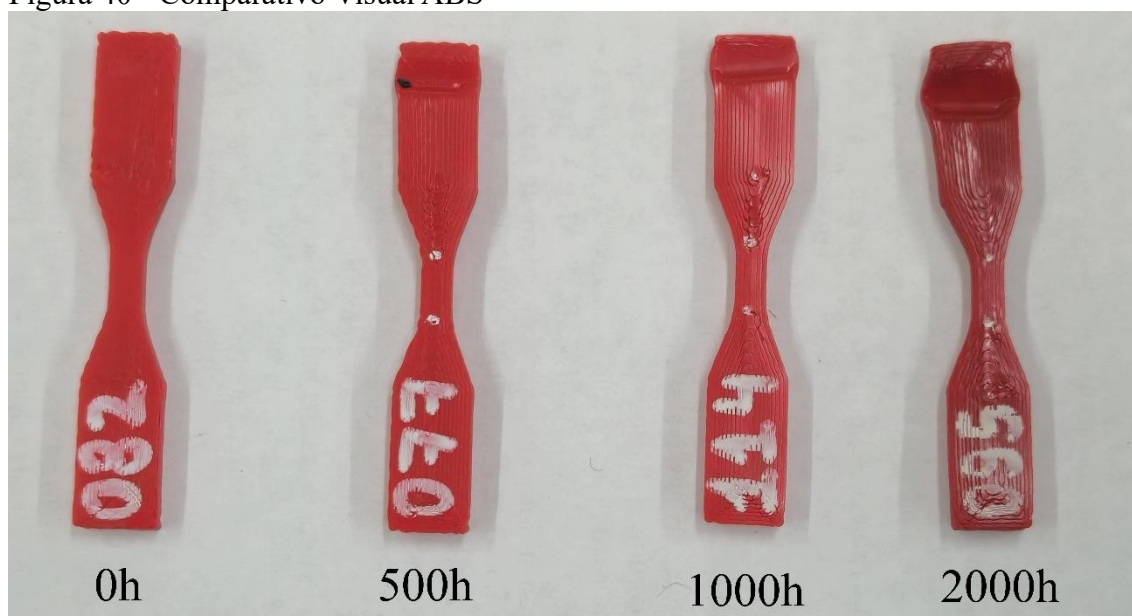
Figura 39 - Comparativo visual PA6



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2025

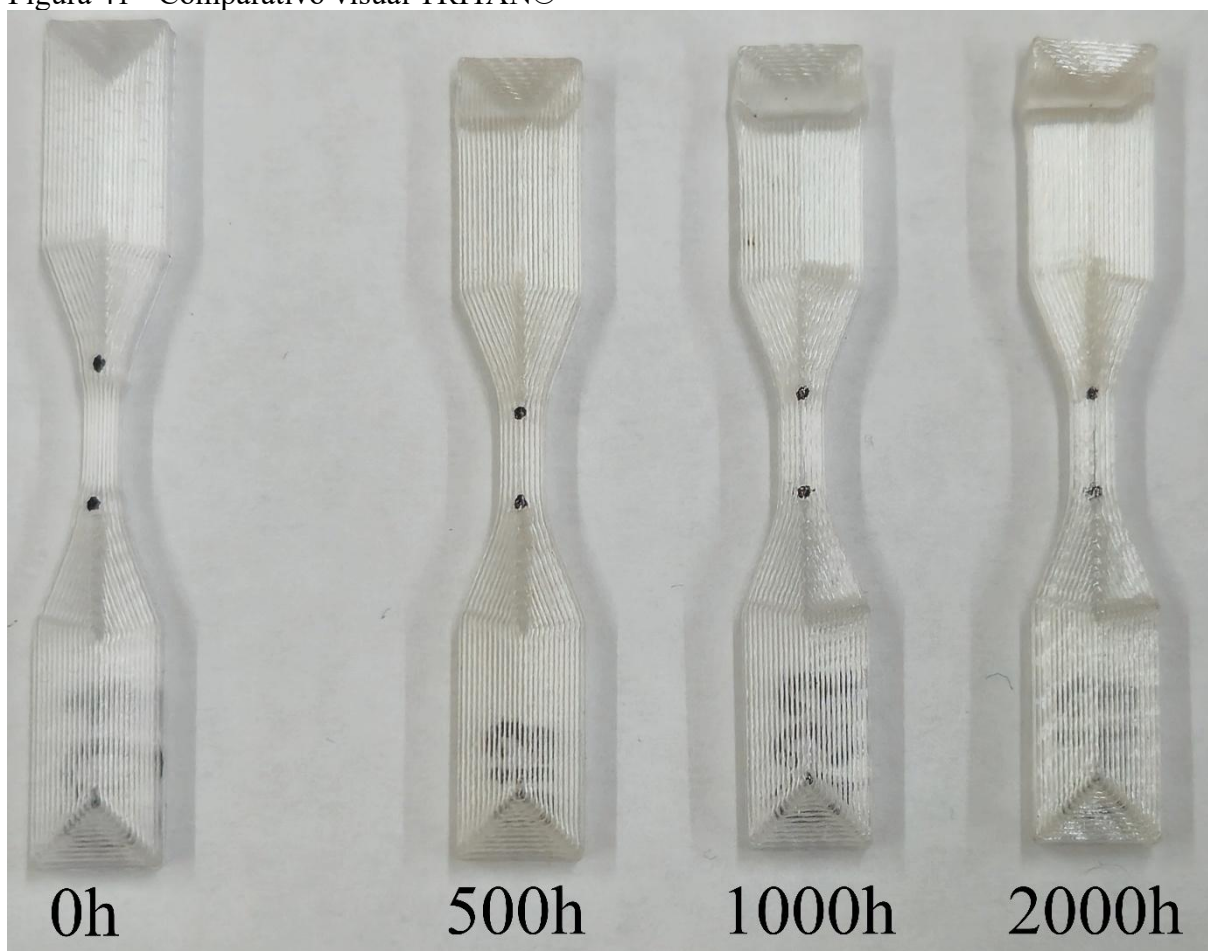
Já o ABS apresentou alteração, mas de forma menos gradual, entretanto essa alteração só foi mais pronunciada entre as amostras que foram expostas a 2000 horas na estufa, apresentando um escurecimento maior, Figura 40, também foi notado que o sistema de suporte dentro da estufa fez o amassamento do material fora da área de ensaio.

Figura 40 - Comparativo Visual ABS



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

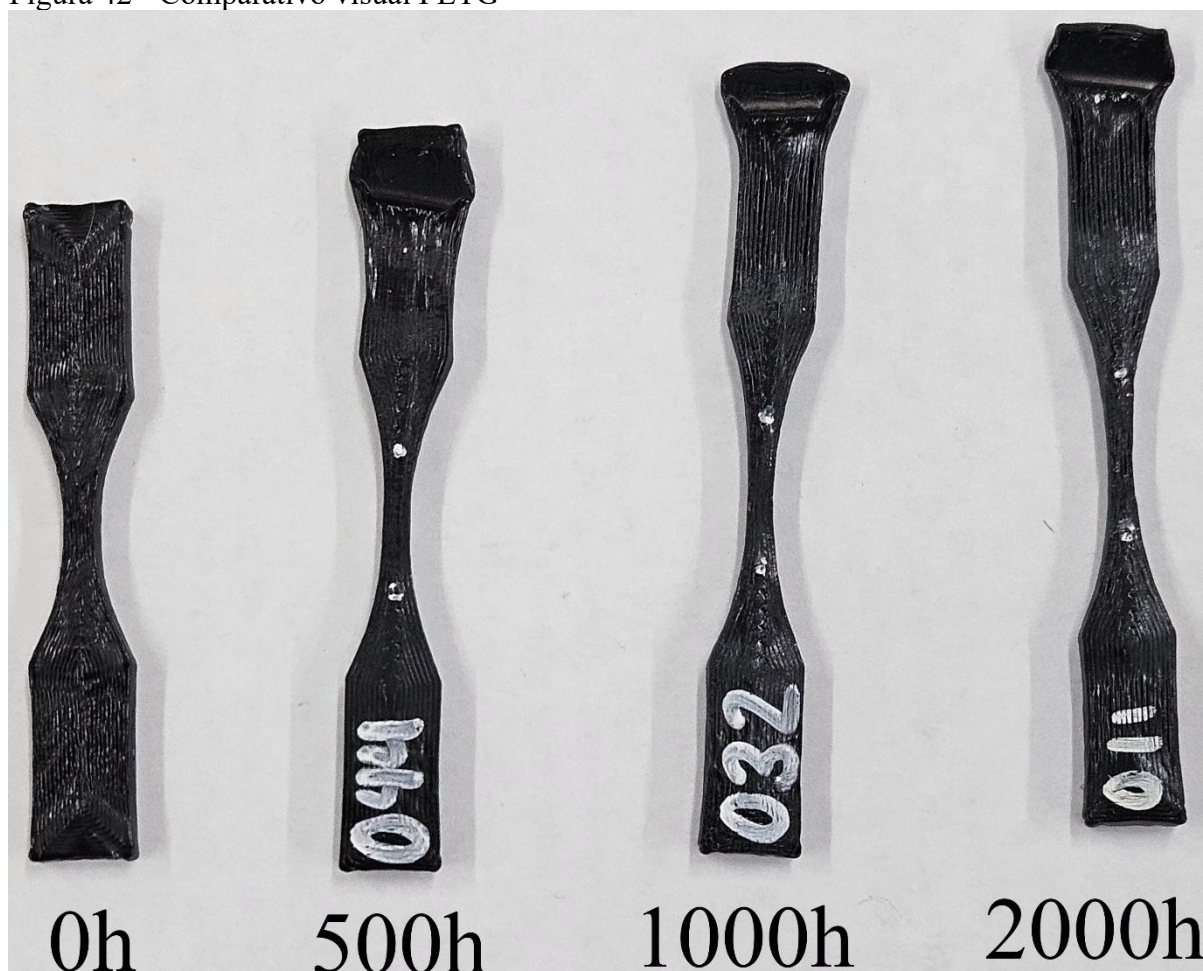
Figura 41 - Comparativo visual TRITAN®



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

O TRITAN® foi o material que menos apresentou mudanças visuais, conforme Figura 41, como o material usado é transparente foi notado somente um aumento da opacidade das amostras e foi levemente deformado pelo sistema de suporte. Já a Figura 42 ilustra as amostras de PETG, nesses corpos não se notou alteração de cor, mas a deformação foi completa.

Figura 42 - Comparativo visual PETG



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

4.2.2 Variação de Massa

Os dados exibidos considerados para análise da variação de massa foram das amostras submetidas ao ensaio de tração sendo essa aferição executada antes do ensaio de tração. Foi usado o mesmo grupo de amostras reduzido ($n=10$) conforme descrito na metodologia. Para verificar os resultados experimentais foi executado o teste ANOVA de dois fatores, onde foi obtido um p-value para a variação de material de $1,699 \times 10^{-43}$ e para a alteração dos tempos de $6,985 \times 10^{-16}$. Esse teste indica que a temperatura e o material interferem na variação da massa. A Tabela 6 compila todos os resultados obtidos para massa.

Tabela 6 - Resultados da variação da massa.

Material	Massa Inicial (g)	Variação 500h (%)	Variação 1000h (%)	Variação 2000h (%)
ABS	$1,689 \pm 0,006$	$-0,035 \pm 0,122$	$0,272 \pm 0,122$	$2,413 \pm 0,876$
PA6	$1,577 \pm 0,045$	$-0,235 \pm 0,06$	$-0,889 \pm 0,073$	$-0,961 \pm 0,07$
PETG	$1,858 \pm 0,017$	$-0,193 \pm 0,068$	$-0,156 \pm 0,039$	$-0,172 \pm 0,091$
TRITAN®	$1,802 \pm 0,017$	$-0,005 \pm 0,017$	$-0,094 \pm 0,12$	$-0,044 \pm 0,057$

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

4.2.3 Verificação da normalidade dos resíduos dos experimentos.

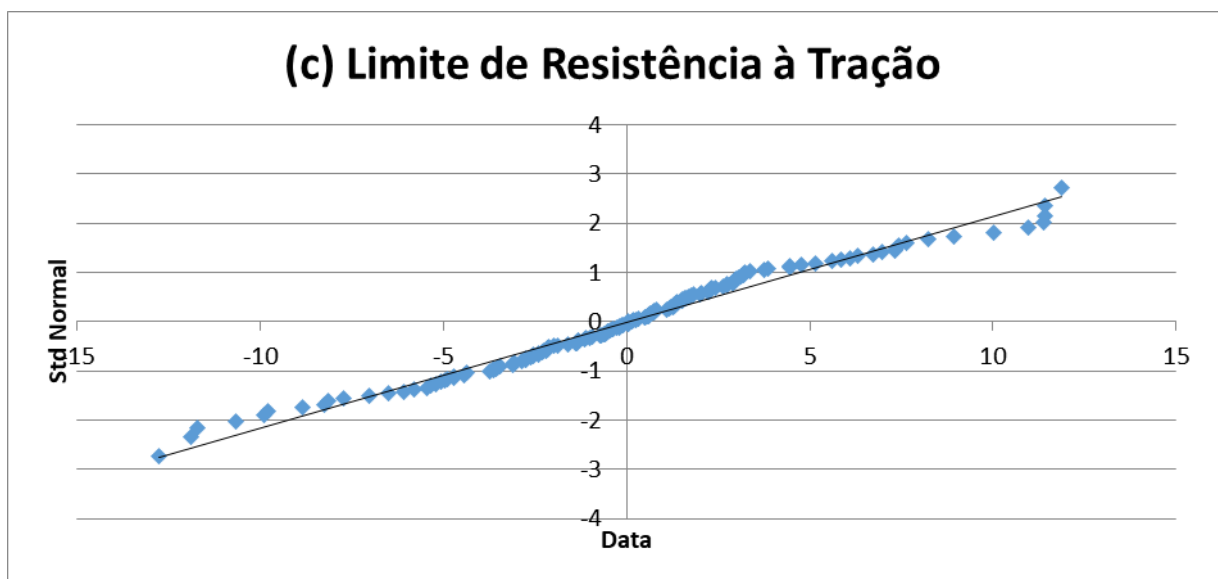
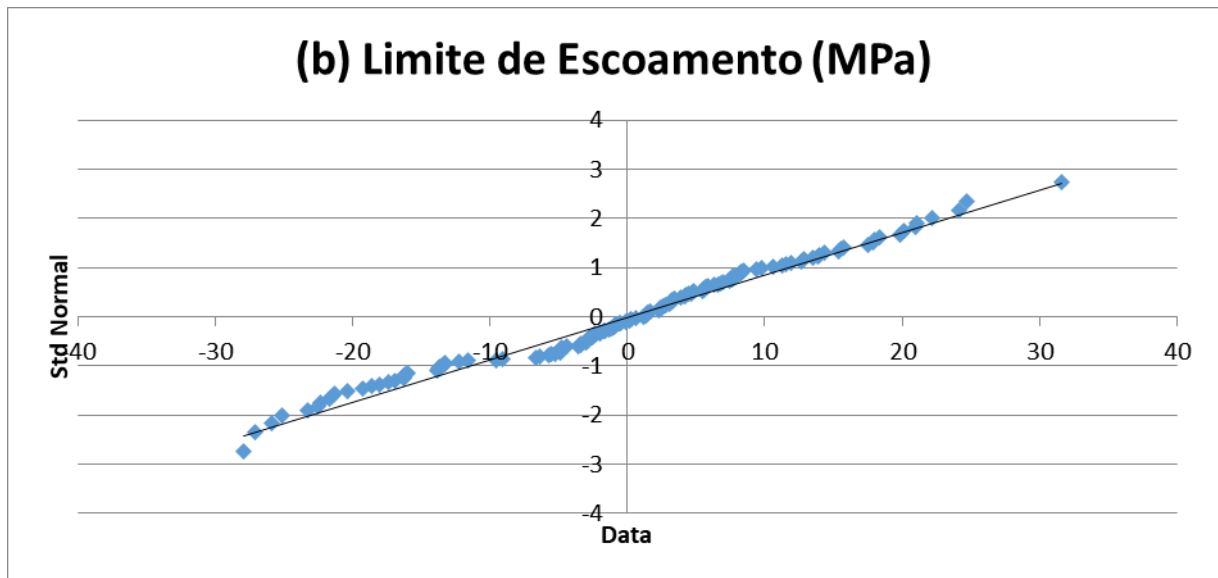
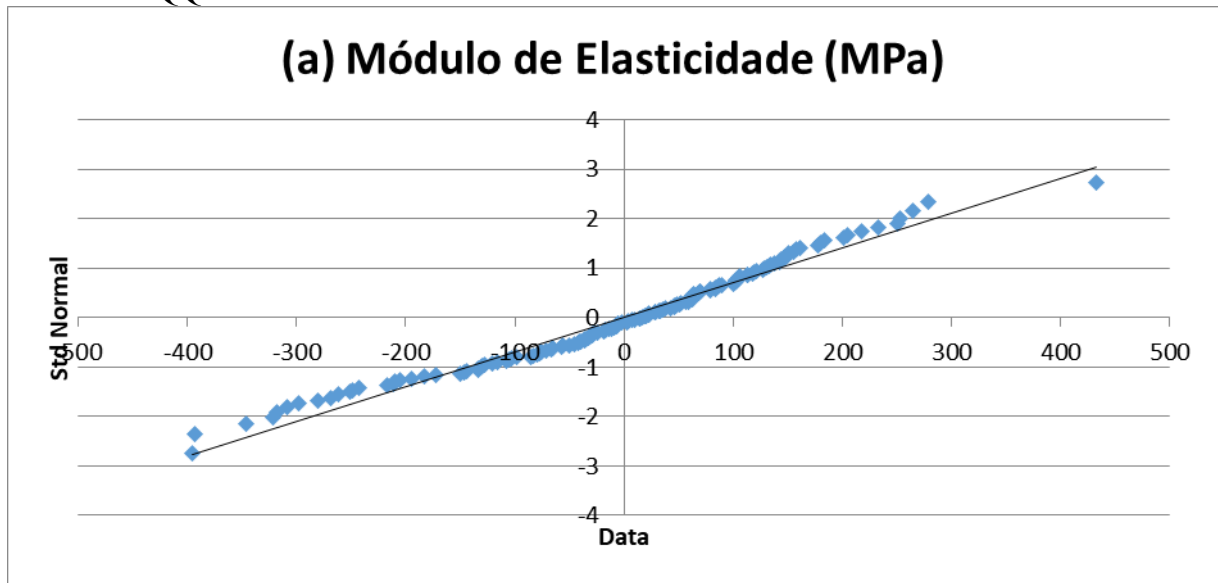
Seguindo o procedimento detalhado na metodologia, a verificação da normalidade da distribuição dos resíduos foi verificada através do teste de D'Agostino-Pearson, sintetizados na Tabela 7. Apesar do resultado negativo para o módulo de elasticidade, o Gráfico 1(a) se aproxima da normalidade. Corroborando com essa indicação, os testes de normalidade executados para os outros parâmetros mecânicos sob o mesmo grupo de amostra indicam que não houve falhas metodológicas que comprometam os dados. Os demais dados estatísticos podem ser visualizados no Gráfico 2..

Tabela 7 - Resultados d'Agostino-Pearson

	p-value	Distribuição normal ? (p-value >0,05)
módulo de elasticidade	0,02	Não
limite de escoamento	0,45	Sim
limite de resistência à tração	0,2	Não

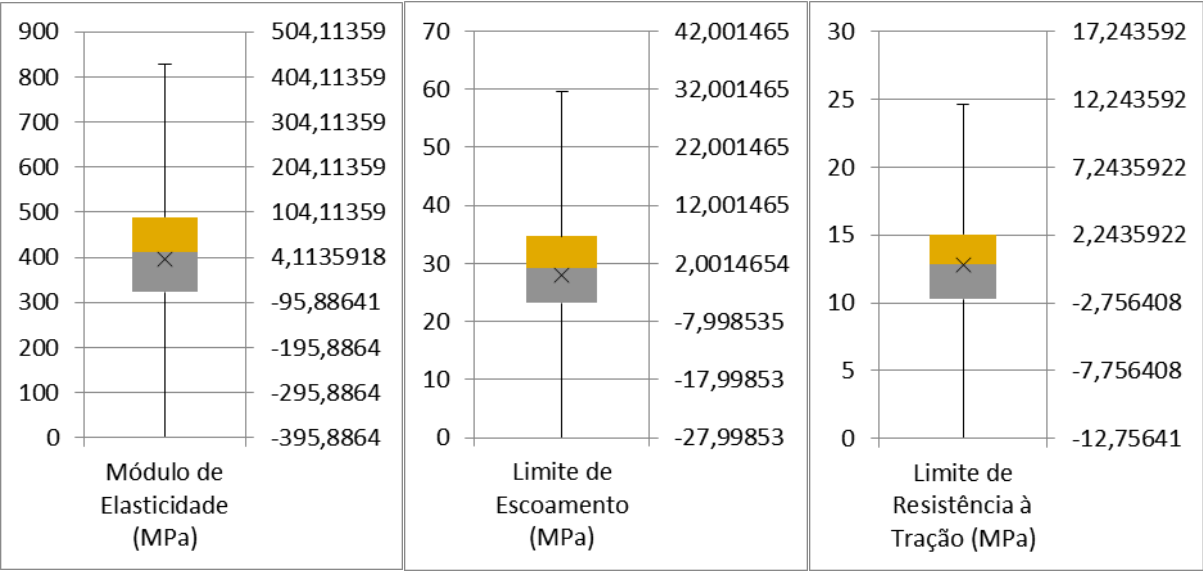
Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Gráfico 1 - QQ Plot



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Gráfico 2 - Box Plot

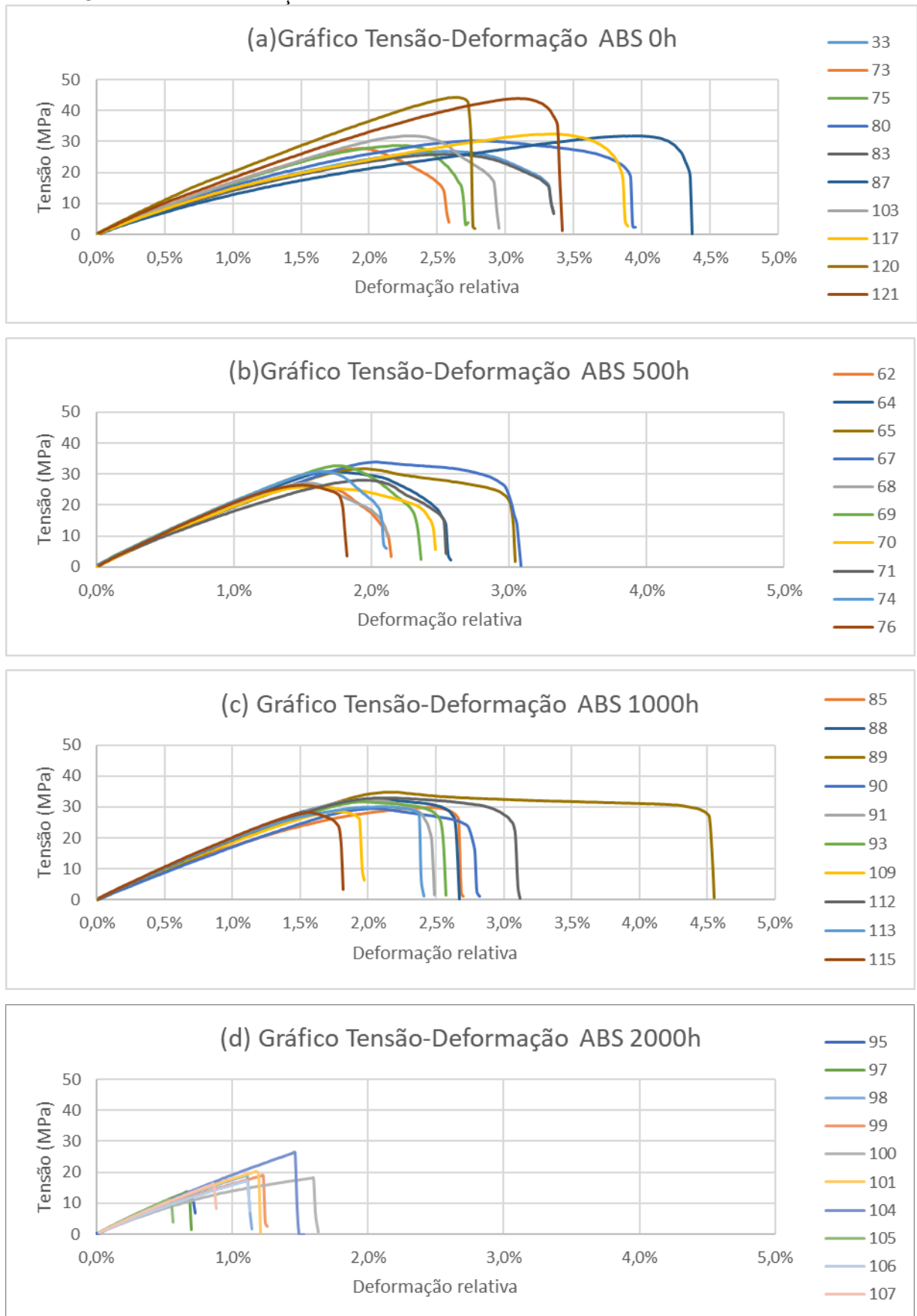


Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

4.2.4 Comportamento Tensão-Deformação

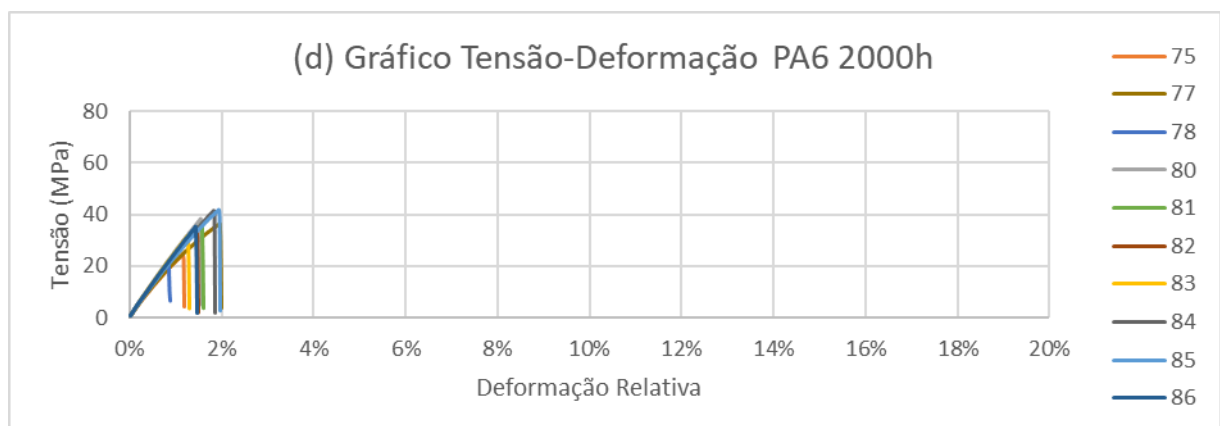
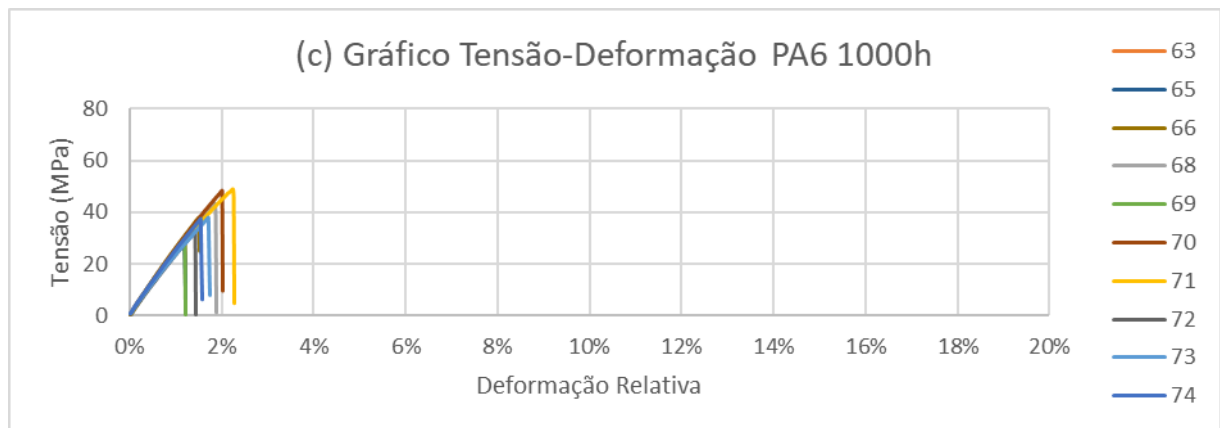
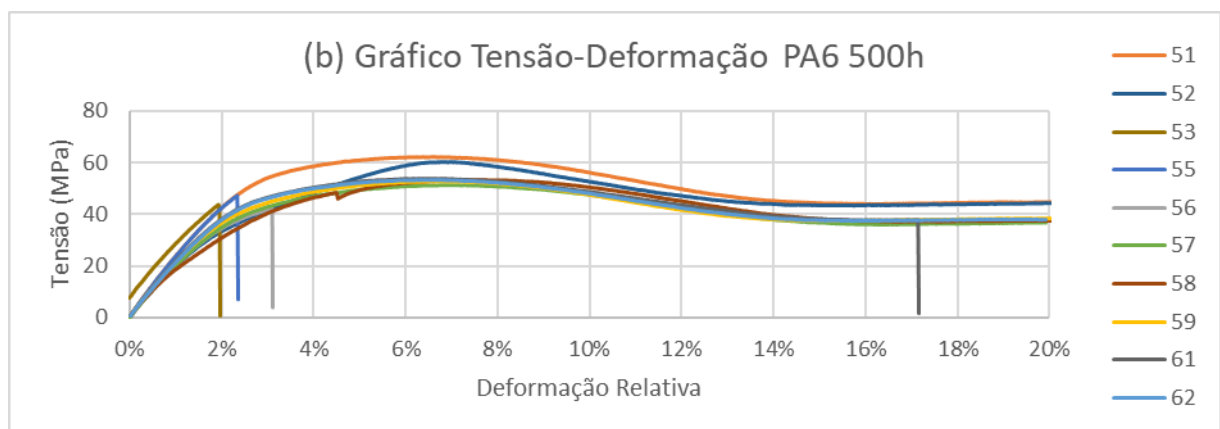
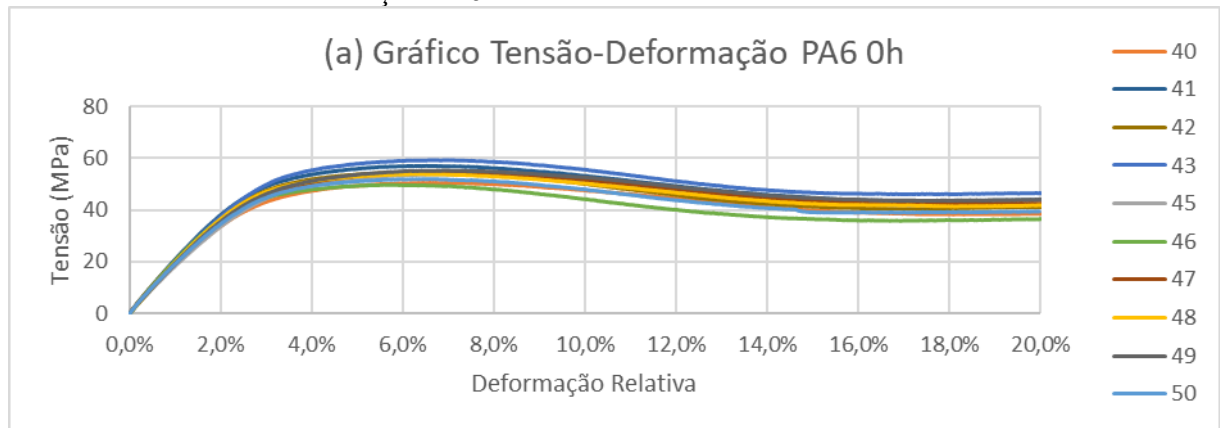
As curvas tensão-deformação obtidas para os quatro materiais poliméricos estudados, em função do tempo de exposição térmico, são apresentadas no Gráfico 3 ao Gráfico 6. Cada gráfico exibe a superposição das curvas das 10 amostras ensaiadas por condição, permitindo a visualização da dispersão experimental e da repetibilidade do processo de impressão e ensaio, estas curvas estão individualizadas nos APÊNDICE B ao APÊNDICE E.

Gráfico 3 - tensão x deformação do material ABS



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Gráfico 4 - tensão x deformação PA6



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Gráfico 5 - tensão x deformação PETG

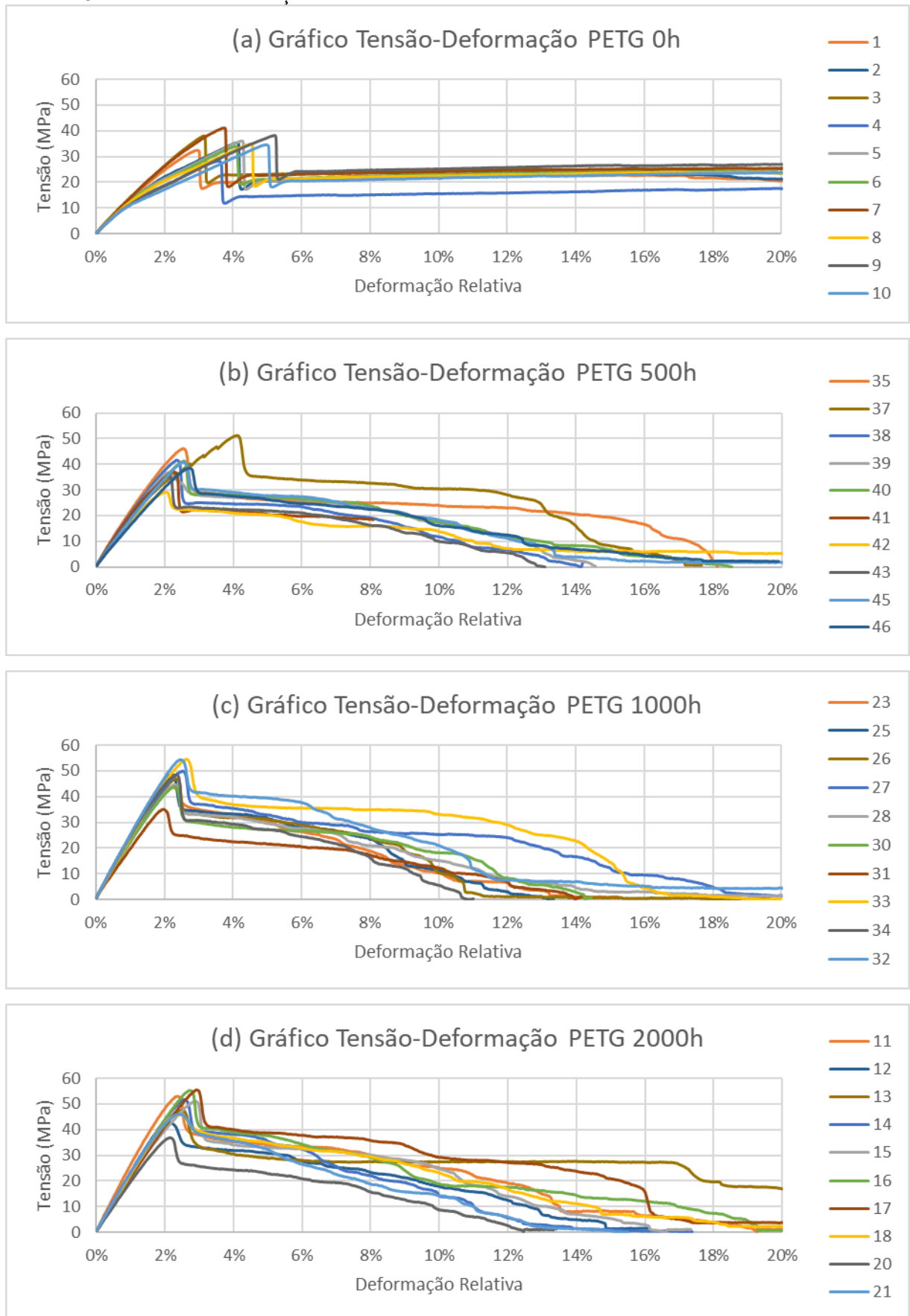
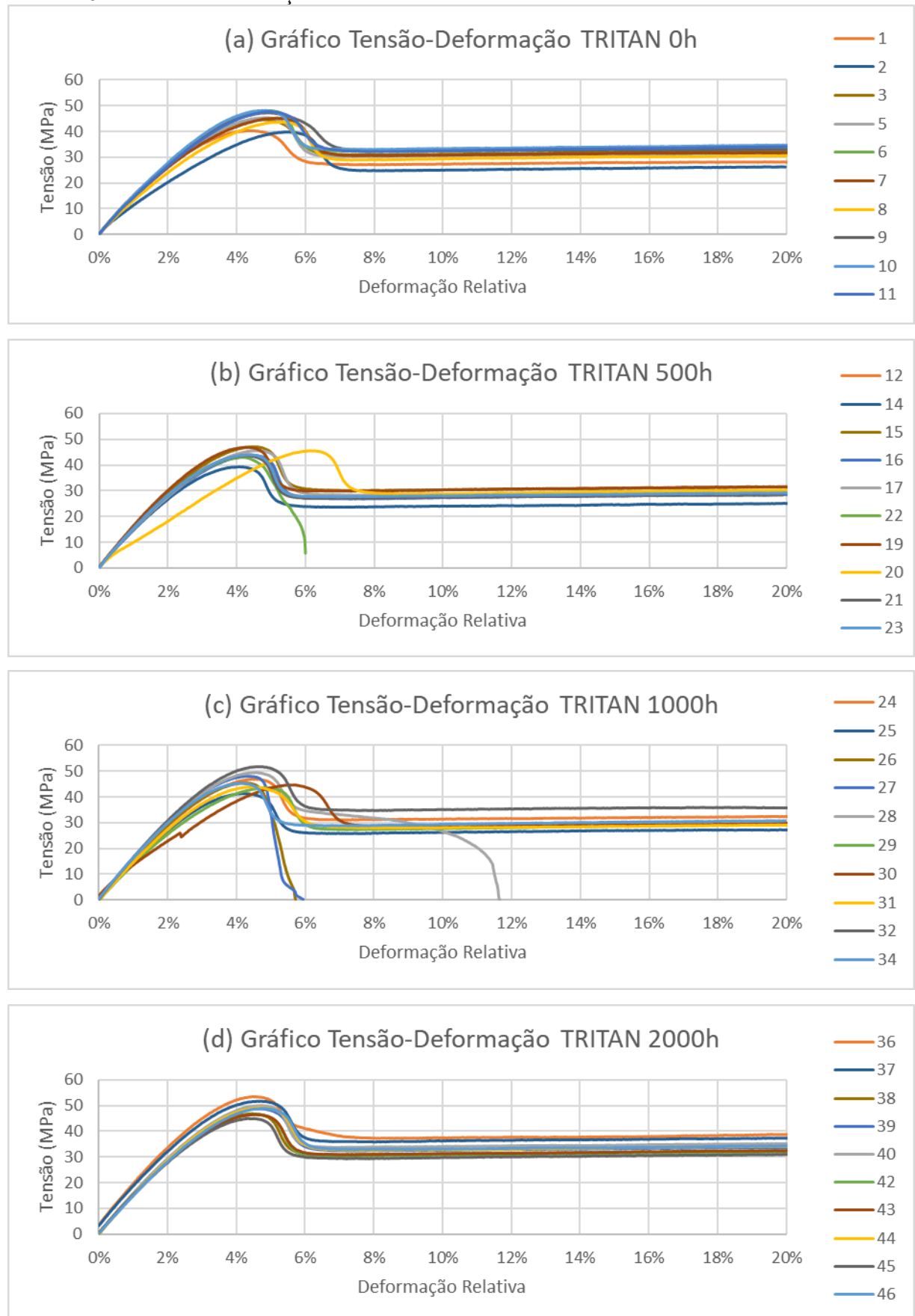


Gráfico 6 - tensão x deformação TRITAN®



Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

4.2.5 Módulo de elasticidade

A avaliação estatística do módulo de elasticidade dos materiais é apresentada na Tabela 8. A Análise de Variância (ANOVA) indicou que tanto os fatores principais (Material e Tempo) quanto a interação entre eles apresentaram significância estatística ($p < 0,05$). Os valores individuais de cada corpo podem ser visualizados nos APÊNDICE F ao APÊNDICE I.

Os valores médios com os respectivos desvios encontrados experimentalmente estão dispostos na Tabela 9 juntamente com a análise estatística é representada pelo par de letras entre parênteses abaixo de cada média: a primeira letra (minúscula) indica a comparação horizontal (efeito do tempo para cada material), enquanto a segunda letra (maiúscula) indica a comparação vertical (diferença entre materiais em cada tempo). Médias que compartilham a mesma letra, na respectiva direção de comparação, não apresentam diferença estatística significativa ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey.

Tabela 8 - Resumo da ANOVA dois fatores para o módulo de elasticidade

Fonte de Variação	P-valor
Material	< 0,001*
Tempo	< 0,001*
Interação (Mat x Tempo)	< 0,001*
Erro	
Total	

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Tabela 9 – Valores médios para módulo de elasticidade (MPa).

Material	0h	500h	1000h	2000h
ABS	1391,1±169,9 (a;A)	1756,8±135,5 (b;A)	1619±176,4 (b;A)	1649,4±223 (b;A)
PA6	1748±82 (a;B)	1750,8±185,5 (a;A)	2312,2±99,3 (b;B)	2264,8±161,4 (b;B)
PETG	1099,4±86,5 (a;C)	1660,4±121,8 (b;A)	2099,9±145,8 (c;C)	2033,4±145,3 (c;C)
TRITAN®	1185,6±113,6 (a;C)	1175,1±160,4 (a;B)	1187,2±167,5 (a;D)	1161±74 (a;D)

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026.

Nota: Os valores representam a Média ± Desvio Padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não apresentam diferença estatística entre os tempos de envelhecimento para o mesmo material. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não apresentam diferença estatística entre os materiais no mesmo tempo de exposição. As comparações foram realizadas via ANOVA seguida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

4.2.6 Limite de escoamento

Os resultados referentes ao limite de escoamento estão apresentados na Tabela 9. Diferentemente do módulo de elasticidade, observou-se que a exposição prolongada ao calor provocou uma alteração severa na ductilidade de alguns materiais. Especificamente para o PA6 (a partir de 1000 h) e para o ABS (em 2000 h), a degradação ocasionou uma transição no modo de falha, de dúctil para frágil, resultando na ruptura das amostras ainda no regime elástico. Nestes casos, indicados por (*) na tabela, o limite de escoamento foi considerado sendo igual ao limite de resistência a tração.

Tabela 10 - Valores médios para limite de escoamento (MPa).

Material	0h	500h	1000h	2000h
ABS	28,553±8,437 (a;A)	29,255±2,915 (a;A)	30,823±2,193 (a;A)	17,338±4,42 * (b;A)
PA6	41,781±2,181 (a;B)	41,012±5,111 (ab;B)	37,427±7,586 * (ab;B)	34,212±6,664 * (b;B)
PETG	24,046±8,854 (a;A)	38,252±4,541 (b;B)	46,908±5,812 (c;C)	48,463±5,923 (c;C)
TRITAN®	36,304±2,796 (a;B)	39,64±2,548 (ab;B)	41,536±2,386 (b;BC)	45,74±3,484 (c;C)

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Notas: Os valores representam a Média ± Desvio Padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não apresentam diferença estatística entre os tempos de envelhecimento para o mesmo material. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não apresentam diferença estatística entre os materiais no mesmo tempo de exposição. As comparações foram realizadas via ANOVA seguida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

As amostras dos grupos marcados com *ND sofreram ruptura frágil com deformações plásticas inferiores a 0,2%, inviabilizando o método de offset sendo os valores retratados do limite de resistência.

A avaliação estatística do limite de escoamento é apresentada na Tabela 11. A Análise de Variância (ANOVA) indicou que tanto os fatores principais (Material e Tempo) quanto a interação entre eles apresentaram significância estatística ($p < 0,05$).

Tabela 11 - Resumo da ANOVA dois fatores para o limite de escoamento

Fonte de Variação	P-valor
Material	< 0,001*
Tempo	< 0,001*
Interação (Mat x Tempo)	< 0,001*
Erro	
Total	

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

4.2.7 Limite de resistência à tração

A avaliação estatística do limite de resistência dos materiais é apresentada na Tabela 12. De maneira similar ao resultado obtido para o módulo de elasticidade, a análise de Variância (ANOVA) indicou que tanto os fatores principais (Material e Tempo) quanto a interação entre eles apresentaram significância estatística ($p < 0,05$). Com isso, ambas as variáveis têm significância no limite de resistência do material.

Tabela 12 - Resumo da ANOVA dois fatores para o limite de resistência à tração

Fonte de Variação	P-valor
Material	< 0,001*
Tempo	< 0,001*
Interação (Mat x Tempo)	< 0,001*
Erro	
Total	

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Já a Tabela 13, traz os valores médios e os grupos formados pelo teste de Tukey para os dados amostrais do limite de resistência a tração.

Tabela 13 - Valores médios para Limite de resistência a tração (Mpa).

Material	0h	500h	1000h	2000h
ABS	32,397±6,511	29,367±2,931	31,008±2,111	17,338±4,42
	(a;A)	(a;A)	(a;A)	(b;A)
PA6	54,12±2,868	52,001±6,388	37,427±7,586	34,212±6,664
	(a;B)	(a;B)	(b;B)	(b;B)
PETG	35,301±3,509	39,82±6,049	47,035±5,725	48,602±5,923
	(a;A)	(a;C)	(b;C)	(b;C)
TRITAN®	45,008±3,047	44,208±2,341	44,313±2,25	48,684±2,601
	(a;C)	(a;C)	(ab;C)	(b;C)

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026.

Nota: Os valores representam a Média ± Desvio Padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não apresentam diferença estatística entre os tempos de envelhecimento para o mesmo material. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não apresentam diferença estatística entre os materiais no mesmo tempo de exposição. As comparações foram realizadas via ANOVA seguida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

5 DISCUSSÃO

O objetivo central deste trabalho foi verificar a viabilidade da aplicação da manufatura aditiva na construção do sistema de isolamento, partindo da premissa de que a confiabilidade operacional é o pilar da indústria moderna. Nesse cenário, as máquinas elétricas assumem um papel de protagonismo absoluto; elas são as forças motrizes que sustentam desde processos de manufatura básica até sistemas complexos de infraestrutura. Dada a sua ampla disseminação no parque industrial, qualquer falha ou parada não planejada nesses ativos resulta em prejuízos financeiros em cascata e riscos à continuidade produtiva.

Entretanto, observa-se uma desconexão tecnológica crítica: enquanto a fabricação de novas máquinas elétricas caminha a passos largos rumo à Indústria 4.0, o setor de manutenção e reparo ainda apresenta uma dependência severa de processos manuais e artesanais. A falta de automação nos processos de recuperação como o rebobinamento, a impregnação ou a própria análise estrutural de componentes torna o reparo um serviço customizado, porém lento e sujeito à variabilidade humana. Essa lacuna tecnológica não apenas encarece o serviço, mas limita a reprodutibilidade e a precisão técnica necessárias para atender às exigências de qualidade e confiabilidade do mercado.

Ao retomar o propósito desta pesquisa, fica evidente que a introdução da MA busca justamente preencher esse vácuo de automação. A transição de um modelo de reparo puramente reativo e manual para um modelo integrado por tecnologias de inovação, permite que a recuperação dessas máquinas não seja apenas um paliativo, mas uma oportunidade de *upgrade* técnico, alinhando os ativos antigos aos padrões de desempenho exigidos pelo mercado atual.

A integração entre o CAD e a Manufatura Aditiva viabilizou a aplicação da prototipagem rápida, a qual permitiu a identificação precoce de inconsistências no modelo digital do isolante. Esse processo favoreceu um ciclo iterativo de testes, assegurando a eficácia das soluções de mitigação para os desafios encontrados. Notadamente, a falha de coesão ilustrada na Figura 13 confirma que variáveis de processo, como o Z-offset, impactam substancialmente a qualidade final; tal observação alinha-se ao descrito por Kafle et al. (2021), validando a premissa de que este ajuste é crítico para evitar a segregação das linhas de deposição.

Quando montado, o material ABS houve problemas na moldagem das bobinas, sendo o material menos flexível e resistente a impacto que o material tradicionalmente empregado. Com isso, ao bater nas bobinas para fazer a moldagem o ABS, PET e TRITAN® se quebraram. Nota-

se que, um requisito de materiais alternativos a serem analisados devem superar as propriedades do PA6.

Os materiais que apresentaram deformação na haste de fixação, ABS, PET e TRITAN®, indicam caso a temperatura de operação fosse de 105 °C ele se deformaria, pois em operação existe um torque que as bobinas aplicam sob a isolação e núcleo eletromagnético. Esse torque causaria a deformação da isolação e eventual contato entre o cobre e o núcleo ferromagnético causando a falha na máquina.

A alteração da cor dos materiais PA6 e ABS, apresentada na Figura 39 e Figura 40, respectivamente, indicam que houve alteração na estrutura química do polímero, isso é corroborado pela alteração de massa. No ABS, os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que esse material sai do ganho de massa médio de 0,27% para um ganho médio de 2,7% quando salta de 1000 h para 2000 h, mesmo que o intervalo que foi notada a maior alteração visual Figura 40. Além disso, nota-se que o ABS apresentou a transição no modo de falha, fragilidade, justamente nesse intervalo de tempo e por consequência uma queda brusca na redução do limite de resistência de tração.

Contrariando a expectativa inicial de perda de massa por degradação térmica, as amostras de ABS apresentaram um ligeiro ganho de massa após a exposição. Este fenômeno é consistente com a literatura sobre a termo oxidação do copolímero durante este processo, ocorre a oxidação na cadeia polimérica. O peso dos átomos de oxigênio incorporados à estrutura supera a massa dos produtos voláteis liberados nas etapas iniciais de degradação, resultando em um aumento líquido de massa (Balart *et al.*, 2019; Tiganis *et al.*, 2002).

Os resultados do módulo de elasticidade e Limite da resistência obtidos no grupo que não foi exposto foram comparados com os demais resultados reportados para condições de ensaio similares por outros autores na Tabela 14 e Tabela 15, respectivamente. Esses resultados mostram uma similaridade dos resultados.

Tabela 14 - Comparativo dos resultados do módulo de elasticidade (MPa) com a literatura

Material	0h	Literatura
ABS	1391,1±169,9	2180±680 (Cavalcanti; Banea; De Queiroz, 2020)
PA6	1748±82	1561.7 ± 123.6 (Chapman <i>et al.</i> , 2021)
PETG	1099,4±86,5	1291 (Martins <i>et al.</i> , 2024)
TRITAN®	1185,6±113,6	1380±10 (Cavalcanti; Banea; De Queiroz, 2020)

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Apesar da similaridade para alguns materiais como o ABS, os valores encontrados apresentam significativa diferença dos resultados obtidos nesse trabalho, mas essa divergência era esperada, pois os parâmetros de impressão e demais condições que afetam os resultados não são exatamente os mesmos. Como apontado em vários estudos, a alteração de configurações e condicionamento dos materiais afeta as propriedades mecânicas (Bhuiyan; Khanafer, 2025; Popescu *et al.*, 2018; Wirawan *et al.*, 2025).

Tabela 15 - Comparativo dos resultados do Limite da resistência (MPa) com a literatura

Material	0h	Literatura
ABS	32,397±6,511	31,03±0,11; 27 (Cavalcanti; Banea; De Queiroz, 2020; Wirawan <i>et al.</i> , 2025)
PA6	54,12±2,868	50,5 (Lakshman; Karthick; Dinesh, 2024)
PETG	35,301±3,509	44,5 (Lakshman; Karthick; Dinesh, 2024)
TRITAN®	45,008±3,047	37,79±1,45 (Cavalcanti; Banea; De Queiroz, 2020)

Fonte: elaborado pelo próprio autor, 2026

Comparando os resultados das amostras de PA6 e ABS, Gráfico 4 e Gráfico 3 respectivamente, notamos que o PA6 teve um comportamento mais uniforme durante os ensaios, isso também pode ser visto pela redução do erro padrão e do desvio padrão apresentados na Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 13.

Esse processo oxidativo desencadeia reações de reticulação (cross-linking) espontânea, que restringem severamente a mobilidade das cadeias poliméricas. Consequentemente, a fase elastomérica perde sua capacidade de absorver energia por deformação plástica. Isso explica a

transição do comportamento dúctil para frágil observada nos ensaios de tração, onde as amostras envelhecidas apresentaram uma redução drástica no alongamento na ruptura e falha prematura sem escoamento visível.

O ABS sofreu uma alteração significativa de rigidez logo na primeira etapa de exposição (de 0 para 500 h), indicada pela mudança da letra 'a' para 'b' na Tabela 9. Não houve diferença estatística entre 500 h, 1000 h e 2000 h ($p > 0,05$), sugerindo que para o módulo da elasticidade não houve alteração quando expostos. Esse comportamento condiz com o fato de o recozimento aliviar tensões internas do material, mas a partir da liberação dessas tensões a exposição a temperatura não traz mais nenhum benefício.

Além da alteração do comportamento da falha que extinguiu a fase de escoamento nesse material em 2000 h, o limite de escoamento não teve alteração estatisticamente relevante até 1000 h. De maneira similar, o Limite de resistência a tração não teve alteração até 1000 horas de exposição, e caiu de forma abrupta no maior tempo. Essa queda de aproximadamente 46% no limite de resistência de tração quando comparado ao valor inicial é condizente com o comportamento logaritmo citado na literatura (Alghamdi; Desuqi, 2020; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017d).

Já a PA6 a alteração de massa foi negativa, ou seja, perdeu massa, essa perda ocorreu de forma mais gradual, também se observou na alteração de cor, Figura 39. O mecanismo de perda de massa se dá pela quebra das cadeias poliméricas liberando compostos voláteis durante o tempo.

Diferentemente do ABS, a PA6 demonstrou uma estabilidade inicial, não havendo alteração significativa nas três propriedades mecânicas analisadas até 500 horas de exposição ($p > 0,05$, ambos grupos 'a'). A degradação só se manifestou estatisticamente no intervalo entre 500 h e 1000 h, onde houve uma mudança de patamar (para o grupo 'b') para o módulo de elasticidade e para resistência de tração. Após essa queda, o material voltou a estabilizar, não apresentando diferenças significativas entre 1000 h e 2000 h. Já para o limite de escoamento ocorreu a transição de modo de falha nesse mesmo intervalo de tempo. Com relação ao limite de resistência a tração para esse parâmetro se manteve similar até 500 h e observou-se uma queda no limite de tração de forma a partir de 1000 h.

Conforme pode-se visualizar na Figura 42 como o PETG deformou complementemente isso foi causado pela exposição a uma temperatura acima de sua temperatura de transição vítrea. Essa deformação não interfere nos resultados de massa nem de tração, pois as medidas mecânicas foram refeitas quando a amostra foi retirada da estufa. Esse material apresentou uma grande estabilidade térmica quando analisamos os resultados de variação de massa.

O PETG sofreu alterações significativas no módulo de elasticidade e no limite de escoamento em cada etapa inicial de exposição, diferenciando-se estatisticamente de 0 h para 500 h (a para b) e novamente de 500 h para 1000 h (b para c). Contudo, entre 1000 h e 2000 h, a degradação estabilizou. Já o comportamento do limite de resistência de tração teve um comportamento mais homogêneo, ocorrendo uma única diferença relativa quando se compara 500 horas de exposição e 1000 horas.

Também é possível notar que uma alteração do comportamento quando o material é inserido na estufa na região plástica de deformação. Sem exposição o material forma o pescoço e este permanece íntegro e suportando uma carga quase que constante até o fim do teste, Gráfico 5(a), e após a exposição a temperatura essa carga apresentou uma redução à medida que o deslocamento era aumentado. Com isso o material passou a falha completa antes de finalizar o teste (60s).

O TRITAN® apresentou uma excelente estabilidade térmica. Conforme demonstrado pelos resultados da variação de massa (Tabela 6), pela análise visual (Figura 41) e pelo teste de Tukey (Tabela 9) indicando que não houve variação estatisticamente significativa no módulo de elasticidade em nenhum dos tempos de exposição avaliados ($p > 0,05$ para todas as comparações). As letras mantiveram-se iguais (a) do início ao fim do ensaio (2000 h), indicando que a estrutura polimérica deste material resistiu à degradação oxidativa e manteve sua rigidez original nas condições testadas.

Para limite de resistência o comportamento foi um pouco diferente, para o primeiro intervalo o limite médio foi de 36,4 MPa e já nas primeiras 500 horas de exposição na estufa o material apresentou um aumento relevante desse parâmetro e houve outro aumento no limite de resistência relevante para as 1000 horas e se estabiliza para o próximo grupo. Para o limite de resistência de tração o grupo de amostra de controle teve um comportamento similar ao que ficou por 500 horas na estufa, o grupo de 1000 horas teve ao mesmo tempo um comportamento similar aos dois primeiros grupos e ao último, indicando ele ser um grupo de transição. Também é possível visualizar no Gráfico 6 que o TRITAN® não se quebra tendo uma fase plástica de deformação durante todo o tempo que foi ensaiado (60 s).

Para análise do envelhecimento térmico fundamentada na norma ABNT NBR IEC 60216-1, adota-se o conceito de ponto final (end-point), definido como a redução de 50% da resistência à tração inicial do material. Com base nos tempos explorados neste trabalho, observa-se que apenas o ABS e a PA6 apresentaram um decréscimo efetivo desse parâmetro (Tabela 13). Em contrapartida, os demais materiais demonstraram estabilidade e, em alguns casos, um incremento na resistência mecânica após 2.000 horas de exposição. Esse

comportamento sugere a ocorrência de um processo de recozimento (annealing), no qual a energia térmica promove o rearranjo das cadeias poliméricas e o aumento da cristalinidade, conferindo um ganho inicial de rigidez estrutural antes que os mecanismos de oxidação e cisão de cadeias tornem-se predominantes.

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal desse trabalho foi verificar a viabilidade da aplicação da Manufatura Aditiva tipo FFF na construção de sistemas de isolamento, aplicados no reparo de máquinas elétricas. Com os resultados obtidos pela verificação qualitativa da técnica FFF e dos materiais e os resultados da análise do comportamento mecânico dos filamentos ABS, TRITAN®, PA6 e PETG quando expostos ao calor. Pode-se observar que o PETG e ABS não são indicados para implementação de sistema de isolamento em máquinas elétricas, devido dificuldade de montagem, baixa temperatura de transição vítrea, no caso do PETG e a rápida deterioração térmica do ABS.

A avaliação qualitativa demonstra que a PA6 é um forte candidato a aplicação em sistema de isolamento devido a suas características, como alta temperatura da transição vítrea e aprovação de acordo com a metodologia. Entretanto, o estudo térmico apresentou degradação de aproximadamente 37% no limite de resistência. Isso indica que em uma avaliação completa da durabilidade térmica o material não alcançaria a vida útil esperada de 20000 horas para uma temperatura compatível com as classificações térmicas dos sistemas de isolamento.

Apesar da análise qualitativa ter apontado desafios, o levantamento da exposição ao calor principalmente quando se tratando do TRITAN® indica ser o material mais estável termicamente. Este pode abranger outras aplicações onde a temperatura de operação é mais baixa do que a temperatura de transição vítrea como em bobina de contadores e bobinas vibratórias. Dessa forma nenhum dos materiais testados é apto a ser aplicado como isolante de ranhura em máquinas elétricas, sendo apresentadas ideias que possam viabilizar a aplicação da técnica na próxima seção.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como resultado a PA6 apresentou a capacidade de ser montado de forma satisfatória, portanto apontamos que, para continuidade desse trabalho recomenda-se investigar polímeros de engenharia com maior estabilidade térmica (como PEEK ou PEI), ou ainda verificar se aditivos a PA6 como fibra de vidro, fibra de carbono entre outros filamentos disponíveis no mercado, melhoram o desempenho de degradação térmica. Em ambos os casos, é necessário verificar se a produtividade e durabilidade térmica se justificam, e ainda se tem adesão do mercado.

Também seria pertinente realizar ensaios de rigidez dielétrica nas peças impressas após a montagem, para verificar se o estresse mecânico da dobra criou microfissuras imperceptíveis a olho nu que comprometam o isolamento.

Por fim, como Jiménez *et al.* (2019) concluíram a escolha da tecnologia de fabricação depende da aplicação e não da tecnologia de manufatura. Sugere-se a investigação de outras tecnologias para criação de isolamento de ranhura, uma delas seria o uso de tecnologias RepRap adaptadas para corte a laser.

REFERÊNCIAS

ADDITIVE DRIVES. **3D Printed Electric Motors from Additive Drives**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.additive-drives.de/en/3d-printed-electric-motors/>. Acesso em: 21 dez. 2025.

ALGHAMDI, A. S.; DESUQI, R. K. **A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing**. Heliyon, [s. l.], v. 6, n. 1, p. e03120, 2020.

Arrhenius, Svante. “Über Die Reaktionsgeschwindigkeit Bei Der Inversion von Rohrzucker Durch Säuren”. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie* 4U, n. 1 (1889): 226–48. <https://doi.org/10.1515/zpch-1889-0416>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16929 - Máquinas elétricas girantes — Reparo, revisão, recuperação ou modificação**. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60085: isolamento elétrica: avaliação e designação térmicas**. Rio de Janeiro : Abnt, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60216-1: materiais isolantes elétricos: propriedades de durabilidade térmica: parte 1: métodos de envelhecimento e avaliação de resultados de ensaio**. Abnt, , 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60216-2: materiais isolantes elétricos: propriedades de durabilidade térmica: parte 2: determinação das propriedades de durabilidade térmica dos materiais isolantes elétricos: escolha dos critérios de ensaio**. Rio de Janeiro : Abnt, 2017c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60216-4-1: materiais isolantes elétricos: propriedades de durabilidade térmica: parte 4-1: estufas de envelhecimento: estufas com um compartimento**. Rio de Janeiro : Abnt, 2017d.

ASTM D638 TENSILE STRENGTH TEST PIECES (5 TYPES) BY ATOM ' S LAB | DOWNLOAD FREE STL MODEL. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.printables.com/model/410751-astm-d638-tensile-strength-test-pieces-5-types>. Acesso em: 29 dez. 2025.

BALART, R. *et al.* **Kinetic Analysis of the Thermal Degradation of Recycled Acrylonitrile-Butadiene-Styrene by non-Isothermal Thermogravimetry**. *Polymers*, [s. l.], v. 11, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/2/281>. Acesso em: 26 jan. 2026.

BHUIYAN, M. Z. H.; KHANAFER, K. Exploring the Nonlinear Mechanical Characteristics of 3D-Printed ABS with Varying Infill Densities. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 103, 2025.

CAVALCANTI, D. K. K.; BANEJA, M. D.; DE QUEIROZ, H. F. M. Effect of Material on the Mechanical Properties of Additive Manufactured Thermoplastic Parts. **Annals of Dunarea de**

Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology, [s. l.], v. 31, p. 5–12, 2020.

CHAPMAN, G. *et al.* Studies on 3D Printability of Novel Impact Modified Poliamida 6: Experimental Investigations and Performance Evaluation. **Macromolecular Materials and Engineering**, [s. l.], v. 306, n. 2, p. 2000548, 2021.

CHEN, Z. *et al.* 3D printing of ceramics: A review. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 661–687, 2019.

CONDUFIO. “**Polivolterm DMD 0,40 x 1000mm Classe F 155°C - 3kg | Condufio**”. Acesso em 16 de fevereiro de 2026. <https://www.lojacondufio.com.br/isolantes-e-amarracao/fibras-e-papeis-isolantes/polivolterm-dmd/polivolterm-dmd-0-40-x-1000mm-classe-f-155-c-3kg>.

D20 COMMITTEE. **Test Method for Tensile Properties of Plastics**. ASTM International, , 2015. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D638-14>. Acesso em: 17 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese 2025**. [s. l.], 2025.

FILAMENTO TRITAN PRETO - 3D LAB - MELHORES FILAMENTOS. *In*: 3D LAB. [s. d.]. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/filamento-tritan-preto/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

HEMMATI, R.; WU, F.; EL-REFAIE, A. **Survey of Insulation Systems in Electrical Machines**. *In*: 2019 IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC), 2019, San Diego, CA, USA. **2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**. San Diego, CA, USA: IEEE, 2019. p. 2069–2076. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8785099/>. Acesso em: 11 out. 2024.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **117-IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery**. [S. l.]: [s. d.], 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60505 Evaluation and qualification of electrical insulation systems**. [S. l.]: [s. d.], 2011.

JIMÉNEZ, M. *et al.* Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. **Complexity**, [s. l.], v. 2019, n. 1, p. 9656938, 2019.

KAFLE, A. *et al.* 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 18, p. 3101, 2021.

KAREEM, F. A.; MICHAEL, P. A. An investigation on applications of additive manufacturing of electrical machines. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 58, p. 86–90, 2022.

KINGSLEY, C.; UMANS, S. D.; FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas - 6.ed.: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6. eded. Porto Alegre: Bookman, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=2btoIMgOLhwC>.

LAKSHMAN, S. S. V.; KARTHICK, A.; DINESH, C. Evaluation of mechanical properties of 3D printed PETG and Polyamide (6) polymers. **Chemical Physics Impact**, [s. l.], v. 8, p. 100491, 2024.

LI, X.-R. *et al.* Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts. In: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION (ICHVE), 2018, ATHENS, Greece. **2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. ATHENS, Greece: IEEE, 2018. p. 1–4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8642096/>. Acesso em: 13 out. 2024.

LI, W. *et al.* Full-life-cycle eco-friendly polymeric insulating materials: research progress and future prospects. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. l.], v. 56, n. 37, p. 373003, 2023.

Lima, Luís Fernando De, Vinicius Abrão Da Silva Marques, e Marcos Massao Shimano. “Influência da temperatura ambiente no comportamento mecânico do PLA utilizado em manufatura aditiva”. *Matéria* (Rio de Janeiro) 27, n. 4 (2022): e20220177. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0177>.

MARTINS, R. F. *et al.* Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymeric Materials—PLA and PETG—For Biomechanical Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 13, p. 1868, 2024.

MONTGOMERY, D. C. (org.). **Design and analysis of experiments**. Eighth editioned. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

MONZEL, W. J. *et al.* Dielectric breakdown of additively manufactured polymeric materials. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 3543–3549, 2015.

NASEER, M. U. *et al.* A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1940, 2021.

PNE 2030 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. [S. l.]: [s. d.], 2007.

POPESCU, D. *et al.* FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 69, p. 157–166, 2018.

PORTELA, S. Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D. In: 3D LAB. 6 out. 2017. Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SEKULA, R. *et al.* Characteristics of 3D Printed Biopolymers for Applications in High-Voltage Electrical Insulation. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 11, p. 2518, 2023.

SELEMA, A.; IBRAHIM, M. N.; SERGEANT, P. Advanced Manufacturability of Electrical Machine Architecture through 3D Printing Technology. **Machines**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 900, 2023.

STONE, G. C. *et al.* (org.). **Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair**. Second editioned. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. (IEEE Press Series on Power Engineering, nº 8).

SZABÓ, L.; FODOR, D. The Key Role of 3D Printing Technologies in the Further Development of Electrical Machines. **Machines**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 330, 2022.

TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO DE VIDRO DE FILAMENTO 3D. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://pt.mfgrobots.com/mfg/3dprinting/1004028757.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 25 fev. 2025.

TICHY, T. *et al.* Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems. *In: 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE)*, 2019, Wroclaw, Poland. **2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)**. Wroclaw, Poland: IEEE, 2019. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8810300/>. Acesso em: 2 nov. 2024.

TIGANIS, B. E. *et al.* Thermal degradation of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 425–434, 2002.

TIWARI, D. *et al.* A Review of Circular Economy Research for Electric Motors and the Role of Industry 4.0 Technologies. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 17, p. 9668, 2021.

UL 1446 STANDARD FOR SAFETY OF SYSTEMS OF INSULATING MATERIALS. Underwriters Laboratories. , 2019.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL 746B : Standard for Polymeric Materials - Long Term Property Evaluations**. IL:UL, 2024.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL 1446 Standard for Safety of Systems of Insulating Materials**. IL:UL, 2020.

VESELÝ, P. *et al.* Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 461, p. 012091, 2018.

WEG. **GUIA DE ESPECIFICAÇÃO MOTORES ELÉTRICOS**. Jaraguá do Sul:WEG, 2023.

WIRAWAN, W. *et al.* Impact of Print Speed and Nozzle Temperature on Tensile Strength of 3D Printed ABS for Permanent Magnet Turbine Systems. **Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST)**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 90, 2025.

WROBEL, R. *et al.* Characterising the performance of selected electrical machine insulation systems. *In: 2015 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION*, 2015, Montreal, QC, Canada. **2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015. p. 4857–4864. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7310345/>. Acesso em: 13 out. 2024.

WU, F.; EL-REFAIE, A. M. Towards Fully Additively-Manufactured Permanent Magnet Synchronous Machines: Opportunities and Challenges. *In: 2019 IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC)*, 2019, San Diego, CA, USA. **2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**. San Diego,

CA, USA: IEEE, 2019. p. 2225–2232. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8785210/>. Acesso em: 29 set. 2024.

ZOCCA, A. *et al.* Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 98, n. 7, p. 1983–2001, 2015.

APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE DO DATALOGGER

```

#include <SD.h>
#include <max6675.h>
#include <Wire.h>
#include <RTCLib.h>
#include <SPI.h>

// Configuração do RTC
RTC_DS1307 rtc;

// Configuração do SD
const int SD_CS = 10; //11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK) e 10 (CS)

const int pinRemocaoSD = 5; // Pino que controla a remoção do SD

//Configuração dos MAX6675K
MAX6675 termopar1(6, 8, 7); // SCK, CS, MISO
MAX6675 termopar2(6, 9, 7); // SCK, CS, MISO

//Constantes de calibração
const int cal_term1 = 3.5; //11,5;11,05;11,05
const int cal_term2 = -8;

//Temperatura de exposição
const int tempe = 105;
//Ultimo tempo
unsigned long lastMillis = 0;
// Tempo acumulado em milissegundos
unsigned long tempoAcima = 0;
//nome do arquivo que armazena a contagem de tempo
const char* arquivoTempo = "tempo.txt";
unsigned long delta; //Variavel para pegar a diferença de tempo
unsigned long now; // Variavel que armazena o horario atual

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();

  // Inicializa RTC
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("Erro RTC!");
    while (1);
  }
  else {
    Serial.println("RTC ok ");
  }

  //Inicializa SD
  if (!SD.begin(SD_CS)) {
    Serial.println("Erro SD!");
    while (1);
  }
  else{
    Serial.println("SD ok");
  }
}

```

```

// Tenta ler o tempo acumulado do arquivo
File arquivo = SD.open(arquivoTempo, FILE_READ);
if (arquivo) {
    tempoAcima = arquivo.parseInt();
    arquivo.close();
} else {
    tempoAcima = 0;
}
lastMillis = millis();
File arquivoLog = SD.open("log_faut.txt", FILE_WRITE);

if (arquivoLog) {
    // Pega a data/hora exata do reinício (o RTC já foi inicializado)
    DateTime agora = rtc.now();

    Serial.println("Gravando marcador de reinício no log...");

    arquivoLog.print("--- REINICIO DO SISTEMA ---,"); // Coluna 1
    arquivoLog.print("EVENTO,"); // Coluna 2 (placeholder)
    arquivoLog.print(agora.day());
    arquivoLog.print("/");
    arquivoLog.print(agora.month());
    arquivoLog.print("/");
    arquivoLog.print(agora.year());
    arquivoLog.print(",");
    arquivoLog.print(agora.hour());
    arquivoLog.print(":");
    arquivoLog.print(agora.minute());
    arquivoLog.print(":");
    arquivoLog.println(agora.second());

    // Fecha o arquivo para que o loop() possa usá-lo
    arquivoLog.close();
}
else {
    Serial.println("Falha ao abrir log_temp.txt para escrever marcador!");
}

}

void loop() {
    //Leitura dos termopares
    float temp1 = termopar1.readCelsius()+cal_term1;
    float temp2 = termopar2.readCelsius()+cal_term2;

    //Leitura da Hora atual
    DateTime agora = rtc.now();

    // Contabilização do tempo de exposição.
    if (temp1 > (tempe - 2)) {
        now = millis();
        delta = now - lastMillis;
        tempoAcima += delta;
        lastMillis = now;
    }
}

```

```

// Salva o tempo acumulado no SD card
SD.remove(arquivoTempo);
File arquivo = SD.open(arquivoTempo, FILE_WRITE);
if (arquivo) {
    arquivo.seek(0); // Garante sobrescrever desde o início
    arquivo.print(tempoAcima);
    arquivo.close();
}
} else {
    lastMillis = millis();
}

// Calcula o tempo de exposição em horas
float hrs = tempoAcima/3600000;

// Salva Log no SD
File arquivo = SD.open("log_temp.txt", FILE_WRITE);
if (arquivo) {
    arquivo.print(temp1);
    arquivo.print(",");
    arquivo.print(temp2);
    arquivo.print(",");
    arquivo.print(agora.day());
    arquivo.print("/");
    arquivo.print(agora.month());
    arquivo.print("/");
    arquivo.print(agora.year());
    arquivo.print(",");
    arquivo.print(agora.hour());
    arquivo.print(":");
    arquivo.print(agora.minute());
    arquivo.print(":");
    arquivo.println(agora.second());
    arquivo.close();
}

// Envia via Serial
Serial.print(temp1);
Serial.print(",");
Serial.print(temp2);
Serial.print(",");
Serial.print(agora.day());
Serial.print("/");
Serial.print(agora.month());
Serial.print("/");
Serial.print(agora.year());
Serial.print(",");
Serial.print(agora.hour());
Serial.print(":");
Serial.print(agora.minute());
Serial.print(":");
Serial.print(agora.second());
Serial.print(",");
Serial.print(tempoAcima);
Serial.print(",");
Serial.println(hrs);

// Verifica se o pino de remoção está em nível alto (5V)
if (digitalRead(pinRemocaoSD) == HIGH) {

```

```

    Serial.println("Pino 5 em HIGH: Preparando para remover o cartão
SD...");

    // Fecha qualquer arquivo aberto
    if (arquivo) {
        arquivo.close();
        Serial.println("Arquivo fechado com sucesso.");
    }

    // Desativa o módulo SD configurando CS como HIGH
    digitalWrite(SD_CS, HIGH);
    Serial.println("Módulo SD desativado. Você pode remover o cartão com
segurança.");

    // Aguarda até que o pino volte para LOW antes de continuar
    while (digitalRead(pinRemocaoSD) == HIGH) {
        delay(100); // Aguarda enquanto o pino está em HIGH
    }

    Serial.println("Pino 5 voltou para LOW. Retomando operações com o
cartão SD...");

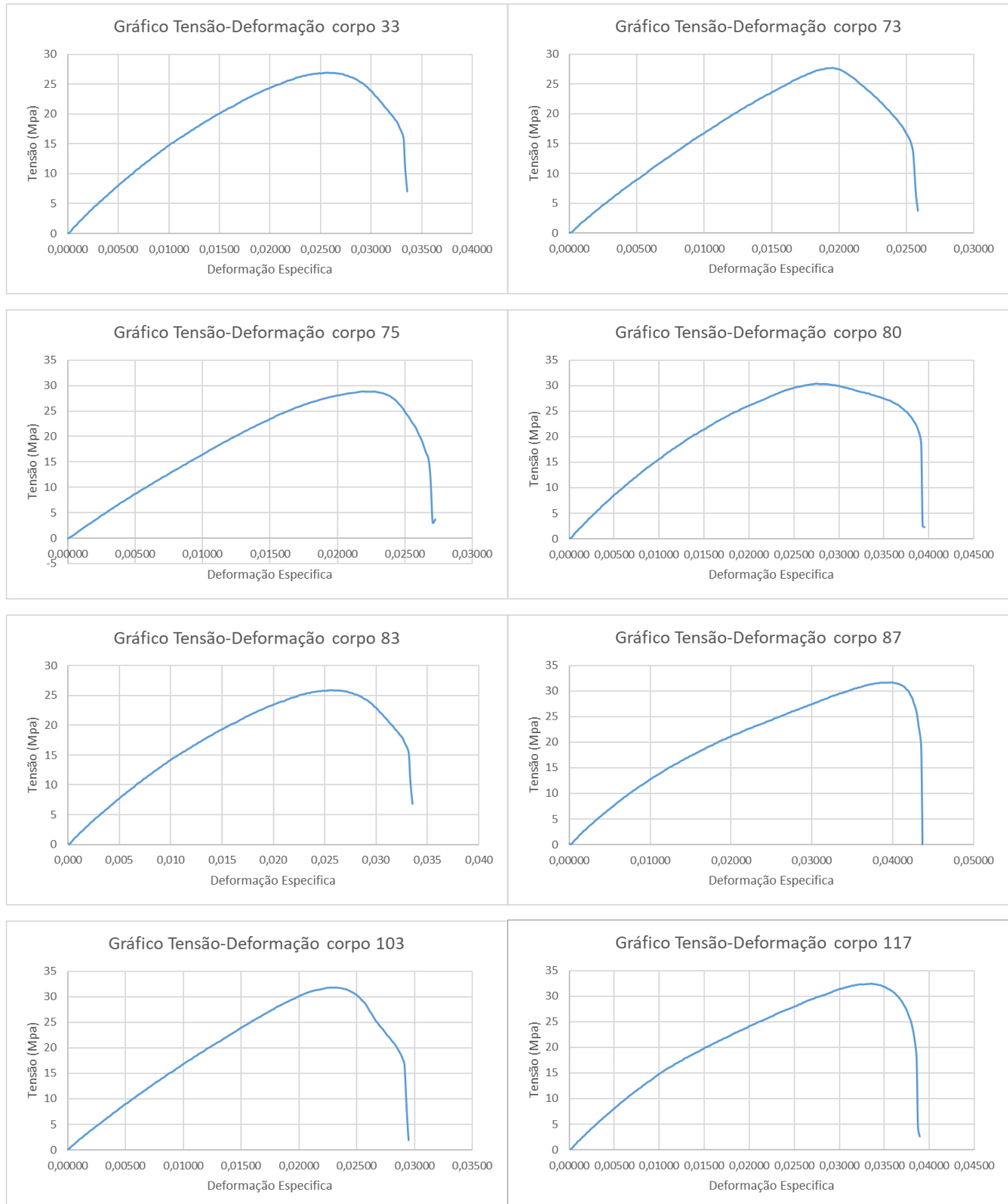
    // Reativa o módulo SD configurando CS como LOW e inicializa novamente
    if (!SD.begin(SD_CS)) {
        Serial.println("Erro ao reativar o cartão SD!");
        while (1); // Para execução caso falhe
    }

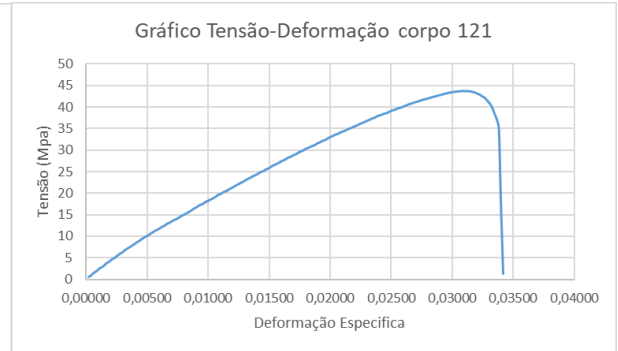
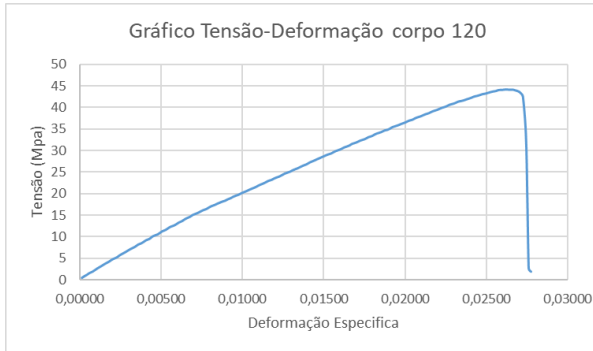
    Serial.println("Cartão SD reativado com sucesso.");
}
delay(60000);
}

```

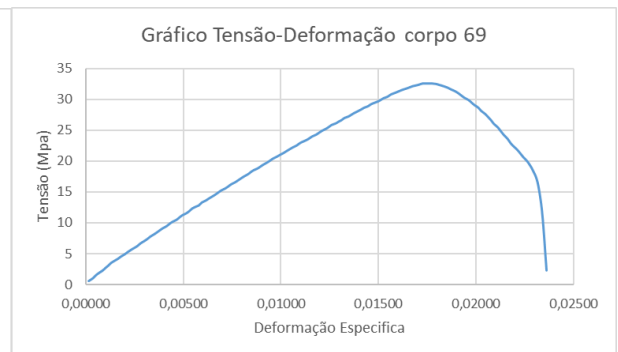
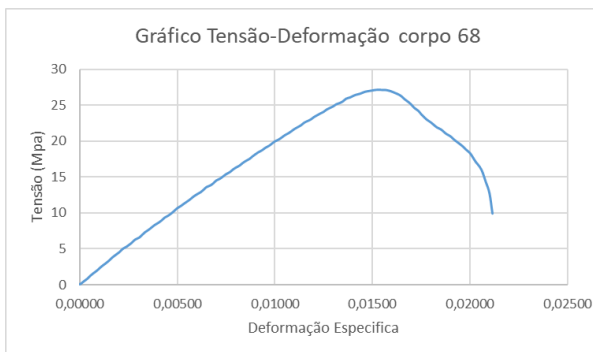
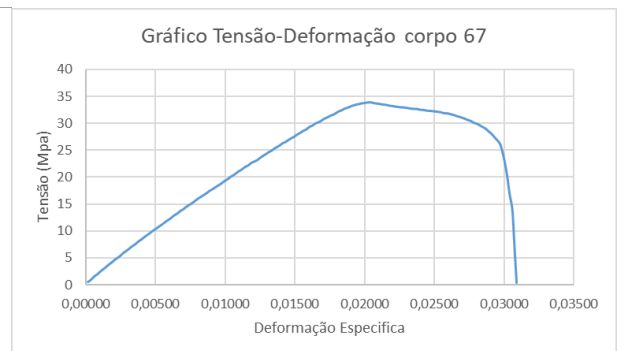
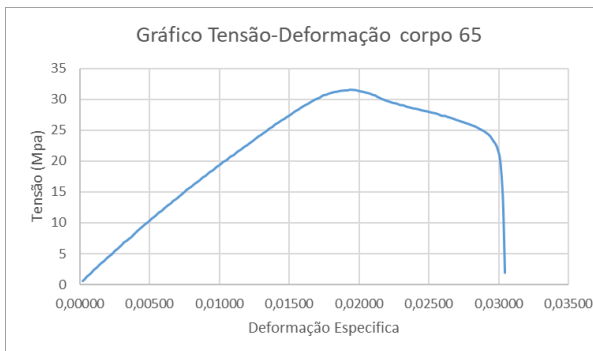
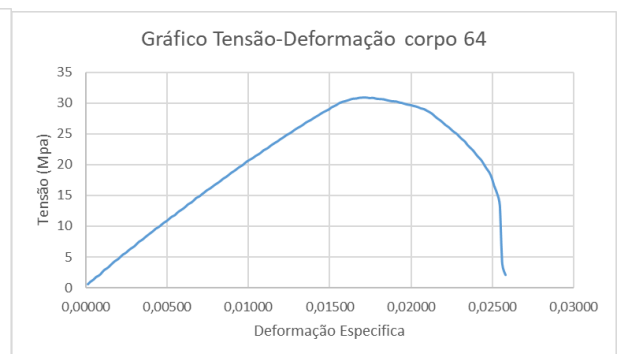
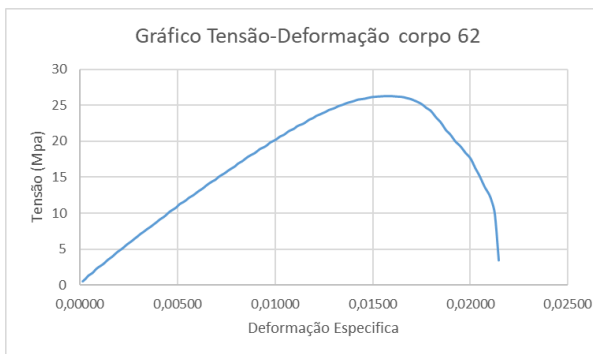
APÊNDICE B - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO ABS

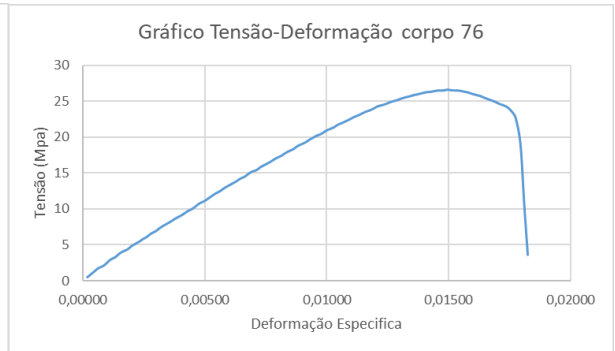
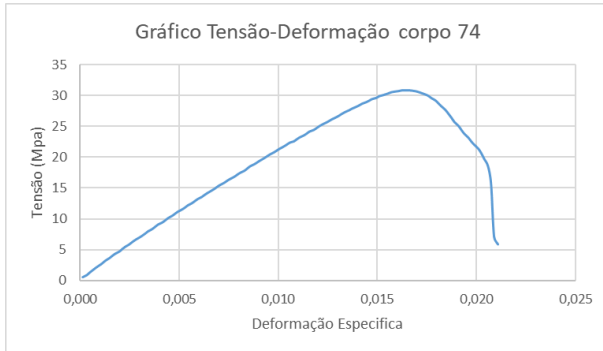
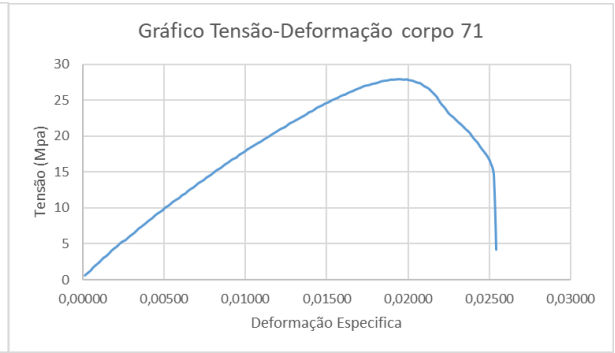
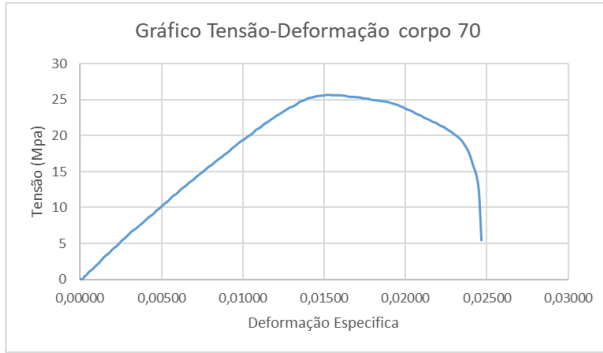
Grupo de Controle



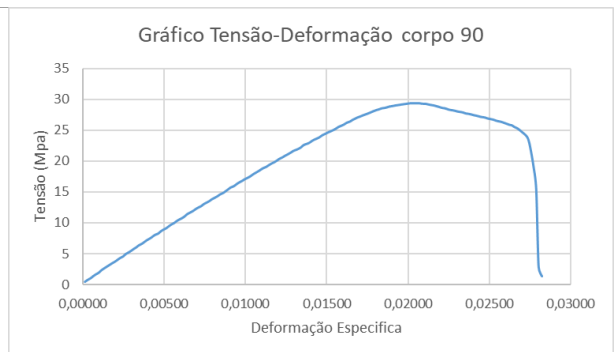
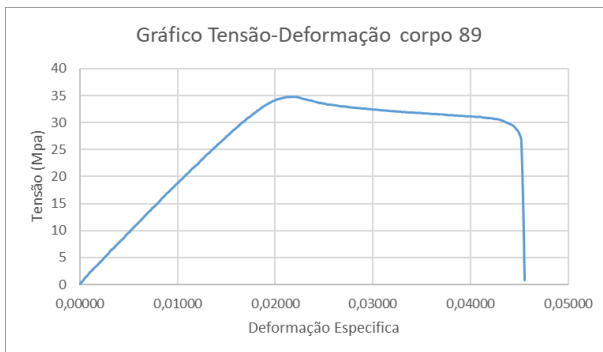
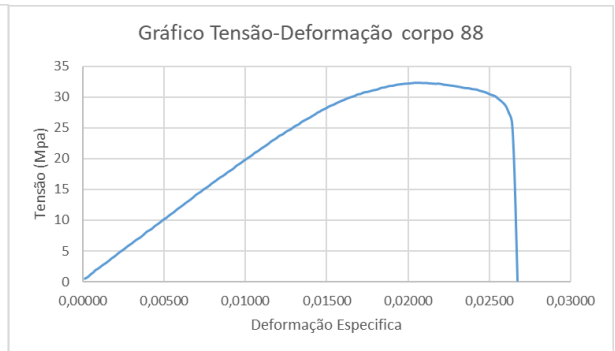
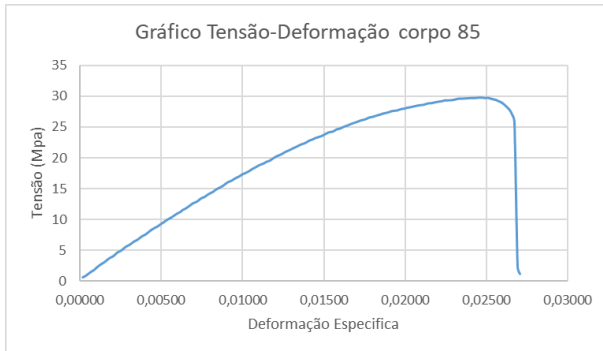


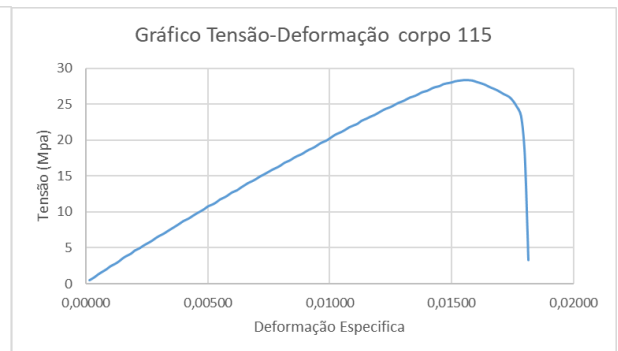
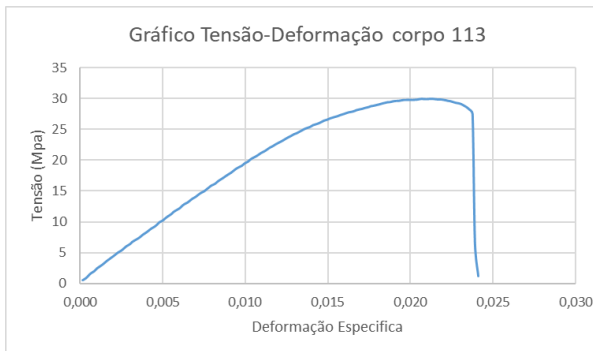
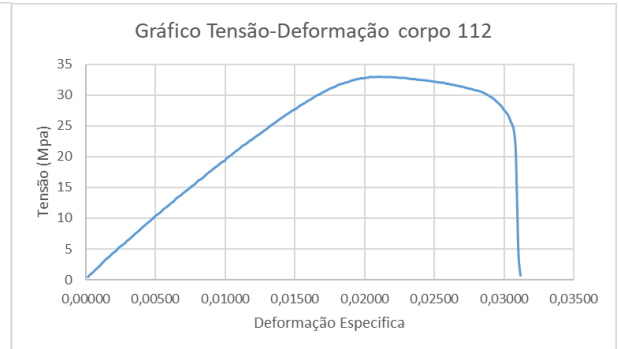
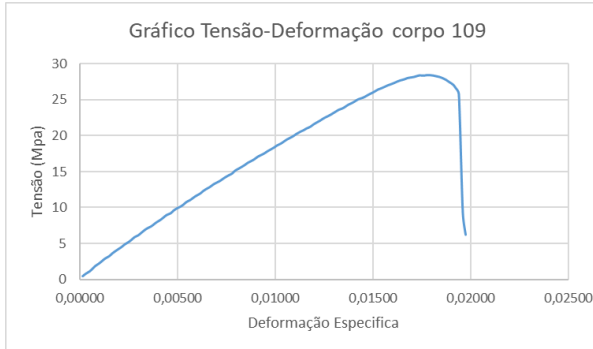
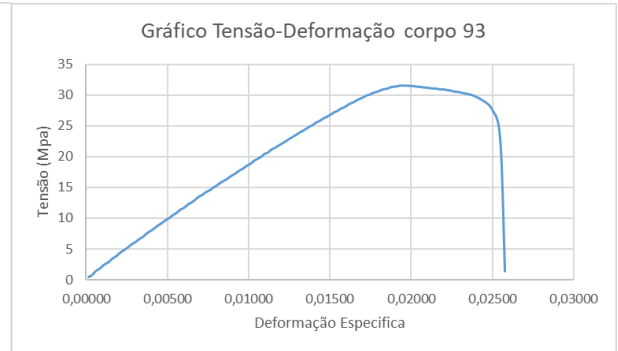
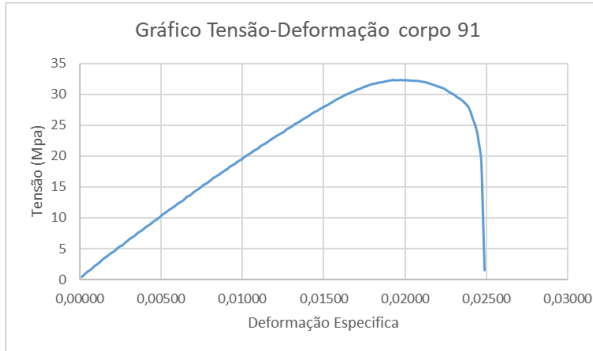
500 horas de exposição





1000 horas de exposição





2000 horas de exposição

Gráfico Tensão-Deformação corpo 95

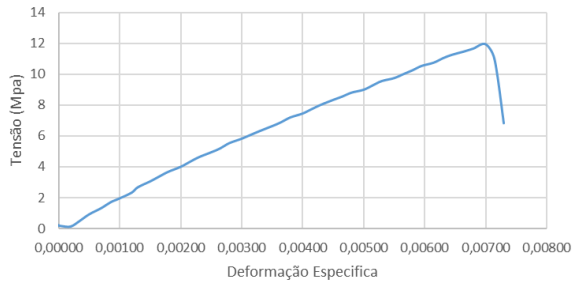


Gráfico Tensão-Deformação corpo 97

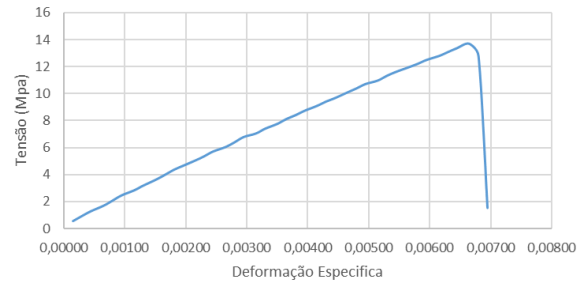


Gráfico Tensão-Deformação corpo 98

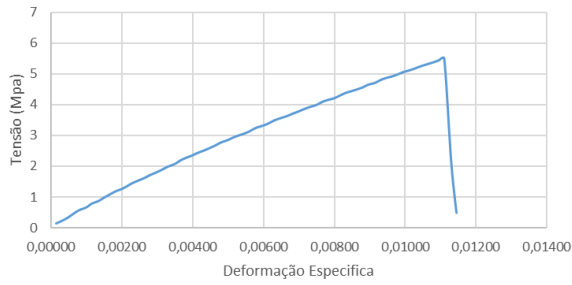


Gráfico Tensão-Deformação corpo 99

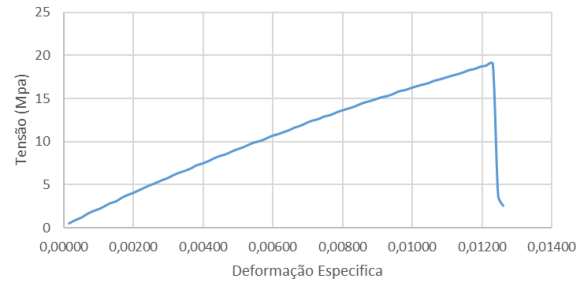


Gráfico Tensão-Deformação corpo 100

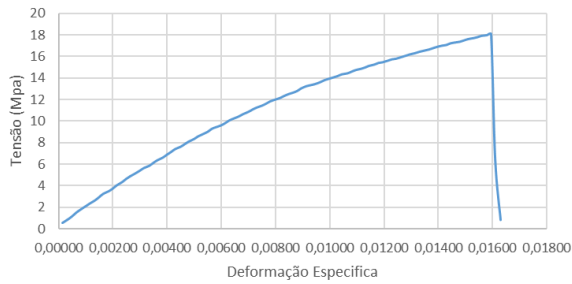


Gráfico Tensão-Deformação corpo 101

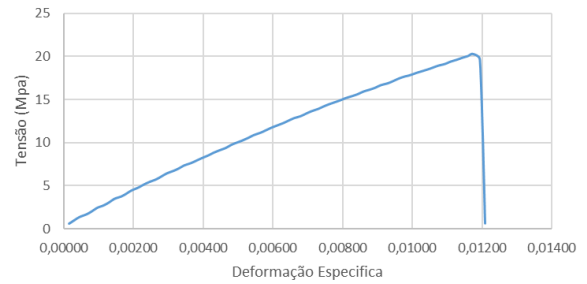


Gráfico Tensão-Deformação corpo 104

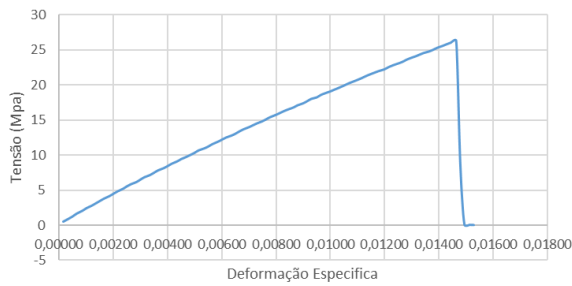


Gráfico Tensão-Deformação corpo 105

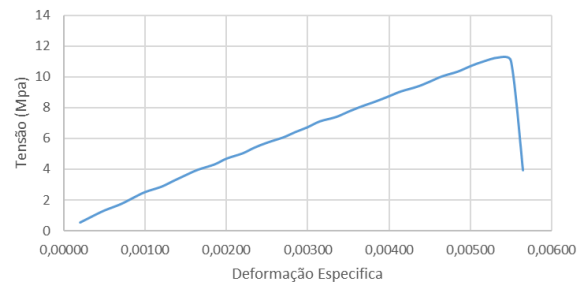


Gráfico Tensão-Deformação CORPO 106

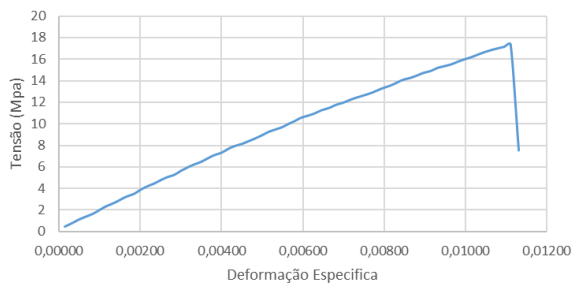
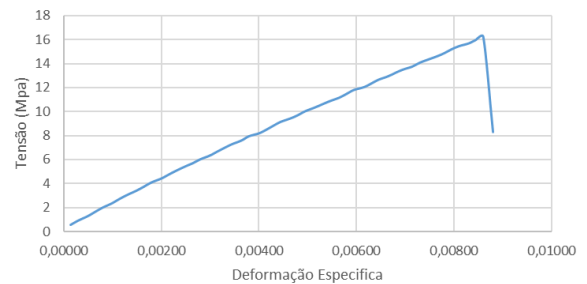
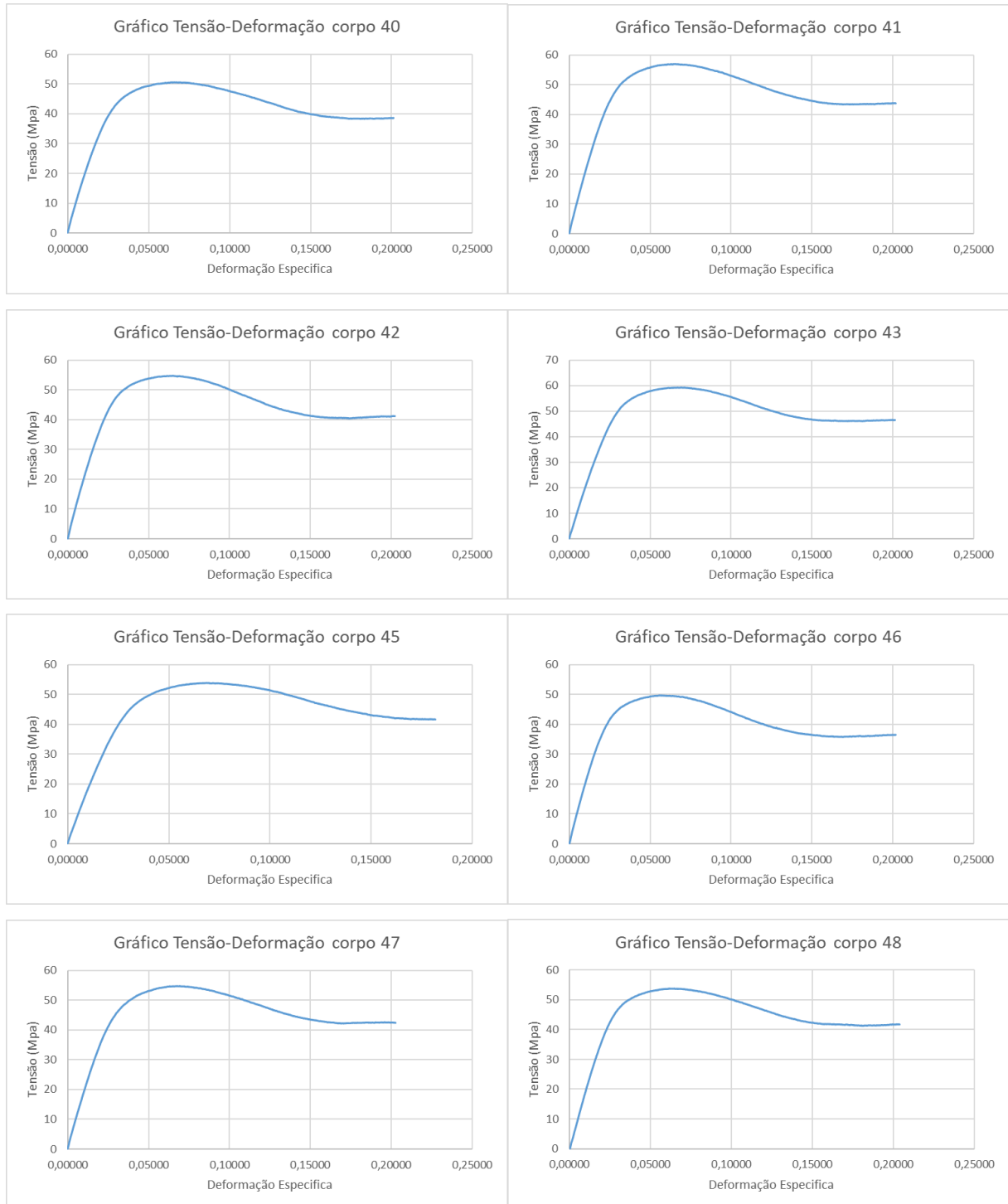


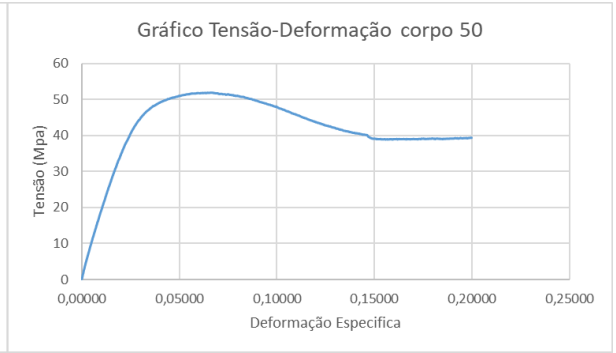
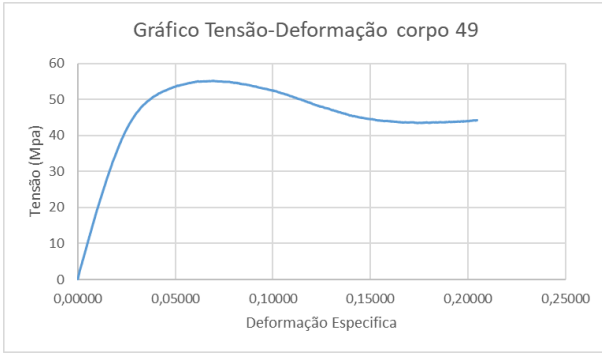
Gráfico Tensão-Deformação corpo 107



APÊNDICE C - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PA6

Grupo de Controle





500 horas de exposição

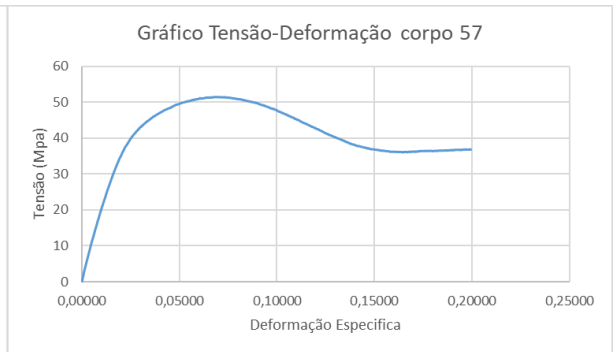
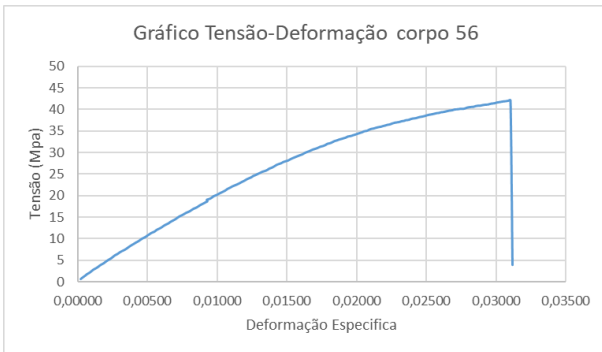
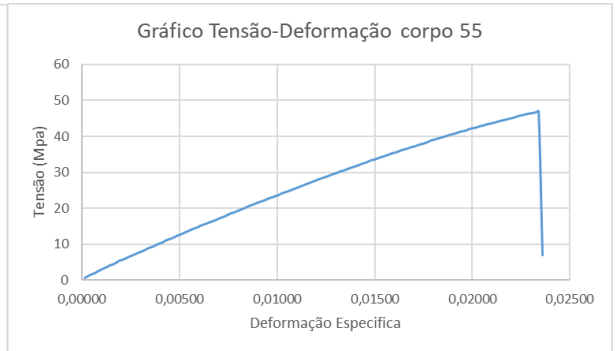
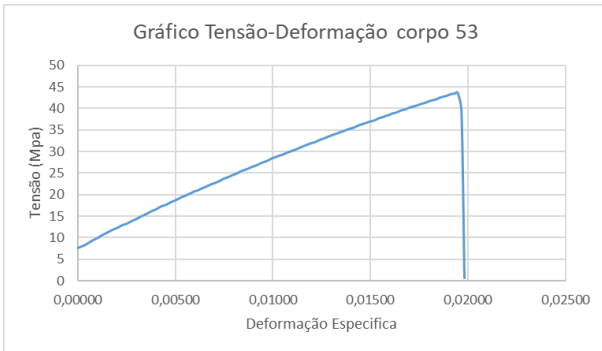
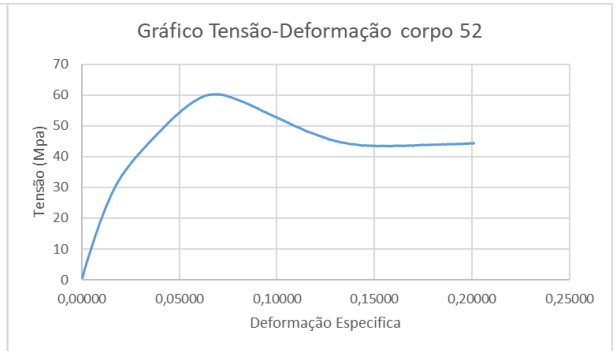
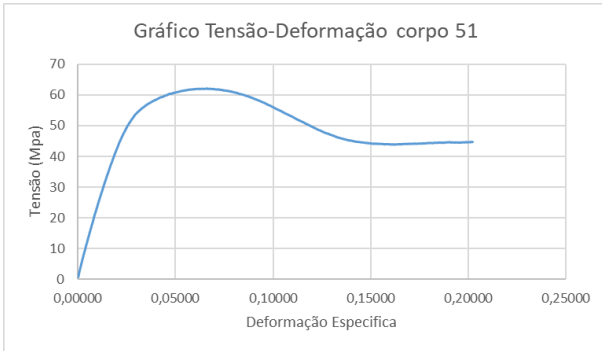


Gráfico Tensão-Deformação corpo 58

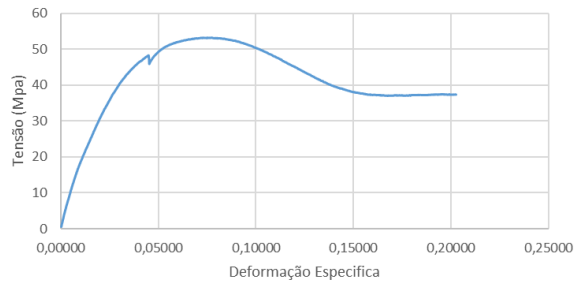


Gráfico Tensão-Deformação corpo 59

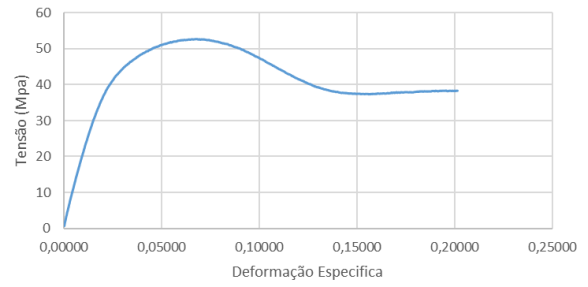


Gráfico Tensão-Deformação corpo 61

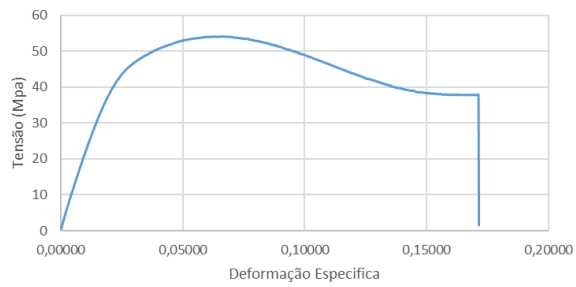
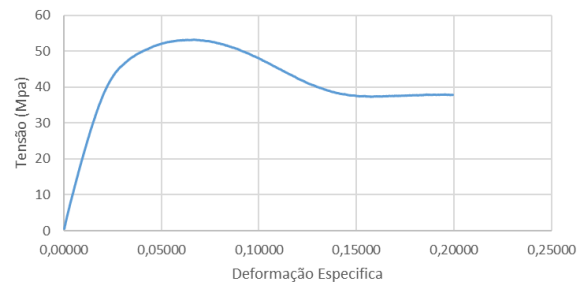


Gráfico Tensão-Deformação corpo 62



1000h exposição

Gráfico Tensão-Deformação corpo 63

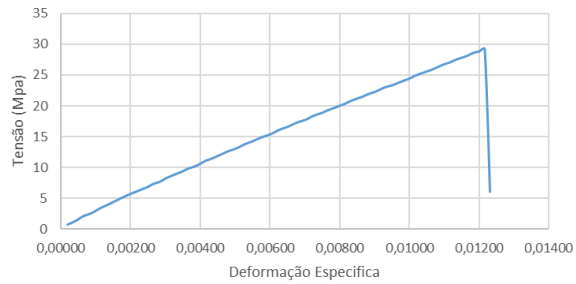


Gráfico Tensão-Deformação corpo 65

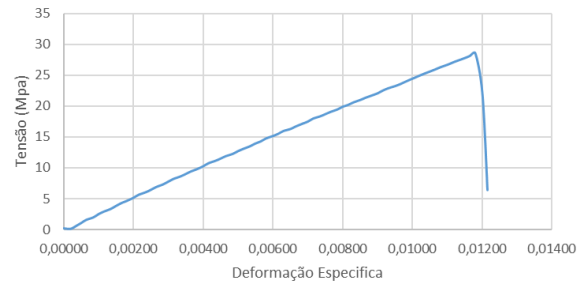


Gráfico Tensão-Deformação corpo 66

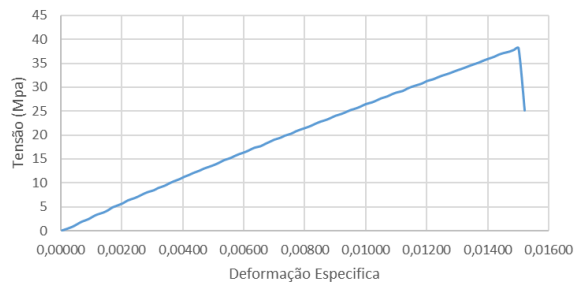
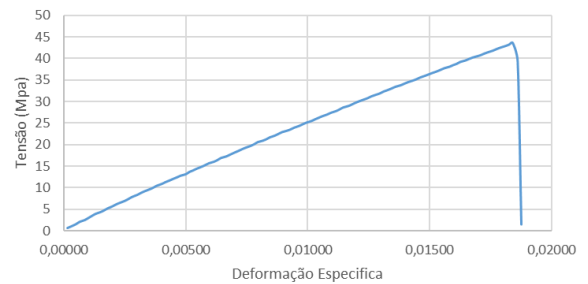
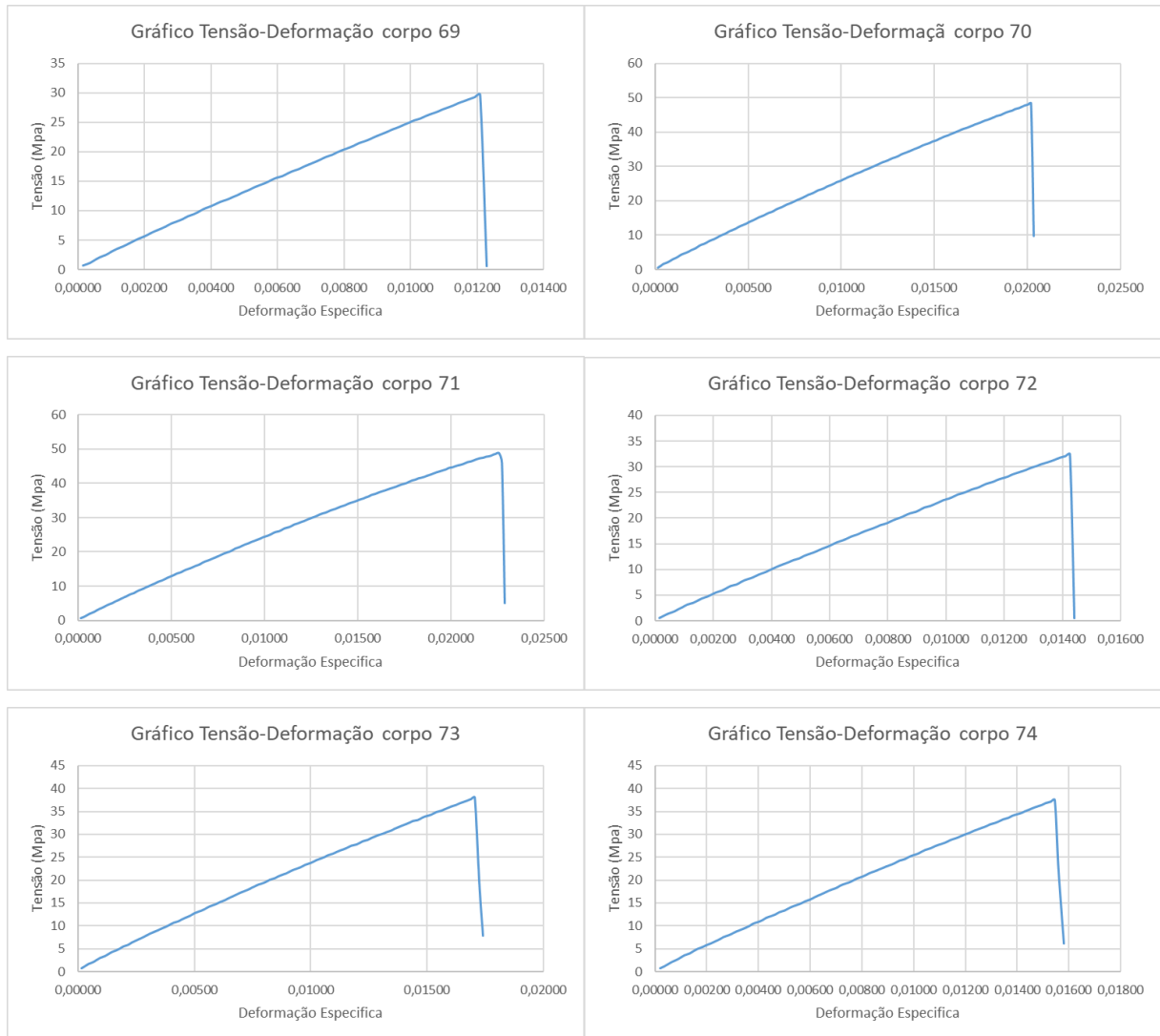


Gráfico Tensão-Deformação corpo 68





2000 horas de exposição

Gráfico Tensão-Deformação corpo 75

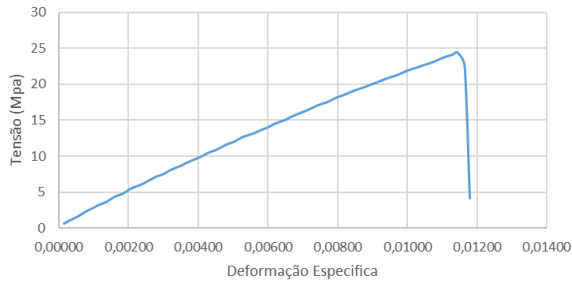
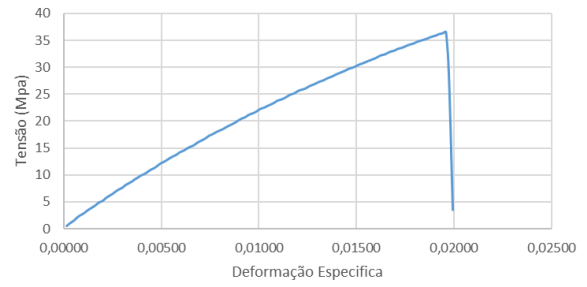
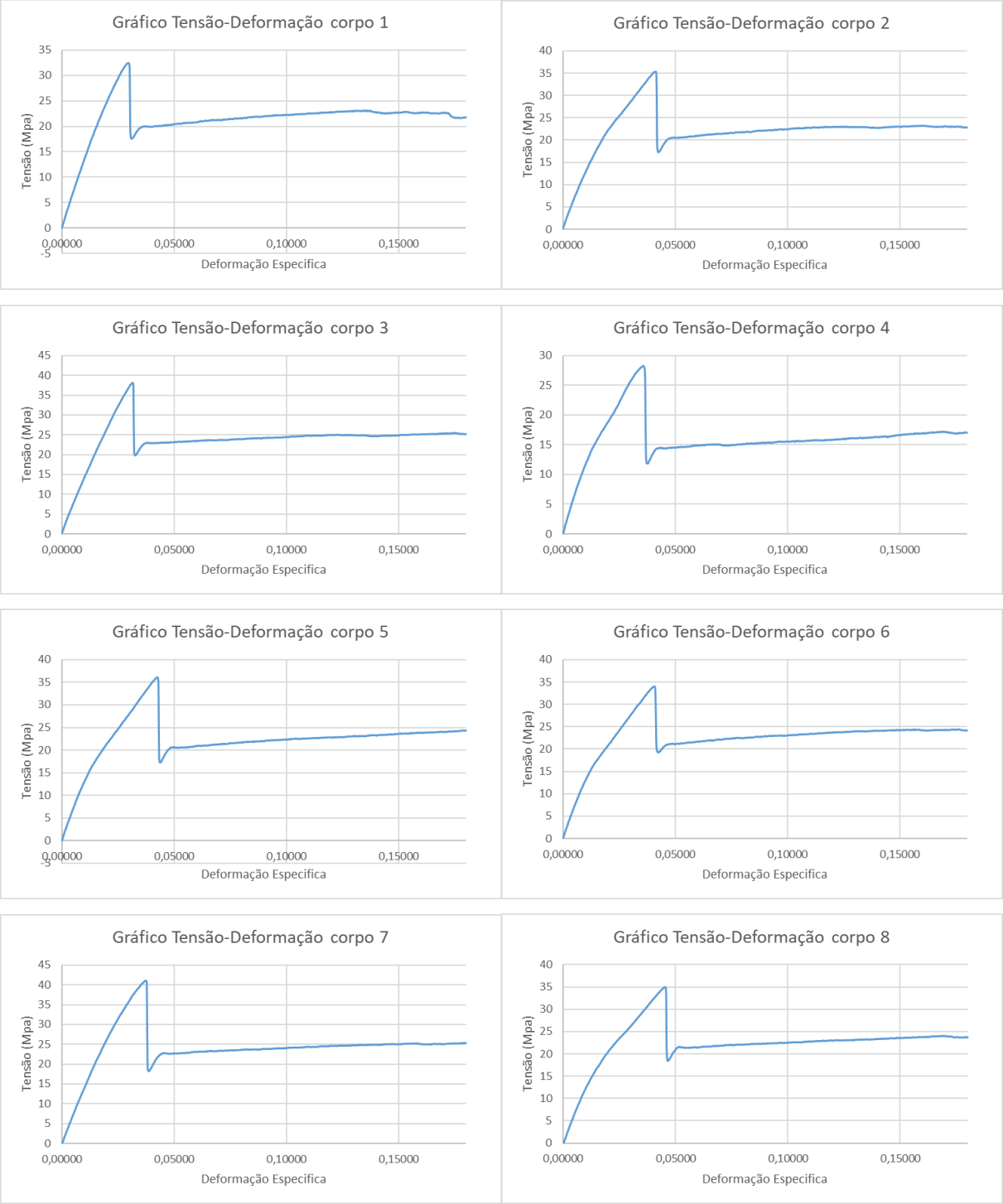


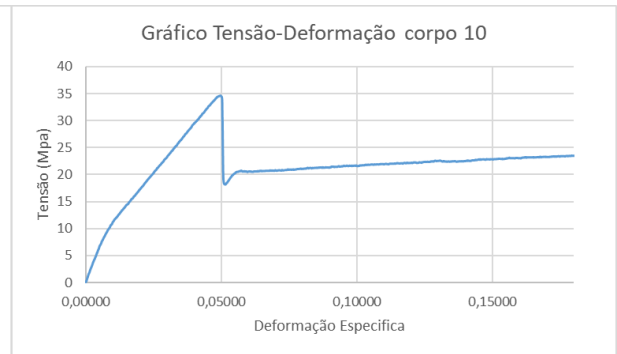
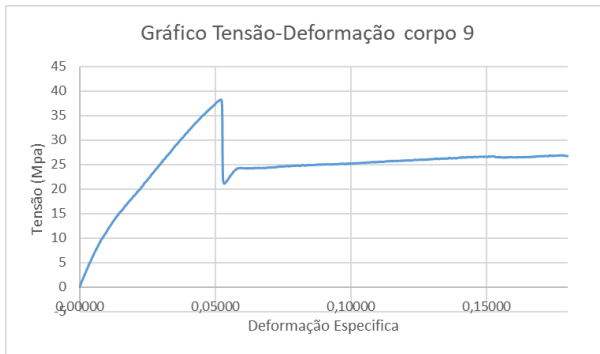
Gráfico Tensão-Deformação corpo 77



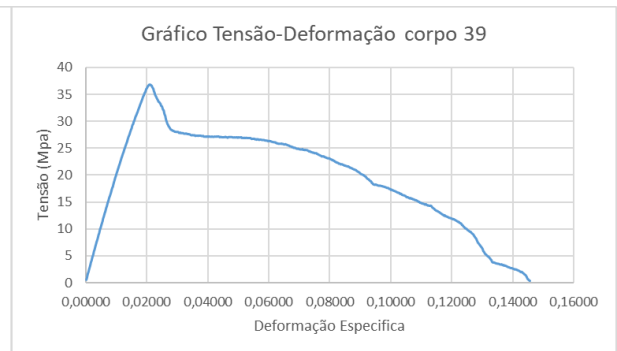
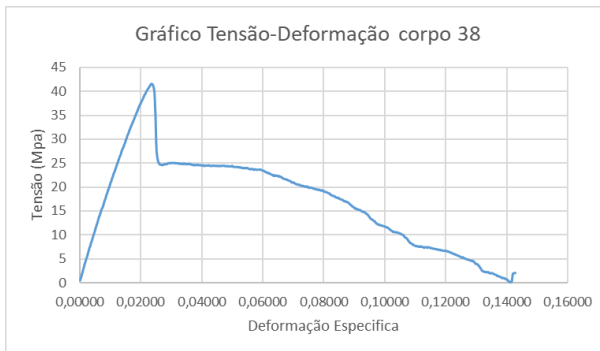
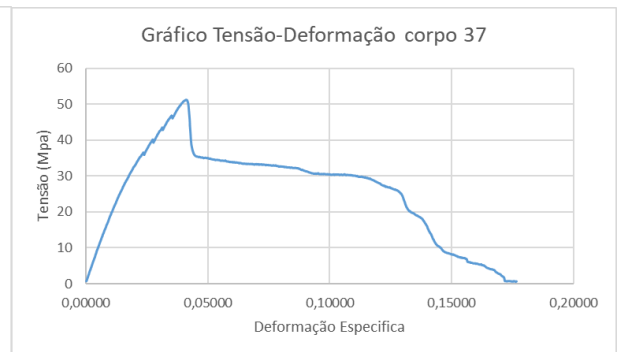
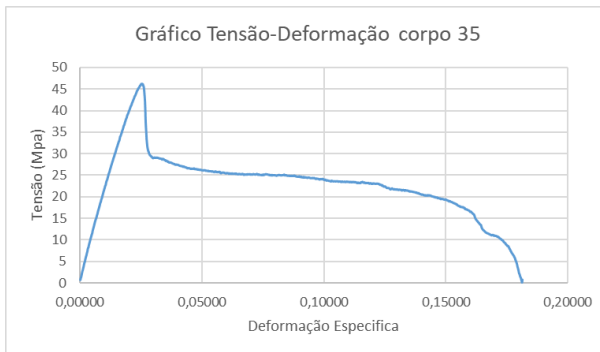
APÊNDICE D - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PETG

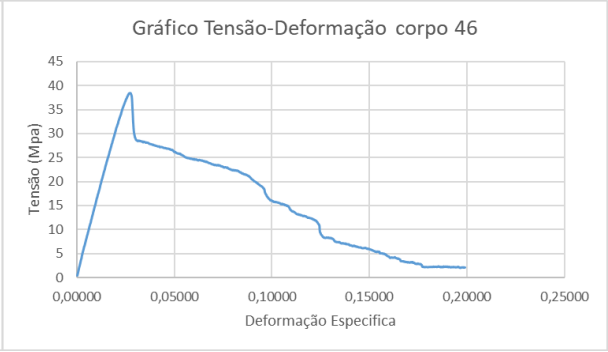
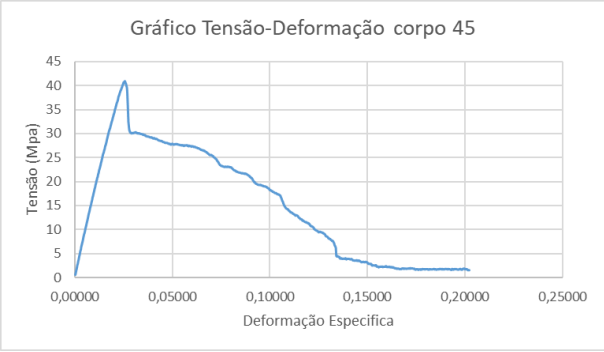
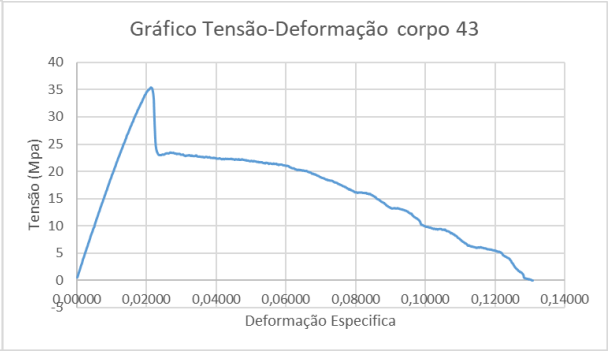
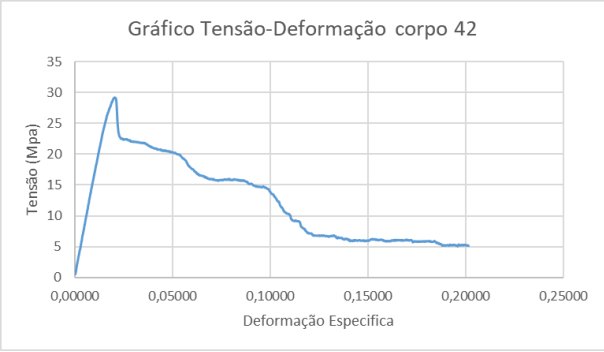
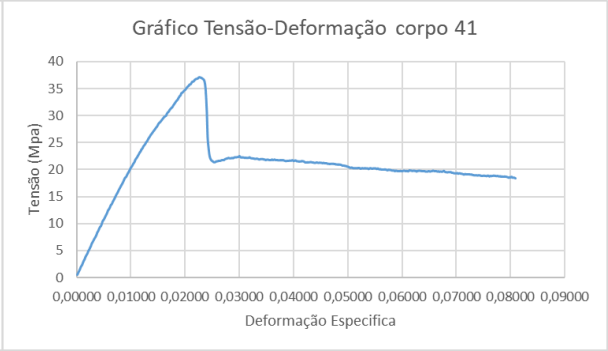
Grupo de Controle



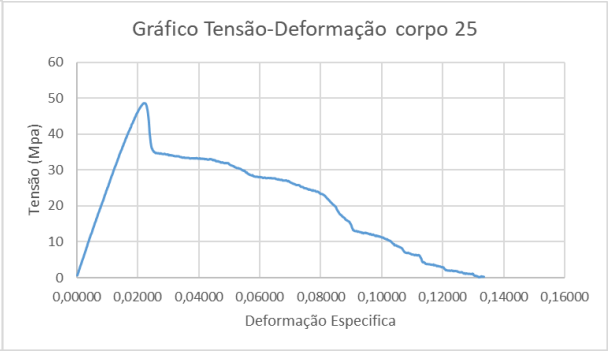
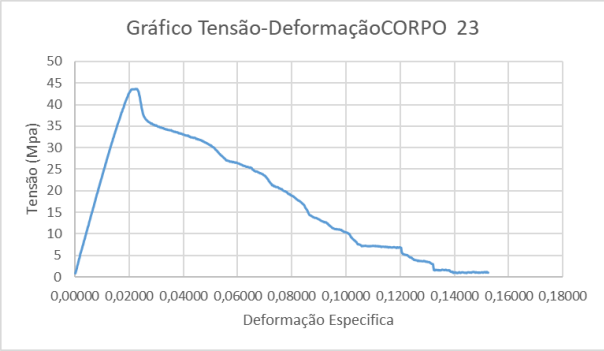


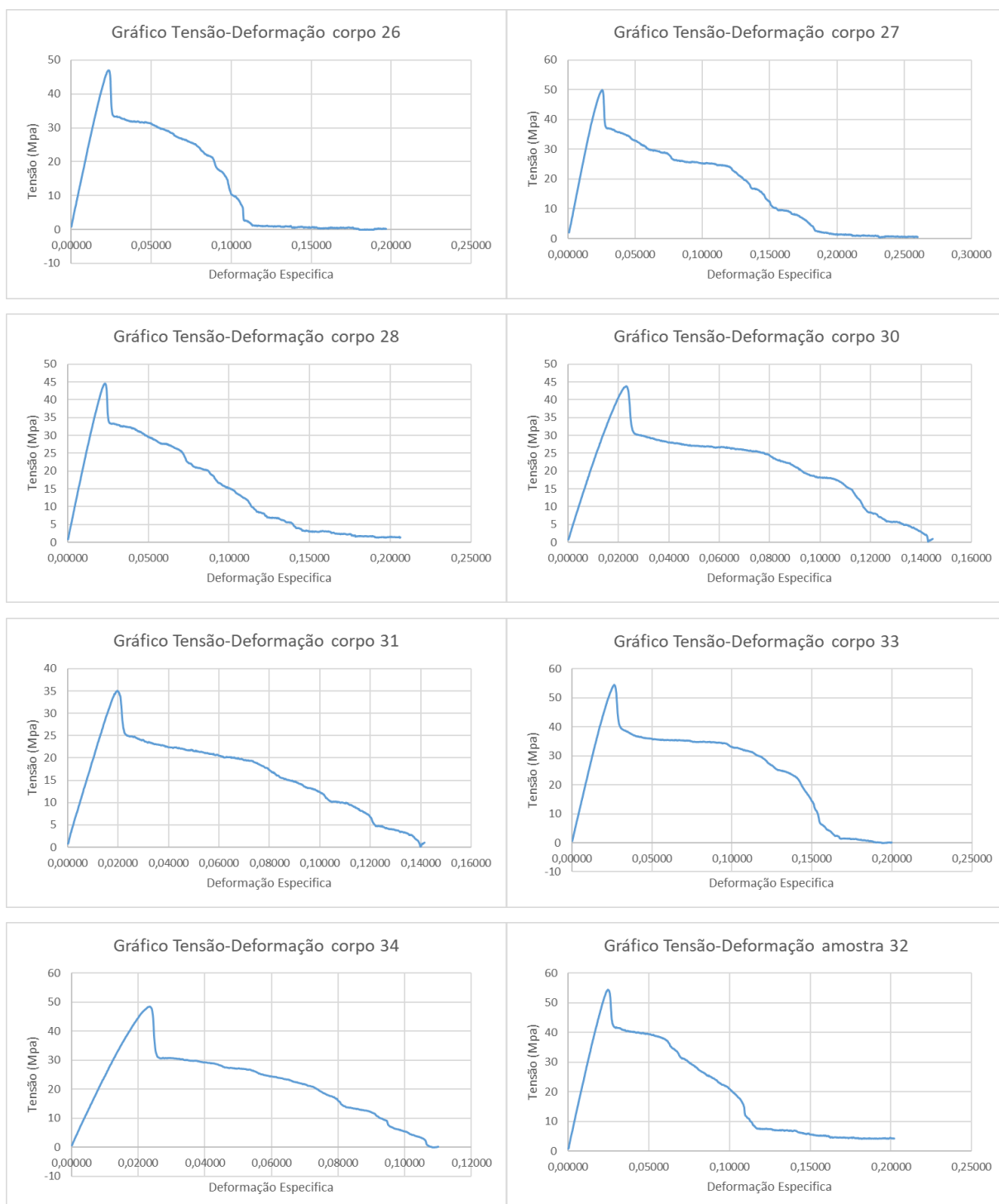
500 horas de exposição



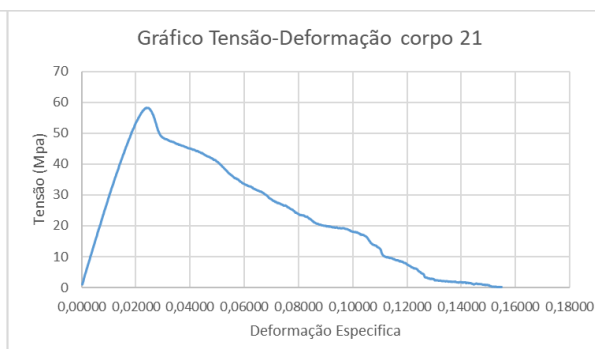
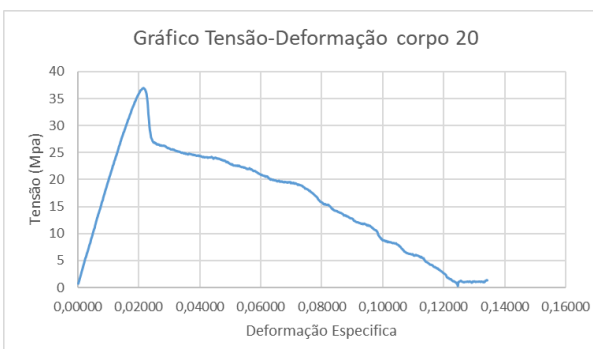
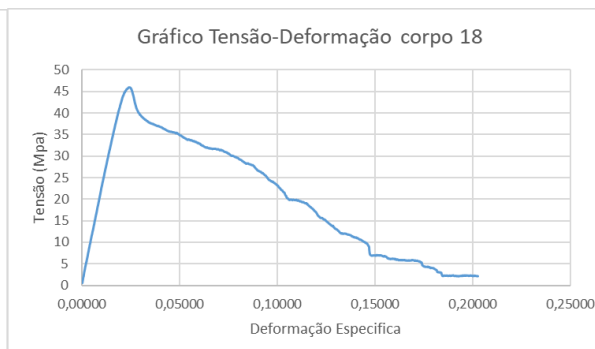
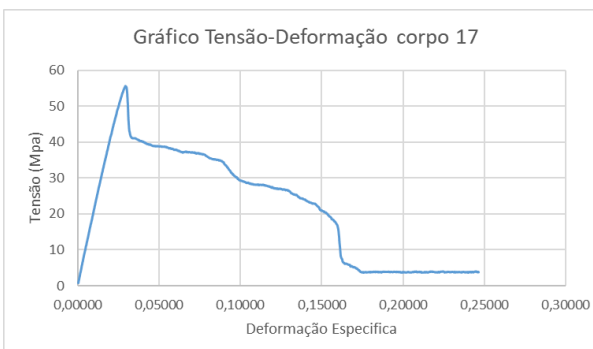
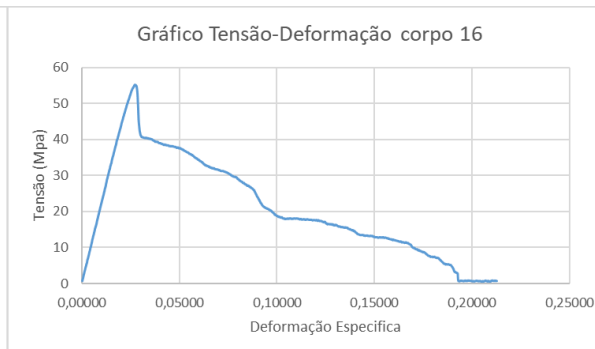
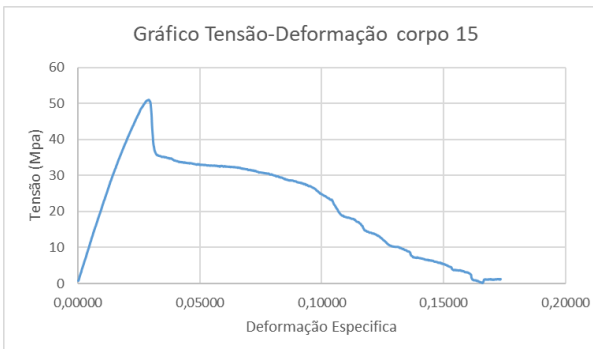
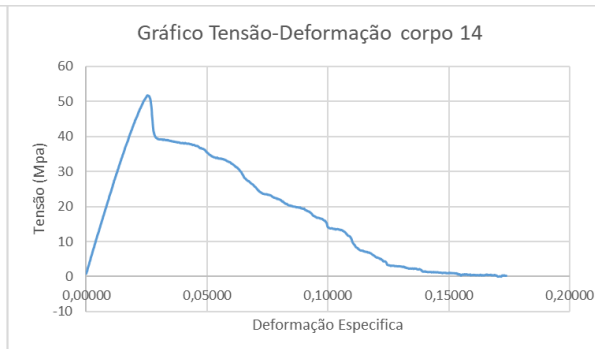
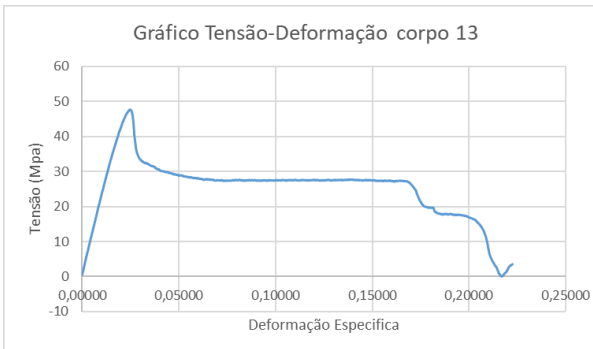
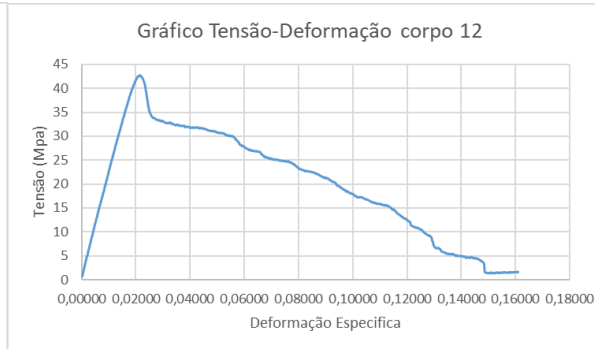


1000 horas de exposição



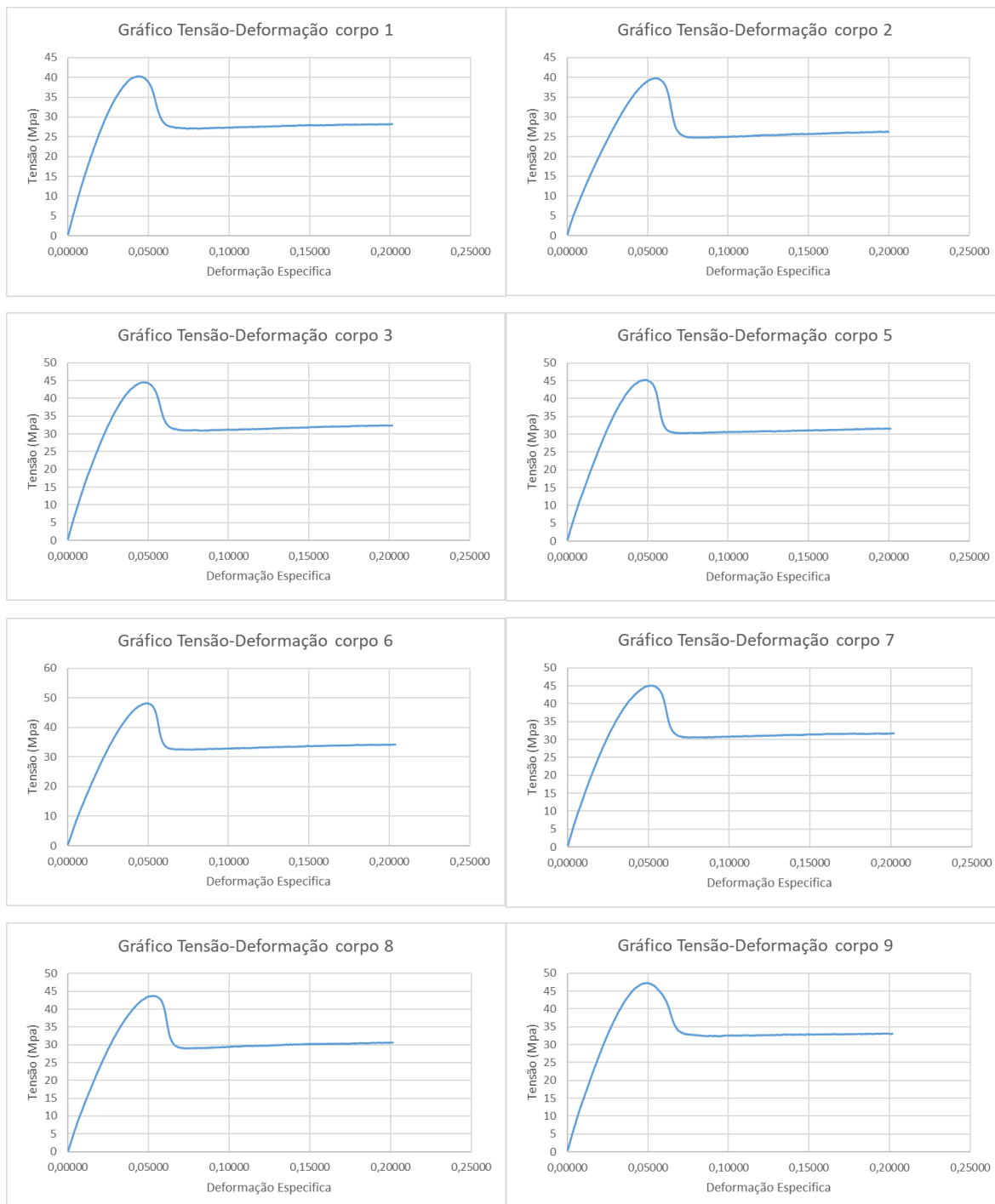


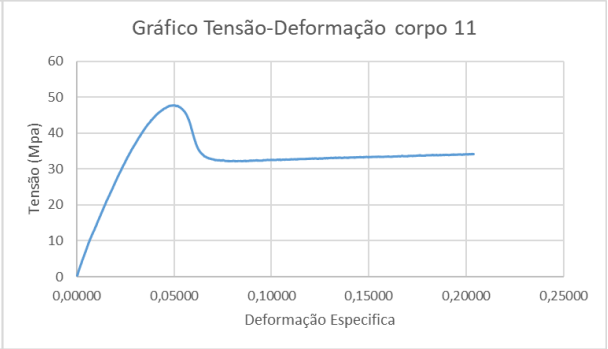
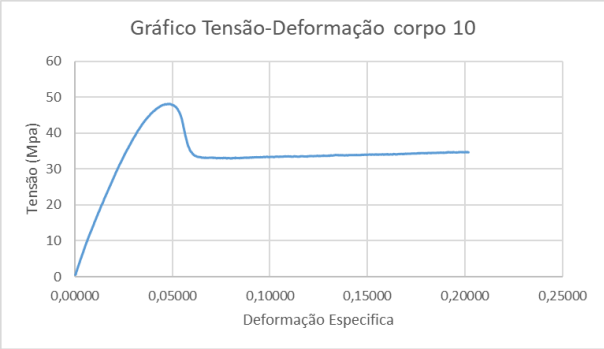
2000 horas de exposição



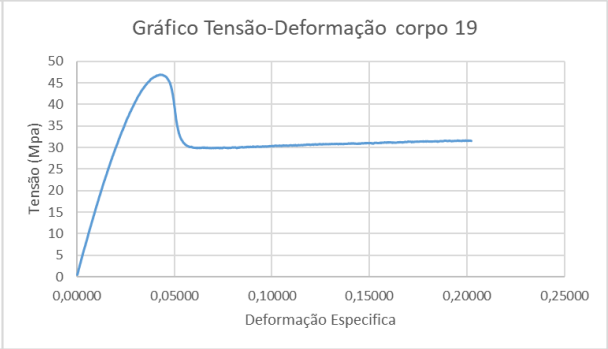
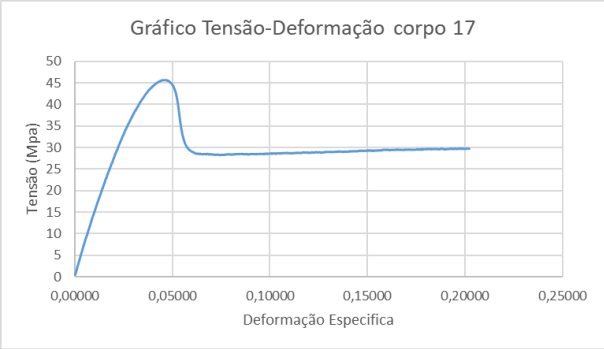
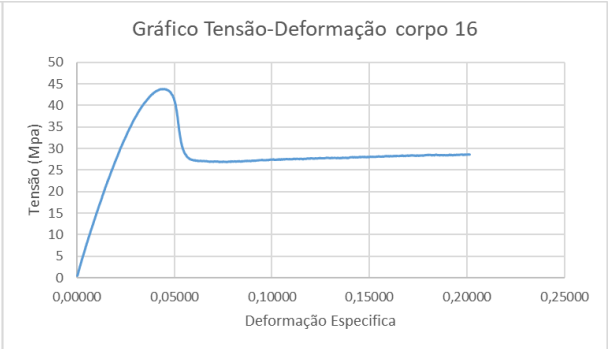
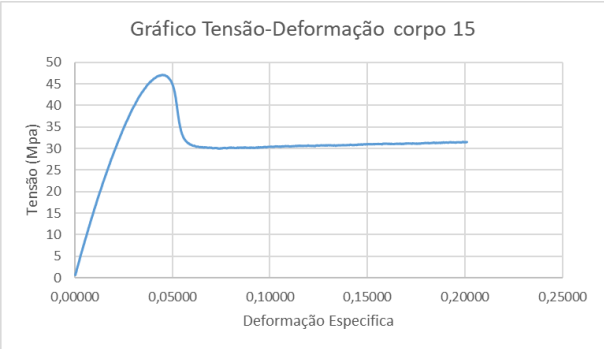
APÊNDICE E - GRÁFICOS INDIVIDUAIS TENSÃO-DEFORMAÇÃO TRITAN®

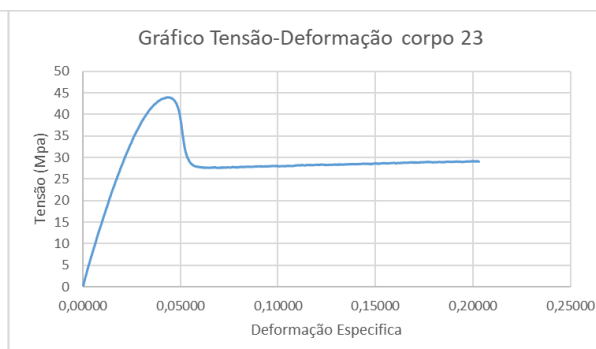
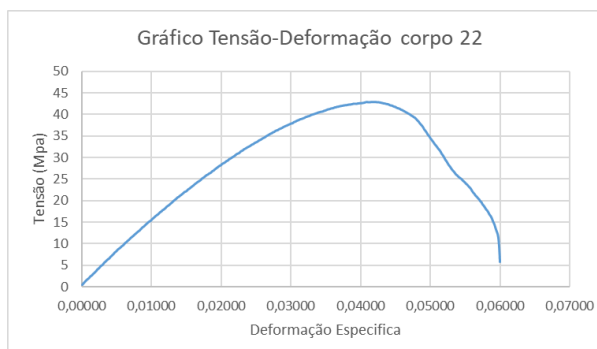
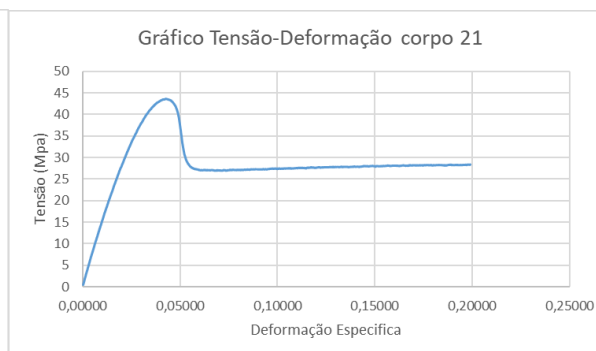
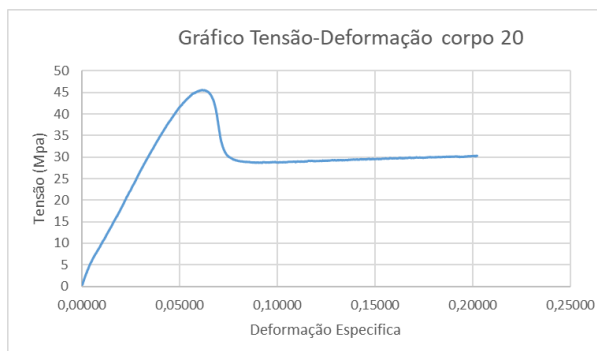
Grupo de Controle



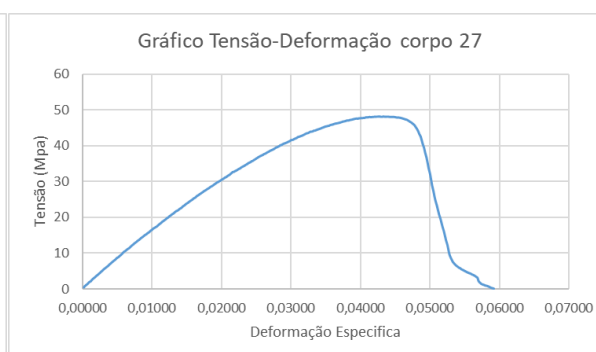
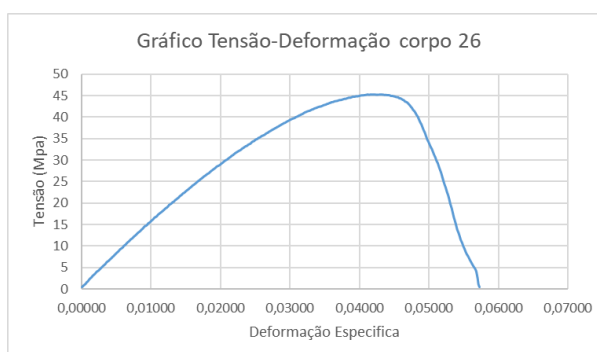
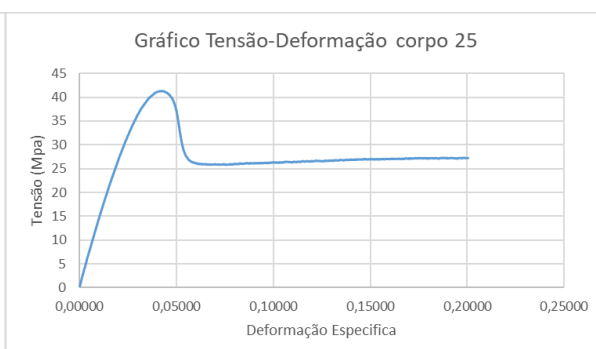
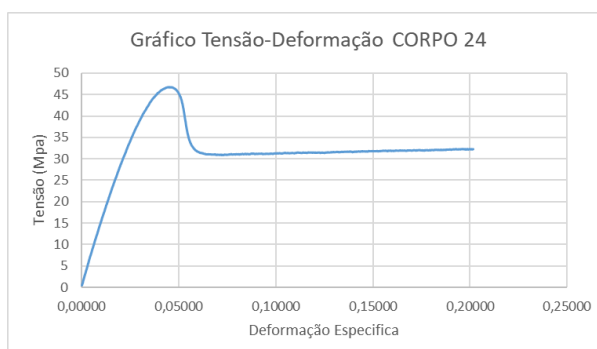


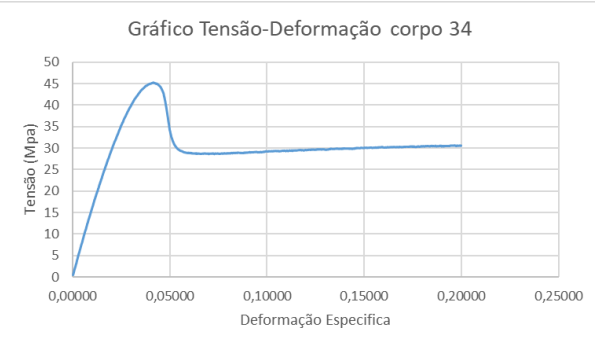
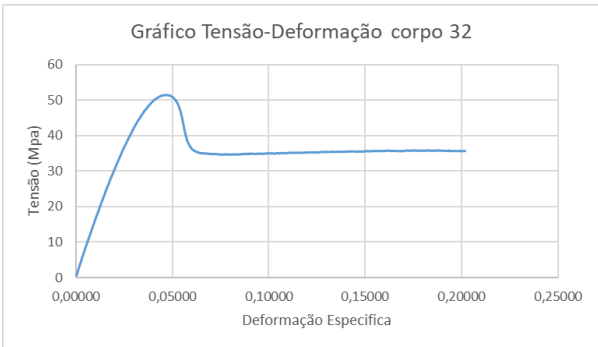
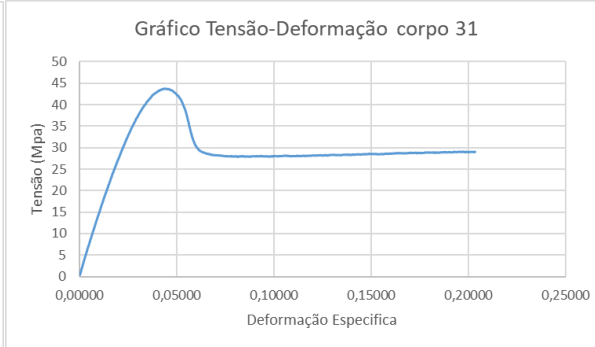
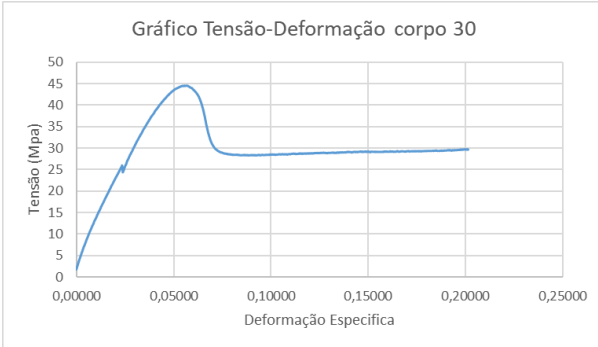
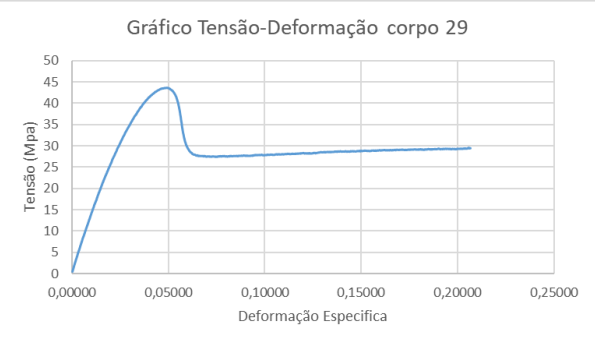
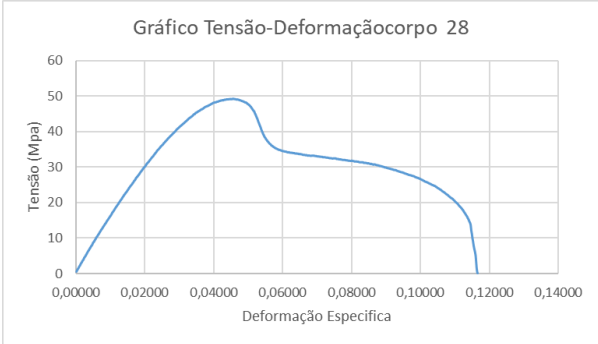
500 horas de exposição



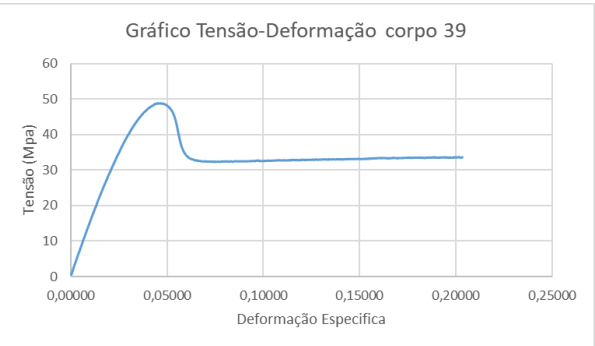
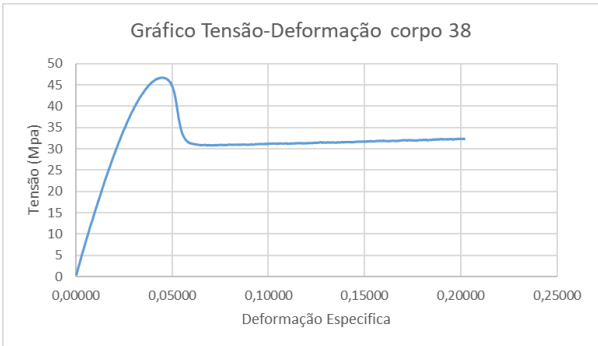
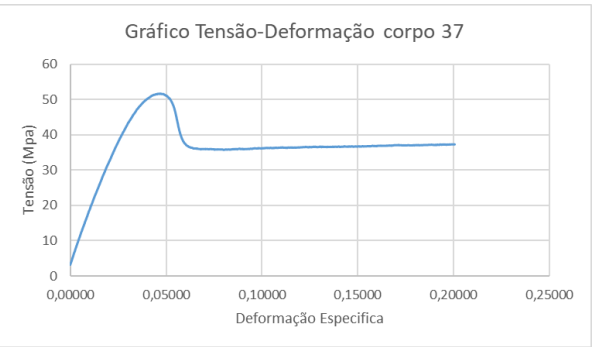
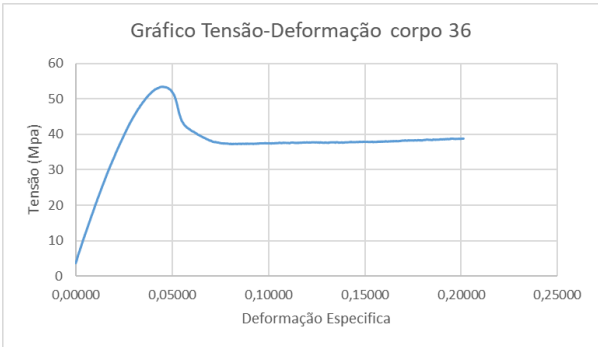


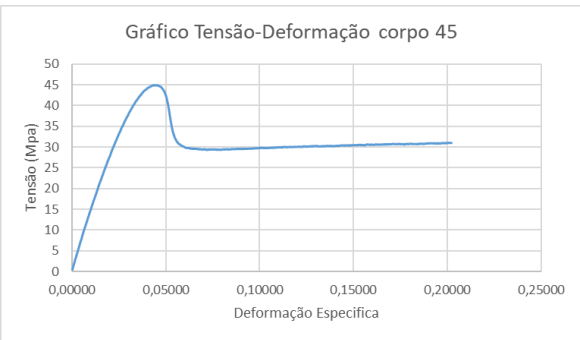
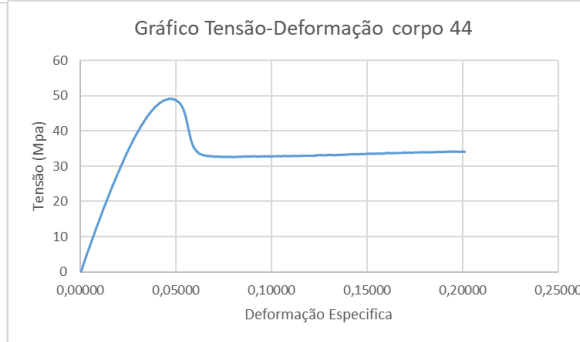
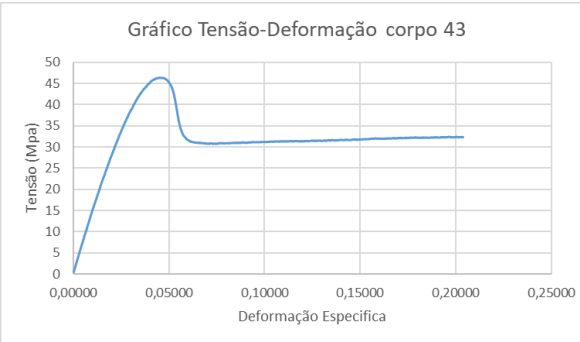
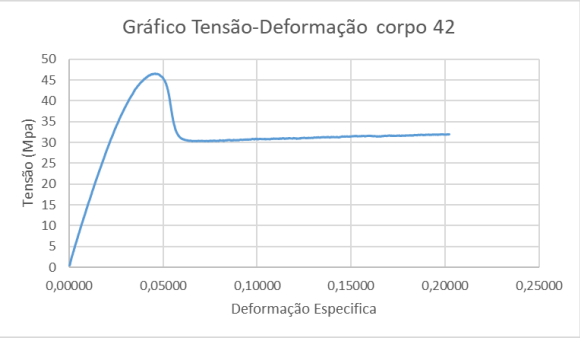
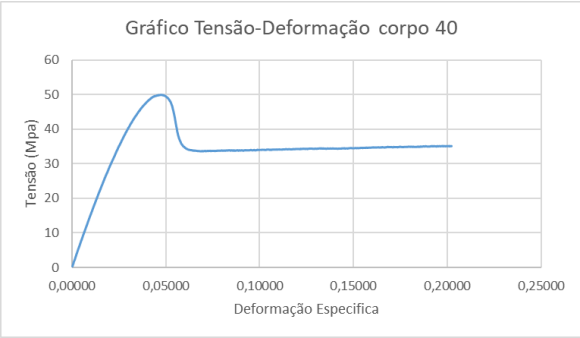
1000 horas de exposição.





2000 horas de exposição





APÊNDICE F - DADOS AMOSTRAS ABS

Dados para o grupo sem exposição

	73	103	117	80	75	87	78	33	120	83
módulo de elasticidade (MPa)	1443,744	1437,789	1377,823	1458,194	1507,475	1191,443	1436,979	1053,420	1669,823	1334,326
limite de escoamento (MPa)	27,604	31,834	20,957	24,431	27,882	19,167	43,192	26,616	42,536	21,319
limite de resistência à tração (MPa)	27,703	31,867	32,439	30,425	28,868	31,758	43,802	26,959	44,256	25,899

Dados para o grupo de 500h

	62	64	65	67	68	69	70	71	76	74
módulo de elasticidade (MPa)	1721,279	1844,207	1679,701	1691,188	1816,173	1870,243	1771,925	1439,259	1820,392	1914,313
limite de escoamento (MPa)	26,2894601	30,91671	31,61765	33,72526	26,92392	32,37814	25,64874	27,92405	26,50676	30,62054
limite de resistência à tração (MPa)	26,2894601	30,98363	31,61765	33,82406	27,1952	32,58885	25,71562	27,95835	26,61181	30,89424

Dados para o grupo de 1000h

	85	88	89	90	91	93	109	112	115	113
módulo de elasticidade (MPa)	1226,20963	1702,72	1723,654	1513,355	1737,094	1667,074	1617,383	1682,019	1851,865	1469,092
limite de escoamento (MPa)	29,2777944	32,00379	34,74614	29,3771	32,2732	31,5914	28,29778	32,84178	28,01932	29,80518
limite de resistência à tração (MPa)	29,8471681	32,28784	34,77675	29,40516	32,30447	31,62252	28,45041	32,99539	28,4058	29,99402

Dados para o grupo de 2000h

	106	95	97	98	99	100	101	104	105	107
módulo de elasticidade (MPa)	1444,7346	1565,994	1899,417	1570,09	1433,001	1387,533	1603,67	1711,676	2082,205	1796,44
limite de resistência à tração (MPa)	17,366052	11,97227	13,71232	19,10788	19,03475	18,09707	20,32946	26,28863	11,25574	16,2172

APÊNDICE G - DADOS AMOSTRAS PA6

Dados para o grupo sem exposição

	40	41	42	43	45	46	47	48	49	50
módulo de elasticidade (MPa)	1614,695	1851,152	1768,449	1833,905	1631,636	1771,067	1705,912	1810,375	1794,550	1698,415
limite de escoamento (MPa)	38,923	44,201	43,105	46,038	40,793	40,036	41,254	42,443	41,206	39,816
limite de resistência à tração (MPa)	50,567	57,086	54,705	59,284	53,862	49,744	54,755	53,921	55,305	51,981

Dados para o grupo de 500h

	51	52	53	55	56	57	58	59	61	62
módulo de elasticidade (MPa)	1892,976	1679,284	1819,659	2015,784	1620,326	1674,877	1354,991	1715,483	1894,372	1841,019
limite de escoamento (MPa)	50,988	34,158	43,756	47,044	36,737	38,049	37,149	39,453	41,499	41,290
limite de resistência à tração (MPa)	62,029	60,237	43,756	47,044	42,107	51,463	53,341	52,676	54,042	53,316

Dados para o grupo de 1000h

	63	65	66	74	68	69	70	71	72	73
módulo de elasticidade (MPa)	2305,797	2363,676	2490,238	2358,300	2303,371	2364,458	2343,963	2139,702	2272,257	2180,937
limite de resistência à tração (MPa)	29,260	28,583	38,163	37,464	43,527	29,702	48,387	48,801	32,353	38,032

Dados para o grupo de 2000h

	75	86	77	78	80	81	82	83	84	85
módulo de elasticidade (MPa)	2014,328	2369,393	2016,085	2466,226	2480,648	2238,554	2307,171	2414,760	2274,762	2144,786
limite de resistência à tração (MPa)	24,430	35,291	36,499	21,456	38,084	36,532	34,721	31,919	41,551	41,644

APÊNDICE H - DADOS AMOSTRAS PETG

Dados para o grupo sem exposição

	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010
módulo de elasticidade (MPa)	1122,322	1107,374	1218,506	1033,752	1127,912	1162,606	1178,171	1116,677	955,207	971,868
limite de escoamento (MPa)	32,332	23,188	37,968	17,354	20,616	18,763	38,422	19,660	17,695	14,466
limite de resistência à tração (MPa)	32,443	35,358	38,044	28,261	36,126	33,955	41,141	34,907	38,189	34,589

Dados para o grupo de 500h

	35	46	37	38	39	40	41	42	43	45
módulo de elasticidade (MPa)	1844,530	1465,835	1557,908	1782,057	1766,081	1642,841	1632,019	1526,849	1739,973	1646,750
limite de escoamento (MPa)	46,008	38,505	36,298	41,502	36,617	41,265	37,071	29,163	35,287	40,808
limite de resistência à tração (MPa)	46,135	38,505	51,251	41,654	36,751	41,315	37,071	29,163	35,388	40,968

Dados para o grupo de 1000h

	23	25	26	27	28	30	31	33	34	32
módulo de elasticidade (MPa)	2094,106	2279,770	2082,646	2091,801	2001,254	1952,989	1831,792	2159,396	2201,402	2304,171
limite de escoamento (MPa)	43,523	48,559	46,833	49,688	44,506	43,911	34,669	54,668	48,392	54,335
limite de resistência à tração (MPa)	43,581	48,632	46,901	49,963	44,629	43,911	35,134	54,668	48,532	54,405

Dados para o grupo de 2000h

	11	12	13	14	15	16	17	18	20	21
módulo de elasticidade (MPa)	2312,581	2089,725	2002,440	2081,184	1822,163	2135,462	1957,654	2062,202	1823,443	2047,894
limite de escoamento (MPa)	53,071	42,717	47,364	51,724	50,790	55,259	55,443	45,480	36,894	45,890
limite de resistência à tração (MPa)	53,071	42,781	47,665	51,785	51,031	55,327	55,574	45,834	36,894	46,063

APÊNDICE I - DADOS AMOSTRAS TRITAN®

Dados para o grupo sem exposição

	1	2	3	11	5	6	7	8	9	10
módulo de elasticidade (MPa)	1187,902	904,835	1223,820	1221,852	1204,850	1245,846	1179,398	1100,764	1288,637	1298,845
limite de escoamento (MPa)	33,951	30,760	36,543	38,860	37,494	39,031	35,454	33,812	37,728	39,417
limite de resistência à tração (MPa)	40,276	39,788	44,624	47,650	45,328	48,125	45,181	43,667	47,260	48,185

Dados para o grupo de 500h

	12	14	15	16	17	22	19	20	21	23
módulo de elasticidade (MPa)	1292,839	1024,433	1107,250	1258,807	1265,766	1217,689	1385,179	833,865	1263,056	1103,111
limite de escoamento (MPa)	37,270	37,799	45,055	37,063	38,017	38,924	40,132	41,551	38,630	41,967
limite de resistência à tração (MPa)	44,103	39,324	47,144	43,756	45,597	42,998	46,931	45,584	43,692	44,005

Dados para o grupo de 1000h

	24	25	26	27	28	29	30	31	32	34
módulo de elasticidade (MPa)	1257,409	1169,221	1154,975	1334,234	1337,399	944,054	878,729	1209,437	1405,024	1181,757
limite de escoamento (MPa)	41,011	37,455	43,212	43,354	43,284	41,363	39,108	38,792	44,452	43,330
limite de resistência à tração (MPa)	46,709	41,242	45,361	48,162	49,337	43,550	44,597	43,792	51,579	45,276

Dados para o grupo de 2000h

	36	37	38	39	40	42	43	44	45	46
módulo de elasticidade (MPa)	1194,6533	1124,499	1104,174	1149,261	1131,42	1094,953	1104,726	1316,176	1261,386	1129,657
limite de escoamento (MPa)	51,103006	49,76612	45,07765	46,4892	47,9725	44,45345	44,21496	42,47513	39,19358	46,66426
limite de resistência à tração (MPa)	53,443601	51,72149	46,8011	48,84259	49,9745	46,5372	46,4716	49,19194	44,94298	48,91983

ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA ESTUFA



Certificado de Calibração

Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: C222852/25

Data Calibração: 28/07/2025

Validade: 07/2026

OS: 1085813-A/2025

1 / 1

1 - Solicitante: THIAGO PENSO BEVILACQUA

Rua Vigário Silva, 1138, Ap 301 - Bom Retiro - Uberaba - MG - 38022-190 - Brasil

Contratante: THIAGO PENSO BEVILACQUA

2 - Características do Instrumento

Descrição: ESTUFA

Identificação: EST-01

3 - Condições Ambientais

Serviço executado nas instalações permanentes do Laboratório.

Temperatura: 24,3 °C ± 1,0 °C

Umidade: 51,0 %ur ± 5,0 %ur

4 - Procedimentos

Calibração Executada conforme:

ITTEC039

Revisão: 2

5 - Padrões

Identificação:

PTO-0517 TERMOHIGRÔMETRO PADRÃO

Marca:

Certificado:

22561PTO-0517090425

Calibrado por:

MEDIÇÃO-CAL0559

Validade:

04/2027

PTT-1135 TERMORRESISTÊNCIA PADRÃO

ECIL

5781/25

ECIL-CAL0026

05/2026

PTT-1159 MULTICALIBRADOR

ECIL

11149/22

ECIL

09/2025

6 - Resultados Obtidos

TEMPERATURA

Faixa de Uso: 0,0 a 200,0 °C

Faixa de Indicação: 0,0 a 200,0 °C

Resolução: 0,1 °C

V.I	V.R	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
°C	°C	°C	°C	°C		
50,0	50,50	-0,50	0,08	0,58	2,00	=
100,0	100,30	-0,30	0,08	0,38	2,00	=
200,0	200,95	-0,95	0,08	1,03	2,00	=

7 - Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.I: Valor Indicado no instrumento na unidade do mesmo.

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

- A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metroológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.

- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços.

- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

- Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Endereço de Emissão: Rua Nicargua, 1390 - Bairro: Tibery - Uberlândia - Minas Gerais

Data de emissão: 28 de julho de 2025

Assinado Eletronicamente

Leandro Silva de Bastos

Gerente Técnico

O conteúdo apresentado neste documento/registro tem significado restrito e se aplica somente a esta situação.
É proibida a reprodução total ou parcial do mesmo sem a autorização do emitente.

