



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luis - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

ANÁLISE DAS VARIAÇÕES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA SOB A INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NATURAL

ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMER MATRIX COMPOSITES UNDER THE INFLUENCE OF NATURAL AGING

Marvin B. M. Sales^{1*} e Flávio N. Pereira²

1,2 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Universidade Estadual do Maranhão
(UEMA), São Luís, MA, Brasil.
engmarvinbmsales@gmail.com

RESUMO

Os compósitos de matriz polimérica são conhecidos por sua versatilidade no processamento e notáveis propriedades, incluindo alta resistência e rigidez em relação ao peso. A inovação na combinação de resinas químicas e fibras sintéticas, desde meados do século XX, impulsionou uma demanda crescente, especialmente na indústria aeronáutica. Apesar de suas qualidades, esses materiais sofrem alterações no comportamento mecânico com o envelhecimento natural. Este estudo investiga essas mudanças, submetendo compósitos a ensaios mecânicos de tração e flexão em dois arranjos distintos, utilizando resina poliéster com fibras de vidro. Os corpos de prova foram fabricados por moldagem manual e envelhecidos naturalmente por mais de 3 anos. Os ensaios, conduzidos em uma máquina universal, forneceram dados sobre tensão-deformação. O estudo visa comparar o comportamento mecânico entre amostras recém-produzidas e envelhecidas, destacando propriedades como tensão de escoamento e módulo de elasticidade. Os resultados demonstram variações notáveis nas propriedades dos materiais compósitos poliméricos fabricados com resina poliéster e fibras de vidro. Houve perdas em relação a tração e ganhos quanto a flexão.

Palavras-chave: Compósitos, Envelhecimento Natural, Resina Poliéster, Fibras de Vidro, Ensaios Mecânicos.

ABSTRACT

Polymeric matrix composites are renowned for their processing versatility and notable properties, including high strength and stiffness-to-weight ratio. Innovations in combining chemical resins and synthetic fibers since the mid-20th century have driven increasing demand, especially in the aeronautical industry. Despite their commendable qualities, these materials undergo changes in mechanical behavior with natural aging. This study investigates these changes by subjecting composites to mechanical tensile and flexural tests in two distinct arrangements, utilizing polyester resin with glass fibers. Specimens were manually molded and naturally aged for over 3 years. Tests, conducted on a universal testing machine, provided data

on stress-strain relationships. The study aims to compare the mechanical behavior between freshly produced and aged samples, emphasizing properties such as yield stress and modulus of elasticity. The results demonstrate notable variations in the properties of polymeric composite materials made with polyester resin and glass fibers, with losses in tension and gains in flexure.

Keywords: Composites, Natural Aging, Polyester Resin, Glass Fibers, Mechanical Tests.

INTRODUÇÃO

Os compósitos de matriz polimérica são conhecidos pela sua facilidade de processamento, correspondente a viscosidade das resinas químicas que as constituem. Esses componentes destacam-se tecnologicamente por resultar materiais de alto limite de resistência a tração, alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso [1,2]. O surgimento e a combinação inovadora de resinas químicas com fibras sintéticas, a partir da segunda metade do século XX, deram origem a uma crescente demanda por componentes leves. Esse avanço não apenas impulsionou, mas também inaugurou um novo e vasto campo de aplicação para esses materiais [3-5].

As resinas químicas solidificam-se pela adição de reagentes, desencadeando reações que resultam em uma estrutura química com ligações cruzadas, formando uma rede tridimensional rígida e irreversível, geralmente covalente. Além de conferir capacidade estrutural às fibras, a fase matriz desempenha um papel crucial na transmissão de tensões às fibras e na prevenção de trincas no material. A superfície da matriz protege as fibras contra adversidades químicas e mecânicas, isolando-as do meio externo, influenciando notavelmente características elétricas, térmicas e resistências químicas [6,7].

Na indústria, os avanços tecnológicos impulsionam o uso de compósitos devido à sua versatilidade, propriedades mecânicas e capacidade de oferecer flexibilidade de design e redução de custos. Esses materiais, especialmente aplicados na construção de aeronaves, proporcionam uma significativa redução de peso (até 30%) e custos (até 25%), tornando-se alternativas atrativas para aplicações comerciais, especialmente em situações não atendidas por materiais convencionais. A capacidade de produzir peças complexas e estruturas eficientemente dimensionadas destaca ainda mais a relevância desses compósitos na indústria [8-10]."

Apesar de suas qualidades iniciais, compósitos de matriz polimérica podem sofrer alterações no comportamento mecânico devido ao envelhecimento natural. Esse fenômeno, influenciado por fatores ambientais como condições climáticas, radiação solar e umidade, pode afetar propriedades e desempenho ao longo do tempo [11-13]. O presente estudo tem como objetivo a análise da resposta mecânica e estrutural destes materiais frente ao envelhecimento natural. Amostras com 10 dias e outras com mais de 3 anos desde sua confecção, constituídas por resina poliéster e fibras de vidro, foram submetidas a ensaios mecânicos de tração e flexão, em dois arranjos distintos (tecidos e mantas de vidro). O envelhecimento foi realizado de forma natural, em ambiente isolado, sem influências externas, luz ou cargas aplicadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova foram confeccionados e testados de acordo com as especificações das normas vigentes: ASTM D638 para os ensaios de tração e ASTM D790 para ensaios de flexão [14,15].

Matéria-prima e equipamento

Dois tipos de reforço foram utilizados no experimento, sendo eles o Tecido Bidirecional de Vidro-E 600 g/m², caracterizando as fibras contínuas alinhadas (FCA), e a Manta de Vidro-E 450 g/m², relacionada as fibras descontínuas aleatórias (FDA). Para a matriz polimérica, utilizou-se a resina polimérica AROPOL L 50500 T-00 poliéster ortoftálica na confecção de ambos os arranjos, com adição de 1 % do volume total de catalisador MERK.

A máquina universal de ensaio EMIC série 01 (300 kN) do tipo bifuso autoportante com faixa e velocidade de 0,01 a 1000 mm/min. Foi utilizado para realização dos ensaios mecânicos de tração e flexão. O equipamento é responsável pela geração de dados capazes de gerar a curva de tensão-deformação de cada teste realizado.

Confecção dos corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova foi utilizado o método de moldagem manual através do molde aberto (superfície lisa), demonstrada na Figura 1. Neste processamento, as camadas de tecido e a manta são impregnados com a resina poliéster já catalisada através de um rolo de lã, seguido do rolo de ferro para remoção de bolhas de ar do componente.

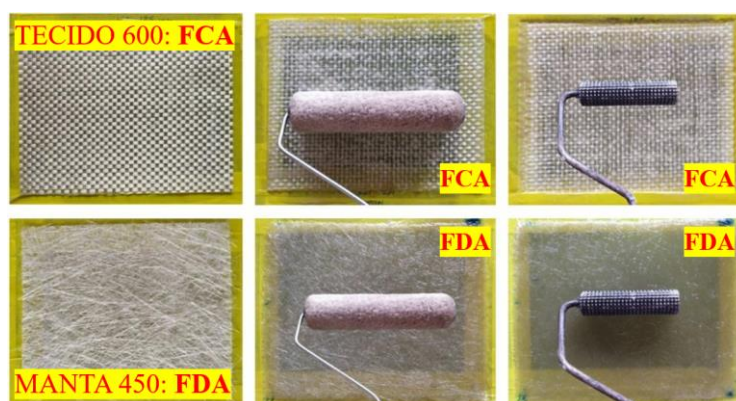


Fig. 1 – Processo de moldagem manual de camadas de tecido 600 (superior) e manta 450 (inferior).

Após o processo de cura superior a 24 horas, foram retificados os corpos de prova com as características determinadas na Figura 2, destinadas aos ensaios de tração e de flexão em ambos os arranjos: FCA e FDA. O Isso também foi realizado para os componentes envelhecidos, sendo estes denominados de FCAE e FDAE respectivamente.

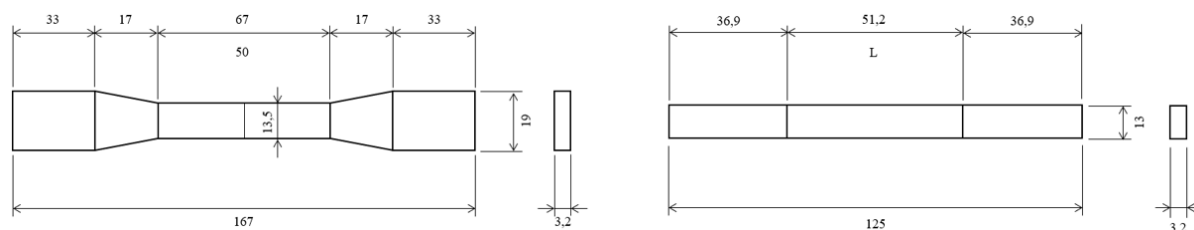


Fig. 2 – Dimensões do corpo de prova para ensaios de tração e flexão respectivamente.

Estes ensaios visam criar um comparativo entre as amostras recém produzidas para avaliar a diferença de comportamento mecânico existente e possíveis alterações de propriedades decorrente do envelhecimento natural, devido a sua disponibilidade foi possível separar apenas 2 corpos de prova envelhecido contra 5 recentes de cada estrutura necessárias para a realização dos testes, totalizando 28 componentes como demonstra a Figura 3. As Fibras Contínuas

Alinhadas (FCA) do tecido 600, identificadas pela letra “a”, expostas com geometria de tração e flexão, seguidas pelo arranjo envelhecido correspondente (FCAE) identificado pela letra “b”. O arranjo composto por Fibras Descontínuas Aleatórias (FDA) da manta 450, representado pela letra “c”, demonstradas também com geometria de tração e flexão, juntamente com seu respectivo componente envelhecido (FDAE) identificado pela letra “d”.

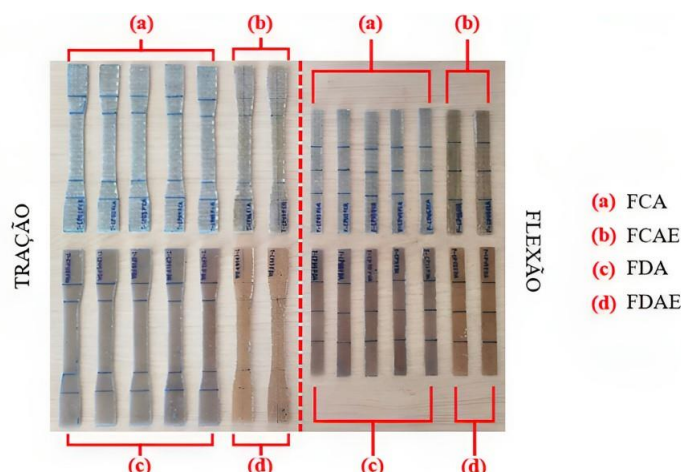


Fig. 3 – Corpos de prova finalizado para ensaios de tração (esquerda) e flexão (direita), com os arranjos FCA (superior) e FDA (inferior), com destaque aos componentes envelhecidos de cada arranjo.

Um total de 28 ensaios mecânicos foram realizados, sendo 14 de tração e 14 de flexão, as velocidades de ensaios foram adotadas de acordo com a norma adotada. Ressaltando que os testes foram realizados 10 dias após sua confecção, enquanto os arranjos envelhecidos possuem um período de fabricação superior a 3 anos. Sendo este componente, envelhecido sem a presença de luz, aplicação de carga ou influências externas.

Ensaio Mecânicos

Os ensaios de tração foram realizados com velocidade de ensaio de 5 mm/min. Os ensaios duraram na faixa de 60 segundos até sua ruptura. As informações obtidas através dos testes são a tensão de escoamento a tração, alongamento, força máxima e módulo de elasticidade.

Os testes de flexão por sua vez, foi realizado com velocidade calculada de acordo com a espessura do corpo de prova, variando em torno de 1,5 mm/min, o mesmo critério determinou a distância entre os apoios. As informações obtidas foram a tensão de escoamento a flexão, deflexão, carga de ruptura e módulo de elasticidade. A Figura 4 abaixo demonstra ambos os ensaios realizados.



Fig. 4 – Ensaios de tração e flexão respectivamente no equipamento universal de ensaio EMIC 300 kN.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de tração para os arranjos FCA e FDA, bem como seus componentes envelhecidos FCAE e FDAE, estão expostos na Figura 5. O arranjo FCA alcançou uma tensão máxima de 309,34 MPa, uma deformação de 0,1772 mm/mm e um alongamento de 6,61 mm. Em contraste, sua configuração envelhecida, FCAE, registrou uma tensão máxima de 269,37 MPa, uma deformação de 0,1435 mm/mm e um alongamento de 6,60 mm.

Para o arranjo FDA, a tensão máxima alcançada foi de 103,15 MPa, com uma deformação de 0,0911 mm/mm e um alongamento de 4,22 mm. Em contrapartida, a configuração envelhecida correspondente, FDAE, registrou uma tensão máxima de 87,05 MPa, uma deformação de 0,0750 mm/mm e um alongamento de 3,79 mm.

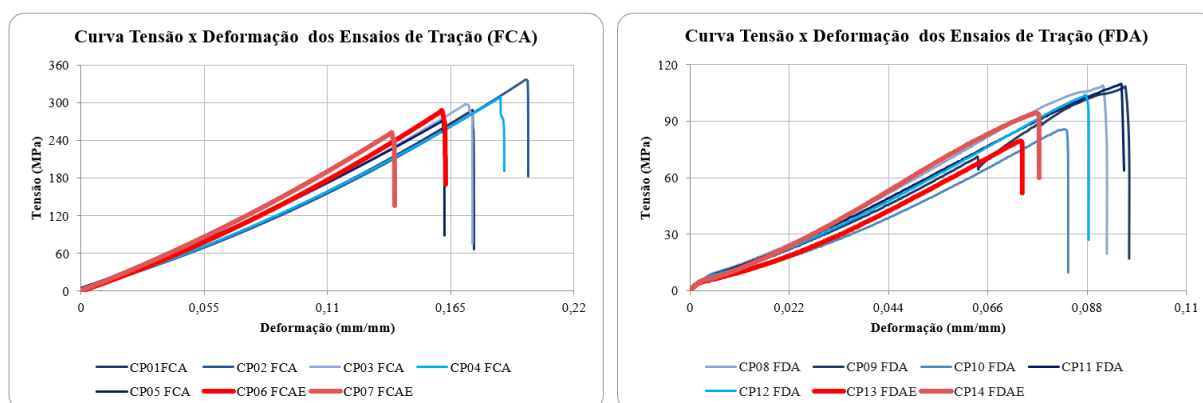


Fig. 5 – Curvas de tensão x deformação dos ensaios de tração nos arranjos FCA/FCAE e FDA/FDAE

O limite de escoamento, obtido pelo equipamento e inserido na Tabela 1 junto com os demais dados, leva em consideração o desvio padrão dos testes. O módulo de elasticidade também foi calculado com base nas tensões e deformações obtidas. A tabela proporciona um comparativo entre os componentes recém-fabricados e os envelhecidos, apresentando uma variação percentual de cada propriedade.

Tabela 1 – Comparativo entre os resultados gerais dos ensaios de tração ao arranjo envelhecido

Arranjo	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Máxima do envelhecido (MPa)	Variação (%)	Alongamento (%)	Alongamento do envelhecido (%)	Variação (%)
FCA	309,39 ± 19,64	269,37 ± 16,89	-12,94%	9,87 ± 0,45	9,86 ± 0,81	-0,10%
FDA	103,15 ± 9,03	87,05 ± 7,35	-15,61%	6,31 ± 0,38	5,66 ± 0,33	-10,30%
Arranjo	Tensão de escoamento (Mpa)	Tensão de escoamento do envelhecido (Mpa)	Variação (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade do envelhecido (E)	Variação (%)
FCA	252,08 ± 20,56	240,62 ± 21,80	-4,55%	1,75 ± 0,04	1,88 ± 0,01	+7,43%
FDA	92,17 ± 11,30	78,46 ± 10,76	-14,87%	1,13 ± 0,06	1,16 ± 0,07	+2,59%

Portanto, é possível afirmar que há uma perda notável, uma vez que a média dos resultados envelhecidos, quando maximizados e somados ao desvio padrão, é inferior mesmo em comparação com os arranjos recém-fabricados, considerando os resultados mínimos subtraídos de seu desvio padrão. Isso evidencia uma tendência de variação negativa (com exceção ao módulo de elasticidade) em relação às propriedades de tração em compósitos

poliméricos envelhecidos naturalmente. Vale ressaltar que a variação entre o alongamento em FCA e FCAE é praticamente nula.

Iniciando com os resultados dos ensaios de flexão, a Figura 6 apresenta a resposta de todos os arranjos. No caso do FCA, a tensão máxima atingida foi de 291,63 MPa, com uma deformação de 0,0284 mm/mm e uma deflexão máxima de 3,50 mm. Para o componente envelhecido, FCAE, observou-se uma tensão máxima de 290,96 MPa, uma deformação de 0,0279 mm/mm e uma deflexão máxima de 4,30 mm.

A configuração FDA alcançou uma tensão máxima de 174,74 MPa, com uma deformação de 0,0263 mm/mm e uma deflexão máxima de 4,65 mm. Por fim, seu componente envelhecido, FDAE, registrou uma tensão máxima de 171,13 MPa, uma deformação de 0,0260 mm/mm e uma deflexão máxima de 4,70 mm.

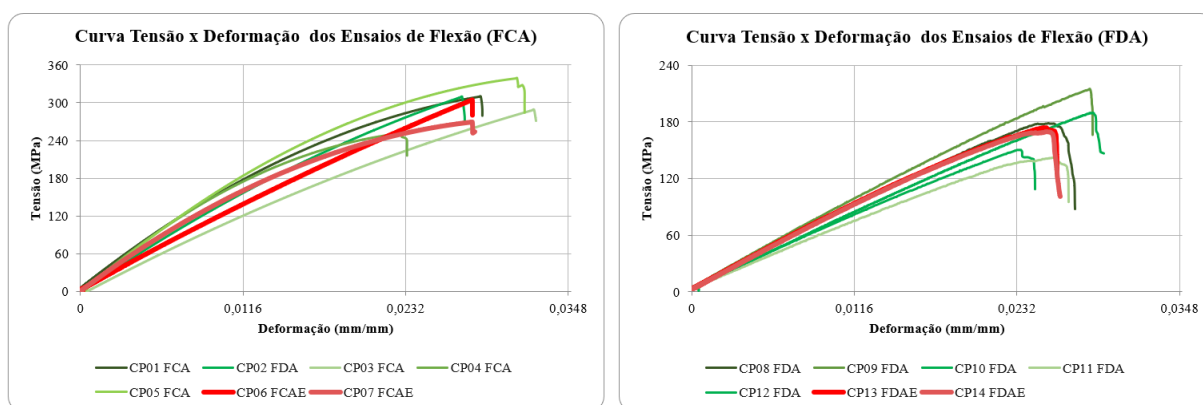


Fig. 6 – Curvas de tensão x deformação dos ensaios de flexão nos arranjos FCA/FCAE e FDA/FDAE

O mesmo procedimento foi aplicado aos resultados de flexão, inserindo os dados na Tabela 2 para comparação entre os arranjos e seus componentes envelhecidos. Ao contrário dos resultados de tração, as variações nas propriedades em testes de flexão foram preservadas, incluindo a tensão máxima e o módulo de elasticidade. Além disso, a deflexão teve um ganho notável, especialmente no arranjo FCA, assim como na força máxima aplicada.

Tabela 2 – Comparativo entre os resultados gerais dos ensaios de flexão ao arranjo envelhecido

Arranjo	Tensão Máxima (MPa)	Tensão do envelhecido (MPa)	Variação (%)	Deflexão (mm)	Deflexão do envelhecido (mm)	Variação (%)
FCA	291,63 ± 26,54	290,96 ± 12,70	-0,23%	3,50 ± 0,39	4,30 ± 0,10	22,85%
FDA	174,74 ± 26,46	171,13 ± 2,63	-2,06%	4,65 ± 0,35	4,70 ± 0,10	1,36%
Arranjo	Força máxima (N)	Força máxima do envelhecido (N)	Variação (%)	Módulo de elasticidade Ef (GPa)	Módulo de elasticidade Ef do envelhecido (GPa)	Variação (%)
FCA	432,24 ± 49,63	513,90 ± 9,90	18,89%	10,393 ± 1,08	10,437 ± 0,44	0,42%
FDA	240,27 ± 32,84	271,56 ± 26,56	13,02%	6,626 ± 0,70	6,615 ± 0,07	-0,17%

Além de validar ganhos nas características flexíveis desses materiais, observamos uma diferença nas variações de envelhecimento ao comparar os arranjos. Notavelmente, o alongamento do FDA variou consideravelmente em relação ao FCA, assim como a deflexão foi mais elevada no FCA quando comparada ao FDA. Isso destaca que as configurações das fibras desempenham um papel significativo nas propriedades finais do material compósito em relação ao processo de envelhecimento.

CONCLUSÕES

A análise dos componentes envelhecidos de cada arranjo revelou resultados bastante interessantes, evidenciando uma variação substancial nas propriedades. Esse fator deve ser cuidadosamente considerado no dimensionamento desses compósitos poliméricos, fabricados com resina poliéster e reforçados com fibras de vidro.

Estas variações nos componentes, em sua maioria, foram negativas quando relacionadas à tração, chegando a perdas de até 15,61%. Por outro lado, foram positivas no que diz respeito à flexão, com ganhos de até 22,85%. É notório que as demais características foram mantidas nos ensaios de flexão, certificando e reiterando a excelência desse material em termos de características flexíveis, onde as propriedades são, em sua maioria, preservadas.

Quando comparados os componentes envelhecidos FCAE e FDAE, as variações apresentaram diferenças mínimas em sua tensão máxima, alcançando 2,67%, e atingiram uma diferença de 10,20% quanto ao seu alongamento. Essa mesma tendência se manifestou nos testes de flexão, evidenciando uma diferença mínima de 0,59% no módulo de elasticidade e uma variação mais expressiva de 21,49% na deflexão. Conclui-se, portanto, que a configuração das fibras também é um fator que influencia diretamente nas características finais desses materiais quando submetidos ao envelhecimento natural.

REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER, William. D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [2] KAW, Autar K. Mechanics of Composite Materials. 2. ed. Boca Raton: CRC, 2005
- [3] MARINUCCI, Gerson. Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2011.
- [4] VENTURA, Ana M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n.º 3/4, 2009
- [5] ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P. Essentials of Materials Science and Engineering. 2. ed. Toronto: Cengage Learning, 2009
- [6] EL MESSERY, Madgi. Natural Fiber Textile Composite Engineering. 1. ed. Toronto: Apple Academic Press, 2017, 460
- [7] CANEVAROLO, Sebastião V. Jr. Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002
- [8] MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. 2. ed. Porto: Publindustrias Edições Técnicas, 2005.
- [9] LIBRANTZ, H.; RAMBO, C. R.; LIBRANTZ H.; FELIPE, André. Efeitos do impacto dos raios nas aeronaves com estrutura composta de materiais compósitos. Exacta, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 259-271, 2006.
- [10] REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2011.
- [11] THOMAS, S. Degradation mechanisms and accelerated aging in polymers and composites. Journal of Materials Science, v. 40, n. 22, 2005.
- [12] SREEKALA, S.; KUMARAN, M. G.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites after natural exposure. Polymer Degradation and Stability, v. 89, n. 2, 2005.
- [13] LEE, J. N.; YOON, Y. S.; LEE, W. J. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites. Journal of Composite Materials, v. 42, n. 18, 2008.
- [14] ASTM D638 - American Society for Testing and Materials. Standard Method For Tensile Properties of Plastics. 2014.
- [15] ASTM D790 - American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2010.