

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, MECÂNICA E DE ENVELHECIMENTO DE UM COMPÓSITO PULTRUDADO¹

Yoanka G. Chacón²

Sidnei Paciornik³

José Roberto M. d'Almeida⁴

Marcos Henrique de Pinho Mauricio⁵

Resumo

Um compósito pultrudado de matriz polimérica reforçado por fibras de vidro foi caracterizado por microscopia digital, análise de imagens, ensaios mecânicos e envelhecimento por absorção de água. Imagens em mosaico obtidas no MEV, com alta resolução e grande abrangência espacial, foram automaticamente construídas e quantitativamente analisadas. Os parâmetros microestruturais obtidos permitiram calcular propriedades mecânicas que foram comparadas com as obtidas diretamente de ensaios de flexão, com ótima concordância. O material foi envelhecido através da imersão em água e a mudança das propriedades mecânicas foi avaliada, indicando perdas significativas. A curva de absorção de água foi experimentalmente obtida.

Palavras-chave: Pultrudados; Microscopia digital; Propriedades mecânicas; Envelhecimento.

MICROSTRUCTURAL, MECHANICAL AND AGING CHARACTERIZATION OF A PULTRUDED COMPOSITE

Abstract

A polymer-matrix/glass fiber reinforced pultruded composite was characterized by digital microscopy, image analysis, mechanical tests and aging by water absorption. Mosaic images obtained in the SEM, with high resolution and vast spatial coverage, were automatically built and quantitatively analyzed. The microstructural parameters obtained allowed the calculation of mechanical properties which were compared to those obtained directly from flexural tests, with excellent agreement. The material was aged through immersion in water and the change in mechanical properties was evaluated, showing relevant changes. The water absorption curve was experimentally obtained.

Key words: Pultrusion; Digital microscopy; Mechanical properties; Aging.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Mestre em Restauração de Estruturas, ISPJAE- Cuba*

³ *Doutor em Física, Professor, DCMM PUC-Rio*

⁴ *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor, DCMM PUC-Rio*

⁵ *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Pesquisador, DCMM PUC-Rio*

INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos possuem ampla aplicação nas mais diversas áreas da engenharia. Com excelentes propriedades mecânicas e um ótimo desempenho em meios agressivos, eles oferecem grandes vantagens sobre os materiais convencionais como a madeira, o aço e o concreto. Além disso, suas propriedades específicas por unidade de peso têm motivado a expansão de seu uso nos mais diversos campos. Conseqüentemente, a caracterização dos materiais compósitos é a chave para o crescimento de seu emprego.

Polímeros e compósitos têm sido usados para renovar estruturas na engenharia civil, que se encontram expostas a condições severas no ambiente de serviço sob a combinação de tensões, tempo, umidade, radiação, agentes químicos e gases ambientais. A expectativa de durabilidade no desempenho destes materiais é de quinze anos ou mais.^[1] A compreensão dos mecanismos de degradação destes materiais, e a estimativa da preservação das propriedades ao longo de sua vida útil, são essenciais para sua utilização e otimização.^[2]

A microestrutura do material analisado é formada por três elementos constituintes fundamentais. A matriz de resina poliéster isoftálica, um polímero termofixo, é um poliéster de alto peso molecular com cadeias longas que conferem maior resistência mecânica em comparação com outras resinas poliéster. Possui boas propriedades de resistência química e pouca sensibilidade à água, além de ser capaz de absorver eficientemente esforços de impacto.^[3]

Um outro constituinte, responsável pela resistência mecânica do material, são as fibras de vidro, neste compósito, do tipo E. E finalmente os aditivos, elementos incorporados à matriz com o objetivo de melhorar as propriedades finais e de durabilidade do material. Eles são conhecidos como “carga” na análise da microestrutura. Cada um desses componentes possui um papel significativo no desempenho final do compósito.

Na análise das propriedades macromecânicas do material é utilizado o ensaio de resistência à flexão em três pontos. Os dados obtidos são usados freqüentemente para caracterizar materiais que devem suportar cargas sem flexionar, materiais rígidos ou semi-rígidos.^[4]

A primeira proposta deste trabalho é desenvolver uma metodologia de caracterização da microestrutura através das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Processamento Digital de Imagens (PDI). A partir dos resultados obtidos, fazer a análise micromecânica como estimativa do possível comportamento macromecânico do material sob condições de carregamento em três pontos.

O método usado se baseia numa varredura automática da amostra fazendo a captura de campos ao longo de uma região de estudo e obtendo uma série de imagens que possibilitam a formação de um mosaico, com alta resolução e grande abrangência espacial. Na etapa seguinte é feita a análise por PDI, desenvolvendo uma rotina de processamento para a classificação e quantificação das frações de área das fases presentes na microestrutura, diâmetro e área das fibras, distribuição do diâmetro e circularidade das fibras. Foi utilizado o software SIS^[5] para automatizar o processo de análise das imagens, incluindo a exportação final dos resultados para arquivos Excel.

A segunda proposta é comparar a resposta mecânica do material antes e após 1440 horas de envelhecimento. Foram testados corpos de provas, submersos em água destilada a temperatura ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi fornecido em forma de placa com 5m de comprimento e cortado posteriormente em placas de 1m cada uma. A seção transversal da peça tem 140mm de largura e 6,3mm de espessura, Figura 1.

• Análise Microestrutural

Na análise microestrutural foram tomadas amostras do centro e borda da placa com o objetivo de comprovar a uniformidade das características microestruturais ao longo do comprimento, Figura 1.

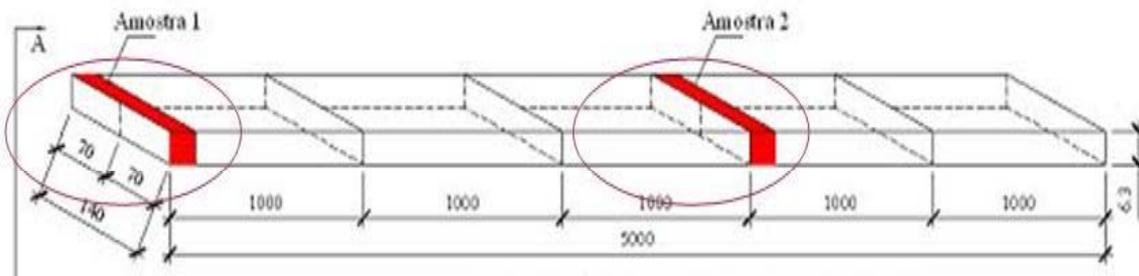


Figura 1 – Localização das amostras para a análise microestrutural (Amostra 1- borda, Amostra 2- centro). Dimensões em mm.

Segundo a seção A–A, Figura 2, foram feitos 6 mosaicos transversais ao longo dos 140mm de largura nas amostras 1 e 2. A comparação entre eles na mesma amostra, através dos resultados obtidos da rotina de processamento, permitiu avaliar a uniformidade do material neste sentido.

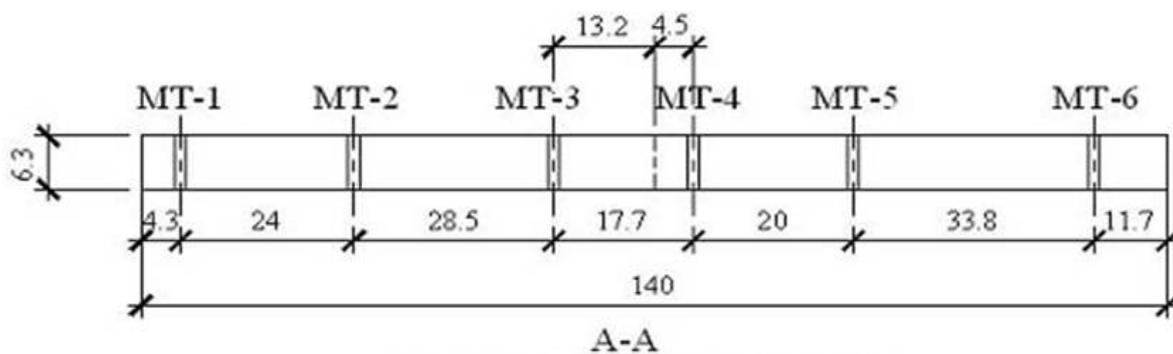


Figura 2 – Distribuição dos mosaicos transversais (MT) nas amostras 1 e 2.

Os mosaicos transversais foram obtidos através do software SIS^[5] a partir da captura automática de 18 campos, distribuídos em 2 colunas e 9 linhas, e que cobriram toda a espessura da peça.

As imagens foram obtidas com o MEV Zeiss DSM960, no modo de elétrons retroespalhados (BSE), que permite uma boa discriminação entre as fases presentes em função da diferença de peso atômico entre elas – Silício das fibras de vidro *versus* Carbono da matriz polimérica.

Nos mosaicos é possível distinguir os tons de cinza que diferenciam as três fases presentes, o tom preto da matriz, cinza da carga e brilhante das fibras. Em todas as imagens a magnificação foi da ordem de 100x, que é suficiente para obter

uma boa resolução nos campos capturados e possibilita a execução de análise quantitativa. Um mosaico típico é apresentado na Figura 3a.

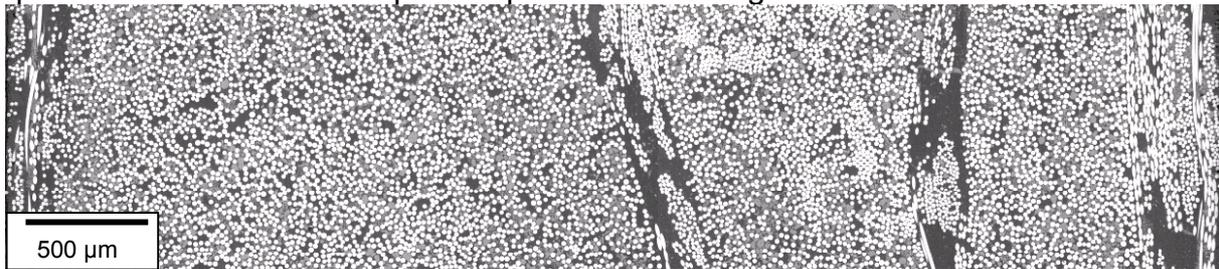


Figura 3 – Mosaico formado por $9 \times 2 = 18$ imagens concatenadas.

Como as fibras do material pesquisado são contínuas e alinhadas longitudinalmente, na seção transversal pode ser obtido um parâmetro de significativa importância: o diâmetro das fibras. Foi possível também verificar a distribuição de diâmetros nas populações de fibras analisadas por mosaico.

O procedimento foi elaborado segundo a seqüência de pré-processamento, segmentação, pós-processamento e medição.^[6] A ilustração da seqüência pode ser visualizada na Figura 4. Como detalhes do processamento seriam invisíveis mostrando o mosaico completo na magnificação da Figura 3a, optou-se por apresentar a seqüência sobre uma pequena área, com maior magnificação.

A primeira característica da imagem a ser tratada durante o pré-processamento é o ruído eletrônico típico de imagens no modo BSE – Figura 4a. A intensidade deste ruído é função da velocidade de varredura do MEV – quanto mais lenta a varredura, menos intenso o ruído. No entanto, dada a alta resolução das imagens em mosaico, a elevação do tempo de varredura levaria a um tempo total de captura de várias horas. Assim, optou-se por tolerar um certo nível de ruído, mantendo o tempo de captura de cada mosaico abaixo de uma hora. A presença de ruído cria dificuldades para a análise das imagens, uma vez que pixels internos às fibras podem ter tonalidades similares a pixels da carga ou da matriz. Assim foi necessário aplicar o filtro Sigma, que gera redução de ruído, sem perda de detalhes da imagem, comum no filtro passa-baixa tradicional (Figura 4b).^[7]

A segmentação das imagens permite discriminar as 3 fases da microestrutura analisada – fibras, carga e matriz. O histograma de intensidades dos pixels da imagem é claramente trimodal, permitindo a discriminação das fases através da escolha manual de dois tons de corte.

Durante a preparação das amostras (corte/lixamento/polimento), algumas fibras quebraram, criando buracos, pequenos fragmentos dispersos na matriz e bordas irregulares. Além disso, existem fibras muito próximas, cujas bordas se tocam produzindo regiões que seriam tratadas pelo “software” como objetos únicos, fornecendo resultados errôneos. Assim, o pós-processamento da segmentação das fibras, envolveu o preenchimento de buracos no interior das fibras, a remoção de pequenos objetos e a separação das partículas interconectadas empregando o método do divisor de águas.^[8] A imagem resultante pode ser observada na Figura 4c. De igual forma foi segmentada a fase carga, Figura 4d.

A Figura 4e mostra as fibras em verde e a carga em vermelho. Foram medidas as frações de área de matriz, fibra e carga. Estes parâmetros são medidos considerando a população total de objetos, incluindo aqueles que tocam as bordas do campo. As medidas dos objetos detectados para cada fase, são quantidade de objetos, área, diâmetro, eixos menor e maior e circularidade, para as fibras. Nestas medidas, objetos que tocam as bordas da imagem foram descartados.

Finalmente foram criadas bases de dados dos parâmetros medidos de cada fibra individual e de cada mosaico analisado, para posterior análise estatística.

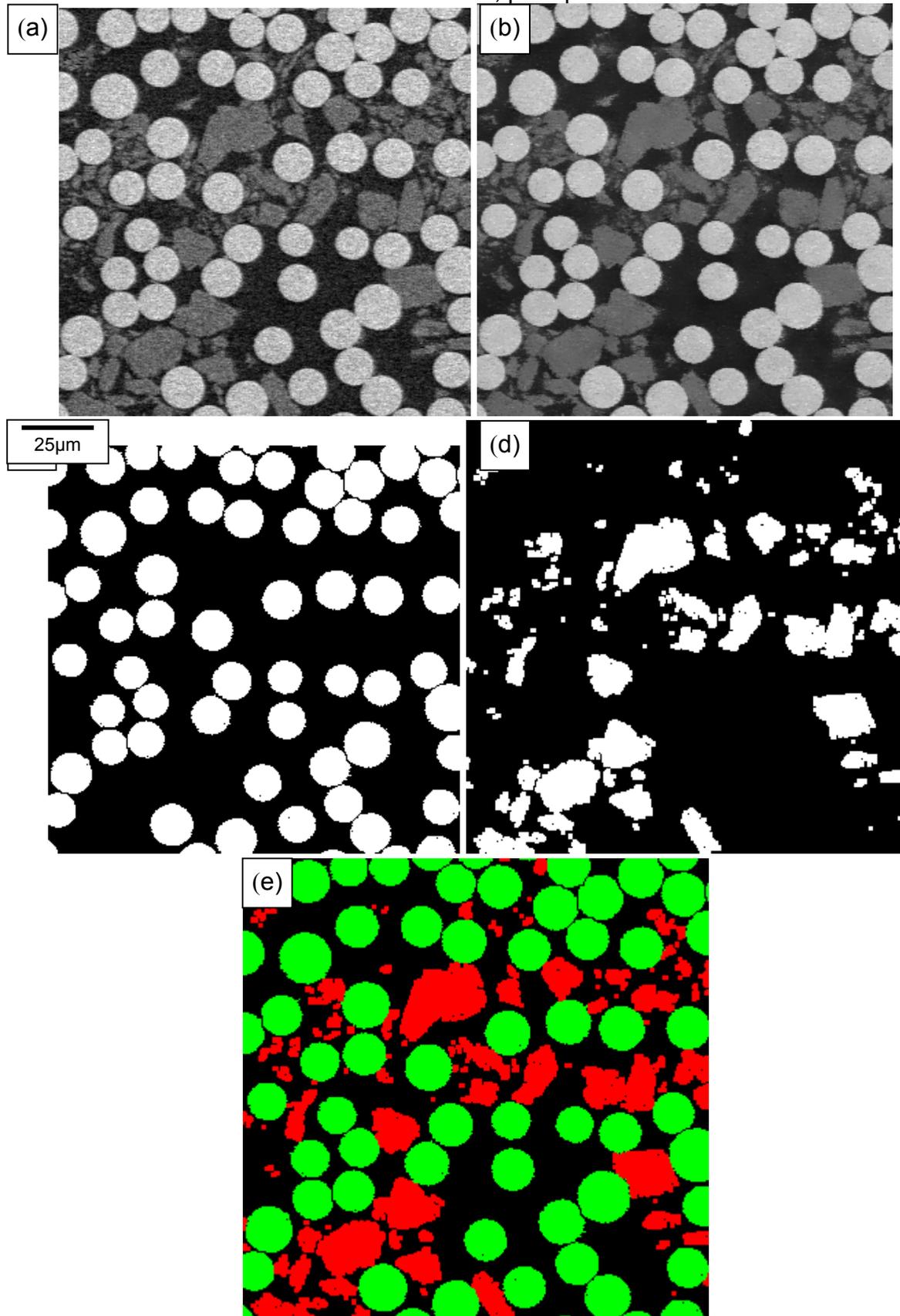


Figura 4 – Sequência do processamento de imagens. Vide texto.

- **Ensaio Mecânico**

A análise macromecânica foi realizada segundo a norma ASTM D790.^[4] Foram preparados corpos de prova com 140mm de comprimento, 25mm de largura e 6,3mm de espessura, para testar as propriedades mecânicas do material antes de ter sido submetido a processos de degradação e, além disso, comparar sua resposta com a estimada através dos estudos micromecânicos. Foram analisados 10 corpos de prova, 5 no sentido longitudinal das fibras, e 5 no sentido transversal. A velocidade de aplicação do carregamento foi de 2,56 mm/min.

- **Ensaio Mecânico após Absorção de Água**

Esses ensaios foram realizados também segundo a norma ASTM D790,^[4] sendo ensaiados 5 corpos de prova no sentido longitudinal das fibras e 5 no transversal, com as mesmas dimensões dos corpos de prova sem envelhecimento. Nesse caso, após a usinagem, os corpos de prova foram colocados no dessecador por um mês. A seguir, foram imersos, suspensos dentro de um recipiente com água destilada, Figura 5. Após um tempo de imersão pré-determinado foram testados.

Os resultados que serão apresentados neste trabalho correspondem a tempos de absorção de 1440 horas.



Figura 5 – Corpos em imersão para análise de degradação por absorção.

- **Ensaio de Absorção de Água**

O objetivo destes ensaios foi fazer o levantamento da curva de absorção do material – incremento em peso *versus* a raiz quadrada de cada tempo de imersão. A partir desta curva é possível determinar o ponto de saturação do material e a constante de difusão da água no material. Estes ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D570.^[9] Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 77,5x26,5x6,3mm, os quais foram previamente colocados num dessecador durante dois meses. A seguir, foram pesados para obter o peso seco do material e colocados num recipiente com água destilada.

Ao longo da primeira semana foram feitas medições do peso do material a cada 2 horas, na segunda e terceira semanas a periodicidade diminuiu para uma medição por dia. Na quarta e quinta semanas foi feita uma única medição, diminuindo-se a periodicidade, nas pesagens seguintes, para duas e três semanas de forma consecutiva. Analisando a diferença do incremento em peso em medições consecutivas, que mostrou uma diferença menor que 1%, com uma taxa de absorção uniforme, as medidas foram espaçadas a seguir para intervalos de 1 mês.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

• Análise Microestrutural

Foram medidas, em média, 7650 fibras por mosaico e na Figura 6a são apresentados os resultados da análise estatística feita na determinação do diâmetro médio das fibras.

Fazendo uma análise qualitativa preliminar dos campos capturados é possível observar uniformidade na distribuição do diâmetro das fibras e este critério foi comprovado uma vez feita a análise estatística e quantitativa. Revelou-se a presença de uma população predominante de diâmetro 16 μm , o que era um resultado esperado.

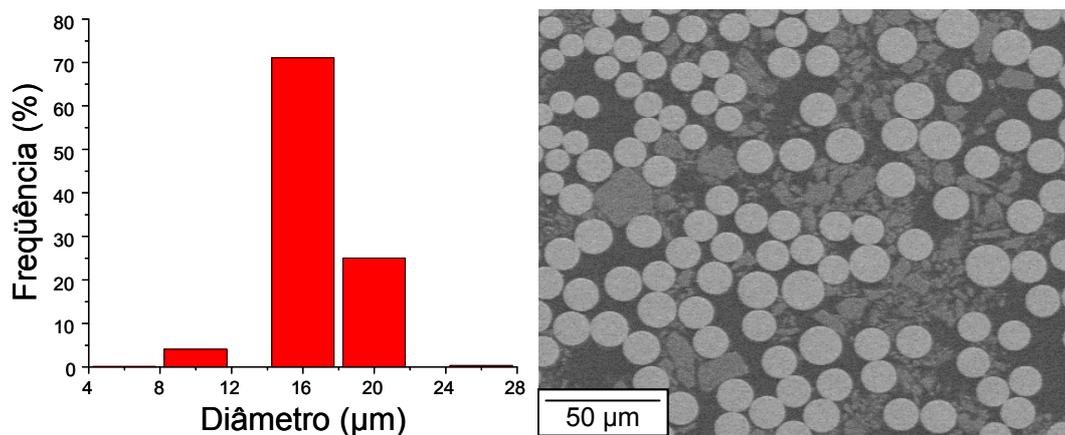


Figura 6 – (a) Distribuição do diâmetro das fibras, (b) Campo típico analisado

As frações de fibras e cargas podem ser comparadas entre os campos de uma amostra e entre elas, Figuras 7(a) e (b).

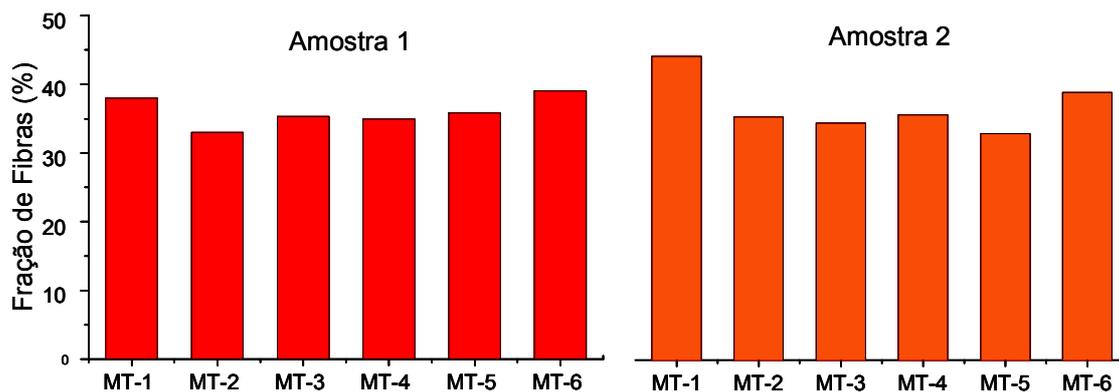


Figura 7(a) – Fração de Fibras (Mosaicos transversais - Amostras 1 e 2)

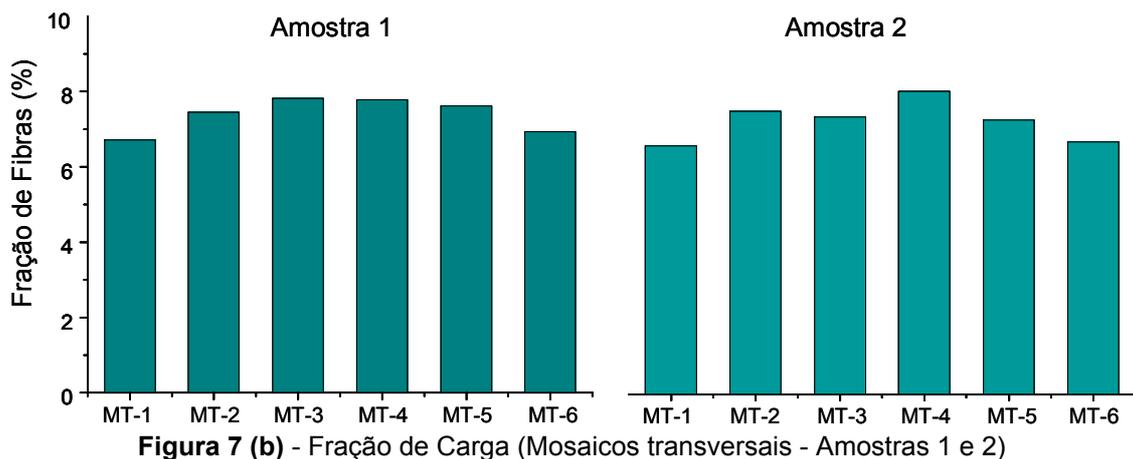


Figura 7 (b) - Fração de Carga (Mosaicos transversais - Amostras 1 e 2)

Através dos gráficos é possível constatar a uniformidade desses parâmetros. Isto foi confirmado fazendo um teste t de Student, com 95% de confiança que indicou que os mosaicos são estatisticamente iguais, tanto longitudinalmente quanto transversalmente. As diferenças mais significativas estão associadas às bordas, que são geralmente regiões de difícil controle no processo de fabricação.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados quantitativos obtidos para os 12 mosaicos analisados.

Tabela 1 – Frações de fibra e carga nos mosaicos transversais

	Vf (%)		Vc (%)		A1Vf:A2Vf	A1Vc:A2Vc
	A1	A2	A1	A2		
MT-1	37,98	44,35	6,71	7,12		
MT-2	33,02	35,51	7,44	8,11		
MT-3	35,30	34,62	7,82	7,95		
MT-4	34,94	35,84	7,78	8,68		
MT-5	35,82	33,10	7,62	7,87		
MT-6	39,07	39,07	6,94	7,24		
Média ± SD	36 ± 2	37 ± 4	7 ± 0,4	8 ± 0,5	36 ± 3	8 ± 0,7
Coef. Var.(CV)	0,06	0,11	0,05	0,06	0,08	0,09
Dif. Amost [%]	6	11	5	6	8	9

Vf => Fração de fibras; Vc => Fração de carga ; A1 e A2 => Amostras 1 e 2

ENSAIOS MECÂNICOS: MATERIAL ANTES E APÓS DA DEGRADAÇÃO

Na análise do comportamento mecânico, os ensaios de resistência à flexão em três pontos, permitiram obter a curva Carga versus Deslocamento e a partir dessa, a curva Tensão versus Deformação. A partir dessas curvas foram obtidos diversos parâmetros de caracterização mecânica, (transversal e longitudinal), do material, quais sejam: Modulo de elasticidade E, Tensão de flexão do material, considerada como a tensão de iniciação da fratura, Limite de Resistência associado à tensão máxima atingida, as Energias de Iniciação e Propagação, assim como a Tenacidade do material.

A energia de Iniciação necessária para que a trinca se desenvolva foi obtida a partir da definição de uma tensão de iniciação considerando uma queda de 95% da tangente na região elástica da curva. Este critério considera que o material mantém um comportamento elástico até 0,001 de deformação.

No caso da análise transversal foram mantidos os mesmos critérios no cálculo das Energias de iniciação e propagação. Para a determinação do Módulo de Elasticidade transversal (E), foram analisados vários critérios, entre eles a determinação do Módulo Tangente, a Secante média a partir de uma secante inicial desde a origem até 50% da tensão máxima e uma segunda secante, deste ponto até a tensão máxima. Comparando os resultados obtidos foi assumido o valor de E transversal igual ao Módulo Secante da reta desde a origem até 50% de σ (máx). Este valor foi avaliado com o estimado através dos resultados da análise micromecânica, a qual validou esta escolha.

Os parâmetros de caracterização mecânica foram também medidos para os corpos degradados pela absorção de água e seus valores comparados com os do material sem processo de degradação. O tempo de exposição à absorção foi correlacionado com a curva experimental levantada nos ensaios de absorção.

Como era esperado, o comportamento no sentido longitudinal, onde as propriedades mecânicas das fibras são predominantes, é bem diferente do comportamento no sentido transversal, onde as propriedades da matriz regem o desempenho do compósito, com pouco aporte das fibras. A propagação da trinca na fratura é reflexo desta diferença, Figura 8.

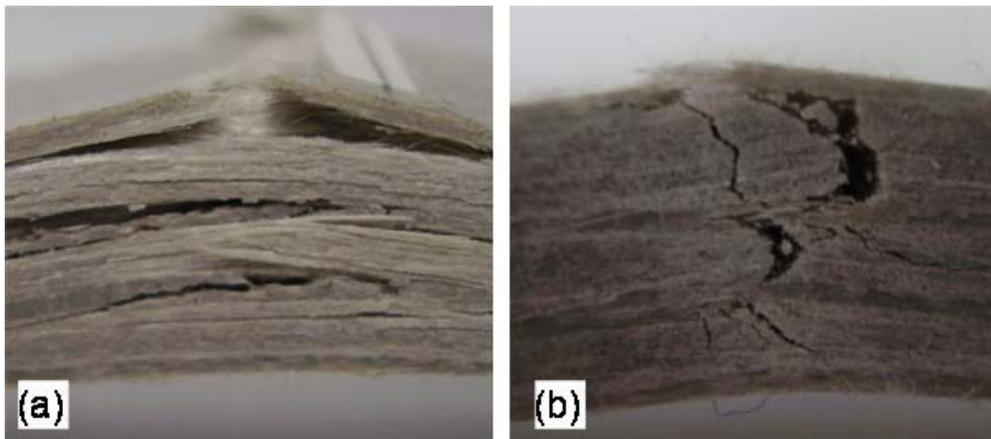


Figura 8 - Propagação da trinca na fratura, (a) Longitudinal às fibras, (b) transversal.

No sentido longitudinal a trinca demora-se a propagar devido ao aporte na resistência do material fornecido pelas fibras, Figura 8(a). O esforço aplicado à peça é eficientemente distribuído entre as fibras através de uma interface não degradada. Altos valores de energia de iniciação e tensão máxima ou limite de resistência são alcançados. No sentido transversal as propriedades do compósito caem em mais de 80 %, sendo que a trinca se propaga rapidamente uma vez atingido o valor da resistência máxima transversal, Figura 8 (b).

Nas Tabelas 2(a)(b) e 3(a)(b) são apresentados os parâmetros de caracterização mecânica do material antes e após a degradação.

Na comparação da análise micromecânica do material os resultados obtidos forneceram uma estimativa de propriedades mecânicas que foi validada com os resultados da análise macromecânica do material.

Tabela 2(a) – Parâmetros mecânicos. Sentido longitudinal, material como fabricado.

	E [GPa]	σ_f [MPa]	ε_f (mm/mm)	E_l [x10 ⁶ J/m ³]	σ_{máx} [MPa]	ε_{máx} (mm/mm)	E_P [x10 ⁶ J/m ³]	T [x10 ⁶ J/m ³]
Média	20 ±	351 ±	0,02 ±	3,53 ±	358 ±	0,019 ±	3,90 ±	7,4 ±
± SD	2,17	52	0,003	1	56	0,003	1,4	1,1

E: módulo de elasticidade; *σ_f*: resistência à flexão; *ε_f*: deformação; *σ_{máx}*: limite de resistência; *E_l*: energia de iniciação; *ε_{máx}*: deformação máxima; *E_P*: energia de propagação; *T*: tenacidade.

Tabela 2(b) – Idem. Sentido longitudinal, material envelhecido.

	E [GPa]	σ_f [MPa]	ε_f (mm/mm)	E_l [x10 ⁶ J/m ³]	σ_{máx} [MPa]	ε_{máx} (mm/mm)	E_P [x10 ⁶ J/m ³]	T [x10 ⁶ J/m ³]
Média	17 ±	285 ±	0,018 ±	2,70 ±	302 ±	0,02 ±	3,86 ±	6,64 ±
± SD	1,6	5,5	0,002	0,3	13	0,0022	1,24	1,4

Tabela 3(a) – Idem. Sentido transversal, material como recebido.

	E [GPa]	σ_f [MPa]	ε_f (mm/mm)	E_l [x10 ⁶ J/m ³]	σ_{máx} [MPa]	ε_{máx} (mm/mm)	E_P [x10 ⁶ J/m ³]	T [x10 ⁶ J/m ³]
Média	6,51 ±	45,41 ±	0,008 ±	0,21 ±	62,5 ±	0,013 ±	0,37 ±	0,573 ±
± SD	0,17	1,9	0,0004	0,02	2,6	0,0005	0,088	0,09

Tabela 3(b) – Idem. Sentido transversal, material envelhecido.

	E [GPa]	σ_f [MPa]	ε_f (mm/mm)	E_l [x10 ⁶ J/m ³]	σ_{máx} [MPa]	ε_{máx} (mm/mm)	E_P [x10 ⁶ J/m ³]	T [x10 ⁶ J/m ³]
Média	6,51 ±	40 ±	0,011 ±	0,24 ±	46,9 ±	0,0014 ±	0,26 ±	0,496 ±
± SD	0,17	1,0	0,0012	0,03	3,7	0,0002	0,095	0,07

Na análise micromecânica foi assumido um módulo de elasticidade da fibra de 70 GPa^[10] e da matriz isoftálica de 3,58 GPa.^[3] Com as frações volumétricas obtidas através das técnicas de microscopia e processamento digital de imagens (*V_f* = 0,36, *V_c* = 0,08 e *V_m* = 0,56) foi possível estimar o comportamento dos parâmetros mecânicos do material, a partir da regra das misturas.

Módulo de Elasticidade Longitudinal (micromecanicamente estimado):

$$E_{CompL} = E_f V_f + E_m V_m \rightarrow E_{CompL} = 25,2 + 2 \rightarrow E_{CompL} = 27,20 \text{ GPa}$$

O aporte pela matriz é quase desprezível, já que este módulo é próximo ao módulo das fibras, $E \approx 25$ GPa. O módulo obtido macromecanicamente (pelo ensaio mecânico) foi $E_{CompL} = 20 \pm 2,17$ GPa.

Módulo de Elasticidade Transversal (micromecanicamente estimado):

$$1/E_{CompT} = V_f/E_f + V_m/E_m \rightarrow 1/E_{CompT} = 0,0051 + 0,16 \rightarrow 1/E_{CompT} \approx 6,25 \text{ GPa}$$

No valor final foi desprezado o aporte pelas fibras por ser muito baixa sua contribuição neste sentido. O módulo obtido macromecanicamente foi $E = 6 \pm 0,17$ GPa.

Ambos os valores tiveram ordens de grandeza semelhantes o que permite validar as análises mecânicas do material tanto microestruturalmente quanto macromecanicamente.

A comparação dos parâmetros antes e após a degradação é apresentada nas Tabelas 4(a)(b). No comportamento do material degradado após 1440h ocorre a queda de importantes propriedades, nos sentidos longitudinal e transversal da peça. Porém as propriedades transversais são as mais afetadas. O fato da água atingir e degradar a interface fibra-matriz prejudica o aporte pela fibra no sentido transversal e a resposta mecânica do material começa a ficar restrita ao aporte dado pela matriz.

Tabela 4(a) – Propriedades mecânicas longitudinais antes e depois da degradação

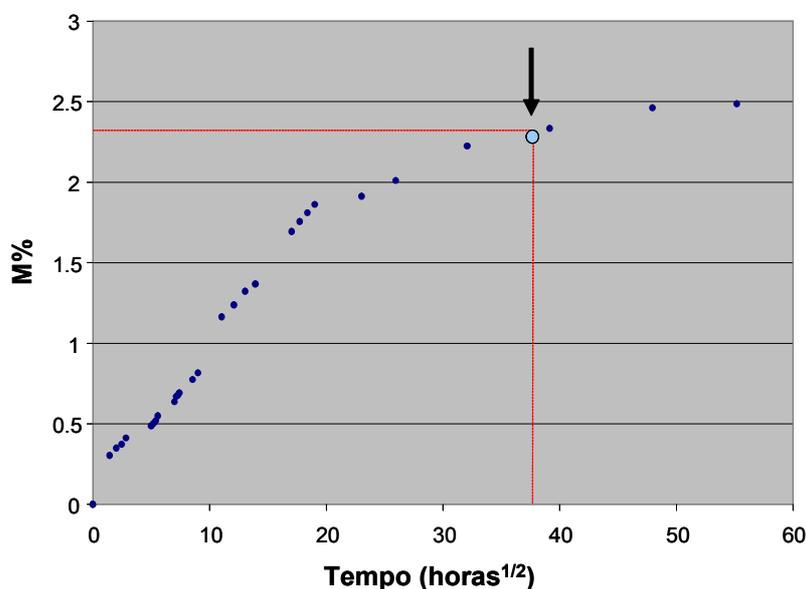
Valores médios	Módulo [GPa]	Resist. à flexão [MPa]	Deform. na Flexão (mm/mm)	Energia Iniciação [$\times 10^6$ J/m ³]	Limite Resist. [MPa]	Deform. máxima (mm/mm)	Energia Propagaç. [$\times 10^6$ J/m ³]	Tenacidade [$\times 10^6$ J/m ³]
Antes	20,01	358,09	0,0194	3,53	351,49	0,0187	3,90	7,44
Depois	16,54	301,63	0,0203	2,71	284,79	0,0183	3,86	6,64
$\Delta\%$	-17,34	-15,77	+4,64	-23,23	-18,98	-2,14	-1,03	-10,75

Tabela 4(b) – Propriedades mecânicas transversais antes e depois da degradação

Valores médios	Módulo [GPa]	Resist. à flexão [MPa]	Deform. na Flexão (mm/mm)	Energia Iniciação [$\times 10^6$ J/m ³]	Limite Resist. [MPa]	Deform. máxima (mm/mm)	Energia Propagaç. [$\times 10^6$ J/m ³]	Tenacidade [$\times 10^6$ J/m ³]
Antes	6,51	62,492	0,0126	0,207	45,41	0,008	0,365	23,43
Depois	4,18	46,90	0,0138	0,237	40,06	0,0107	0,259	18,72
$\Delta\%$	-35,79	-24,95	+ 9,52	+ 14,49	-11,78	+ 33,75	-29	-20,10

• Ensaios de Absorção de Água

Por serem resultados preliminares, destes ensaios só será apresentada a curva de absorção experimental obtida e não serão dados os valores do ponto de saturação do material e a constante de difusão da água no material. Porém, a curva permite referenciar as condições, segundo os incrementos em peso versus a raiz quadrada do tempo de imersão, nas quais se encontravam os corpos testados mecanicamente, após 1440h de imersão, Figura 9.

**Figura 9** – Curva de absorção, mostrando o ponto (seta) de onde foram retirados os corpos de prova para os ensaios de envelhecimento.

CONCLUSÕES

As vantagens do uso de recursos integrando técnicas de aquisição e processamento digital de imagens e microscópios motorizados na análise da microestrutura deste compósito permitiu reconhecer o material como uniforme, o que é um conceito importante na análise das propriedades mecânicas do material.

Os parâmetros microestruturais obtidos permitiram obter valores de propriedades mecânicas que foram compatíveis com os resultados obtidos diretamente dos ensaios de flexão, indicando que a metodologia proposta é robusta.

O material degradado após 2 meses de imersão revelou a queda em importantes propriedades mecânicas. Porém a curva de absorção do material revelou que este teve um bom comportamento à absorção já que o material estabilizou a curva em um tempo relativamente curto. Os corpos testados correspondem a um intervalo de tempo próximo da estabilização da curva de absorção ou da localização provável do ponto de saturação do material. Assim, testes para tempos maiores poderiam ter porcentagens de quedas menores nas propriedades em relação aos testados com 1440h de imersão. O trabalho deve continuar na procura destes resultados para tempos maiores de imersão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq

REFERÊNCIAS

- 1 MORGAN R., DUNN C. e EDWARDS C. Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure. In: **Chapter 6: Effects of creep and relaxation** p. 52-59.
- 2 L.PRIAN, A. BARKATT. Degradation mechanism of fiber-reinforced plastics and its implications to prediction of long-term behavior. **Journal of Materials Science** **34**. p.3977-3989, 1999.
- 3 BADER M. G. et al. **Delaware Composites Encyclopedia Design: Processing and Fabrication Technology**, v.3. Processing and Fabrication Technology, USA, 1990. 237p. ISBN 87762-701-0.
- 4 **ASTM D790** Standard Test Methods: Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. United States, 2001.
- 5 SIS, Soft Imaging Systems, Germany, 2006.
- 6 PACIORNIK S. e MAURICIO M.H.P. Digital imaging in ASM Handbook – Metallography and Microstructure. **ASM International**, v. 9, p. 368-402, 2004.
- 7 RUSS, J.C. Computer Assisted Microscopy, Plenum Press, 1990.
- 8 SERRA J. Image Analysis and mathematical morphology. **Academic press**, 1982.
- 9 **ASTM D570** Standard Test Methods for water absorption of plastics. United States, 1998.
- 10 MORLEY J. G. Reinforcing fibers. In: **High-performance fiber composites**. London: Academic Press, 1987. p. 21-40.