

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO CARREGAMENTO NA FADIGA DO COMPÓSITO DE POLIPROPILENO COM FIBRA DE COCO¹

Dijan Vinicius Osti de Moraes²

Rodrigo Magnabosco³

Marcela Caroline Antunes⁴

Sílvia Helena Prado Bettini⁵

Resumo

Este trabalho estudou a influência da variação da frequência da solicitação mecânica na resistência em flexão e na vida em fadiga de compósitos de polipropileno reforçado com 40% fibra de coco e compatibilizado com 4% de polipropileno enxertado com anidrido maleico. Os compósitos foram analisados através de ensaios de flexão e fadiga por flexão alternada com diferentes frequências de ensaio, entre 5 e 35 Hz. As superfícies fraturadas foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados dos ensaios de flexão monotônicos mostraram que a adição do reforço tornou o compósito mais rígido e resistente do que o PP puro. Para as propriedades de fadiga, foi observado que ao aumentar a frequência da solicitação mecânica, reduziu-se a vida em fadiga do compósito. A análise das fraturas mostrou que a redução na vida em fadiga foi devida a maior geração de calor por histerese, causando o aumento da falha por fadiga com efeito de temperatura.

Palavras-chave: Compósitos; Polipropileno; Fibra de coco; Fadiga; Frequência de solicitação.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE VARIATION OF FREQUENCY OF THE MECHANICAL LOADINGS ON THE COCONUT FIBER REINFORCED POLYPROPYLENE COMPOSITE'S LIFE DUE TO FATIGUE

Abstract

This work studied the influence of the variation of frequency of the mechanical loadings on bend resistance and on fatigue life of a 40 % coconut fiber reinforced polypropylene composite, which was compatibilized with 4% of polypropylene-grafted maleic anhydride. The composites were analyzed by bending tests and alternated bending fatigue using different test frequencies between 5 and 35 Hz. The fractured surfaces were analyzed by scanning electron microscopy. The results of bending monotonic tests showed that the addition of the reinforcement make the composite stiffer and stronger than pure PP. For the fatigue properties, it was observed that by increasing the test frequency, the fatigue life of the composite was decreased. The fracture's analysis showed that reduction in fatigue life was due to greater heat generation by hysteresis, causing an increase in failure by fatigue with effect of the temperature.

Key words: Composites; Polypropylene; Coconut fibers; Fatigue; Loading frequency.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Me. Engenharia Mecânica, FEI, São Paulo, SP, Brasil; dijan_88@hotmail.com.*

³ *Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Paulo, SP, Brasil; rodrmagm@fei.edu.br.*

⁴ *Me. Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC, SP, Brasil; marcela.antunes@gmail.com.*

⁵ *Prof. Dra., Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos buscam-se alternativas para diversos produtos para não agredir ainda mais a natureza. Procuram-se também materiais de baixo custo, provenientes de fontes de matérias primas renováveis e que possam competir com os materiais normalmente utilizados. Isto fez com que houvesse um aumento da importância das fibras naturais como reforço para polímeros, tornando-se um tópico interessante de pesquisa. Outro fator que contribuiu para aumento da importância das fibras naturais é o alto preço das fibras sintéticas. Por isso, se procura substituir parcialmente ou até totalmente as fibras sintéticas por fibras naturais, principalmente para condições menos severas de uso.^(1,2)

Neste contexto as empresas automobilísticas viram um potencial em substituir a fibra de vidro como reforço de materiais poliméricos, e aumentaram o interesse sobre os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, estimulados pela procura dos consumidores por produtos “amigos” do meio ambiente. As fibras naturais apresentam vantagens sobre fibras sintéticas, como as de vidro, pois são provenientes de fontes renováveis e inesgotáveis, além de serem biodegradáveis, contribuindo para o descarte das peças. Além disso, propiciam uma redução de massa de 10% a 30%, podendo assim baratear o alto custo de peças fabricadas de compósitos de fibra sintética.^(3,4)

Dentre as fibras naturais existentes encontra-se a fibra de coco. O uso de fibra de coco como agente de reforço em compósitos tem sido assunto de diversos estudos, pois envolve um processo barato e que promove alterações positivas nas propriedades mecânicas do composto, tais como aumentos na resistência à tração e no módulo de elasticidade.⁽⁵⁾

Com a atual importância tecnológica dos polímeros e compósitos, a fadiga destes materiais tem ganhado importância, apesar desta ainda ser pouco abordada, principalmente em compósitos de matriz termoplástica. O estudo e a obtenção de dados sobre a vida em fadiga de materiais compósitos é importante, já que as estimativas na literatura indicam que o maior número de falhas em peças de compósitos termoplásticos, empregados em aplicações de engenharia, são atribuídas a fadiga mecânica sob solitação cíclica.^(6,7)

Com isso os componentes dos veículos que poderão ser fabricados em polipropileno reforçado com fibra de coco também estarão expostos a tensões e deformações cíclicas em diferentes frequências,⁽⁸⁾ sendo assim necessário conhecer o comportamento deste material sob fadiga e principalmente a diferentes frequências de solitação, sendo este o objetivo deste artigo.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho optou-se por estudar a influência da frequência de carregamento no compósito PP-fibra de coco que apresentou em estudos anteriores^(5,9,10) o melhor comportamento mecânico monotônico e cíclico, isto é melhor resistência à tração e maior vida em fadiga uniaxial. A composição é de aproximadamente 56% m de polipropileno, 40% m de fibra de coco, 4% m de polipropileno enxertado com anidrido maleico, reestabilizado com os antioxidantes primário e secundário, Irgafos 168[®] e Irganox 1010[®] respectivamente.

O polipropileno em grânulos utilizado para fazer o compósito foi fornecido pela empresa Quattor, sob o código PP HP 550K, do lote M56649, apresentando um índice de fluidez 3,8 g/10min. O agente compatibilizante adicionado ao compósito foi

o polipropileno enxertado com anidrido maleico (PP-g-MA), fornecido pela empresa Crompton-Uniroyal Chemical com o código Polybond® 3200 (índice de fluidez a 110g/10min a 190°C e 2,16 KG) do lote AW8EA19Y000. A fibra de coco foi doada pelo projeto coco verde (Rio de Janeiro/RJ), in natura, sem nenhum tratamento químico prévio, com comprimento variando entre 12 a 14 cm. Após a moagem (ou cominuição) em um moinho de facas chamado “Desintegrador e Picador de forragem”, modelo DPC-4 da Metalúgica Braspec Ltda, o tamanho médio das fibras de coco obtido foi de 1,0 cm.

Todos os elementos do compósito foram separados e pesados em uma balança digital de precisão de 0,001g. A pré-mistura foi mantida na estufa por no mínimo 4 horas a 70°C antes do processamento na extrusora HAAKE Rheomex PTW 16 OS, dupla rosca co-rotacional (D= 16 mm e L/D= 25), utilizando rotação de 200 rpm. A condição de processamento foi estabelecida em trabalhos anteriores do grupo de estudo.^(5,9,10)

Antes da injeção, os grãos dos materiais extrudados foram mantidos em estufa por 4 horas a 80°C, para ser retirada a umidade. A injeção dos corpos de prova foi realizada na Injetora Battenfeld HB 60/350. Após a injeção, os corpos de prova foram mantidos a 23°C (+/- 2%) e umidade relativa de 50% (+/- 1%) por no mínimo 48 horas antes dos ensaios mecânicos.

Os ensaios de flexão em três pontos monotônicos foram realizados na Máquina Universal Instron 5567, seguindo a norma ASTM D790:⁽¹¹⁾ velocidade de deslocamento de 1,3 mm/min, distância entre pontos de 50 mm, temperatura de 23°C e umidade relativa = 50%. Realizaram-se 5 ensaios a fim de se determinar as medidas de módulo de elasticidade na flexão, e o limite de escoamento. Os ensaios foram interrompidos quando a deformação atingiu o valor de 5%, devido a recomendações da norma ASTM D 790,⁽¹¹⁾ onde a partir deste valor, pequenos erros são introduzidos no cálculo da tensão de flexão, sendo assim não aplicável.

Foram realizados alguns ensaios extras de flexão em três pontos numa máquina universal de ensaios MTS 810.25, variando a velocidade do ensaio, e conseqüentemente a taxa de deformação, a fim de se verificar se o limite de escoamento variava em função da taxa de deformação aplicada durante o ensaio. Ensaíram-se dois corpos de prova para cada velocidade de ensaio.

Os ensaios cíclicos de flexão alternada foram realizados na máquina de ensaio com sistema biela-manivela, sob controle por deformação com ciclo totalmente reverso, isto é, com uma razão de deformação de $R_e = -1$, em ambiente com temperatura controlada em 22°C. O uso de ciclos totalmente reversos minimiza os efeitos de possível fluência no material. O corpo de prova utilizado nestes ensaios foi o desenvolvido para este trabalho baseado na norma ASTM B593⁽¹²⁾ por meio de simulações numéricas por método dos elementos finitos, considerando grandes deformações. A geometria do corpo de prova é mostrada na Figura 1a e o resultado da simulação numérica mostrando as tensões de von Mises na Figura 1b. Utilizou-se um contador microprocessador NC400-6 para a contagem dos ciclos. Os ensaios foram conduzidos com um deslocamento máximo (flecha) imposto ao corpo de prova de 9 mm, o qual causava no corpo de prova uma tensão máxima atuante de 38,11 MPa (Figura 1b).

Realizaram-se ao menos 3 repetições para cada deslocamento imposto e para cada uma das frequências de ensaio (5,10,15, 20, 25, 30 e 35Hz), visando a construção das curvas número de ciclos por frequência. A temperatura do corpo de prova foi medida por um pirômetro a infravermelho na região de máxima tensão antes do aparecimento de uma trinca visível, ao longo dos ensaios. O critério de falha

adotado nos ensaios de fadiga por flexão é a separação total das duas partes rompidas do corpo de prova.

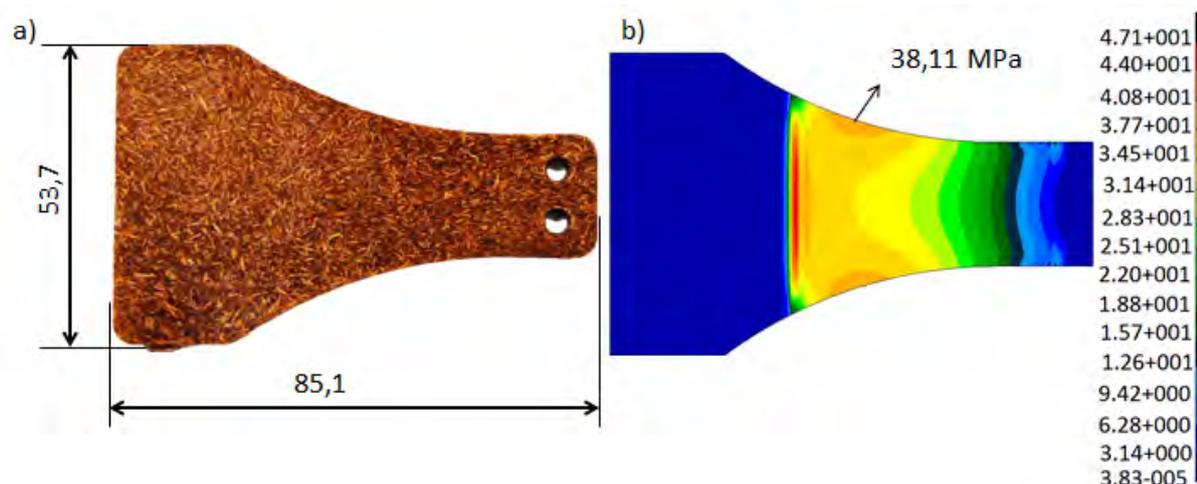


Figura 1. (a) Geometria do corpo de prova; e (b) resultado da simulação numérica para as tensões de von Mises, destacando a tensão máxima atuante durante os ensaios.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização dos 5 ensaios de flexão em três pontos, determinaram-se o módulo elástico e do limite de escoamento a 0,2%. Como a norma ASTM D790⁽¹¹⁾ não padroniza o offset para determinação de limite de escoamento, foi aplicada a metodologia utilizada por Bianchi⁽¹³⁾ de onde se escolheu o limite de escoamento a 0,2% para representar o material, pois com offsets maiores o material já se apresentava fora do regime elástico. O resultado das propriedades obtidas é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades obtidas no ensaio de flexão em três pontos	
módulo elástico em flexão (GPa)	limite de escoamento a 0,2% (MPa)
2,94 ± 0,07	36,90 ± 2,77

Ao observar a Figura 2, verifica-se como o limite de escoamento varia em função da taxa de deformação aplicada, o que já era esperado devido tanto o polipropileno quanto a fibra de coco apresentarem comportamento viscoelástico. Aproximando a curva da variação do limite de escoamento em função da taxa de deformação por uma curva logarítmica, pode-se extrapolar a curva para uma taxa de deformação de $0,3599 \text{ s}^{-1}$ (igual à mínima atuante durante os ensaios cíclicos, considerando a menor frequência adotada – 5 Hz – na flecha de $\pm 9\text{mm}$), obtendo-se o limite de escoamento de 74,06 MPa, permitindo inferir que todos os ensaios de cíclicos foram realizados com predominância de deformação elástica.

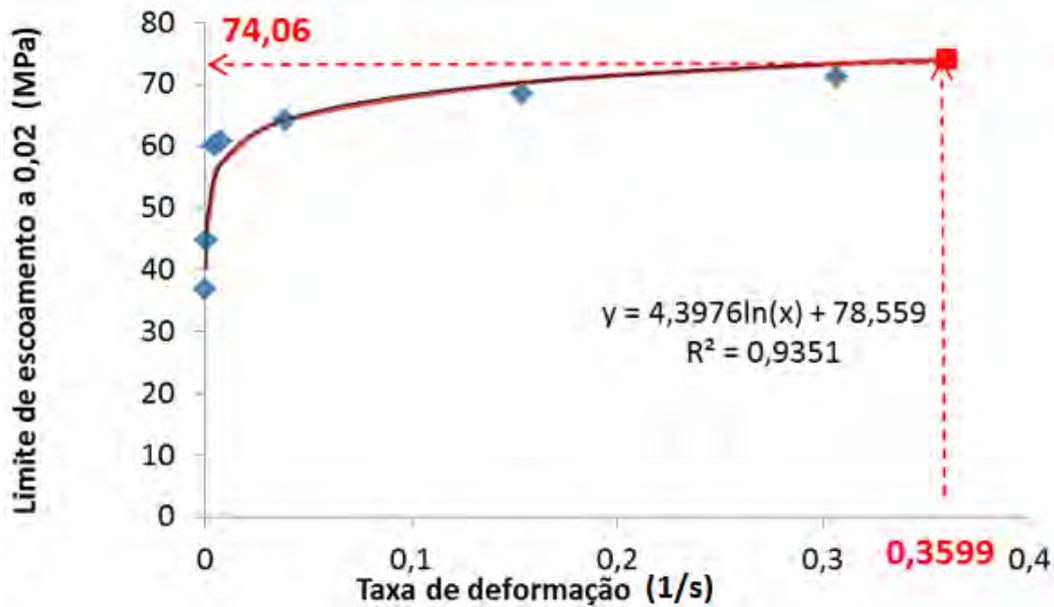


Figura 2. Variação do limite de escoamento a 0,2% em função da taxa de deformação aplicada.

Os resultados dos números de ciclos até a falha são mostrados em função da frequência na Figura 3, onde se verifica que ao se aumentar a frequência de ensaio o número de ciclos até a falha diminui. Além disso, em 20 Hz a curva apresenta uma mudança de tendência, fazendo com que o número de ciclos necessários para o material falhar torne-se praticamente constante até 35 Hz. As temperaturas registradas com o pirômetro a infravermelho são mostradas em função da frequência de ensaio na Figura 4, onde se nota que ao aumentar a frequência de solicitação a temperatura no material eleva-se.

As superfícies fraturadas dos copos de prova ensaiados com 5 Hz e 35 Hz foram recobertas com ouro e analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Na Figura 5 é mostrada uma visão geral da superfície do corpo de prova que foi ensaiado em 5 Hz, onde se nota que próximo as superfícies a fratura foi mais plana, e na região central ocorreu uma fratura com mais fibras arrancadas e deformação plástica da matriz.

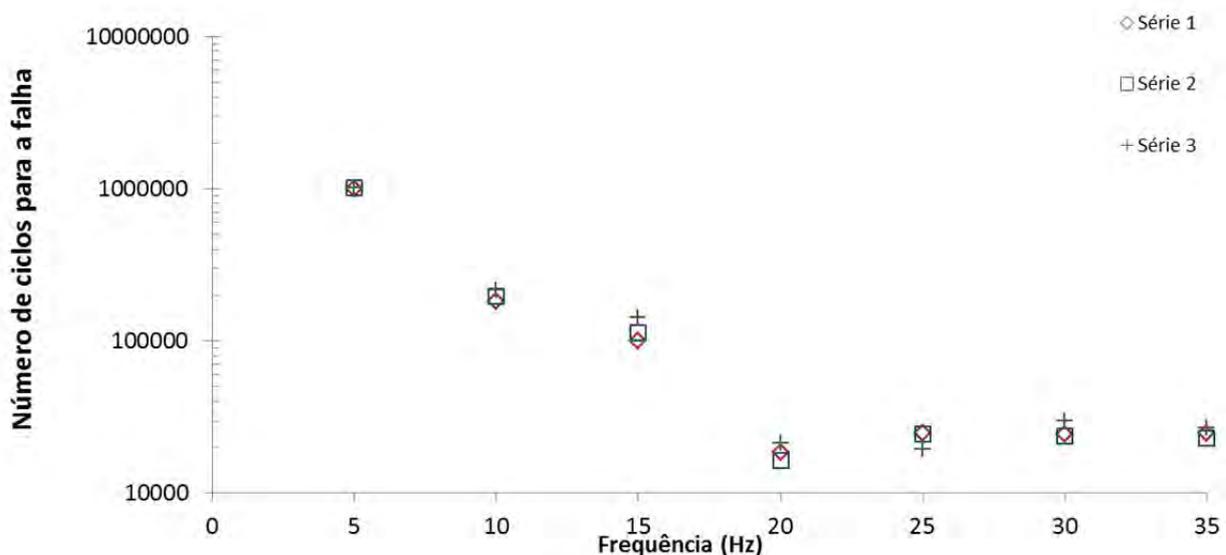


Figura 3. Resultado do número de ciclos para a falha em função da frequência ensaiada.

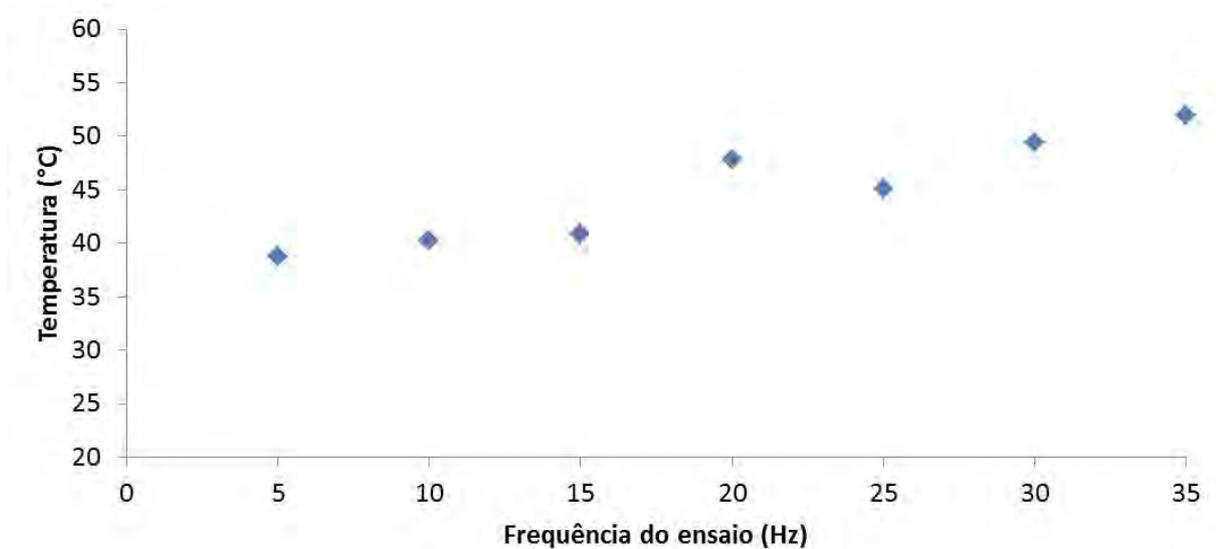


Figura 4. Temperatura na superfície do corpo de prova durante ensaios.

Na Figura 6 tem-se com maior detalhe a região central do corpo de prova, que durante o ensaio corresponde a região próxima da linha neutra. Pode se notar que houve arrancamento de algumas fibras, evidenciado pelos vazios deixados na matriz, mas algumas fibras não foram arrancadas, rompendo rente a matriz e exibindo desfibrilamento, expondo as microfibrilas. A Figura 6 exhibe também a matriz deformada plasticamente em volta das fibras que romperam na região central do corpo de prova. Provavelmente com o rompimento das fibras, que estavam bem aderidas (visto pelo desfibrilamento da fibra), a sollicitação foi maior na matriz, elevando sua temperatura, levando a falha por fadiga com efeito de temperatura.

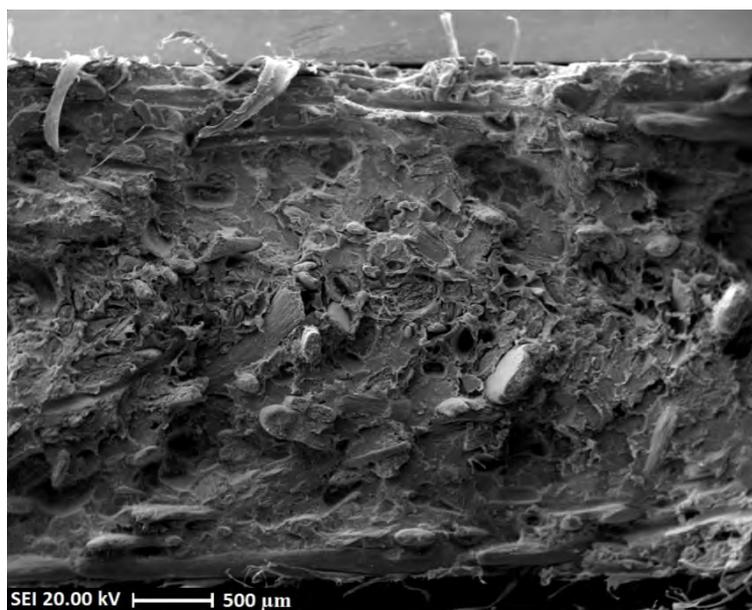


Figura 5. Fractografia em MEV: visão geral da superfície fraturada no ensaio realizado a 5 Hz.



Figura 6. Fractografia em MEV: visão detalhada da região central da superfície fraturada no ensaio realizado a 5 Hz.

Ao se analisar a Figura 7, observa-se como se deu a fratura perto da superfície do corpo de prova. A matriz exibiu uma fratura mais plana, típica de iniciação e propagação de trinca, sem a ocorrência de deformação plástica, evidências de falha por fadiga mecânica. Nesta região, as fibras presentes romperam rente a matriz sem apresentar qualquer descolamento da matriz polimérica.

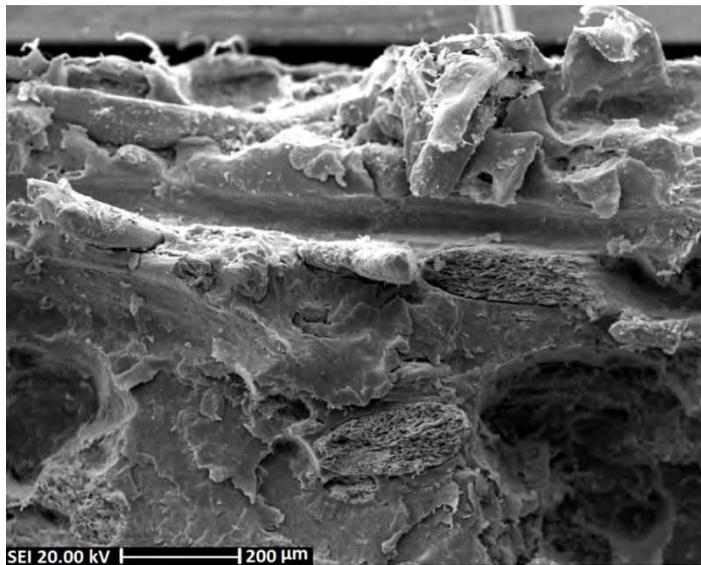


Figura 7. Fractografia em MEV: região próxima a superfície fraturada no ensaio realizado a 5 Hz.

Verificando as fractografias do corpo de prova ensaiado a 5 Hz (Figuras 5 a 7) percebeu-se que devido a menor frequência do ensaio, com um ciclo de solicitação mais longo, que possibilita mais tempo de dissipação de calor e menor taxa de deformação, teve-se um menor aquecimento do material, ocorrendo deste modo regiões que falharam por fadiga mecânica.

Analisando a fratura do corpo de prova ensaiado a 35 Hz apresentada nas Figuras 8 a 10, observa-se que de um modo geral a fratura apresentou uma matriz muito mais deformada plasticamente, havendo muito mais vazios deixados por fibras arrancadas, não apresentando mais evidências de fratura plana.

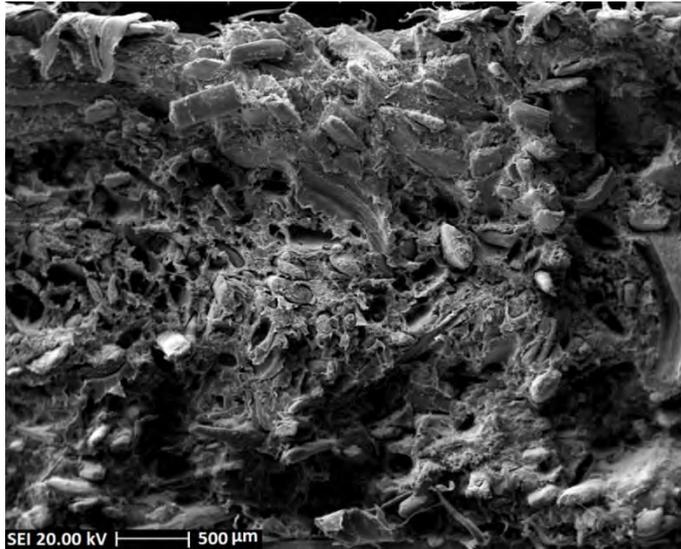


Figura 8. Fractografia em MEV: visão geral da superfície fraturada no ensaio realizado a 35 Hz.



Figura 9. Fractografia em MEV: detalhe da região central da superfície fraturada no ensaio realizado a 35 Hz.



Figura 10. Fractografia em MEV: região próxima a superfície do corpo de prova ensaiado a 35 Hz.

Após observar as temperaturas registradas na superfície (Figura 4) e as análises realizadas no MEV dos corpos de prova (Figuras 8 a 10) verifica-se que em 35 Hz o aumento registrado de temperatura no material provavelmente causou um amolecimento do material, tanto no centro do corpo de prova como na superfície, causando deformação plástica generalizada na matriz, evidenciando que o tipo de fadiga que causou a falha do material foi a fadiga com efeito de temperatura. Em relação ao reforço, o calor gerado provavelmente foi tanto que o agente compatibilizante não teve como manter as fibras aderidas na matriz, que estava amolecida. Assim as fibras não conseguiram desempenhar seu papel como reforço, e foram simplesmente arrancadas da matriz.

Com isso pode-se então dizer que a partir da frequência de solitação de 20 Hz, onde o número de ciclos praticamente ficou constante para a falha, não existe mais predominância de falha por fadiga mecânica, ficando somente a fadiga com efeito de aquecimento dominando o processo de falha do material, pois em frequências mais altas de carregamento há menos tempo para dissipar o calor que foi gerado, fazendo com que a taxa de geração de calor torne-se muito maior do que a taxa de dissipação para o ambiente, justificando o patamar constante de número de ciclos para a falha acima de 20 Hz para a geometria de corpo de prova e condições de solitação deste trabalho.

Esses diferentes modos de falha de fadiga, por iniciação e propagação de trincas e com efeito de temperatura, também foram encontrados na literatura, porém na literatura a falha ocorrida por causa do aumento de temperatura no material é chamada de fadiga térmica,^(6,9,14-17) termo considerado inapropriado pelos autores deste trabalho, já que a causa do esforço é puramente mecânica, e não devida a variações de temperatura que levariam a contração e expansão do material, causa comumente associada a fadiga térmica. Assim, foram propostos neste trabalho duas terminologias: fadiga por iniciação e propagação de trincas, e fadiga com efeito de temperatura.

4 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode se concluir que a frequência realmente influi na vida em fadiga do compósito, já que ao aumentar a frequência de ensaio de 5 Hz até 35 Hz, reduziu-se a vida do material, devido a maior geração de calor por histerese por causa do efeito viscoelástico do material, o que levou a mudança no tipo de fadiga predominante na falha, de fadiga mecânica para fadiga com efeito de temperatura.

REFERÊNCIAS

- 1 MEDEIROS, E.; MATTOSO, L.; CARVALHO, L. Uso de tecidos de fibras vegetais para melhoria das propriedades de materiais plásticos. Embrapa Circular técnica, São Carlos, n.16, nov. 2002.
- 2 JUSKA, C., 2006 Automotive plastics report card: the policies and practices of eight leading automakers. Ecology Center. EUA. P. 1-28, nov. 2006.
- 3 SUDDLELL, B.C.; EVANS, W.J. Natural fiber composites in automotive applications. In: MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL L. T. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Florida: Taylor & Francis, 2005, cap. 7.
- 4 SANTOS, P.A.; et al. Natural fibers plastic composites for automotive applications. In: Automotive Composites Conference & Exhibition, 8., 2008, Michegan, Anais eletrônicos....

- 5 BICUDO, A. B. L. C.; et al. Estudo da utilização da fibra de coco como alternativa de agente de reforço numa matriz polimérica de polipropileno. 2007. 82 f. Trabalho de conclusão de Curso (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo, 2007.
- 6 SURESH, S. Fatigue of materials. 2. ed. Cambridge: Cambridge University, c1998, 679 p.
- 7 CRUZ, M. C. A.; SOUSA, J. A. Correlações entre propriedades dinâmico-mecânicas e durabilidade sob fadiga mecânica em compósitos de polipropileno/polipropileno maleificado/ fibra de vidro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAS, 17., 2006, Foz do Iguaçu, Anais eletrônicos...
- 8 GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale, PA: SAE-Sociedade de Engenheiros da Mobilidade, c1992. 495 p. ISBN 1560911999.
- 9 ANTUNES, M. C. Estudo da influência do agente compatibilizante no comportamento em fadiga de um compósito de polipropileno reforçado com fibra de coco. 2009. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo, 2009.
- 10 MORAES, D.V. O. de. Estudo da influência de variáveis de composição no comportamento em fadiga de compósitos de polipropileno e fibra de coco. 2010. 83 f. Iniciação Científica - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D790: "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials". ASTM, West Conshohocken, 2011.
- 12 _____. ASTM B593: "Standard Test Method for Bending Fatigue Testing for Copper-Alloy Spring Materials". ASTM, Pennsylvania, 1996.
- 13 BIANCHI, M. Desbalanceamento de resistência mecânica em materiais poliméricos: caracterização experimental e aplicação exploratória para projeto. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 24 de fev de 2011.
- 14 HERTZBERG, R. W.; MANSON, J. A.; SKIBO, M. Frequency sensitivity of fatigue processes in polymeric solids. Polymer Engineering and Science, v. 15, n. 4, p. 252-260, Apr. 1975.
- 15 MEYERS, M.A.; CHAWLA, K. K. Mechanical behavior of materials. Prentice-Hall, 1999, 680 p. 0132628171.
- 16 KULTURAL, S.E.; ERYUREK, I.B. Fatigue behavior of calcium carbonate filled polypropylene under high frequency loading. Materials & Design, Istambul, v.28, n.3, p. 816-823, Set. 2007.
- 17 ROESLER, M. HARDERS, H, BAEKER, M. Mechanical behavior of engineering materials, metals, ceramics, polymers, and composites springer verlag. Berlin Heidelberg, 2007.