

Resistência à Fadiga de Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida, Vidro e Carbono

Leila Cristina Meneghetti¹

Mônica Regina Garcez¹

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho³

Francisco de Paula Simões Lopes Gastal³

RESUMO

A demanda da indústria da construção por materiais resistentes e duráveis fez que os compósitos reforçados com fibras ganhassem destaque nos últimos anos como material de reforço em estruturas de pontes e *offshore*, situações em que esses novos materiais estão submetidos à cargas cíclicas durante sua vida útil. Portanto, existe uma necessidade urgente de caracterizar a resistência à fadiga dos compósitos sob cargas cíclicas, assim como de desenvolver procedimentos para medir a segurança e a eficiência do uso destes materiais nestas aplicações. Buscando colaborar neste sentido, o presente trabalho investigou o comportamento à fadiga de compósitos estruturados com fibras de carbono, aramida e vidro. Os corpos-de-prova foram submetidos a cargas de tração cíclica a uma frequência de 5 Hz até a ruptura. A carga máxima aplicada variou na faixa de 0,45 a 0,80 da tensão última à tração, mantendo sempre a razão $R=0,1$ (razão entre a carga mínima e a máxima). Os resultados mostraram que a fibra de carbono apresenta o melhor desempenho à fadiga, seguida pela aramida e pelo vidro. Foram obtidas também as curvas SxN para as três fibras até uma vida à fadiga de no máximo 1 milhão de ciclos.

Palavras-chave: Fadiga; Compósitos; Carbono; Aramida; Vidro.

1 Introdução

O comportamento dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) à fadiga tem sido estudado extensivamente nos últimos trinta anos (ACI 440.2R, 2008). No entanto, quando a aplicação do PRF destina-se ao reforço ou recuperação da infraestrutura civil, tais como pontes e viadutos, poucos trabalhos sobre fadiga destes materiais têm sido encontrados. Uma particularidade destas aplicações é a baixa frequência do carregamento cíclico em serviço, em torno de 1 Hz, valor bastante inferior a frequência comumente utilizada nos ensaios de fadiga de compósitos em outras aplicações.

As condições de ensaio que elevam a temperatura e a umidade do compósito geralmente influenciam negativamente o comportamento à fadiga destes materiais. Entre todos os compósitos de PRF, os de fibras de carbono são os menos susceptíveis à falha por fadiga.

Os Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV) não apresentam claramente um limite à fadiga, pois seu comportamento é altamente influenciado por fatores ambientais, tais como: umidade e soluções alcalinas e ácidas. As fibras de aramida, em função de sua durabilidade, parecem comportar-se bem à fadiga (ACI 440.2R, 2008).

Outro fator que afeta o comportamento à fadiga de PRF é a frequência de carregamento. Ellyin e Kujawski (1995) examinaram experimentalmente a influência da taxa de carregamento em PRFV. O efeito da frequência de carregamento ficou evidente na relação tensão x deformação.

Keller *et al.* (2005) investigaram o comportamento à fadiga de placas pultrudadas de PRFV usadas na infraestrutura civil. O primeiro objetivo deste trabalho foi o de encontrar um procedimento de preparação, configuração e teste das amostras apropriado. Os autores utilizaram placas de PRFV disponíveis no mercado, a fim de preservar as

1 Dra, Professora da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR – lmeneghetti@gmail.com.

2 Dra, Professora da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS – mrgarcez@hotmail.com.

3 PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

características de largura e espessura do compósito, em três configurações de corpo-de-prova diferentes: retangular, retangular com reforço nas extremidades e retangular com redução na seção transversal. Depois disso foram estudados os modos de falha e o processo de degradação por fadiga destes laminados. Os corpos-de-prova com redução na seção transversal foram os que mostraram melhor desempenho à fadiga. A resistência à fadiga para $N=10^6$ foi de aproximadamente 25% da resistência estática. Os modos de ruptura foram semelhantes tanto para o carregamento estático quanto para o cíclico.

A fadiga dos materiais compósitos é completamente diferente da fadiga em metais. O desenvolvimento simultâneo no compósito de numerosas fissuras torna impossível medir o dano por fadiga com base em uma única fissura, como na mecânica da fratura. Além disso, o dano por fadiga depende de outros mecanismos de falha, tais como ruptura das fibras, fissuração da matriz, delaminação e descolamento. A combinação destes mecanismos pode afetar prejudicialmente algumas das propriedades destes materiais, como, a resistência e a rigidez. Consequentemente, muitas das pesquisas sobre dano cumulativo em materiais compósitos estão relacionadas principalmente com a investigação da resistência residual e a diminuição da rigidez durante o processo de fadiga.

Segundo Tserpes *et al.* (2004), o mecanismo dominante que causa a falha final por fadiga de compósitos laminados estruturados com fibras é a delaminação. Sob baixos níveis de carregamento, o fenômeno de delaminação é um fator dominante e leva à falha do compósito. Mesmo que a delaminação não cause falha imediata, ela reduz a resistência residual. Além disso, processos de delaminação de diferentes origens podem se acumular e causar falhas de grandes dimensões.

El-Assal e Khashaba (2007) avaliaram a resistência à fadiga de compósitos de fibra de vidro (PRFV) em matriz poliéster sob carregamento de torção e flexão/torção. O mecanismo de falha dos compósitos testados ocorreu pelo aparecimento de fissuras longitudinais ao longo da interface fibra-matriz e, no colapso, por corte transversal a partir da superfície. Essas fissuras, na fibra e na matriz, reduzem a rigidez do corpo-de-prova e, por essa razão, a carga necessária para manter o deslocamento constante deve ser diminuída. Os autores observaram também que o número de ciclos até a falha aumenta com o volume de fibra para uma mesma amplitude de tensão. A resistência à fadiga, calculada para $N=10^7$ ciclos, mostrou-se 8,5 vezes maior nos corpos-de-prova testados sob carregamentos de flexão e torção

combinados do que sob torção pura. Por outro lado, a resistência à fadiga do efeito combinado (flexão e torção) foi aproximadamente 50% menor do que à flexão pura.

Compósitos formados por fibras de vidro E apresentaram, para uma mesma tensão máxima normalizada, resistência à fadiga menor do que os de fibra de carbono. Tal conclusão foi obtida na investigação da fadiga em PRF de vidro e carbono conduzida por Demers (1998a). Neste trabalho, a autora observou ainda a influência da frequência do carregamento cíclico (20 Hz no carbono) na elevação da temperatura das amostras, o que afeta prejudicialmente o desempenho dos compósitos à fadiga. Por essa razão, os compósitos formados por fibra de vidro E foram testados à fadiga com frequências de carregamento de 1 Hz, 3 Hz e 5 Hz. Os resultados destes testes, publicados em Demers (1998), permitiram o estabelecimento do limite de resistência à fadiga, com 95% de confiança, por meio de:

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_u} = 0,790 - 0,078 \log N \quad (1)$$

onde σ_u é a tensão última à tração.

O limite de resistência estabelecido pela expressão 1 pode ser usado como uma estimativa conservadora da vida à fadiga no projeto de estruturas com PRF, enquanto não houver o refinamento do efeito dos parâmetros individuais (R, tensão mínima, tensão máxima, etc.) (DEMERS, 1998). Considerando-se que um dos principais campos de aplicação dos PRF é na recuperação e reforço de estruturas de pontes – e que estas estão sujeitas a cargas cíclicas –, o desempenho destes elementos em relação à fadiga necessita ser avaliado. Até o momento, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área. No entanto, tem-se consciência de que o entendimento do comportamento de elementos reforçados com PRF sujeitos a carregamentos repetidos é fator chave na consolidação da técnica.

2 Programa Experimental

2.1 Materiais e métodos

A caracterização dos sistemas compósitos estruturados com fibras é necessária para a avaliação das propriedades da resina, fibras, compósitos de PRF e componentes estruturais. Segundo o ACI 440.2R

(2008), os métodos de teste da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que quantificam o comportamento estrutural dos sistemas compósitos estruturados com fibras aderidos ao concreto, ainda estão em fase de preparação. Alguns métodos existentes são aplicáveis aos materiais componentes dos sistemas compósitos. Todavia, a utilização de alguns destes métodos necessita de adaptações.

Para efeito deste trabalho e conforme recomendação do ACI 440.2R (2008), as propriedades de compósitos PRF serão determinadas usando os métodos da ASTM D 3039 (2006) – resistência à tração – e, ASTM D 3479 (1996) – fadiga.

2.2 Características dos compósitos testados

Foram utilizados três sistemas de reforço, compostos por três diferentes tipos de fibras e duas formulações adesivas de base epóxi, bicomponente, selecionadas de acordo com as recomendações dos fabricantes das fibras.

As mantas de fibra de carbono CF 130 e de vidro EG 900, do tipo *dry fabric*, são parte do Sistema Compósito Estrutural MBrace™, comercializado pela *Basf Construction Chemicals*. O sistema de reforço com fibras de aramida AK 60 foi desenvolvido no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As principais propriedades destas fibras encontram-se discriminadas na Tabela 1.

Para a criação da matriz do compósito de fibra de carbono CF 130 e vidro EG 900 utilizou-se a formulação comercial fornecida pelo fabricante.

Já para a criação da matriz do compósito estruturado com fibra aramida uma nova formulação de base epóxi bi-componente teve que ser selecionada. Devido ao fato de o reforço unidirecional de aramida ser muito denso foi necessário adotar uma formulação de viscosidade mais baixa, que garantisse um bom envolvimento das fibras. As propriedades dos dois tipos de resinas utilizadas encontram-se detalhadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Propriedades das fibras.

	Carbono CF 130	Vidro EG 900	Aramida AK 60
Resistência à tração (MPa)	3.400	1.517	2173,5
Espessura (mm)	0,165	0,353	0,286
Módulo de elasticidade (MPa)	227.000	72.400	124.200
Peso por área (kg/m ²)	0,3	0,9	0,45
Deformação última (%)	1,67	2,1	2,3
Largura (mm)	508	610	300

Tabela 2 – Propriedades das resinas.

Componentes	Formulação Epóxi 1	Primer	Formulação Epóxi 2
	Araldite LY 1564	MBrace Primer - A	MBrace Saturant - A
Aradur 955	MBrace Primer - B	MBrace Saturant - B	
Resistência à tração (MPa)	106	24	124
Deformação última (%)	6,5 – 7,5	3	2,5
Módulo de elasticidade (MPa)	2600-2800	717	3034

Os compósitos que deram origem aos corpos-de-prova foram formados no laboratório pelo sistema curado *in situ*. O segmento de tecido de reforço usado para formação do compósito, com fibras orientadas unidirecionalmente, teve suas extremidades vinculadas à superfície de laminação de modo a garantir o alinhamento das fibras. Após a cura da resina por 7 dias, o laminado produzido foi cortado nas dimensões de 250 mm x 40 mm (Figura 1) e, em seguida, executou-se o reforço das extremidades. Para o reforço das extremidades dos corpos-de-prova foram colados simetricamente laminados de

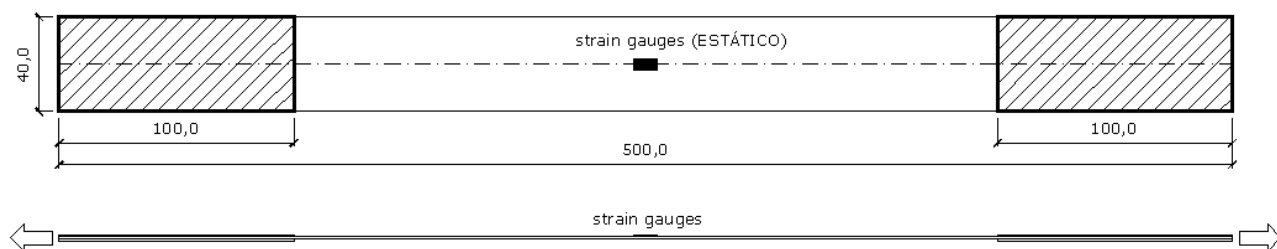


Figura 1 – Configuração dos corpos-de-prova de PRF.

fibra de vidro de 1,2 mm de espessura a fim de evitar a ruptura próxima às garras da máquina de ensaio. A espessura do compósito foi determinada com uso de um micrômetro com sensibilidade de 0,01 mm. A Figura 1 mostra a geometria dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios estático e cíclico.

2.3 Ensaio de determinação da resistência à tração do PRF

O ensaio de tração dos corpos-de-prova de PRF de carbono, vidro e aramida foi realizado numa máquina universal de ensaios, com capacidade máxima de 100 kN. A força de tração foi aplicada por meio de controle de deformação com emprego de uma velocidade de 2 mm/min até a ruptura do compósito. Os dados de força e deformação foram registrados durante todo o teste, por meio de um sistema de aquisição de dados.

O módulo de elasticidade do compósito foi determinado conforme especificação da ASTM D 3039, para um trecho de variação das deformações específicas de 1‰ e 3‰.

2.4 Ensaio de determinação da resistência à fadiga do PRF

Os testes de fadiga nos corpos-de-prova de PRF foram realizados no modo tração-tração (variação entre tensões mínima e máxima positivas), com carga aplicada na direção das fibras. Adotou-se uma frequência de 5 Hz, pois este valor torna desprezível o efeito de aumento da temperatura da matriz polimérica ao longo da aplicação dos ciclos. A carga máxima aplicada variou na faixa de 0,45 a 0,80 da tensão última à tração estabelecida num ensaio de tração direta estática, mantendo sempre uma razão $R=0,1$ (razão entre a força mínima e a máxima).

Os ensaios foram realizados numa máquina MTS equipada para ensaio de fadiga. Durante todos os testes foram registrados os valores do número de ciclos até a falha, assim como as cargas mínimas e máximas efetivamente aplicadas.

3 Apresentação e análise dos resultados

As propriedades elásticas dos materiais são características mecânicas essenciais para a análise de tensões e para o projeto de componentes estruturais utilizados em diversos ramos da engenharia. Os materiais compósitos poliméricos apresentam comportamento linear elástico até praticamente atingir a

tensão de ruptura. Por essa razão, é fundamental o conhecimento das propriedades elásticas do material.

3.1 Propriedades mecânicas

Os valores médios obtidos para a tensão e deformação específicas máximas e para o módulo de elasticidade dos PRF testados estão mostrados na Tabela 3. Os valores da tensão máxima foram obtidos a partir da média das observações colhidas de cinco exemplares de cada tipo de PRF. Já a deformação máxima e o módulo de elasticidade representam a média dos valores obtidos com o ensaio de duas amostras.

Analisando-se os dados observa-se que os compósitos formados com fibras de carbono (PRFC) foram os que apresentaram os maiores valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade, como esperado. As proporções entre os módulos se mostraram adequadas, visto que o módulo da fibra de carbono é aproximadamente três vezes superior à de vidro EG 900 e o da aramida é duas vezes superior à de vidro EG 900.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do PRF.

Compósito	Resistência à tração máxima (MPa)	Deformação máxima (‰)	Módulo de elasticidade (GPa)
Vidro EG 900	320,97	8,95	20,63
Carbono CF 130	841,51	8,85	74,20
Aramida AK 60	419,98	8,43	51,13

Considerando-se que a fração volumétrica de fibras em compósitos confeccionados com impregnação manual é de aproximadamente 30% (LEVY NETO e PARDINI, 2006), pode-se fazer uma estimativa do módulo de elasticidade do material utilizando os conceitos da micromecânica (regra das misturas). Pela regra das misturas, o módulo de elasticidade do compósito é dado pela soma das frações volumétricas da fibra e da matriz, multiplicadas pelos respectivos módulos de elasticidade. O módulo de elasticidade experimental e o estimado desta forma para os diferentes tipos de compósito testados são mostrados na Tabela 4.

Analisando a Tabela 4 observa-se que, no caso dos compósitos formados pelas fibras de carbono CF 130 e de vidro EG 900, o módulo de elasticidade estimado pela regra das misturas aproximou-se bastante do valor obtido experimentalmente. Já o valor de módulo de elasticidade do compósito

de aramida AK 60, obtido experimentalmente, foi bastante superior ao estimado, o que pode indicar a presença de um maior volume de fibras no compósito ou problemas nos dados fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 4 – Módulo de elasticidade dos PRF.

Compósito	Módulo de elasticidade experimental (GPa)	Módulo de elasticidade estimado* (GPa)
Vidro EG 900	20,63	24,03
Carbono CF 130	74,20	70,22
Aramida AK 60	51,13	39,02

* valores estimados desprezando-se o volume de vazios.

Analisando-se os dados da Tabela 4 observa-se que, no caso dos compósitos formados pelas fibras de carbono CF 130 e de vidro EG 900, o módulo de elasticidade estimado pela regra das misturas aproximou-se bastante do valor obtido experimentalmente. Já o valor de módulo de elasticidade do compósito de aramida AK 60, obtido experimentalmente, foi bastante superior ao estimado, o que pode indicar a presença de um maior volume de fibras no compósito ou problemas nos dados fornecidos pelos fabricantes.

As tensões máximas dos compósitos variaram entre 200 MPa e 850 MPa, ficando abaixo das tensões de escoamento do aço de construção, no caso dos compósitos de aramida e vidro.

É interessante notar, ainda, que as deformações médias obtidas em todos os PRF testados foram praticamente as mesmas, sendo registrados valores ligeiramente menores para os compósitos de carbono. Essas deformações específicas são bem inferiores às características das fibras dadas pelos fabricantes. Como as deformações específicas foram medidas com *strain gauges* aplicados sobre a matriz do reforço, admite-se a hipótese de que os valores obtidos representem apenas as deformações específicas máximas permitidas pelo sensor ou pela fissuração da matriz. As deformações específicas teóricas especificadas para os compósitos de fibras de vidro e carbono seriam aproximadamente 30% superiores às obtidas experimentalmente.

Na maioria dos casos a ruptura do corpo-de-prova se deu na região próxima ao material de reforço utilizado para prevenir a ruptura nas garras

da máquina de ensaio. A Figura 2 mostra a ruptura característica de cada tipo de fibra formadora do PRF ensaiado.

É interessante registrar que os corpos-de-prova de compósitos de fibras de carbono permaneceram sem apresentar qualquer manifestação de deterioração aparente até instantes próximos à ruptura, que ocorreu de forma brusca, despedaçando toda a amostra (Figura 2-a). Já a ruptura dos corpos-de-prova formados com polímeros reforçados com fibra de aramida (PRFA) se iniciou com duas ou três linhas de falha orientadas longitudinalmente na matriz, seguida pela ruptura das fibras próxima à extremidade do reforço (Figura 2-b).

A ruptura dos corpos-de-prova de PRFV mostrou-se bastante diferente das demais, iniciando-se por uma fissuração da matriz ao longo dos feixes de fibras que formam o reforço unidirecional de vidro. Após essa fissuração, iniciava-se um processo de ruptura das fibras na região das extremidades do reforço (Figura 2-c).

É interessante ainda destacar que todos os PRF testados exibiram comportamento elástico linear até a ruptura, como esperado. O gráfico força x deformação específica para os PRF ensaiados à tração está mostrado na Figura 3. A reprodutibilidade dos dados foi bastante alta em alguns casos, com exceção do carbono CF 130, em que houve uma variação maior entre o comportamento dos dois corpos-de-prova ensaiados.

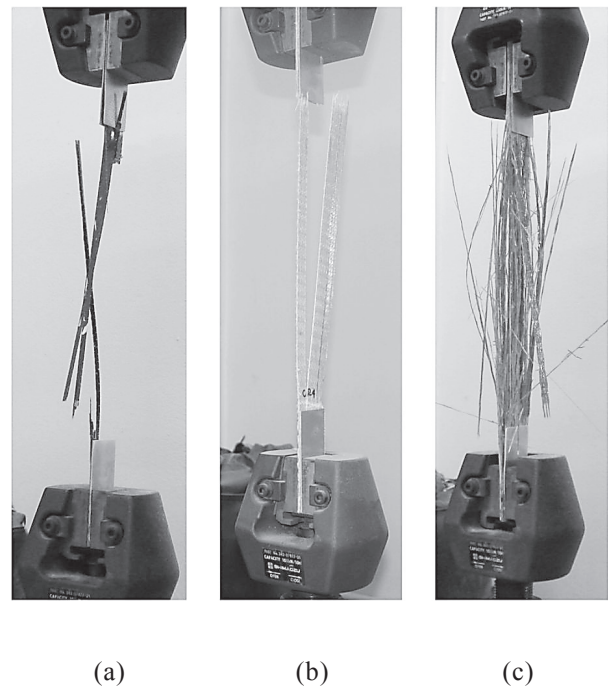


Figura 2 – Ruptura dos corpos-de-prova em ensaio de tração uniaxial: (a) vidro; (b) carbono e (c) aramida.

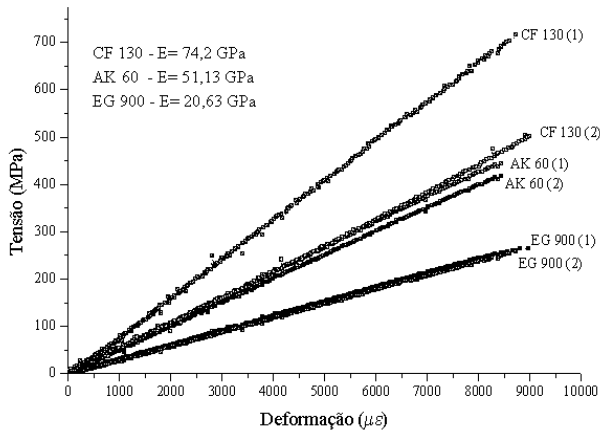


Figura 3 – Gráfico tensão x deformação para os PRF testados.

3.2 Resistência à fadiga e modos de falha

Os resultados obtidos nos testes de fadiga, em termos do número de ciclos até a ruptura, mostram a grande dispersão nos resultados, fato comum nos testes de fadiga em compósitos.

O modo de falha por fadiga dos compósitos ocorre, inicialmente, por uma fissuração da matriz na região entre os feixes de fibra que compõem o PRF. Essas fissuras na matriz aumentam com o número de ciclos, até se unirem. Em seguida, já com um grande número de fissuras percorrendo toda a extensão do corpo-de-prova, inicia-se o processo de delaminação que culmina com a ruptura das fibras.

Os compósitos formados por fibras de aramida apresentaram apenas duas ou três grandes fissuras na matriz entre os feixes de fibras, que evoluíram rapidamente para a ruptura sem, praticamente mostrar uma delaminação. Já os corpos-de-prova formados por compósitos de fibras de vidro e carbono mostraram claramente os três estágios de dano.

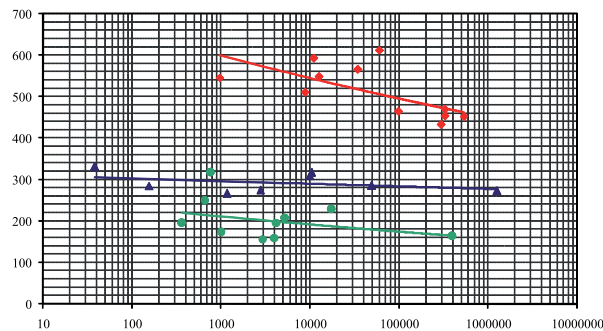


Figura 4 – Variação de tensão x número de ciclos para fadiga por tração.

Cabe notar que a relação entre a tensão máxima (σ_{max}) e o logaritmo do número de ciclos revela uma

forte linearidade, como esperado, o que pode ser visto na Figura 4. As fibras de carbono apresentam a melhor relação $\log N \times \sigma_{max}$, seguidas pelas fibras de aramida. As retas de tendência de comportamento têm inclinação leve, mais intensa no caso da fibra de carbono e suave no caso da fibra de aramida.

Constata-se que os compósitos formados com fibras de carbono exibem o melhor comportamento à fadiga, característica referida na literatura. Os PRF de aramida e vidro, por sua vez, mostram curvas de vida útil à fadiga próximas para números de ciclos mais baixos, com clara vantagem para a aramida com o avanço dos ciclos. A regressão dos dados experimentais para cada tipo de compósito resulta em equações que mostram a tendência de resistência à fadiga, uma vez que as amostras falharam em, no máximo, 1.000.000 de ciclos. As formulações matemáticas obtidas para os compósitos de carbono, aramida e vidro estão mostradas nas expressões 2, 3 e 4, respectivamente:

$$\log N = 15,68906 - 0,0392\sigma_{max} \quad (2)$$

R2=0,6517

$$\log N = 15,68906 - 0,0392\sigma_{max} \quad (3)$$

R2=0,8119

$$\log N = 5,9491 - 0,011\sigma_{max} \quad (4)$$

R2=0,7670

Os modelos apresentados nas expressões 2, 3 e 4 podem ser utilizados para estimativa da resistência à fadiga de compósitos poliméricos utilizados como reforço de estruturas de pontes, considerando-se uma vida de até 1.000.000 de ciclos com um nível de confiança de 95%. Projetando-se as retas para o ponto de 1.000.000 de ciclos, seria necessário limitar as tensões na fibra de vidro a cerca de 100 MPa, as tensões na fibra de aramida a cerca de 250 MPa e as tensões nas fibras de carbono a aproximadamente 450 MPa.

De forma geral, o desempenho da fibra de carbono à fadiga foi bem superior ao da aramida e do vidro. O desempenho inferior exibido pelo PRFV pode estar relacionado com o fenômeno de ruptura dos filamentos que compõem o compósito logo no início do carregamento, fazendo com que se perca o efeito de reforço da matriz, prejudicando as características mecânicas do conjunto.

4 Conclusões

As propriedades elásticas dos polímeros reforçados com fibras dependem de um grande número

de fatores relativos à composição e ao processo de manufatura dos compósitos. Dentre esses fatores, alguns dos mais importantes são: formulação da resina, condições de cura, tipo e quantidade de fibras e processo de fabricação. No caso deste trabalho, havia interesse em determinar o comportamento à fadiga de compósitos com diferentes fibras.

A determinação das propriedades básicas (resistência à tração e módulo de elasticidade) dos compósitos em estudo foi feita por meio de ensaios de tração simples em corpos-de-prova confeccionados em laboratório pelo procedimento de impregnação manual, utilizando-se os mesmos materiais empregados no reforço de vigas e protótipos. Os compósitos investigados apresentaram comportamento elástico linear até a ruptura. Mesmo utilizando-se placas de fibra de vidro como reforço nas extremidades dos corpos-de-prova, a ruptura da maioria das amostras testadas ocorreu próximo às garras da máquina de ensaio, pois neste ponto existe maior resistência à deformação. Cuidados com o alinhamento das fibras no processo de impregnação e cura da resina se mostraram essenciais para a obtenção de resultados confiáveis. Os primeiros sinais de ruptura surgiam por meio da fissuração da matriz ao longo dos feixes de fibras. Essa fissuração mostrou-se praticamente imperceptível nos compósitos de fibras de carbono, dificultando a detecção do momento exato da ruptura, que ocorreu de maneira extremamente brusca. Observou-se que os corpos-de-prova de PRF com fibras de carbono se despedaçavam no momento do rompimento, enquanto que os com fibras de aramida e vidro mostravam suas falhas a partir dos feixes de fibras.

A deformação específica máxima alcançada, considerando-se todos os compósitos investigados, foi de aproximadamente 8‰. A tensão última foi consideravelmente maior nos PRF de fibras de carbono, atingindo, no caso do sistema MBrace, 2,62 vezes a resistência do PRF com fibras de vidro EG 900 e o dobro da resistência do compósito com fibras de aramida AK 60.

De forma similar, o módulo de elasticidade do compósito de fibras de carbono foi o maior (~70 GPa), seguido pelo PRF de fibras de aramida (~51 GPa) e, bem depois, pelo PRF de fibras de vidro (~20 GPa).

O desempenho à fadiga dos diferentes compósitos ensaiados foi distinto, sendo que os compósitos de fibras de carbono se mostraram como os mais resistentes à fadiga, embora seu desempenho caia mais rapidamente com o aumento da variação de tensão aplicada, enquanto os compósitos de fibras de vidro se mostraram como os mais suscetíveis a esse fenômeno.

Foi possível estabelecer, considerando os modelos gerados, os valores da tensão máxima no compósito para atingir uma vida útil de 1 milhão de ciclos. No entanto, testes adicionais, com diferentes razões entre as tensões mínimas e máximas e que levem os corpos-de-prova a número de ciclos superiores a 1 milhão de ciclos são necessários para o estabelecimento do comportamento à fadiga do PRF.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a Capes, pela concessão dos recursos financeiros indispensáveis a realização do trabalho e aos Laboratórios de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) e de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Abstract

The growing interest by civil engineers in high strength and durable materials lead to the increase in the use of fiber reinforced polymeric composites for applications such as bridge reinforcement and offshore structures, where these new materials are subjected to important cyclic loads during their service life. Therefore, there is an urgent need to understand how FRP responds to these load conditions and to develop quantitative procedures for assessing the safety and reliability of using it in these applications. The main objective of this study is to experimentally verify the fatigue life of carbon, aramid and glass FRP reinforcements. To this end, fatigue experiments were conducted in tension-tension mode in the unidirectional fiber direction with an R (minimum stress to maximum stress ratio) value of 0.1. The maximum loads applied ranged from 0.45 to 0.80 of ultimate tensile strength, and frequency was set at 5 Hz. The fatigue experiments were carried out until the specimens failed. The experimental results show that the best fatigue performance was that of CFRP, following by AFRP and GFRP. The S-N curves were performed for the kinds of fiber until 1 million of fatigue life.

Keywords: Fatigue; Composites; Carbon; Aramid; Glass.

Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R – Guide for the Design and Construction of

Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Michigan, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039/D 3039 M**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites Materials. West Conshohocken, PA, EUA, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3479/D 3479 M**: Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composites Materials. West Conshohocken, PA, EUA, 1996.

DEMERS, C. E. Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites. **Construction and Building Materials**, 12, 1998a, p. 311-318.

DEMERS, C. E. Tension-tension axial fatigue of E-glass fiber-reinforced polymeric composites: fatigue life diagram. **Construction and Building Materials**, 12, 1998b, p. 303-310.

EL-ASSAL, A. M., KHASHABA, U. A. Fatigue analysis of unidirectional GFRP composites under combined bending e torsional loads. **Composites Structures**. 79, 2007, p. 599-605.

ELLYIN, F., KUJAWSKI, D. Tensile e fatigue behaviour of glass fibre/epoxy laminates. **Construction and Building Materials**, Vol. 9, n° 6, 1995, p. 425-430.

KELLER, T., TIRELLI, T., ZHOU, A. Tensile fatigue performance of pultruded glass fiber reinforced polymer profiles. **Composites Structures**. 68, 2005, p. 235-245.

LEVY NETO, F., PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 313 p.

TSERPES, K. I., PAPANIKOS, P., LABEAS, G., PANTELAKIS, S. P. Fatigue damage accumulation and residual strength assessment of CFRP laminates. **Composite Structures**, 63, 2004, p. 219-230.