

# COMPÓSITOS DE PRFV INDUSTRIAIS: ANÁLISE DOS CARREGAMENTOS ESTÁTICOS E DE FADIGA

**Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior**

Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – UFRN

CEP: 59072-970 – Campus Universitário – Lagoa Nova

Natal – RN – Tel./Fax: (84) 215-3826 – E-mail: [freirej@ufrnet.br](mailto:freirej@ufrnet.br)

**Eve Maria Freire de Aquino**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFRN

CEP: 59072-970 – Campus Universitário – Lagoa Nova

Natal – RN – Tel./Fax: (84) 215-3768 – E-mail: [eve@dem.ufrn.br](mailto:eve@dem.ufrn.br)

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo analisar a resistência à tração, à compressão e à fadiga de dois laminados de PRFV utilizados na indústria. No estudo da fadiga se faz destaque à elaboração de diagramas na prevenção da falha, como o Diagrama de Falha de Goodman, onde todos os componentes de tensão cíclica são tomados como parâmetros de falha. Para tanto foram analisados laminados com diferentes tipos de configurações, utilizando como matriz a resina ortoftálica e como reforço fibras de vidro-E na forma de manta e tecido têxtil cruzado.*

**Palavras Chave:** *Diagrama de Goodman, Materiais Compositos, Fadiga*

## 1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos elementos estruturais encontram-se sob ação de tensões que oscilam durante o tempo, ou seja, as estruturas são submetidas a esforços cíclicos. Por conta da oscilação da tensão durante o tempo, normalmente, estas estruturas se rompem com valores de tensão muito abaixo dos valores de limite de resistência (carregamento estático) suportados. Ou seja, o material falha por fadiga (Shigley et al., 1989, Sousa, 1982).

Devido à falha por fadiga, todos os projetos estruturais ou de elementos de máquinas que sofrem a ação de cargas cíclicas devem ser dimensionados considerando a vida útil do material (pode-se medir a vida útil do material pelo tempo de uso ou pelo número de ciclos que o material deve suportar antes de falhar por fadiga, dando-se preferência a este último). Por exemplo, componentes de aeronaves devem suportar pelo menos um milhão de ciclos ( $10^6$ ) antes de apresentarem falhas, helicópteros devem suportar 100 milhões de ciclos ( $10^8$ ) e para projetos de estruturas que devem durar trinta anos o mesmo deve suportar 5 bilhões de ciclos ( $5 \times 10^9$ ) (Sutherland, 1999).

Na elaboração de projetos estruturais a prevenção de falha dos elementos envolvidos é fundamental para a garantia da segurança do sistema, seja qual for o tipo de solicitação externa. Para elementos estruturais envolvendo materiais compostos sob ação de cargas cíclicas, a preocupação com a presença de falha aumenta, tendo em vista a complexidade do dano envolvido e os mais diversos parâmetros de influência direta no seu comportamento mecânico (Mandell et al., 1997).

A literatura especializada tem demonstrado que os Diagramas de Falhas têm prestado um bom papel na solução do problema. Para o caso da prevenção de falha por fadiga em laminados compostos, o Diagrama de Goodman tem sido utilizado com bons resultados, embora seja necessário a elaboração do mesmo para cada especificidade dos compostos estudados. Por exemplo,

um dos fatores de influência na elaboração do Diagrama Modificado de Goodman para laminados compostos é o valor adotado para a razão de fadiga **R**, ou seja, a forma de aplicação da carga cíclica (Mandell et al., 1997; Bond, 1999; Beheshty et al., 1999).

Este trabalho tem como objetivos analisar a influência de vários parâmetros (razão de fadiga, configuração, simetria das camadas) na resistência à fadiga dos laminados, bem como, traçar diagramas de falha para sua utilização em projetos estruturais. Estes laminados são constituídos de resina de poliéster ortoftálica reforçada com fibras de vidro/E em forma de manta e tecido têxtil cruzado. O estudo foi desenvolvido para dois tipos diferentes de configurações do laminado, um possuindo simetria na distribuição de suas camadas e o outro não. As referidas configurações são utilizadas na fabricação de reservatórios industriais de grande porte. Os ensaios de fadiga uniaxial foram realizados, para cargas axiais com valores de  $R = -1$  (axial alternada),  $R = 0,1$  e  $R = 10$ , e diferentes intensidades da tensão máxima aplicada ( $R$  é definido como a razão de fadiga, que é o valor da tensão mínima, dividido pela tensão máxima aplicada). Todos os ensaios foram realizados com amplitude de tensão constante para cada corpo de prova e o com o número de ciclos de falha dentro da faixa de fadiga de alto ciclo, ou seja, acima de  $10^3$  ciclos. A prevenção da Falha por Fadiga foi determinada a partir dos resultados obtidos, utilizando-se o Diagrama de falha de Goodman.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os laminados utilizados neste trabalho foram confeccionados pelo processo de laminação manual em forma de placas de  $1\text{ m}^2$ , nos quais utilizou-se como matéria prima a resina de poliéster insaturada ortoftálica e o reforço de mantas ( $5\text{ cm}$ ,  $450\text{ g/m}^2$ ) e tecidos têxteis cruzados ( $450\text{ g/m}^2$ ) de fibra de vidro/E. Desse modo, foram fabricadas duas placas, uma com 10 e a outra com 12 camadas, com espessura de 7 e 10 mm, respectivamente e com as seguintes configurações.

$[\text{M/T/M/T/M}]_s$  Configuração do laminado de 10 camadas (**C10**)

$[\text{M/T/M/T/M/M/T/M/T/M/T/M/T/M}]$  Configuração do laminado de 12 camadas (**C12**)

Os símbolos **M** e **T** são referentes à manta e tecido têxtil cruzado de fibra de vidro/E, respectivamente. O símbolo *s* é referente à simetria do laminado, observando-se que o laminado **C10** é simétrico e o **C12** não apresenta simetria em sua configuração.

Os dois laminados possuem praticamente o mesmo valor em percentual de fibra (32,8 % para o **C10** e 32,9 % para o **C12**). Por este motivo, pode-se considerar que qualquer variação nas propriedades mecânicas e no mecanismo de formação do dano entre eles, será somente em consequência da variação da sua configuração, já que se mantém constantes a orientação das fibras (tecido cruzado) com relação ao carregamento aplicado.

Para o corte das placas utilizou-se um disco de corte diamantado (DIFER D252), de forma a evitar um possível "arranque" de fibras ou qualquer outro tipo de dano nos corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração uniaxial foram retiradas da norma ASTM D 3039 [7], e as dimensões dos corpos de prova de compressão uniaxial e fadiga uniaxial ( $R = 10$ ,  $R = -1$  e  $R = 0,1$ ) foram inspiradas no trabalho de Mandell et al. (1997). De modo que, todos os corpos de prova foram feitos de forma retangular no sentido longitudinal do laminado com as seguintes dimensões:  $200 \times 25\text{ mm}$  para os ensaios de tração e fadiga, e  $100 \times 25\text{ mm}$  para os ensaios de compressão. Os comprimentos úteis (gage) são de  $127\text{ mm}$  para os corpos de prova de tração e fadiga com  $R = 0,1$ ,  $40\text{ mm}$  para os corpos de prova de fadiga com  $R = -1$  e  $R = 10$  e de  $35\text{ mm}$  para os corpos de prova de compressão.

Para os ensaios de tração uniaxial utilizou-se uma máquina de Tração Universal Mecânica PAVITEST, com uma velocidade de deslocamento de  $1\text{ mm/min}$ . Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina MTS-810 servo-hidráulica, utilizando-se uma velocidade de deslocamento de  $1\text{ mm/min}$ . Foram utilizados 5 corpos de prova na realização de cada ensaio estático.

Os ensaios de fadiga foram feitos em uma máquina MTS servo-hidráulica, utilizando-se uma freqüência de 5 Hz com comportamento senoidal e razões de fadiga  $R = 0,1$ ,  $R = -1$  e  $R = 10$ . Para a obtenção da curva S-N fez-se primeiramente um ensaio com tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ) a 60 % do valor de tensão última do laminado (para  $R = 0,1$  e  $R = -1$  utilizou-se a tensão última à tração e para  $R = 10$  utilizou-se a tensão última à compressão) e a partir deste resultado escolheu-se os valores de tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ) dos outros ensaios. Os ensaios foram feitos de modo que os valores do número de ciclos de falha ficassem entre  $10^3$  e  $10^6$  ciclos, caracterizando dessa forma a fadiga de alto ciclo. Para cada valor de tensão máxima escolhido, utilizou-se 3 corpos de prova, totalizando 87 corpos de prova na conclusão dos ensaios. Todos os ensaios foram feitos a temperatura ambiente (25 °C) e com umidade relativa do ar a 50 %.

Como modelo matemático das curvas S-N utilizou-se a equação empírica demonstrada abaixo. Esta equação foi utilizada por vários autores na literatura especializada (Subramanian et al., 1995; Lavoie et al., 2000).

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ult}} = a - b \cdot [\log(N)]^p \quad (1)$$

Na qual  $a$ ,  $b$  e  $p$  são os coeficientes de fadiga do material,  $\sigma_{ult}$  é a tensão última do material (este valor é representado pela tensão última à tração para os resultados obtidos para  $R = -1$  e  $R = 0,1$  e pela tensão última à compressão para  $R = 10$ ),  $\sigma_{max}$  é a tensão máxima aplicada ao material durante o ensaio de fadiga e  $N$  é o número de ciclos suportado pelo material até a sua ruptura final.

### 3. RESULTADOS

Mostra-se na Tabela 1 os resultados das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e de compressão uniaxiais para as duas configurações utilizadas. A partir destes resultados, percebe-se que os valores da tensão última à tração e do módulo de elasticidade dos dois laminados são bastante próximos e que a maior diferença percentual entre os dois é no módulo de elasticidade à compressão (11 %).

Tabela 1. Propriedades Mecânicas dos laminados C10 e C12

	Laminado C10	Laminado C12
Limite de resistência à tração (MPa)	116,7	115,3
Limite de resistência à compressão (MPa)	171,3	181
Módulo de elasticidade à tração (GPa)	4,81	4,5
Módulo de elasticidade à compressão (GPa)	4,27	4,79
Deformação máxima à tração (%)	2,45	2,54
Deformação máxima à compressão (%)	4,07	3,92

A partir do que foi dito anteriormente pode-se concluir que a variação da configuração do laminado (pequeno aumento do número de camadas e modificação da simetria do laminado) não influiu de modo significativo nas propriedades mecânicas destes. Estes resultados condizem com os obtidos por Davies (1999) que analisou as propriedades mecânicas de vários laminados modificando apenas o seu número de camadas. Também através dos resultados mostrados nesta tabela percebe-se que os dois laminados possuem uma tensão última à compressão superior a tensão última à tração (variação percentual de 31,9 %).

A partir da Figura 1, tem-se as curvas tensão versus deformação obtidas para os dois laminados compostos tanto na tração (figura 1(a)) quanto na compressão (figura 1(b)), por estas curvas pode-se perceber que os dois laminados possuem um comportamento linear tanto na tração quanto na

compressão. As curvas são o resultado da média dos cinco corpos de prova ensaiados para cada configuração e cada carregamento, na qual a dispersão encontrada nos resultados destes corpos de prova ficou em torno de 2 %.

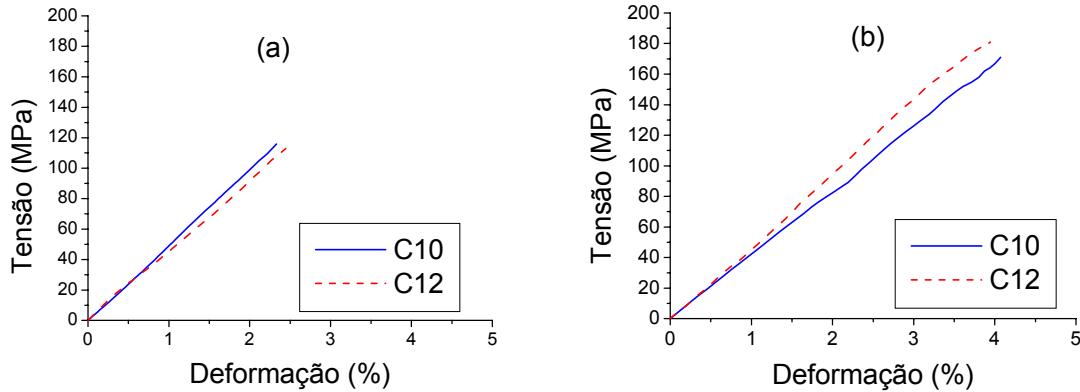


Figura 1. Gráfico tensão versus deformação dos dois laminados (a) no ensaio de tração uniaxial, (b) no ensaio de compressão uniaxial.

Mostra-se na figura 2, os resultados experimentais obtidos para as curvas S-N dos laminados **C10** (a) e **C12** (b), bem como os resultados do modelamento matemático feito a partir da equação 1 com os respectivos valores dos coeficientes de fadiga (**a**, **b** e **p**), para  $R = 0.1$ ,  $10$  e  $-1$ . A partir destes resultados percebe-se que o modelo matemático utilizado representa bem os resultados experimentais obtidos. Percebe-se também pela figura, que os menores valores de resistência à fadiga encontrados foram para  $R = -1$ .

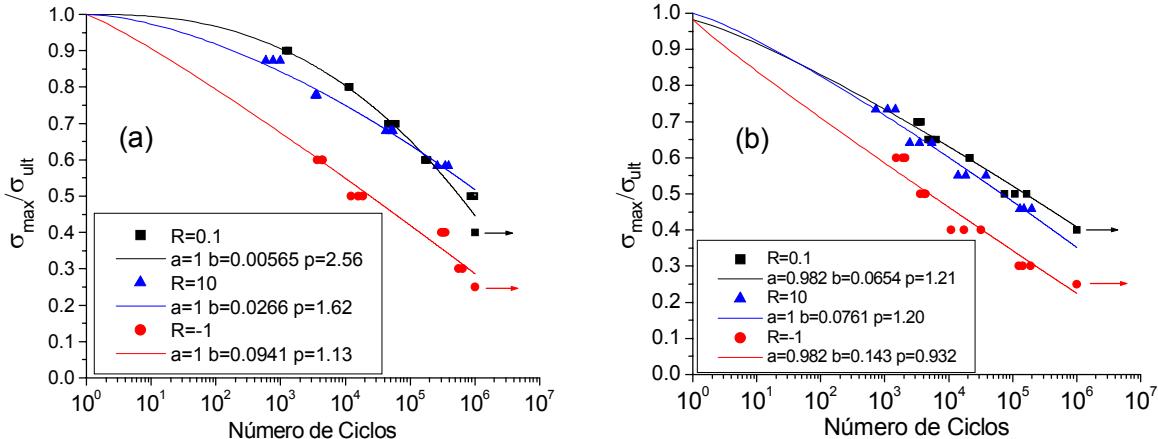


Figura 2. Gráfico da tensão máxima normalizada versus o número de ciclos de ruptura do laminado (a) **C10** e (b) **C12**

Analizando-se a figura 2 (b), percebe-se que para o laminado **C12** o valor de **p** é bem próximo de 1 o que significa dizer que se fosse utilizado um modelo linearmente logarítmico (a equação 1 utilizando o **p** com o valor de 1) ainda assim teria-se uma boa aproximação dos resultados.

Para a prevenção de falha por fadiga, utilizou-se o Diagrama de Falha de Goodman (**DFG**) mostrados nas figuras 3 e 4 para os laminados **C10** e **C12**, respectivamente. Este diagrama foi inspirado no diagrama de falha de Goodman utilizado para metais, porém se faz necessário diversas alterações para adaptá-lo aos materiais compostos. A importância de se utilizar na prevenção de falha por fadiga o **DFG** com todos os componentes de tensão cíclica, é a dependência de qual componente deve ser escolhida como parâmetro de resistência à fadiga ( $S_f$ ) do material.

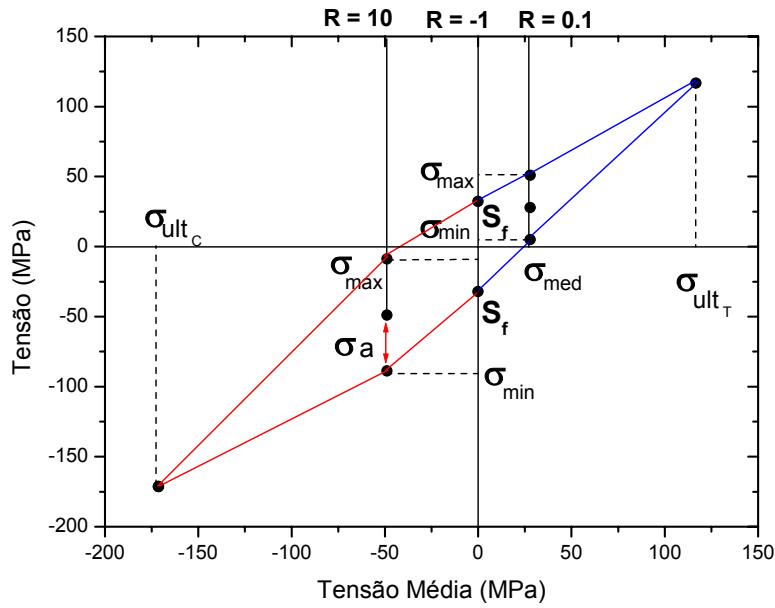


Figura 3. Diagrama de Goodman utilizado na prevenção de falha por fadiga do laminado **C10** ( $10^6$  ciclos).

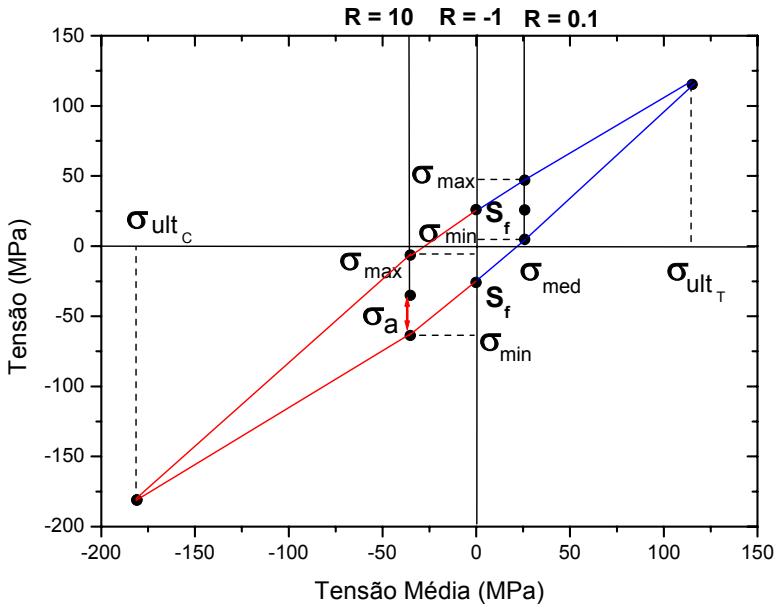


Figura 4. Diagrama de Goodman utilizado na prevenção de falha por fadiga do laminado **C12** ( $10^6$  ciclos).

Observações preliminares devem ser feitas no sentido de que, no caso dos materiais compostos, o material sofre influência do valor da razão de fadiga ( $R$ ), e o diagrama deve ser feito para um valor determinado de número de ciclos de falha já que estes materiais não possuem limite de resistência à fadiga. No caso dos diagramas das figuras 3 e 4 o número de ciclos necessários à ruptura é de  $10^6$ .

Ao analisar-se os **DFG** das figuras 3 e 4 do ponto de vista da amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ), percebe-se que a razão de fadiga  $R = 0,1$  possui um pior comportamento à fadiga quando comparado à  $R = -1$ , para um mesmo número de falha ( $N = 10^6$ ) e o mesmo valor de limite de resistência à tração.

Esse resultado diverge ao observado no diagrama S-N das figuras 1 e 2, quando o componente de tensão cíclica considerado é o de  $\sigma_{max}$ .

Com relação à fadiga compressiva um cuidado maior deve ser tomado na análise quando o material possui diferença entre o limite de resistência à tração e à compressão. Como os laminados **C10** e **C12** possuem um limite de resistência à compressão superior ao da tração, tem-se consequentemente durante o carregamento cíclico compressivo ( $R = 10$ ), valores maiores para a amplitude de tensão quando comparados a  $R = 0,1$  e  $R = -1$ . O problema é que da forma como os valores nos são apresentados os mesmos não podem ser comparados. Para se comparar estes valores deve-se primeiro normalizá-los.

Quando se verifica os valores dos limites de resistência percebe-se que estes materiais possuem maior resistência à compressão do que à tração e, se normalizarmos os resultados ( $\sigma_a/\sigma_{ult}$ ), percebe-se que em  $R = -1$  tem-se os maiores valores de amplitude de tensão, pois se obtém 0.27 para **C10** e 0.23 para **C12** enquanto que para  $R = 10$  os resultados são de 0.23 para **C10** e 0.15 para **C12**.

Também pelos resultados aqui apresentados percebe-se que o laminado **C10** possui maior amplitude de tensão do que o laminado **C12**, isto ocorreu porque este laminado possui simetria em suas camadas e com isso melhor distribuição de tensões internas (Freire Júnior, 2001).

#### 4. CONCLUSÕES

- A partir dos resultados apresentados, percebeu-se que o aumento do número de camadas não influenciou no aumento das propriedades mecânicas como limite de resistência e módulo de elasticidade dos laminados compostos.
- O modelo matemático utilizado para aproximar as curvas S-N se demonstrou adequado para representar os resultados obtidos experimentalmente.
- O Diagrama de falhas de Goodman utilizado normalmente para os metais, se demonstrou satisfatório para análise de prevenção de falhas por fadiga em materiais compostos, porém o mesmo deve ser adaptado para que possa se adequar às realidades deste tipo de material.
- O **DFG** com todos os componentes de tensão cíclica mostra de forma clara a dependência do parâmetro a ser escolhido como referência ao comportamento à fadiga do material, para um mesmo número de ciclos de falha ( $N$ ) e mesma  $\sigma_{ult}$ .

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento das bolsas e ao DEM-PFCG pela utilização da MTS para a realização dos ensaios estáticos e de fadiga.

#### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D3039, 1990, "Standard Test Method for Tensile Properties of Oriented Fiber Composites".  
Beheshty, M.H., Harris, B., Adam, T., 1999, "An Empirical Fatigue-Life Model for High-Performance Fibre Composites with and without Impact Damage", Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30, pp. 971-987.
- Bond, I.P., 1999, "Fatigue Life Prediction for GRP Subjected to Variable Amplitude Loading", Composites: Part A, Vol. 30, pp. 961-970.
- Davies P, Petton D., 1999, "An Experimental Study of Scale Effects in Marine Composites". Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing., Vol. 30, pp. 267-275.
- Freire Júnior, R.C.S., Aquino, E.M.F., 2001, "Estudo da Prevenção de Falha por Fadiga em Laminados de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro", Dissertação de Mestrado, 133 p.
- Lavoir, J.A., Reifsnider, K.L., Renshaw, A.J., Mitten, W.A., 2000, "Prediction of Stress-Rupture Life of Glass/Epoxy Laminates", International Journal of Fatigue, Vol. 22, pp. 467-480.

- Mandell, J.F., Samborsky, D.D., 1997, "DOE/MSU Composite Material Fatigue Database: test Methods, Materials and Analysis", SAND97-3002, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 140 p.
- Shigley, J.E., Mischke, C.R., 1989, "Mechanical Engineering Desing", 5° Ed., 347 p.
- Souza, S.A., 1982, "Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos", 5° Ed., 286 p.
- Subramanian, S., Reifsnider, K.L., Stinchcomb, W.W., 1995, "A Cumulative Damage Model to Predict the Fatigue Life of Composite Laminates Including the Effect of a Fibre-Matrix Interphase", International Journal of Fatigue, Vol. 17, N. 5, pp. 343-251.
- Sutherland, H.J., 1999, "On the Fatigue Analysis of Wind Turbines", SAND99-0089, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 133 p.

## **INDUSTRIAL COMPOSITES OF RPF: ANALYSIS OF STATIC AND FATIGUE RESISTANCE**

### **Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior**

Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – UFRN  
 CEP: 59072-970 – Campus Universitário – Lagoa Nova  
 Natal – RN – Tel./Fax: (84) 215-3826 – E-mail: [freirej@ufrnet.br](mailto:freirej@ufrnet.br)

### **Eve Maria Freire de Aquino**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFRN  
 CEP: 59072-970 – Campus Universitário – Lagoa Nova  
 Natal – RN – Tel./Fax: (84) 215-3768 – E-mail: [eve@dem.ufrn.br](mailto:eve@dem.ufrn.br)

**Abstract.** This paper has as objective analyzes the resistance to tension, to compression and the fatigue of two laminated of RPF used in the industry. In the study of the fatigue it is made prominence to the elaboration of diagrams in the prevention of the failure, as the Goodman's Diagram of Failure, where all the components of cyclical tension are taken as failure parameters. For so much they were analyzed laminated with different types of configurations, using as head office the resin ortofthalic and as reinforcement fibers of glass-E in the mat and fabric textile form.

**Keywords:** Goodman Diagram, Composite Materials, Fatigue.