



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE MADEIRA REFORÇADAS POR FIBRAS DE CARBONO

Dogmar Antonio de Souza Junior

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFU
Email : dogmar@mecanica.ufu.br

Jesiel Cunha

Professor Adjunto - Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Email : jecunha@ufu.br

Resumo. *A geração de novos materiais e novas configurações estruturais obtidas a partir da madeira tem propiciado a ampliação das aplicações deste material, que vão desde a construção civil até a fabricação de aviões. O reforço de placas de madeira através dos plásticos reforçados por fibras de carbono é uma alternativa interessante para aumentar a performance destes materiais. Além do ganho em leveza, uma grande vantagem dos materiais compostos é a possibilidade da variação dos elementos constituintes da estrutura segundo as direções preferenciais dos esforços, permitindo uma otimização do comportamento mecânico. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo teórico/numérico de placas compósitas de madeira reforçadas por fibras de carbono. As simulações numéricas foram realizadas via método dos elementos finitos, o que permitiu calcular diversas configurações geométricas, com diferentes condições de contorno e de carregamento. Utilizando modelos de placas compósitas, foram feitas diversas variações na posição e na taxa de reforço. Os resultados obtidos permitiram definir o ganho de rigidez da peça em função do reforço aplicado. Além disso, foi feito um estudo do comportamento mecânico da estrutura do ponto de vista da distribuição dos esforços.*

Palavras-chave: *comportamento mecânico, reforço, madeira, fibras de carbono, materiais compostos.*

1. INTRODUÇÃO

Até o século XX, a madeira foi usada principalmente na sua forma natural. Porém, a madeira apresenta algumas características que dificultam sua utilização, tais como a heterogeneidade do material. Outra característica é a anisotropia, característica peculiar a todas as madeiras de apresentar propriedades mecânicas distintas em relação aos seus três eixos de crescimento. A variação ocorre tanto entre espécies, como entre árvores da mesma espécie e até mesmo entre peças de uma mesma árvore (Gouveia, 2000).

Para vencer estes inconvenientes tornou-se necessário desenvolver produtos que ao mesmo tempo possuíssem as qualidades da madeira e minimizassem suas propriedades negativas e que pudessem ser aplicados em situações antes restritas a outros tipos de materiais. Neste contexto surgiram os compósitos de madeira como alternativa para aproveitamento de madeiras de baixa qualidade e com dimensões limitadas.

Com o advento das duas grandes guerras mundiais, houve uma grande evolução nesses materiais, em um primeiro momento devido à indústria aeronáutica e pela utilização em embarcações. Em seguida, no pós-guerra, com o processo de recuperação dos centros atingidos, quando ocorreu um grande desenvolvimento das técnicas construtivas utilizando esses materiais em obras civis, onde o grande desafio era a reconstrução rápida, segura e econômica.

A cada descoberta é possível visualizar mais um mercado promissor e mais uma utilidade para o produto madeireiro. Engana-se quem ainda pensa que a madeira só tem utilidade em sua forma original.

Os Plásticos Reforçados por Fibras (PRF) são geralmente construídos a partir de fibras de alta resistência em uma matriz polimérica de resina (Jones, 1975). Uma grande vantagem destes materiais é a possibilidade da variação dos elementos constituintes da estrutura segundo as direções preferenciais dos esforços, o que confere ao composto uma eficiência global excepcional. O uso dos PRF no reforço de estruturas de madeira apresenta diversas vantagens (Tingley and Cegelka, 1996; Beber et al, 2000): Reduz o custo quando usado apropriadamente; Repara e reabilita danificações e deteriorações estruturais em peças de madeira; Aumenta a resistência à flexão e a rigidez das novas peças de madeira. Em particular, eles podem melhorar as propriedades estruturais de classes de madeira de menor qualidade, por exemplo, as madeiras provenientes de reflorestamento; Permite o uso de peças de menor seção transversal com a mesma rigidez e resistência do que as peças sem reforço.

Neste trabalho alguns aspectos foram analisados através de simulações numéricas via MEF. Além do estudo do ganho de rigidez com a aplicação do reforço, foi investigado o comportamento mecânico da estrutura resultante. As simulações utilizaram as formulações específicas aplicadas aos materiais compostos. Foram analisadas o comportamento mecânico de placas compósitas de madeira do tipo compensado, LVL e OSB reforçadas por fibras de carbono nas suas faces externas.

2. GENERALIDADES SOBRE PLACAS ESTRATIFICADAS

Para a análise mais precisa do comportamento mecânico das placas de madeira reforçadas por Plásticos Reforçados por Fibras de Carbono (PRFC), usou-se a teoria de estratificados para materiais compostos. Esta teoria agrega a vantagem de considerar a peça como um empilhamento de camadas (Fig. 1), onde são definidas as propriedades elásticas, geométricas e a orientação das fibras para cada camada.

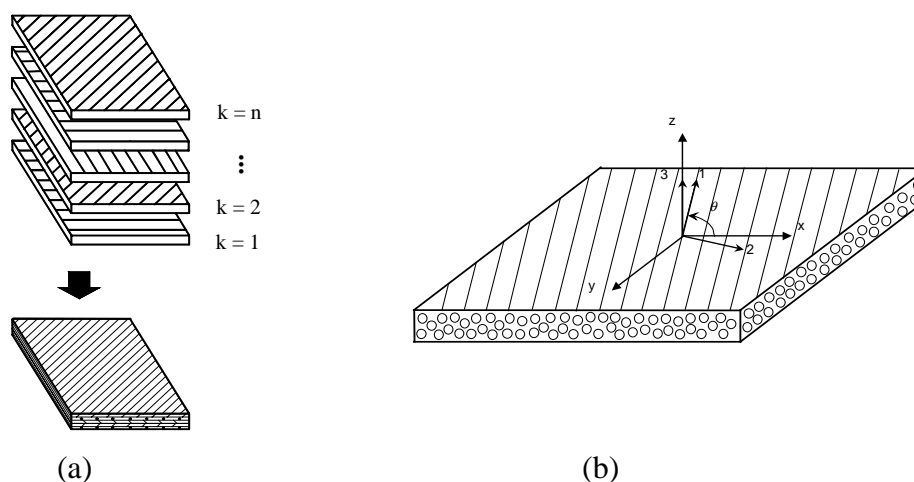


Figura 1. a) Modelo do estratificado; b) Sistema de referência da camada unidirecional (1,2,3) e do estratificado (x,y,z)

Geralmente, no cálculo de esforços e deslocamentos de estruturas de madeira, o material é considerado isotrópico, o que não corresponde à realidade (Souza Jr e Cunha, 2001). A utilização da formulação de materiais compostos permitiu considerar a madeira como um material ortotrópico, o que representa um avanço no cálculo deste tipo de estrutura.

A análise de placas estratificadas ou sanduíches apresenta diversos graus de complexidade. A análise mais complexa ocorre para estratificados constituídos de empilhamentos quaisquer (Berthelot, 1992). Nestes casos, existe o acoplamento das solicitações membrana-flexão, membrana-torção ou flexão-torção, conforme mostra a Eq. (1).

A teoria que se segue é aplicada a placas retangulares (a x b) estratificadas simétricas simplesmente apoiadas, com um carregamento uniforme distribuído (q_0) perpendicularmente ao plano da placa. Considerando a Teoria do Cisalhamento de Primeira Ordem, a aplicação dos princípios de equilíbrio ou energéticos, juntamente com as relações tensão-deformação da Teoria da Elasticidade, leva à seguinte relação constitutiva do material estratificado (Berthelot, 1992):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{63} & B_{12} & B_{22} & B_{26} & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} & 0 & 0 \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} & 0 & 0 \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} & 0 & 0 \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{44} & H_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \varepsilon_{zz}^o \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde:

A_{ij} : coeficientes da matriz de rigidez de membrana; B_{ij} : coeficientes da matriz de acoplamento membrana/flexão-torção; D_{ij} : coeficientes da matriz de rigidez de flexão-torção; H_{ij} : coeficientes da matriz de rigidez de cisalhamento transversal; M_x : momento fletor na direção x ; M_y : momento fletor na direção y ; M_{xy} : momento torçor; N_x : força normal na direção x ; N_y : força normal na direção y ; N_{xy} : força cisalhante no plano xy ; Q_x : força cisalhante na direção x ; Q_y : força cisalhante na direção y ; ε_{xx}^o : deformação do plano médio na direção x ; ε_{yy}^o : deformação do plano médio na direção y ; ε_{xy}^o : deformação do plano médio na direção xy ; γ_{yz} : deformação cisalhante do plano médio em relação a yz ; γ_{xz} : deformação cisalhante no plano médio em relação a xz ; κ_x : curvatura do plano médio na direção x ; κ_y : curvatura do plano médio na direção y ; κ_{xy} : curvatura de torção do plano médio.

Os coeficientes das matrizes de rigidez são determinados pelas seguintes expressões:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (4)$$

$$H_{ij} = k_{ij} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (5)$$

sendo:

$$\begin{aligned} E_1 &= 8,431 \text{ GPa} \\ G_{12} &= 0,602 \text{ GPa} \\ \nu_{12} &= 0,219 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_2 &= 0,674 \text{ GPa} \\ G_{13} &= 0,566 \text{ GPa} \\ \nu_{13} &= 0,262 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_3 &= 0,422 \text{ GPa} \\ G_{23} &= 0,060 \text{ GPa} \\ \nu_{23} &= 0,364 \end{aligned}$$

As propriedades do PRFC foram determinadas através da micromecânica (Souza Jr, 2001; Berthelot, 1992), onde as propriedades dos elementos constituintes (matriz e fibra) são utilizadas para determinar as propriedades da camada. O reforço foi considerado como sendo um material transverso isotrópico e suas propriedades elásticas obtidas foram:

$$\begin{aligned} E_1 &= 230 \text{ GPa} & G_{12} &= 5 \text{ GPa} & \nu_{12} &= 0,32 \\ E_2 &= 20 \text{ GPa} & G_{13} &= 5 \text{ GPa} & \nu_{13} &= 0,32 \\ E_3 &= 20 \text{ GPa} & G_{23} &= 4 \text{ GPa} & \nu_{23} &= 0,35 \end{aligned}$$

O adesivo utilizado para colar os PRFC na madeira é o mesmo considerado como matriz no PRFC. As propriedades da resina epóxi são (Berthelot, 1992):

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2 = E_3 = 3,45 \text{ GPa} \\ G_{12} &= G_{13} = G_{23} = 1,33 \text{ GPa} \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = \nu_{23} = 0,30 \end{aligned}$$

3.2 Análise da confiabilidade do modelo numérico

Os resultados apresentados na Tabela 1 se referem aos três modelos de placas de madeira estudados, compensado, LVL e OSB. As placas do tipo compensado e LVL são formadas por 8 camadas de madeira com 2cm de espessura cada e a placa do tipo OSB possui 4 camadas de madeira com 4cm de espessura formadas a partir de fibras curtas dispostas de forma alinhada ou aleatoriamente. A Figura 3 mostra o esquema de empilhamento dessas placas.

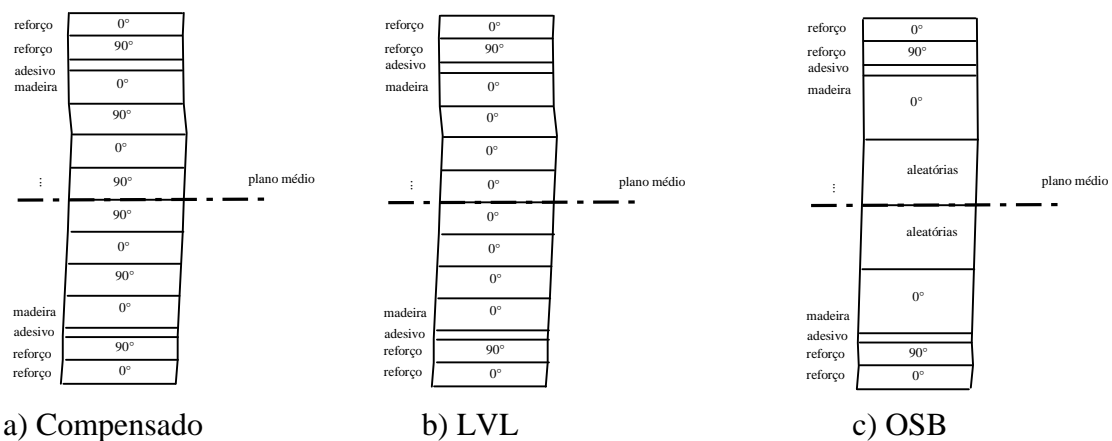


Figura 3. Esquema de empilhamento das camadas para as placas simuladas

O carregamento foi aplicado perpendicularmente à toda superfície da placa, com valor constante de 20.000 N/m^2 . Apesar de se usar a Teoria Clássica no modelo analítico (Eq. 7), os resultados dos deslocamentos máximos na placa apresentados na Tabela 1 tiveram uma ótima aproximação com os resultados do ANSYS®.

$$w_{\text{máx}} = \frac{16q_0 a^4}{\pi^6} \alpha \quad (7)$$

onde,

$$\alpha = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn} \quad \alpha_{mn} = \frac{(-1)^{m+n-2}}{(2m-1)(2n-1)D_{2m-1,2n-1}}$$

Tabela 1. Resultados obtidos para o deslocamento máximo da placa para verificação da confiabilidade do modelo numérico

Dimensões das placas			Relação de aspecto	Deslocamento máximo (mm)		Erro (%)
a (m)	b (m)	h (m)		Modelo analítico	Modelo numérico	
1,60	1,60	0,1622	9,86	0,148	0,169	14,18
2,40	2,40	0,1622	14,78	0,749	0,813	8,54
3,20	3,20	0,1622	19,73	2,366	2,511	6,13
4,00	4,00	0,1622	24,66	5,776	6,054	4,81
4,80	4,80	0,1622	29,59	11,980	12,454	3,96

sendo a o comprimento, b a largura e h a espessura da placa.

Pode-se notar que à medida em que a placa se torna mais fina (aumento da relação de aspecto), os resultados estão mais próximos. Isto é explicado porque para estas placas a teoria clássica é suficientemente precisa.

4. ESTUDO DO ENRIJECIMENTO DA PLACA EM FUNÇÃO DA TRA

Após a validação do modelo numérico, testou-se novas configurações de reforço que pudessem representar economia de material. Assim, foi adotado o princípio de se reforçar a placa através de faixas contínuas de PRFC. O reforço através de faixas deve considerar que os esforços em placas estão distribuídos em várias direções, Souza Jr (2001). Dessa forma, não é possível reforçar a placa privilegiando uma única direção, ou seja, a distribuição do reforço deve permitir que todos os esforços sejam convenientemente absorvidos. A Figura 4 ilustra os três modelos de reforço estudados: reforço distribuído (o mesmo usado para testar a confiabilidade do modelo numérico), reforço em faixas a $0/90^\circ$ e reforço em faixas a $\pm 45^\circ$.

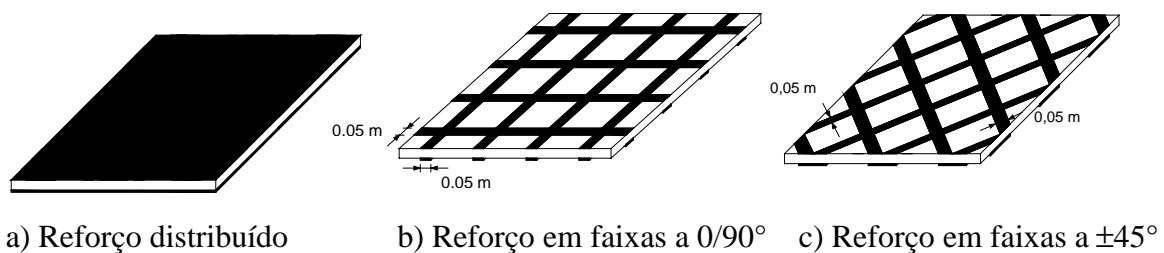


Figura 4. Modelos de placas reforçadas estudadas

Para as placas com reforço em faixas, foi modelada uma malha suplementar para cada faixa de reforço. Com isso os modelos numéricos apresentaram parâmetros diferenciados, conforme Tab. (2).

Tabela 2. Parâmetros numéricos dos modelos estudados

	Reforço nas duas faces			Reforço na face inferior		
	Distribuído	0/90°	±45°	Distribuído	0/90°	±45°
Nós	882	2.184	6.170	882	1.502	3.312
Elementos	400	720	1.604	400	560	900
GDL	2.482	4.114	17.122	2.482	3.298	9.178

A Figura 5 apresenta graficamente os resultados obtidos para o deslocamento máximo em função da TRA para uma placa de madeira (compensado, LVL ou OSB) com dimensões de (5,00x5,00x0,16)m, reforçada nas duas faces ou somente na face inferior. Através destes resultados pode-se concluir que o ganho de enrijecimento é o mesmo para as placas com reforço em faixas, e que a aplicação do reforço em faixas gera um enrijecimento bem maior que aplicá-lo em toda a superfície da placa.

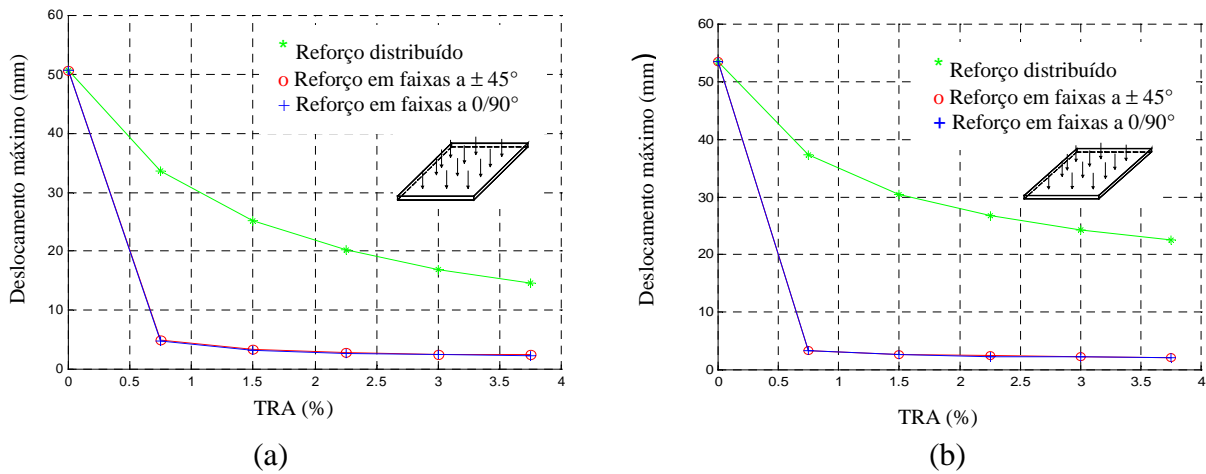


Figura 5. Resultados obtidos para o deslocamento máximo na face inferior do centro da placa; a) PRFC nas faces inferior e superior; b) PRFC somente na face inferior

A Figura 6 permite comparar os resultados obtidos para o deslocamento máximo na placa com reforço nas duas faces e somente na face inferior para uma mesma taxa de reforço aplicado.

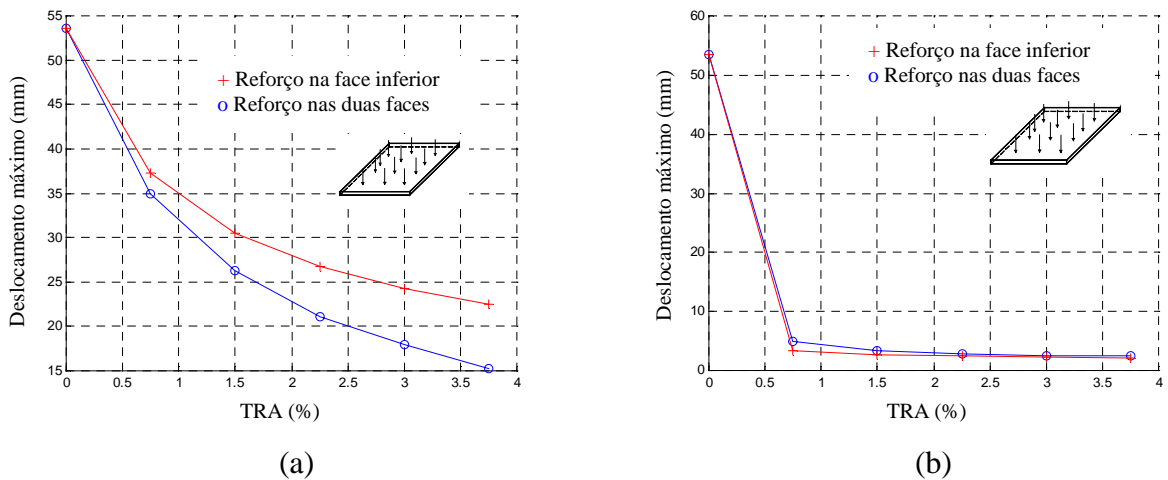


Figura 6. Comparação dos resultados obtidos para o deslocamento máximo na placa; a) com reforço distribuído; b) com reforço em faixas

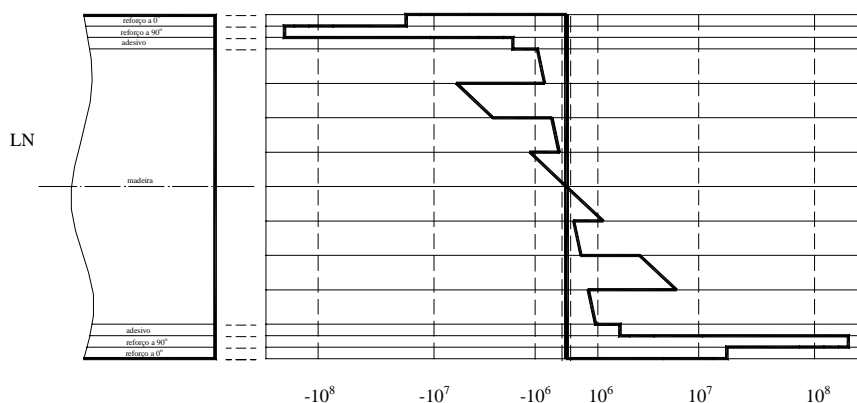
Os resultados obtidos mostram que as placas com reforço em faixas tiveram o mesmo grau de enrijecimento. Já para placas com reforço distribuído, estas sempre apresentaram maior ganho de

rigidez quando reforçadas nas duas faces, comparadas às placas reforçadas apenas na face inferior. Isto decorre do fato destas placas trabalharem como placas sanduíches, que possuem maior rigidez à flexão. Nestes casos, a madeira trabalha resistindo aos esforços cisalhantes, permitindo ao reforço trabalhar praticamente como uma membrana, resistindo apenas aos esforços normais. Este comportamento é mostrado na seção a seguir.

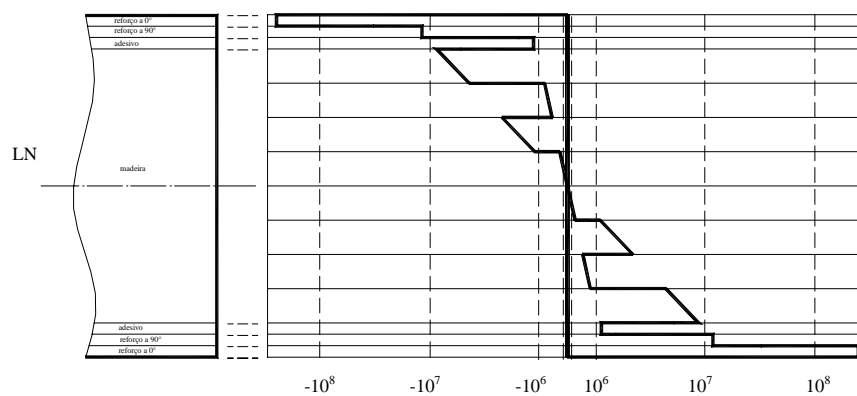
5. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES

A análise da distribuição das tensões ao longo da espessura da placa foi feita para placas compósitas de madeira do tipo compensado com reforço distribuído nas duas faces. O objetivo desta análise é de avaliar se estas placas trabalham como um sanduíche. Isto pode ser importante no projeto deste tipo de estrutura. Usando o elemento SHELL99 modelou-se uma placa com dimensões de (4,80x4,80x0,16)m e TRA de 0,75%. O carregamento aplicado foi de 20.000N/m² perpendicularmente a toda superfície superior da placa.

As Figuras 7 e 8 ilustram os resultados obtidos. Eles mostram que as tensões normais no reforço são bem superiores às tensões normais na madeira, demonstrando que o PRFC está resistindo aos esforços normais oriundos da flexão. Nota-se também que as tensões cisalhantes são maiores na madeira do que no reforço. De acordo com estes resultados pode-se concluir que a placa analisada trabalha como uma estrutura sanduíche. A descontinuidade das tensões normais é provocada pela ortotropia dos materiais e pela diferença de orientação das fibras entre as camadas. Já a descontinuidade nas tensões cisalhantes transversais é resultado da teoria utilizada pelo ANSYS[®]. Observa-se também que esta teoria assegura distribuição parabólica ao longo da espessura e nulidade nas faces das tensões cisalhantes transversais.



(a)



(b)

Figura 7. Distribuição das tensões no meio da placa e ao longo da espessura; a) tensões normais σ_{xx} (N/m²); b) tensões normais σ_{yy} (N/m²)

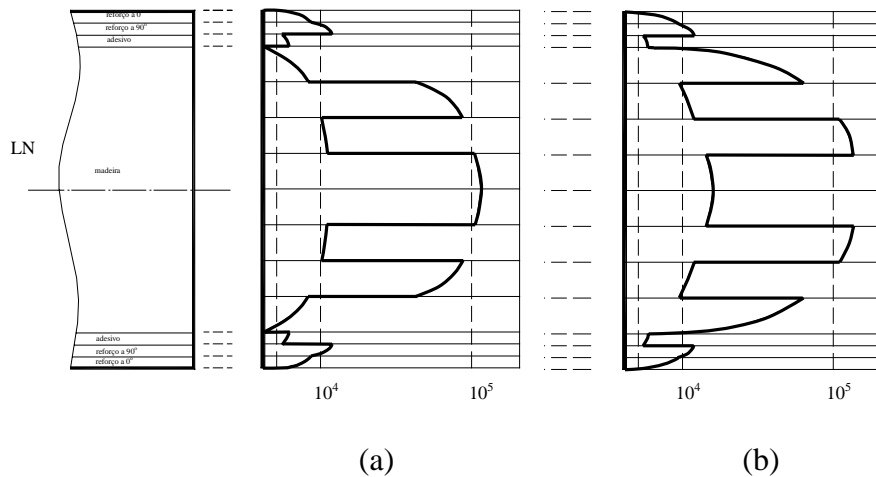


Figura 8. Distribuição das tensões no canto da placa e ao longo da espessura; a) tensões cisalhantes σ_{xz} (N/m²); b) tensões cisalhantes σ_{yz} (N/m²)

6. CONCLUSÕES

Foi estudada neste trabalho a aplicação de fibras de carbono no reforço externo de placas compósitas de madeira através de simulações numéricas. Estas simulações permitiram avaliar o comportamento estrutural destas placas com diferentes formas geométricas de reforço. Em geral, o ganho de enrijecimento é bem maior para pequenas taxas de reforço aplicado. Para uma mesma TRA, os resultados mostraram um elevado aumento de rigidez nas placas com reforço em faixas, bem superior ao alcançado com o reforço distribuído em toda a face da placa. A análise da distribuição das tensões ao longo da espessura da placa com reforço distribuído nas faces inferior e superior comprovou o comportamento de estrutura sanduíche. Para outras configurações de reforço e de materiais, estudos neste sentido devem ser feitos, pois são importantes no dimensionamento de uma peça. Para todas as estruturas analisadas, o ganho de enrijecimento é basicamente determinado pela taxa de reforço aplicado. Isto significa que o reforço é uma boa alternativa estrutural mesmo no caso de compósitos de madeira, que utilizam em geral material de qualidade inferior.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS[®] User's Manual, Versão 5.4, 1997.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1997, "Projeto de estruturas de madeira - NBR 7190:1997", ABNT, Rio de Janeiro.
- Beber, A. J., Campos Filho, A. e Campagnolo, J. L., 2000, "Reforço de estruturas de concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono", Revista Técnica, pp 52-55.
- Berthelot, J.-M., 1992, "Matériaux Composites - Comportement Mécanique et Analyse des Structures", Masson, Paris, 620p.
- Bodig, J. and Jayne, B. A., 1982, "Mechanics of Wood and Wood Composites", 710p.
- Jones, R. M., 1975, "Mechanics of Composite Materials", International Student Edition, 355p.
- Gouveia, F. N., 2000, "Painéis de Madeira - Situação Atual", Revista da Madeira, Ano 8, Número 49, pp 20-21.
- Souza Jr, D. A., 2001, "Estudo do comportamento mecânico de peças estruturais de madeira reforçadas por fibras de carbono", Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 113p.

Souza Jr, D. A. e Cunha, J., 2001, “Análise do comportamento mecânico de estruturas de madeira reforçadas por fibras de carbono”, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia-MG.

Tingley, D. A. and Cegelka, S., 1996, “High Strength Fiber Reinforced Plastic Reinforced Wood”, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, USA.

ANALISYS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF TIMBER PLATES REINFORCED BY CARBON FIBERS

Dogmar Antonio de Souza Junior

Graduate Student - School of Mechanical Engineering - Federal University of Uberlândia

Email : dogmar@mecanica.ufu.br

Jesiel Cunha

Assistant Professor - School of Civil Engineering - Federal University of Uberlândia

Email : jecunha@ufu.br

Abstract. *The creation of the new materials and structures obtained from the wood has been allow extend the applications of these material in the civil construction. The reinforcement of wood plates with carbon fibers reinforced plastics is an interesting alternative to increase the performance of these materials. Beyond of the low weight, a great advantage of the composite materials is a possibility of choice the direction of the reinforcement, allowing an optimization of the mechanical behavior. The objective of this work is a theoretical/numerical study of wood composites plates reinforced by carbon fibers. The numerical simulations have been performed using finite element method, which allows calculate various geometrical configurations, with different boundary and loading conditions. Using numerical models of composites plates, the variation in placement and ratio of the reinforcement has been made. The results show the gain of rigidity as a function of the applied reinforcement. A study of mechanical behavior of the structure relative to the stress distribution view of point has been performed.*

Keywords. *mechanical behavior, reinforcement, wood, carbon fibers, composite materials.*