

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ENSAIO DE TRAÇÃO DE MADEIRAS COM REFORÇO DE LAMINADOS RESINADOS DE FIBRAS DE VIDRO E CARBONO

Marcel Willian Reis Sales¹
Glaucia Maria Dalfré²
José de Souza Sales³
Rafaela Bernardes Rabelo⁴

RESUMO

O conhecimento de reforço exige do projetista uma ampla visão do comportamento teórico e prático seja qual for o material da estrutura. No caso, as estruturas de madeiras possuem a característica de poder trocar peças danificadas. Porém, ao invés de trocar uma peça pode-se reforçá-la localmente, ou até a peça como um todo. Dessa forma, um dos métodos utilizados é o reforço usando fibras como, por exemplo, carbono, aramida ou vidro. Assim, para entender melhor o comportamento desse reforço este trabalho visou realizar uma modelagem numérica de peças de madeira cortadas ao meio, sujeitas à tração e reforçadas com fibras de carbono ou vidro. A modelagem é realizada a partir de uma pesquisa de referência, onde foi reforçada à madeira de *Eucalyptus grandis* in natura e autoclavada, com o uso do adesivo epóxi e ensaiada à tração. Vale ressaltar que a madeira é cortada ao meio. Sendo assim, a transferência de tração das seções cortadas é feita apenas pelo reforço fibroso. A modelagem desenvolvida no programa DIANA®, é realizada a partir desses ensaios e então validada. A validação ocorre via força máxima e modos de ruptura. Depois de validado o comportamento da malha, varia-se a taxa de área de reforço, de carbono e vidro, na madeira. A partir dessa análise paramétrica, verifica-se qual a influência da variação da taxa de área de reforço na resistência final à tração da madeira reforçada e seus modos de ruptura.

Palavras chaves: Reforço em madeira, fibras de vidro, fibra de carbono, reforço com fibras

COMPUTATIONAL MODELING OF TEST TENSIL OF WOODS WITH REINFORCEMENT OF RESINED LAMINATES OF FIBERS OF GLASS AND CARBON

ABSTRACT

Reinforcement knowledge demands from the designer a broad view of theoretical and practical behavior for the material of the structure. In this case, as wood structures have a characteristic of being able to exchange damaged parts. However, instead of changing a piece one can reinforce it locally, or even a piece as a whole. Thus, one of the methods used and the reinforcement of fibers such as, for example, carbon, aramid or glass. Thus, in order to better understand the behavior of this work in this work, the aim was to perform a numerical modeling of wood pieces cut in half, subjected to traction and reinforced with carbon or glass fibers. The modeling is carried out from a reference research, where the wood of *Eucalyptus grandis* in natura and autoclaved was introduced, with the use of epoxy and tested by traction. It is worth mentioning that a wood is cut in half. Thus, a transfer of traction from the cut sections is done only by the fibrous reflux. The modeling developed in the DIANA® program is carried out from tests and then validated. Validation occurs via maximum force and burst modes. After validating the behavior of the mesh, a rate of reinforcement area, carbon and glass, varies in the wood. From this parametric analysis, it is verified the influence of the variation of the area of reinforcement on the final resistance to the traction of the reinforced wood and its modes of rupture.

Keywords: Reinforcement in wood, glass fibers, carbon fiber, reinforcement with fibers.

¹ Professor do Instituto Federal Goiano – Campos Rio Verde, Doutorando no Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPGECIV

Professor do Instituto Federal Goiano – Campos Rio Verde

³ Universidade Federal de Goiás

⁴ Faculdade Araguaia

INTRODUÇÃO

As manifestações patológicas ocorrem das maneiras mais diversas possíveis. Essas manifestações além de reduzir a estética da estrutura, ainda reduzem a segurança. O que quer dizer que podem causar sensações de insegurança aos que estão dentro do edifício, ou até a queda da peça.

Estruturas de madeiras, por exemplo, sofrem grande deterioração dos efeitos de vento. Além de vibração causada pelos mesmos. Outros problemas, das peças de madeira, é a deterioração causada pelo tempo, além de agentes biológicos e químicos. Assim, proporcionam a redução da vida útil da estrutura.

Quando sujeitas as essas manifestações patológicas, as peças de madeira podem perder diversas de suas propriedades mecânicas, por exemplo, resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade e etc. Destas, a resistência à tração pode ser trabalhada com a simples introdução de materiais para reforçar.

As fibras de vidro e carbono, por sua vez, possuem boa resistência à tração. Dessa forma, reforçar uma peça de madeira a partir da colagem de fibras, desses materiais, aumenta a resistência à tração de uma peça de madeira deteriorada.

Em Mohammad *et. al.* (2011) o reforço em estruturas de madeira pode ser preciso em ocasiões no qual o aumento de carga não foi previsto em projeto, ultrapassando o estado limite de utilização da estrutura.

Madeira

A madeira é um material que possui propriedades distintas em suas direções. Dentre essas propriedades, cabe destacar a resistência à tração, sendo essa diferente da propriedade de compressão. Assim, quando falamos de resistência paralela às fibras sua constituição celular trabalha de forma que seu alongamento permita maiores forças antes da ruptura. Na Figura 1, pode-se observar como é a curva tensão x deformação para casos de peças com compressão e tração paralela às fibras.

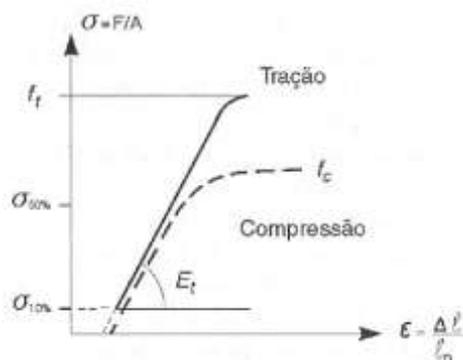


Figura 1 - Curva tensão x deformação de peças à compressão e à tração (PFEIL, PFEIL, 2003).

No caso de ensaio de resistência à tração paralela as fibras a ABNT NBR 7190 (1997) padroniza a seção do corpo de prova a ser ensaiado. A geometria pode ser vista na Figura 2 de uma figura retirada da própria norma. Na Figura 3, pode ser vista uma peça ensaiada por Mohammad et. al. (2011).

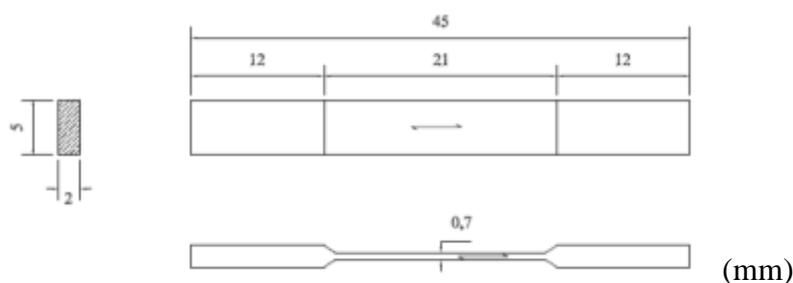


Figura 2 - Geometria do ensaio de resistência à tração da madeira paralela às fibras (ABNT NBR, 1997).

Apesar de a norma dar a geometria da peça, infelizmente não é dada a volta da curva de caimento da região de apoio para a região esbelta da peça. Essa medida é feita dependendo do equipamento de moldagem da madeira. Além de não ser uma reta como demonstrado, na Figura 2, sendo na verdade uma curva sinuosa como mostrado na Figura 3.

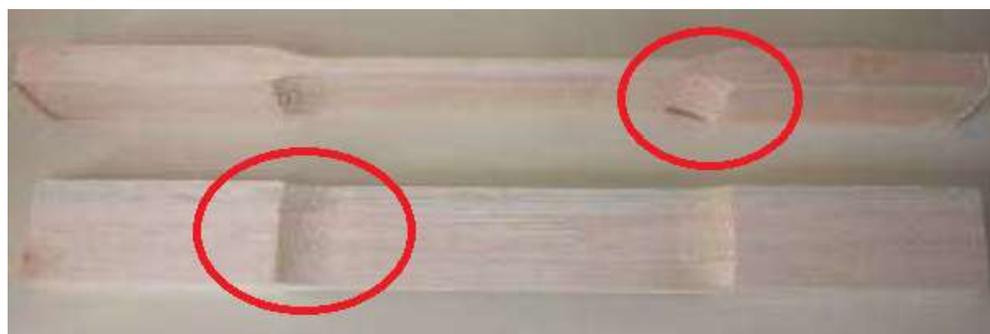


Figura 3 - imagem de uma madeira a ser ensaiada (MOHAMMAD et. al. 2011).

Vale ressaltar que dependendo da umidade, do clima, a ABNT NBR 7190 (1997) recomenda que a madeira seja reduzida sua resistência a tração paralela às fibras baseado na.

Com a classe de umidade encontra-se o fator redutor da resistência da peça baseado no parâmetro de umidade k_{mod2} , como pode ser visto na Tabela 2

Tabela 1 - Classes de umidade da madeira (ABNT NBR, 1997)

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb} .	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eg}
1	$\leq 65\%$	12
2	$65 < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75 < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997) atribui para alguns tipos de madeira, quando não se tem ensaio, resistências médias. Neste trabalho será usado a madeira *Eucalyptus grandis*, quando em umidade 12%, possui resistência média à tração da espécie 70,2 MPa. A classe de umidade na região sul, dada, neste trabalho era de, aproximadamente, $U = 80\%$. Assim, a resistência à tração da peça é de 70,2 vezes 0,8 (k_{mod2}), sendo então 56,16 MPa para resistência à tração paralela às fibras.

Tabela 2 – Parâmetro k_{mod2} de classe de umidade (ABNT NBR, 1997)

Tipo de produto de madeira		
Classe de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada e colada Madeira compensada	
1 e 2	1,0	1,0
3 e 4	0,8	0,9

Nos ensaios, conforme as Figura 1 e Figura 2 dados por Mohammad et. al. (2011), de 6 peças in natura, chegaram a encontrar os valores na Tabela 3.

Tabela 3 – propriedades da madeira in natura *Eucalyptus grandis* (MOHAMMAD et. al., 2011)

Corpo de Prova	Massa (g)	Força Máxima (kN)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP 1	171,17	28,31	81,1	16189
CP 2	141,20	25,97	71,7	18630
CP 3	165,70	27,85	82,4	14543
CP 4	158,90	21,03	57,3	24488
CP 5	152,00	21,32	58,5	20007
CP 6	145,40	18,27	55,5	13046
Média	155,72	23,79	67,75	17817,17
Desvio Padrão	11,64	4,14	12,27	4149,49
Coef. Variação (%)	7,48	17,42	18,12	23,29

Dessa forma, a resistência média, dos seis corpos de prova, encontrada foi de 67,75 MPa, diferindo do resultado dado pela norma em 18 %. O módulo de elasticidade ensaiado foi de 17,8 GPa.

A força, média, máxima encontrada no artigo para essas madeiras in natura foi de 23,79 kN. Sendo que, neste trabalho, essa força última será uma das forças de validar a modelagem numérica realizada.

Laminado de Fibras de Carbono

As fibras de vidro de carbono surgiram como a modernidade dos plásticos, (MITCHELL, 1999). Thomas Edison foi um dos primeiros a estudar as fibras de carbono, e os primeiros relatos das fibras de carbono datam da década de 60, com usos militares. Esses materiais podem vir de diversas formas. Dentre essas formas estão lâminas ou painéis bidimensionais, conforme Figura 4.

As características dos laminados diferem de fabricante para fabricante. Isso porque, o processo produtivo, o material e a forma de estocagem podem ser diferentes. Na Tabela 4, são apresentados as propriedades do laminado, em forma de ficha técnica, usado no trabalho experimental. Esses dados são usados na modelagem numérica em elementos finitos como dados de entrada da constituição dos materiais que irão compor os elementos finitos.

Tabela 4 – Ficha técnica do laminado de fibra de carbono (TEXIGLASS)

Tipo de Tecelagem	Tela com Trama Dupla			
Parâmetros	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Peso por m quadrado	g/m²	313	348	383
Peso por m linear	g/m linear	15,7	17,4	19,1
Número de Fios de Urdume	Fios/cm	3,80	4,00	4,20
Número de Fios de Trama	Fios/cm	2,07	2,30	2,53
Largura	mm	48	50	52
Comprimento do rolo	m	45	50	55
Tamanho total do rolo	m²	2,16	2,50	2,83
Espessura	mm	0,50	0,59	0,68
Carga de Ruptura Urdume Teórica	Kgf/cm	544	680	748
Carga de Ruptura da Trama Teórica	Kgf/cm	8	10	11

Módulo de Elasticidade Teórico	Kgf/cm²	-	239000	-
Porcentagem de Resina em Peso	%	0	0	0

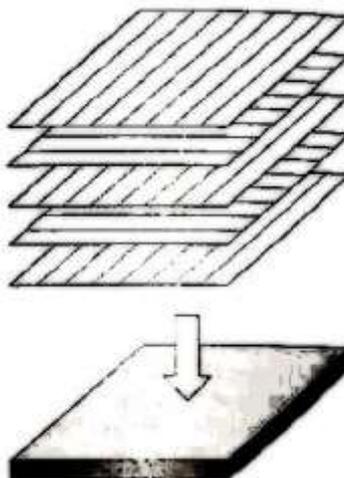


Figura 4 - Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras (CALLISTER, 2007).

Nesse sentido, as fibras deste trabalho serão orientadas na mesma direção das fibras da madeira. E o tramo da fibra, além do rolo pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 - Laminado de fibra de carbono bidirecional (MOHAMMAD et. al. 2011).

Este laminado tem 5 centímetros de largura além de 0,59 milímetros de espessura. A resistência a tração dessa fibra de carbono é de 115,2 MPa, com 680 kgf e área de 1x0,59 cm.

Resina Epóxi

A resina epóxi usada para colagem é de fácil molhabilidade durante o uso e possui viscosidade baixa, características que permitem fácil manuseio durante o processo de impregnação, Mohammad et. al. (2011). Além disso, suas propriedades podem ser vistas na Tabela 5.

Como a mistura se adere bem à madeira, considera-se que há boa interação entre a resina e a peça, neste trabalho. Logo abaixo está uma foto do laminado colado com a resina junto à madeira, além do esquema de ensaio, Figura 6.

De fato, essa interação perfeita não é o que ocorre na realidade. Isso porque, existem poros na madeira. Apesar de a resina preencher esses poros, a aderência não pode ser considerada perfeita

quando for realizar um reforço estrutural utilizado esse método. A questão fundamental é avaliar se houve aderência razoável no ato de realizar o reforço.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios com CPs reforçados com laminas de carbono e madeira cortada ao meio (MOHAMMAD et. al. 2011).

Corpo de Prova	Madeira in natura	
	Força Máxima (kN)	Resistência à Tração (MPa)
CP 1	15,70	44,86
CP 2	20,20	57,71
CP 3	25,90	74,00
CP 4	16,60	47,43
CP 5	24,00	68,57
CP 6	28,50	81,43
Média	21,82	62,33
Desvio Padrão	5,16	14,76
Coef. Variação (%)	23,67	

O comportamento da madeira junto com o laminado, colado pela resina, apresenta resultados bi-lineares, ou seja, duas regiões elásticas distintas. Vale ressaltar que a madeira é cortada ao meio e posteriormente é colado o compósito, conforme Figura 7.



Figura 6 - Esquema de ensaio da peça sem laminado e com laminado (MOHAMMAD et. al. 2011).

Na Tabela 5 é possível ver as forças e as resistências dadas pelo ensaio à tração nas madeiras reforçadas com laminas de carbono. A área de laminado de carbono colocada foi de 5x7 cm, sendo 35 cm². E localizados no centro da peça, conforme Figura 7.



Figura 7 - Esquema de ensaio e ruptura das madeiras, cortadas ao meio, com fibra de carbono cortada.
(MOHAMMAD et. al. 2011).

Assim é possível perceber, que a resistência média à tração dos corpos de prova, com lamina de carbono, obtiveram resistência de 62,33 MPa e força média de 21,82 kN. Sendo valores bem próximos dos corpos de prova in natura, dados na Tabela 3. Portanto, as peças se equivalem em resistência última.

Modelagem Computacional Da Ligação

A partir desta seção é descrito a modelagem computacional. O programa utilizado é comercial de elementos finitos, denominado DIANA 10.1 (TNO, 2017). Além disso, será descrito os modelos baseado na geometria da ABNT NBR 7190 (1997).

Modelagem da madeira

As propriedades dos materiais utilizados na modelagem foram as informadas pelos autores no item anterior. O módulo de elasticidade da madeira foi inicialmente admitido igual a 17817,8 MPa, que é a média dos CPs adotados encontrados por Mohammad et. al (2011).

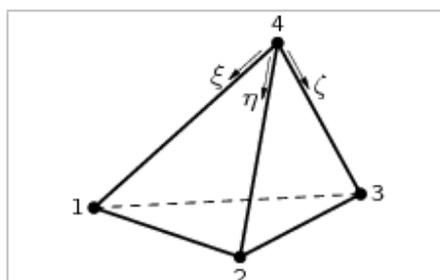


Figura 8 – Elemento finito sólido TE12L (TNO, 2017)

O elemento finito utilizado na modelagem é o tetraédrico TE12L, isoparamétrico, com 3 lados e 4 nós, e interpolação linear, conforme Figura 8. O coeficiente de Poisson foi de 0,2. E foi usado regime elástico com região plástica elástica. O limite de resistência a tração foi de 67.75 MPa.

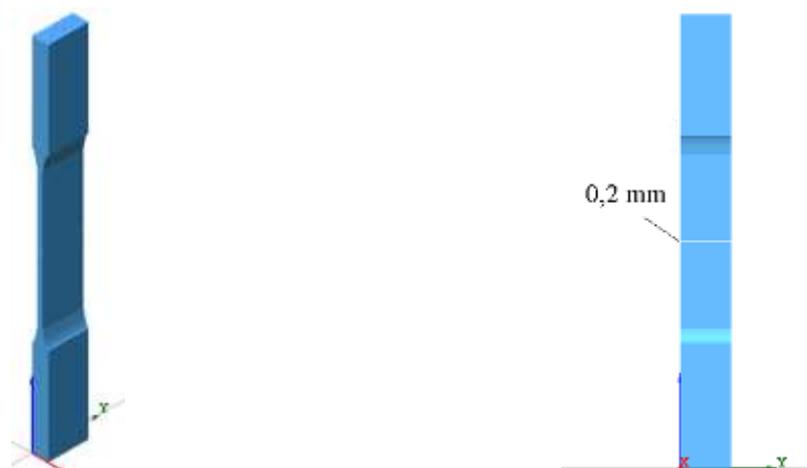


Figura 9 – a) Geometria em volume; b) Face frontal mostrando a distância de 0,2 mm representando o corte da peça

Primeiramente criado as geometrias em formas de volumes, conforme a Figura 9a. Vale ressaltar que a ABNT NBR 7190 (1997) fornece a geometria do ensaio de esforço à tração, porém não fornece a geometria da volta sinuosa, conforme pode ser visto na Figura 3. Dessa forma, nessa modelagem utilizou-se uma equação do segundo grau para gerar essa curva. Sendo que a base dessa curva possui 0,65 mm e a altura é de 1,95 mm.

Para representar o corte que foi feita na peça, em Mohammad et. al (2011), a geometria foi dividida em duas partes e distanciadas de 0,2 mm, conforme Figura 9b. Assim, usando elementos com tamanho de 0,35 mm para poder compor todas as seções criadas na modelagem, Figura 10a. E a distância entre os dois volumes está na Figura 10b.

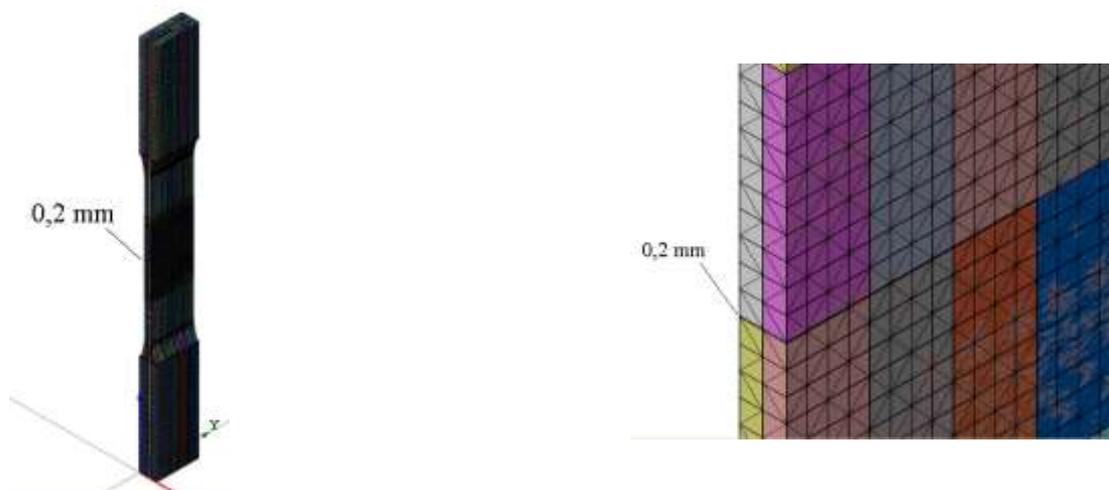


Figura 10 – a) representação da malha de elementos finitos; b) representação da distância entre os dois malhas

Modelagem do material compósito de carbono.

Para os elementos, que representam a fibra de carbono a modelagem usada foi a 2D, com entrada de espessura de 0,59 mm. Esse valor de espessura foi usado devido essa ser a espessura medida na fibra de carbono. O elemento usado foi o Q8MEM de interpolação linear, e pode ser visto na Figura 11.

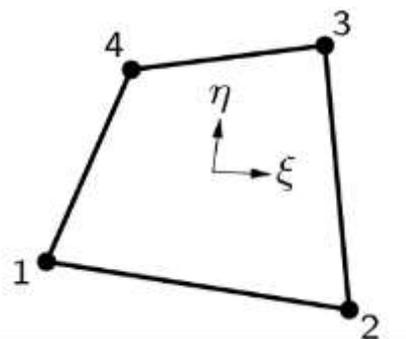


Figura 11 – Elemento finito bidimensional Q8MEM (TNO, 2017)

A malha foi gerada a partir de geometrias de superfície, e os elementos possuem 0,35 mm. Assim, a malha pode ser gerada compatibilizando os nós dos elementos sólidos, da madeira, com os elementos de superfície que representam as fibras de carbono, conforme Figura 12.



Figura 12 – Malha Q8MEM ligando as duas peças de madeira cortadas

Para que os nós dos elementos estejam nos mesmos pontos foi realizada nos sólidos cortes proporcionais aos tamanhos do elemento, 0,35 mm.

Forças e condições de contorno

As condições de contorno foram colocadas na face inferior da estrutura. Essas condições foram a restrição a todos os graus de liberdades para simular o efeito da garra da prensa que faz o ensaio físico real, conforme Figura 13.

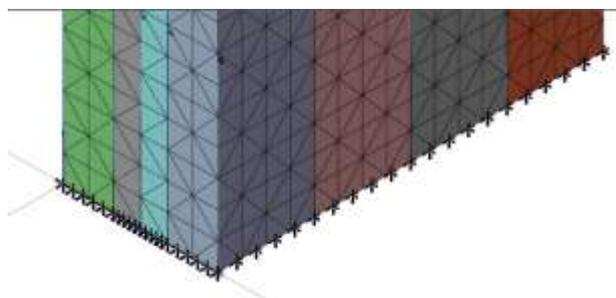


Figura 13 – Condições de contorno na face inferior da peça de madeira

Na face superior, da peça de madeira, foi colocada uma pressão de 5 kN/cm². Isso para simular o efeito da garra na peça. Sabendo que a peça tem seção de 20 x 7 mm é possível encontrar a força máxima na peça. As forças podem ser vistas na Figura 14.

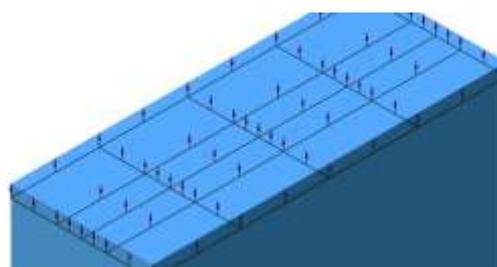


Figura 14 – Força de 5 kN/cm² aplicado na face superior da peça de madeira

Resultados e discussão

A modelagem mostrou que a presença da manta aumentou consideravelmente a ductilidade do sistema. Assim mesmo com a variação da carga a deformação absorveu as tensões e ainda assim não gerou ruptura no sistema.

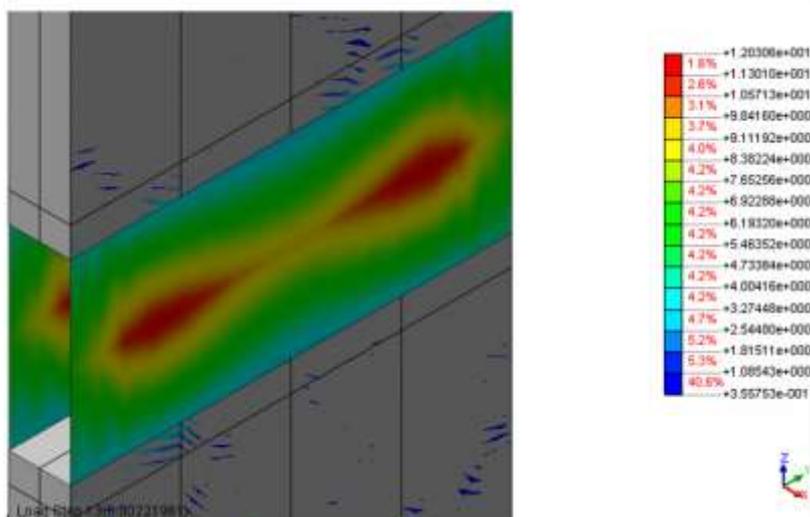


Figura 15 – tensões de tração na manta em kN/cm²

Também, a fissuração na manta na carga de 24,5 kN o que condiz com a Tabela 3 para o o CP 05. Isso quer dizer que a modelagem atende bem ao critério de fissuração e ruptura da seção. Para essa mesma carga, 24,5 kN, encontra-se uma tensão de 7,137 kN/cm² (71,37MPa), conforme Figura 15, que está próximo as tensões dadas na Tabela 3. A fissuração para essa carga de 24,5 kN estava na ordem de 0,03 cm pode-se ver o padrão da região onde ocorre as primeiras fissuras.

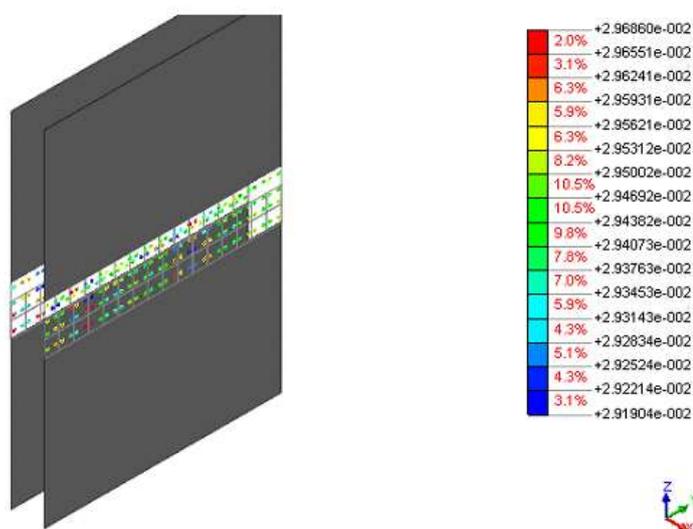


Figura 16 – fissuração em cm para carga de 24,5 kN.

E mesmo alcançando a carga de 24,5 kN e as fissuras se iniciarem no compósito (0,03cm), a peça ainda aumentou sua deformação de forma linear, e chegou a deformar bastante antes da ruptura final. A madeira não apresentou deformações o suficiente para romper. Isso porque nessa modelagem considerou-se a perfeita aderência entre a madeira e o compósito.

A Figura 17 mostra que o deslocamento da madeira foi da ordem de 1,3 mm. Contudo, vale relembrar que no centro existe um corte separando as madeiras. Assim, esse deslocamento da

madeira representa a deformação das fibras acima da manta. Na Figura 18 é possível verificar que a tensão máxima que a madeira alcançou foi de 24 MPa, sendo que a sua resistência final é de 67,75 MPa dado pela média dos corpos de provas descritos na Tabela 3.

A análise modelagem mostra, também, que a interação da interface entre a madeira e o compósito é de altíssima importância no comportamento do reforço. Isso porque, a força resistente da peça pode ser grande demais dependendo da interação entre o compósito e a madeira. Assim, como sugestão para trabalho futuro é interessante colocar um elemento de contato, entre as interfaces de compósito e a madeira. Esse elemento, não foi colocado por não ser escopo deste artigo. A ideia era avaliar como seria o comportamento perfeito.

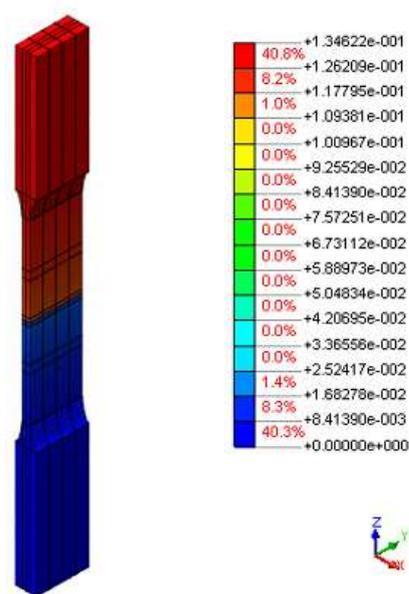


Figura 17 – Deslocamento da madeira em cm

Contudo, para avaliar a resistência ao cisalhamento entre os materiais é necessário um ensaio de cisalhamento no estilo, push out. Isso permitiria encontrar os parâmetros de referente ao cisalhamento dado pela interação entre os dois materiais.

E depois de ensaiado, a resistência ao cisalhamento entre os materiais, elementos de interface podem ser introduzidos na modelagem com os verdadeiros valores retirados de ensaios experimentais.

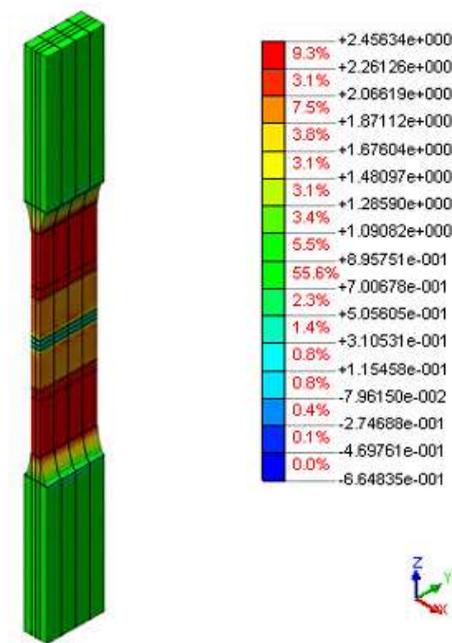


Figura 18 – distribuição de tensões na madeira em kN/cm²

CONCLUSÃO

A manta é um elemento importante que pode introduzir ductilidade à madeira. Dando maiores deformações ao alcançar a força resistente da peça. E mesmo com depois de atingir a força resistência máxima, a madeira não atingiu a resistência limite. Porém, esse fato só ocorre no reforço real se houver perfeita aderência entre o compósito e a madeira. O que na prática não ocorre com perfeição. Dessa forma, uma boa saída para uma modelagem futura é a verificação do cisalhamento na interface de contato entre a madeira e o compósito.

Este trabalho cumpriu seu escopo de mostrar a modelagem com idealização de aderência perfeita entre a madeira e o compósito. Como sugestão de trabalhos futuros deve-se realizar ensaios reais para determinar a resistência ao cisalhamento da interação entre a face da madeira e do compósito. E assim, introduzir na modelagem elementos de interface a fim de calibrar o modelo. Outra forma de verificar o comportamento da interface é ensaiar a madeira com o compósito e extrair os dados de força por deslocamento. Depois disso, com o uso dos ensaios de cisalhamento, modelar a geometria usando a interface e observando se a curva força por deslocamento da modelagem será a mesma do ensaio de tração.

Depois disso, calibrado o modelo linear, chocar o modelo não linear. E por fim o modelo estará validado. O próximo passo seria mudar a taxa de compósito para verificar o comportamento e não haverá necessidade de realizar ensaios físicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal de São Carlos e a Capes pelo incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (1997) NBR 7190: **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro.

CALLISTER, W. D. **Material science and engineering: an introduction**. 7. Ed. [S.1.]: Jhon Wiley and Sons, Inc, 2007.

MITCHELL, S. **The Birth Of Fiberglass Boats**: Good Old Boat magazine: Volume 2, Number 6, November/December 1999.

MOHAMMAD, G. ACCORDI, J. ROCA, L. E. A. 2011. *Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira de eucalyptus in natura e autoclavada.. Revista matéria*, v. 16. N 1. pp.621-637.

MONTANA QUÍMICA S.A., Boletim Técnico: Osmose K33 C. São Paulo, 2008.

TEXIGLASS, disponível em <<http://www.texiglass.com.br>> Acessado em 01 maio 2017.

TNO DIANA BV. 2017. *Diana User's Manual – Release 10.1*. TNO DIANA BV.

Recebido em 05 de junho de 2017.

Aprovado em 20 de junho de 2017.