

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE VIGAS DE MADEIRA MACIÇA ARMADAS COM BARRAS DE AÇO CA-50 FIXADAS COM RESINA EPOXÍLICA

Felipe Carradore (1), Marcio Vito (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) felipecarradore29@hotmail.com, (2) marciovito@unesc.net

RESUMO

A madeira é um recurso muito utilizado na construção civil, e quando como elemento estrutural, tem-se como agravante, que seria o grande deslocamento vertical que sofre quando submetida à aplicação de cargas, prejudicando muito a resistência da mesma. Desse modo, no presente trabalho desenvolveu-se um sistema de reforço para essas vigas através da colagem de barras de aço CA-50 com uma resina epoxilica em vigas de Eucalyptus Citriodora. As barras foram coladas próximo às extremidades, com a finalidade de reduzir esse deslocamento, tornando-a mais rígida e, conseqüentemente, diminuindo a perda de resistência em função da deformação. Utilizou-se dois tipos de vigas para efeito de comparação, vigas de madeira maciça e madeira armada, tendo como resultado a comparação das propriedades mecânicas. Foram realizados os ensaios de umidade, resistência à flexão estática em quatro pontos e ensaio de aderência entre resina/madeira e resina/aço, para verificar a eficácia das vigas armadas e compará-las com vigas de referência. Após obtidos os resultados, chegou-se à conclusão que as vigas armadas possuem um ganho de resistência média de 68,51% em comparação às vigas de madeira maciça. Também foram acompanhados os comportamentos dos diversos elementos envolvidos nos ensaios.

Palavras-Chave: Madeira-Armada. Resina Epoxilica. Barra de Aço.

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil a madeira é utilizada para usos temporários (fôrmas, andaimes, escoramentos, etc.) e permanentes (pisos, forros, coberturas, janelas, etc.)(ZENID, 2009, p. 20). E pouco encontrada usada como estrutura, apesar de que possui uma ótima relação peso específico por capacidade de resistência, garantindo diversas vantagens ligadas diretamente à sua aplicação em sistemas construtivos racionalizados.

[...] Com uma relação peso-resistência muito favorável é um material capaz de transmitir tanto tensões de compressão como tração. Conseqüentemente a madeira é um material naturalmente apropriado para elementos sujeitos a esforços de flexão. (MARTINS, 2010, p. 01).

De acordo com Pfeil (2003, p. 1), “em todas as etapas da construção a madeira se faz presente, desde a fundação até o acabamento”. Porém, quando submetida a esforços estruturais, é prejudicada pelo grande deslocamento vertical quando comparada a aço ou concreto. Pfeil (2003, p. 29) explica, ainda que “[...] as células da madeira quando comprimidas são achatadas precocemente, apresentando grandes deformações”. Analisados os esforços internos no material, percebe-se o rompimento primeiro à área comprimida e, conseqüentemente, levando ao rompimento das fibras tracionadas.

Quando a madeira é solicitada à flexão simples, ocorrem as tensões: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e nas regiões dos apoios, compressão normal às fibras. A ruptura em peças de madeira solicitadas à flexão ocorre pela formação de minúsculas falhas de compressão seguidas pelo desenvolvimento de enrugamentos de compressão macroscópicos. Este fenômeno gera o aumento da área comprimida na seção e a redução da área tracionada, podendo, eventualmente, romper por tração. (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003, p. 41).

Tratando-se de sustentabilidade, a exploração da madeira possui um baixo consumo de energia se comparado à outros materiais da construção e também uma facilidade na execução, que por exemplo, dispensa uso de materiais descartáveis como formas para estrutura. Há também o seu comportamento quando exposta ao fogo, uma vez que possui alta resistência ao fogo em função de sua seção transversal, onde há uma demora em atingir o "coração" da madeira (LELPO, 2014, p. 1).

Colocados os fatos acima, foi desenvolvido neste trabalho um sistema de reforço para madeira, visando diminuir a deformação e aumentar a resistência sem o aumento de seção da peça, através da união de diferentes materiais estruturais. Segundo Douglas Rodrigues Brasil (2008, p. 14) “o reforço visa à melhoria do desempenho estrutural, possibilitando que a estrutura assuma novas exigências funcionais, como uma nova carga ou se adapte a condições ambientais causadas pelas modificações na área”.

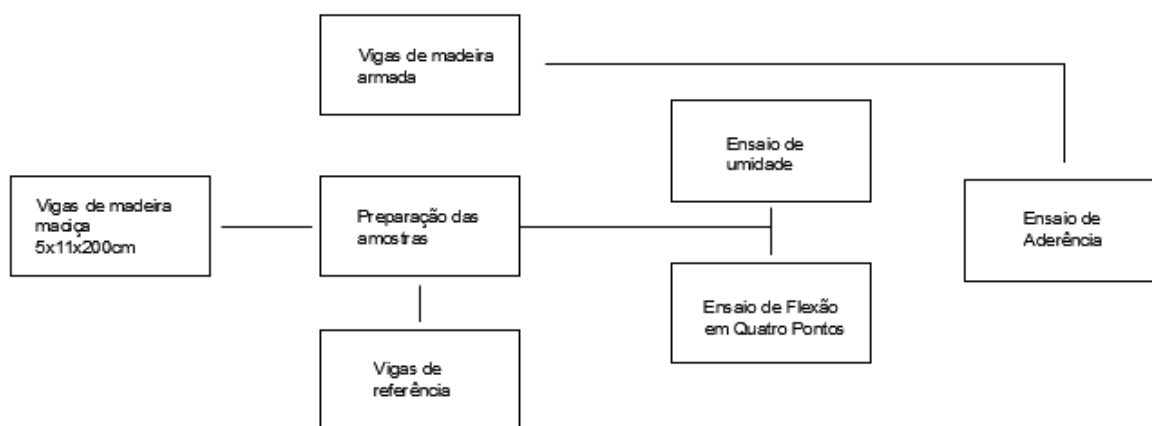
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram ensaiadas cinco vigas de madeira, sendo três reforçadas com o sistema cola-aço, desenvolvido neste trabalho, e duas maciças. A madeira utilizada é do tipo *Eucalyptus Citriodora*, a resina do tipo epoxilica e a barra de aço tipo ca-50.

Três ensaios foram realizados: deflexão estática em quatro pontos para verificar o limite último de resistência; ensaio de aderência para analisar a eficiência entre cola/madeira e cola/aço; e ensaio de umidade para identificar o grau de umidade das amostras.

No fluxograma da Figura 01, é possível analisar o decorrer do procedimento adotado.

Figura 01 – Fluxograma do Procedimento Experimental



Fonte: Autor (2016).

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VIGAS

Foi utilizada madeira com seção retangular do tipo *Eucalyptus Citriodora* de reflorestamento, devido à sua aplicação no mercado da construção e ao impacto ambiental e sua elevada resistência mecânica, conforme indicado na Tabela 01, cujos dados foram obtidos no item E.1 da NBR 7190/1997.

Tabela 01 – Propriedades do *Eucalyptus Citriodora*

Propriedades de Resistência e Rigidez	Resistência Padrão 12% (kN/cm ²)
Resistência à compressão (f _{c,0})	6,2
Resistência à tração paralela (f _{t,0})	12,36
Resistência à tração perpendicular (f _{t,90})	0,39
Resistência ao cisalhamento (f _{v,0})	1,07
Módulo de Elasticidade (E)	1.842,10

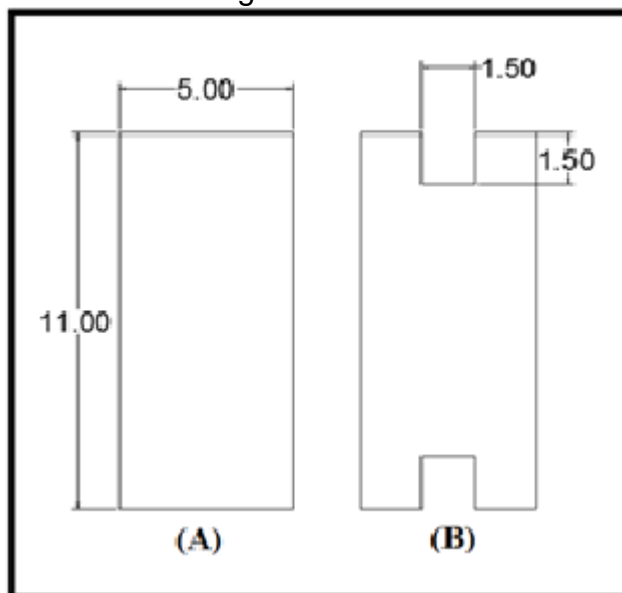
Fonte: ABNT (1997).

As amostras foram separadas em dois grupos, 1 e 2. O grupo “1” é composto pelas

vigas de referência, com a seção de 5 x 11 cm e área de 55 cm² (Figura 02-A), tendo comprimento de 200 cm e vão teórico de 190 cm.

As vigas armadas pertencem o grupo “2”, utilizando as mesmas dimensões das vigas de referência, sendo que estas possuem duas canaletas com dimensões de (1,5 x 1,5) cm, conforme (Figura 02-B). As seções transversais se mantêm dentro do mínimo exigido pelo item 10.2.1 da NBR 7190/1997, que é de 5 cm de espessura e área mínima de 50 cm².

Figura 02 – (A) Seção Transversal Vigas de Referência; (B) Seção Transversal Vigas Armadas.



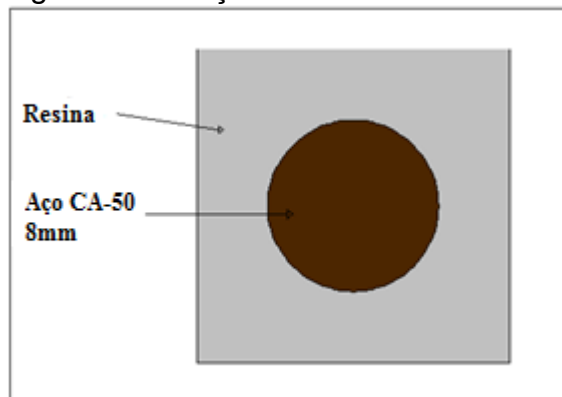
Fonte: Autor (2016).

2.2 BARRA DE AÇO

Para contribuir com a resistência à tração e compressão foram utilizadas barras de aço do tipo CA-50, disseminada na construção civil. Conforme Dias (2003, p. 78) “[...] o aço em função da sua resistência, ductilidade e outras propriedades, é adequado para utilização em elementos que suportam cargas”.

O diâmetro nominal utilizado foi de 8 milímetros com a superfície nervurada para garantir uma melhor aderência e o comprimento foi de 200 cm. Toda a superfície da barra será coberta pela cola (Figura 03).

Figura 03 – Seção Transversal da Canaleta



Fonte: Autor (2016).

2.3 RESINA EPOXÍLICA

A cola utilizada para unir aço e madeira na viga armada é uma resina epoxilica que tem como característica chave a aderência à madeira, concreto e aço, e também resistência de até 80 MPa para compressão e 50MPa para Flexo Tração.

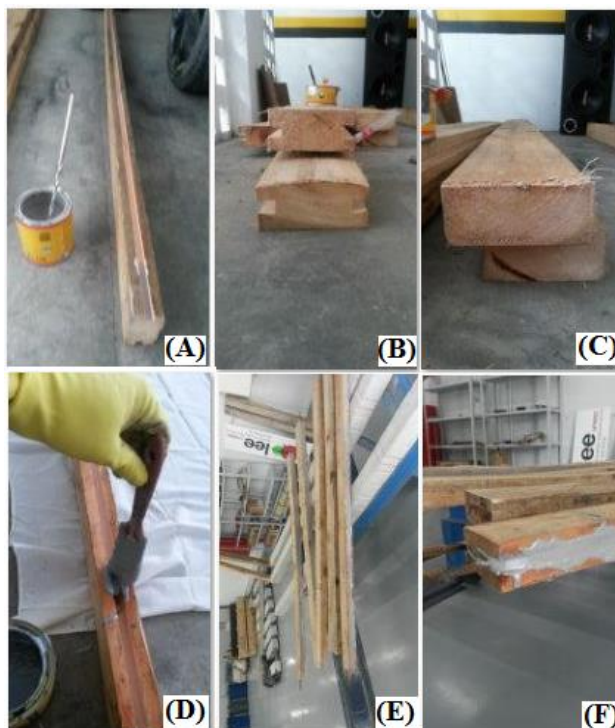
Além das boas propriedades mecânicas, é também de fácil utilização devido a consistência viscosa no momento da aplicação.

2.4 PREPARAÇÃO DA VIGA ARMADA

Depois de feitos os cortes das canaletas, realizou-se uma limpeza em toda a viga e na barra de aço para retirar qualquer resíduo de impureza ou pó resultante do corte. Nas canaletas, após a preparação da cola, é posta uma primeira camada para servir de "colchão" para a barra de aço que é inserida em seguida.

Feito isso, inserindo a barra de aço no local determinado com o transpasse de 5 cm para acompanhamento do alongamento da barra de aço, logo após preenchido todo o restante da cavidade com resina finalizando um lado da seção. Este processo é efetuado para as duas cavidades, após finalizar os dois lados da seção, as vigas são armazenadas durante sete dias sem sofrer movimento ou carregamento de acordo com determinação do fabricante para atingir a resistência determinada na especificação técnica. Na Figura 04 está representada a preparação da viga armada.

Figura 04 – (A) Preparação da cola; (B) Vigas armadas Limpas; (C) Vigas maciças limpas; (D) Primeira camada de cola; (E) Vigas secando; (F) Detalhe Viga Armada;



Fonte: Autor (2016)

2.5 ENSAIO DE ADERÊNCIA TIPO PUSH-IN

Como um dos elementos principais do experimento realizado no presente trabalho, tem-se a cola ou resina, é devido a ela que há ligação entre os materiais, proporcionando o aumento na resistência da viga.

Em relação às possíveis causas do limite de resistência da viga armada, pode-se ressaltar a questão da aderência entre a resina/madeira ou o resina/aço. Este ensaio chama-se push-in e tem como objetivo mensurar a tensão máxima de aderência entre os materiais, no qual a força máxima é medida, até provocar escorregamento da superfície de ancoragem. O referido ensaio foi baseado no autor Silva (2014).

2.6 ENSAIO DE UMIDADE

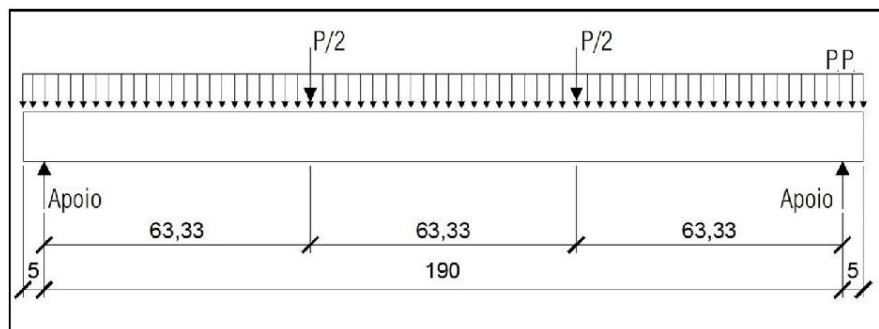
A norma NBR 7190/1997 informa que as propriedades mecânicas das vigas de madeira variam com a variação do grau de umidade das mesmas, desta forma, foi realizado o ensaio do grau de umidade das amostras conforme a NBR, onde se toma nota da massa inicial do corpo de prova e o deixa em estufa até atingir massa

constante, verificando a diferença de peso.

2.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA EM 4 PONTOS

O ensaio de resistência à flexão estática se constitui por aplicação de carga que se divide em dois pontos nos terços da amostra. Além da carga, tem-se o peso próprio da viga, e para pontos de reações tem-se dois roletes que simulam vínculos de primeira e segunda classe. Na figura 06, está representada a carga pontual "P", exercida pelo macaco hidráulico verticalmente de cima para baixo, a carga "PP" que representa o peso próprio da viga e as distâncias dos terços da viga.

Figura 06 – Carregamento da amostra



Fonte: Autor (2016).

2.7.1 Equipamentos utilizados para o ensaio de flexão

Os equipamentos utilizados neste ensaio tiveram como objetivo medir a carga máxima suportada pelas vigas e o deslocamento máximo antes do rompimento.

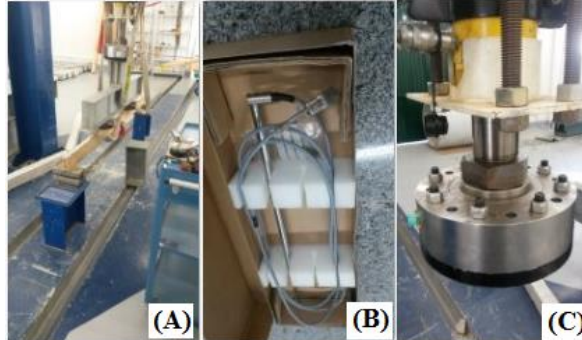
A carga máxima foi medida pelo pórtico de reações, sendo que, abaixo dele, há uma estrutura de fundação rígida o suficiente para que as deformações, geradas pelas forças de reação, não intervissem nos resultados do estudo. Em relação ao deslocamento linear, este foi medido por sensores de deslocamento linear (LVDT) no centro do vão teórico.

Ambos os equipamentos estão ligados a um sistema de aquisição de dados QuantumX MX840A de 8 canais, ligados a um software chamado Catman easy, ambos da empresa HBM.

Na Figura 07, estão demonstrados os equipamentos utilizados para o ensaio,

localizados no Laboratório de Estruturas (LEE), no Iparq - I.D.T. UNESC.

Figura 07 - (A) Pórtico de reações; (B) LVDT;
(C) Célula de carga e macaco hidráulico.



Fonte: Autor (2016)

3 RESULTADOS E COMPLEMENTOS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios para cada grupo de amostra e complementos necessários para boa compreensão.

3.1 ENSAIO DAS VIGAS DE REFERÊNCIA

O ensaio das vigas de referência consistiu basicamente em submetê-las a cargas até a ruptura e, através dessas cargas, obter as forças máximas e transformá-las em tensões. A Tabela 02 demonstra as tensões máximas obtidas no ensaio e as tensões calculadas, sem os coeficientes de segurança e baseadas na NBR 7190/1997. Ao realizar a comparação entre as tensões atuantes e calculadas, foram obtidos valores bem próximos.

Tendo em vista que as vigas são apenas para referência comparativa de cálculo, foram rompidas apenas duas amostras.

Tabela 02 - Comparação do fck obtido das vigas de referência à NBR 7190/1997

Resistências das vigas de referência em ensaio					
Vigas	Carga Máxima (kN)	E (GPa)	Tf (kN/cm ²)	Tc,d (kN/cm ²)	Tt,d (kN/cm ²)
R1	15,79	1.286,25	5,21	1,74	5,21
R2	14,94	1.217,01	4,93	1,64	4,93
Média	15,37	1.251,63	5,07	1,69	5,07
Desvio Padrão	0,60	48,96	0,20	0,07	0,20
Resistência de uma viga calculada segundo a norma					
Vigas	Carga Máxima (kN)	E (GPa)	fcw,od	ft,od	
(5 x 11 x 200)	17,76	852,36	2,92	5,78	

Fonte: Autor (2016)

Legenda:

E – módulo de elasticidade;

$f_{f,d}$ – tensão de flexão atuante;

$f_{c,d}$ – tensão de compressão atuante;

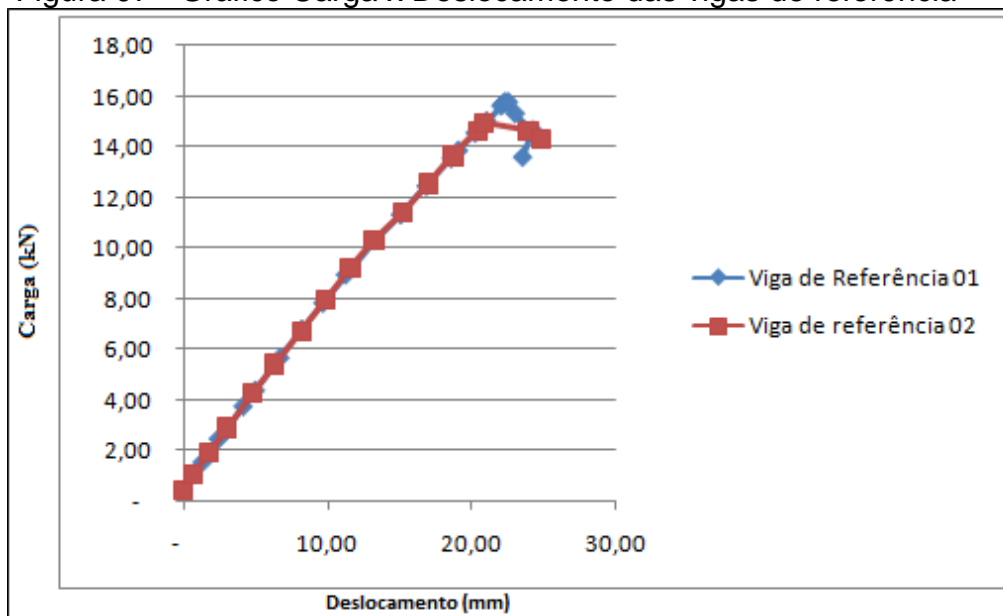
$f_{t,d}$ – tensão de tração atuante;

$f_{cw,0d}$ – resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{t,0d}$ – resistência à tração paralela as fibras.

Durante o ensaio, percebeu-se que a deformação constante em função do aumento da carga até o limite de resistência, próximo aos 15kN, apresentou uma deformação consideravelmente maior após momento de ruptura das vigas.

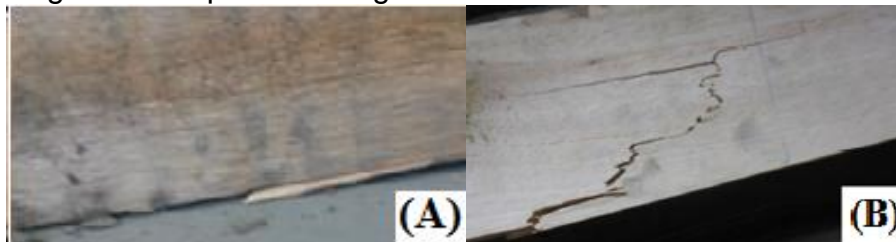
Figura 07 - Gráfico Carga x Deslocamento das vigas de referência



Fonte: Autor (2016)

A ruptura em ambas as vigas de referência, ocorreu com a compressão e esmagamento na parte superior da viga, minimizando a área tracionada e rompendo por tração. Conforme Calil Junior, Lahr e Dias (2003, p. 40) “quando este plano é perpendicular às fibras, a madeira apresenta alta resistência pelo fato da ruptura cisalhar esses elementos” e, desse modo, “antes de romper por cisalhamento, certamente a peça já apresentará problemas de resistência na compressão normal”. Pode-se observar que a ruptura começou na área comprimida, causando o rompimento por tração logo em seguida. Esse fenômeno se dá por um aumento na área comprimida na seção e redução da tracionada, vindo a romper por tração. A Figura 8 (A e B) demonstra as rupturas.

Figura 8 - Ruptura das vigas de referência



Fonte: Autor (2016)

3.2 ENSAIO DAS VIGAS ARMADAS

Houve dois tipos de rupturas nas vigas armadas, que foram: por tração com rompimento da resina e por cisalhamento na linha neutra, sem romper a resina.

Observou-se um grande aumento na resistência se comparadas às vigas de referência. A Tabela 03 indica todas as vigas ensaiadas e um ganho médio de 66,81% de resistência para ruptura e 43,40% para carga de serviço, essa para o deslocamento máximo indicado pela norma NBR 7190. Houve também um aumento no módulo de elasticidade das vigas armadas, indicando o aumento da rigidez das mesmas e, conseqüentemente, menor deformação vertical.

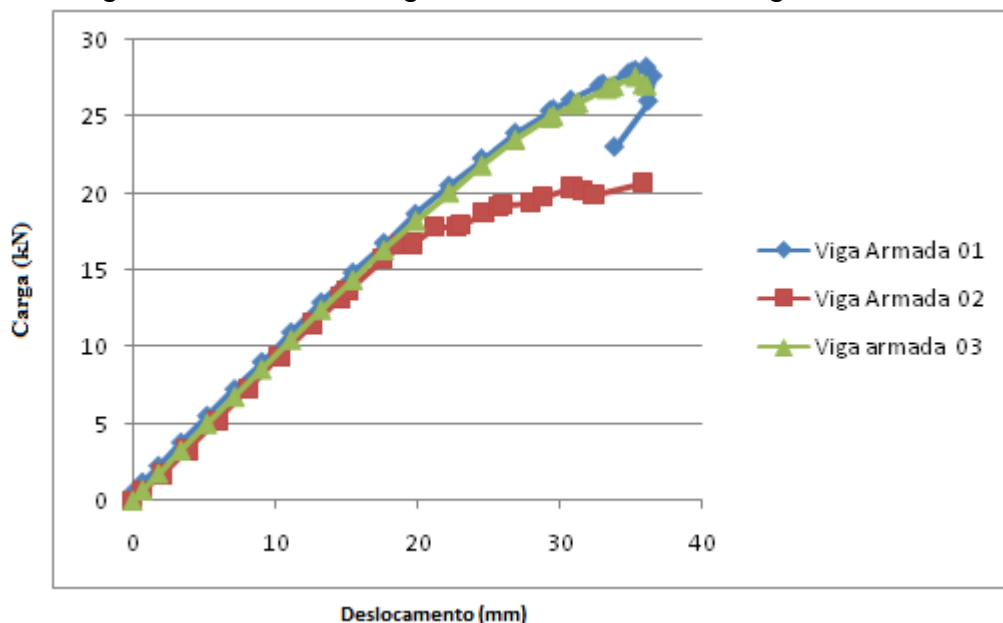
Tabela 03 - Comparação de resistências dos grupos de vigas

Resistências das vigas armadas em ensaio						
Vigas	Carga Máxima (kN)	E (GPa)	Tf (kN/cm ²)	Tc,d (kN/cm ²)	Tt,d (kN/cm ²)	Carga de serviço (kN)
A1	28,34	1.429,01	9,45	3,15	9,45	12,09
A2	21,01	990,75	7,00	2,33	7,00	11,26
A3	27,54	1.418,83	9,18	3,06	9,18	11,41
Média	25,63	1.279,53	8,54	2,85	8,54	11,59
Desvio Padrão	4,02	250,14	1,34	0,45	1,34	0,44
Resistências das vigas de referência em ensaio						
R1	15,79	1.286,25	5,21	1,74	5,21	8,10
R2	14,94	1.217,01	4,93	1,64	4,93	8,06
Média	15,37	1.251,63	5,07	1,69	5,07	8,08
Desvio Padrão	0,60	48,96	0,20	0,07	0,20	0,03

Fonte: Autor (2016)

Quanto ao deslocamento, as vigas A1 e A3 tiveram comportamento similar, apresentando deslocamento constante até a hora do rompimento e retorno aos 6mm após retirada da carga. A A2 demonstra comportamento instável a partir dos 1500kgf, quando já havia um momento atuante de forma a tentar "virar" a mesma.

Figura 09 - Gráfico Carga x Deslocamento das vigas armadas



Fonte: Autor (2016)

A Viga Armada 01, indicada na figura 10, rompeu por cisalhamento próximo à linha neutra, já a A3, na figura 11, teve uma pequena ruptura da resina na região inferior e

também um cisalhamento, porém mais próximo da área tracionada, indicando rompimento por tração, e a A2 demonstrou indícios de rompimento e virou aos 2100kgf, apesar de não demonstrar visualmente o rompimento, foi constatado devido à diminuição de carga aplicada pela célula.

Figura 10 - Viga Armada 01



Fonte: Autor (2016)

Figura 11 - Viga Armada 03

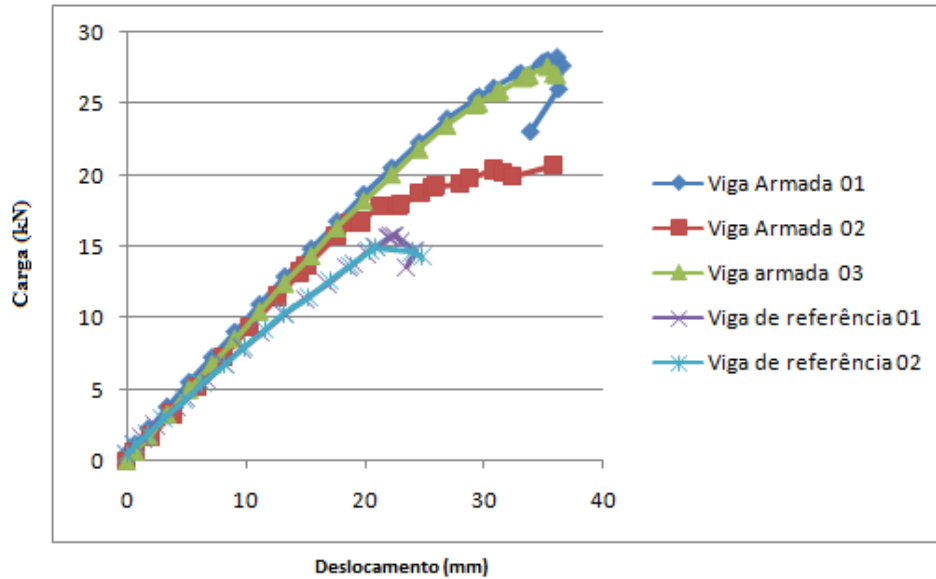


Fonte: Autor (2016)

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS VIGAS

As rupturas de ambos os grupos se deram por tração ou cisalhamento gerados por esforço de compressão normal. A figura 12 mostra o comportamento de ambos os grupos e a grande diferença das resistências, mesmo tendo mesma seção.

Figura 12: Gráfico Carga x Deslocamento de comparação dos grupos



Fonte: Autor (2016)

3.4 ENSAIO DE ADERÊNCIA

3.4.1 Entre resina e madeira

Chamado de Push-in, o ensaio consiste em aplicar uma força na área da resina para causar um escorregamento na madeira e separar os materiais. Foram usados dois corpos de prova para a aplicação da forma, outrossim nos dois corpos de prova houve rompimento das fibras da madeira antes de separar os materiais.

Figura 13 - Equipamento utilizado para ensaio Push-in



Fonte: Autor (2016)

A NBR 7190/1997 informa, no item 8.1.3, que a resistência da parte colada deve ser, no mínimo, igual à resistência de cisalhamento longitudinal da madeira. Constatado que no ensaio de flexão em nenhum momento a resina se desprende da madeira, está dentro da norma.

3.4.2 Entre resina e aço

Neste ensaio foi aplicado uma força na barra de aço para causar escorregamento do aço com a resina e medirmos a aderência em 3 corpos de provas. Na tabela 06, está indicada a força e a tensão de cada amostra.

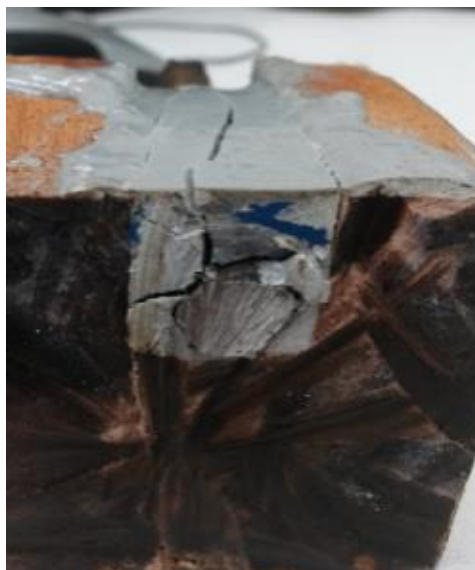
Tabela 06 - Aderência entre aço/resina

Corpo de Prova	Força (kN)	Tensão (kN/cm ²)
CP 01	26,20	3,30
CP 02	18,63	2,37
CP 03	21,10	2,74
Média	21,98	2,80
Desvio Padrão	3,86	0,47

Fonte: Autor (2016)

As três amostras tiveram a resina fissurada em todo seu comprimento de ancoragem, seguida pelo escorregamento do aço, conforme Figura 13.

Figura 13 - Rompimento ensaio push-in



Fonte: Autor (2016)

3.5 CORREÇÃO DOS PARÂMETROS

Como supracitado no item 2.6, é necessária a correção das propriedades da madeira para a umidade encontrada na amostra, que variou de 26,78% a 27,41% para todas as amostras. Então, foi adotado 27%, que se enquadra à classe de umidade 4. Assim sendo, foram efetuadas as alterações conforme item 6.4.4 da NBR 7119 (ABNT, 1997), considerando carga de curta duração, como informadas na tabela 07 abaixo.

Tabela 07 - Correção das propriedades em função da Umidade

Propriedades de Resistência e Rigidez	Resistência Padrão 12% (kN)	Resistência Corrigida de 27% para 12% (kN)
Resistência à compressão (f_{c0})	6,2	3,06
Resistência à tração paralela (f_{c0})	12,36	6,10
Resistência à tração perpendicular ($f_{t,90}$)	0,39	0,19
Resistência ao cisalhamento ($f_{v,0}$)	1,07	0,53
Módulo de elasticidade	1842,1	909,08

Fonte: Autor (2016)

4 CONCLUSÕES

Os ensaios destes materiais, realizados no presente trabalho, obtiveram bons resultados, demonstrando um ganho considerável de resistência se comparado às vigas de referência.

O reforço aumentou a resistência das vigas armadas em 69%, tendo sido eficiente tanto na tração quanto na compressão, o que é verificado ao se analisar os tipos de rompimentos das vigas armadas, uma vez que houve um aumento significativo de resistência e rupturas diferentes, tanto por tração e rompimento da resina, quanto por compressão e cisalhamento da linha neutra.

Após a ruptura, pode-se concluir que a resina foi resistente o suficiente para que o aço deformasse junto à viga, fazendo com que o mesmo fosse ativado. Segundo Lubliner (1990), “um corpo sofre deslocamento de corpo rígido, se a distância entre todas as suas partículas não sofrem mudança, do contrario é deformação”.

Por se tratar de uma cola com alta resistência e com aderência tanto ao aço quanto à madeira acima dos admitidos pela NBR 7190/1997, tornou as vigas armadas mais rígidas, evitando a alta deformação vertical, tendo, portanto, um aumento no módulo de elasticidade e, conseqüentemente, diminuindo o número de mini falhas nas fibras e evitando que a área de tração seja diminuída para posterior ruptura pela mesma.

Foi utilizado, como referência, o trabalho de conclusão de curso da acadêmica Alexandra Longo, realizado também na UNESC, que fez este mesmo experimento, porém com outro tipo de resina, obtendo 13% de ganho de resistência contra 69% do atual.

Fica como sugestão a trabalhos futuros realizar este experimento com vigas de maiores sessões ou engastamento do aço no sistema de reforço, exigindo maior participação do aço sem depender exclusivamente da resina.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BRASIL, Douglas Rodriguez. **Utilização de estruturas de aço na recuperação de estruturas de madeira**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UERJ, 2008. 86p.

CALIL JUNIOR, Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. São Paulo: Manole, 2003. 152p.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estrutura de Aço**: conceito, técnicas e linguagem. 6.ed. São Paulo: Ziguarte, 2008. 295p.

DUARTE, António Carlos Ruivo. **Reabilitação de elementos estruturais de madeira com argamassa epoxídica armada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências Tecnológica de Coimbra. Coimbra/PT, 2004. 189p.

LUBLINER, Jacob. **Plasticity Theory**. New York: Macmillan Publishing Company, 1990.

MARTINS, Tomás Francisco Ribeiro Mendes. **Dimensionamento de Estruturas de Madeira**: Coberturas e Pavimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa/PT. 2010. 151p.

PFEIL, Walter. **Estruturas de madeira**: dimensionamento segundo a NBR 7190/97 e critérios das normas americanas NDS e europeia EUROCODE 5. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p.

SILVA, Bruno do Vale. **Proposição de um teste de aderência para o controle tecnológico da resistência à compressão do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2014.