

AValiação NUMÉRICA: RIGIDEZ DE CONECTORES “X” EM CORPO-DE-PROVA MISTO DE MADEIRA E CONCRETO A PARTIR DE CARREGAMENTO CÍCLICO

NUMERICAL EVALUATION: STIFFNESS OF CONNECTORS "X" IN COMPOSITE SPECIMEN OF WOOD AND CONCRETE FROM A CYCLICAL LOAD

Carlito Calil Junior¹ e Julio Cesar Molina²

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Universidade de São Paulo – USP
Departamento de Engenharia de Estruturas
CEP: 13566-590 – São Carlos, SP Brasil
E-mail: ¹calil@sc.usp.br; ²juliocm@sc.usp.br

RESUMO

Neste artigo avaliou-se a perda de rigidez “K” de um corpo-de-prova misto, de madeira e concreto, com conectores “X”, formados por barras de aço coladas, do tipo CA-50. O comportamento do sistema foi avaliado numericamente através da utilização do *software* ANSYS, a partir de um modelo numérico tridimensional, com carregamento cíclico aplicado variando entre 40% e 5% (R=0,125) da resistência estática das conexões “X”, para um total de 20 ciclos de carga aplicados. O modelo utilizado considerou a não linearidade física e geométrica, além de elementos de contato para os materiais, e um comportamento ortotrópico para a madeira. Os resultados mostraram que a perda de rigidez “K” foi de aproximadamente 5% com relação a um único ciclo de carga, sendo que o modelo tridimensional utilizado forneceu bons resultados que concordaram com os resultados experimentais. Apresentam-se, principalmente, os pontos mais importantes da estratégia de modelagem computacional desenvolvida para a composição do modelo numérico analisado.

Palavras-chave: rigidez da conexão, conectores de cisalhamento, carga cíclica, corpos-de-prova mistos, modelagem computacional.

ABSTRACT

In this paper it was evaluated the stiffness "K" of a composite specimen of wood and concrete, with connectors "X", formed by glued steel bars, type CA-50. The behaviour of the system was numerically evaluated through the use of the software ANSYS, starting from a three-dimensional numeric model with cyclical load applied varying among 40% and 5% (R=0,125) of the static strength of the connections "X", for a total of 20 load cycles applied. The used model considered the physical and geometric nonlinearities, contact elements among surfaces and the wood as an orthotropic material. The results showed that the loss stiffness "K" was of approximately 5% for a single load cycle and the three-dimensional model used supplied good results that agreed with the experimental results. They also are the most important points of the modeling computational strategy developed for the composition of the analyzed numerical model.

Keywords: connection stiffness, shear connectors, cyclical loads, composite specimens, computational modeling.

1 – INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento das conexões entre os materiais presentes nas soluções mistas é importante. A eficiência do elemento estrutural com seção composta está diretamente relacionada com a qualidade do sistema de conexão, uma vez que o comportamento dos conectores afeta diretamente a distribuição dos esforços internos bem como as deformações da estrutura.

O módulo de deslizamento “K” é o parâmetro que quantifica a flexibilidade do sistema de conexão em uma estrutura mista e é definido como o coeficiente angular da curva força versus deslocamento. Geralmente é adotado como linear para simplificações, mas a maioria dos conectores apresenta seu diagrama força versus deslocamento com comportamento não linear.

Além disso, os ensaios de cisalhamento, realizados em corpos-de-prova, fornecem valiosas informações sobre a rigidez e resistência última dos conectores de cisalhamento. De acordo com Pigozzo (2004), no Brasil a falta de normalização para os ensaios em conectores de cisalhamento de estruturas mistas tem permitido aos pesquisadores adotarem diferentes metodologias para os ensaios, além de diferentes formatos para os corpos-de-prova. Observa-se, portanto, que não existe um consenso sobre os procedimentos a serem utilizados na determinação do módulo de deslizamento o que tem impedido o estabelecimento de conclusões gerais.

Por outro lado, a análise dinâmica tem sido alvo de intensas pesquisas visando à avaliação da integridade das estruturas. Porém, a análise estrutural estática ainda é rotina dos engenheiros civis que se dedicam ao projeto de estruturas e mesmo quando as solicitações em questão são

notadamente dinâmicas emprega-se o artifício de convertê-las em uma análise estática equivalente. É importante salientar que a análise estrutural requer, em muitos casos, um conhecimento prévio, se não exato ao menos aproximado, das solicitações que agem sobre a estrutura, sejam elas estáticas ou dinâmicas, sendo também de fundamental importância o conhecimento das conseqüências dos efeitos causados por estas solicitações na estrutura.

É evidente que existe uma grande dificuldade associada às incertezas na quantificação das variáveis necessárias para a análise do sistema em questão. Por esta razão, a consideração de um comportamento intrinsecamente dinâmico, em toda a sua complexidade, na área de engenharia de estruturas é um grande desafio para o engenheiro.

Atualmente, com o avanço dos microcomputadores, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica destacam-se programas comerciais ou *softwares* específicos (SAP2000, ANSYS, ABAQUS, ADYNA etc.) desenvolvidos com base no Método dos Elementos Finitos. Esses *softwares* possibilitam reproduzir numericamente o comportamento das estruturas evitando-se custos inerentes à realização de ensaios experimentais sem a necessidade do desenvolvimento analítico, em geral descritos por equacionamentos custosos, em razão da considerável complexidade da análise nos campos das tensões e das deformações. Além disso, no contexto nacional, estruturas mistas envolvendo os materiais madeira-concreto têm sido amplamente estudadas no que se refere aos aspectos teóricos e experimentais e, mais recentemente, no referente aos aspectos numéricos.

Neste artigo, efetuou-se a simulação da perda de rigidez “K” do sistema de conexão “X”, efetuado por barras de aço coladas, em um corpo-de-prova misto de madeira e concreto, submetido a um carregamento cíclico variando entre 40% e 5% da resistência estática da conexão “X”, sendo a relação de carga $R = 0,125$, para um total de 20 ciclos de carga aplicados. A simulação numérica foi efetuada no *software* ANSYS (2005), a partir de um modelo tridimensional de corpo-de-prova. A proposta do modelo numérico, apresentada neste artigo, é seguida da estratégia de modelagem utilizada para o seu desenvolvimento. Este trabalho poderá servir de base para outros pesquisadores no desenvolvimento de estudos de caráter numérico, onde seja necessária uma análise mais detalhada dos aspectos localizados de interesse como, por exemplo, a concentração de tensões nas regiões das conexões, o que é difícil de ser analisado em uma análise experimental.

2 – MODELAGEM NUMÉRICA DE SISTEMAS ESTRUTURAIS

A maioria dos modelos numéricos utilizados em análises estruturais propõe formas simplificadas de análise sem considerar os critérios de resistência, ruptura ou falha dos materiais. Tais modelos procuram restringir o comportamento das estruturas a limites linearmente

elásticos obtendo, dessa forma, respostas muito conservadoras. No entanto, os resultados obtidos por uma análise linear são válidos à medida que as deformações plásticas são pequenas. A geometria dos elementos estruturais, especialmente nas regiões próximas às conexões, é capaz de elevar os estados de tensões a níveis máximos atingindo a falha dos materiais para carregamentos de serviço. Por estas razões, é necessária a utilização de modelos numéricos mais sofisticados que permitam determinar com maior precisão o verdadeiro comportamento estrutural dos materiais, principalmente nas regiões das conexões. Em muitas soluções numéricas, a modelagem dos conectores de cisalhamento é simulada pela união de nós comuns das malhas de elementos finitos que compõem os materiais envolvidos na ligação mista, a partir da utilização de elementos de mola, que quantificam a rigidez do sistema de ligação. Essa estratégia é válida e apresenta bons resultados para análises de caráter global, não sendo tão eficiente para análises estruturais onde se necessite da visualização e, principalmente, da quantificação dos aspectos localizados de interesse como, por exemplo, a concentração das tensões e deformações nas regiões das conexões.

3 – METODOLOGIA

3.1 Configuração do modelo numérico

O modelo de corpo-de-prova misto analisado neste artigo foi composto por duas peças laterais de concreto, com resistência média a compressão ($f_{c,m}$) de aproximadamente 28 MPa, e por uma peça central de madeira da espécie *Eucalypto citriodora*, de classe C60. Para a união dos materiais foram utilizados dois conectores de cisalhamento, dispostos em “X” (fixados com inclinação de 45° em relação às fibras da madeira), formados por barras de aço, do tipo CA-50, com 8 mm de diâmetro, coladas nas peças de madeira com a resina epóxi Sikadur 32. Os comprimentos de ancoragem na madeira e no concreto foram respectivamente 8 cm e 20 cm. Para diminuição do tempo de processamento optou-se pela modelagem de metade do corpo-de-prova (Figura 1).

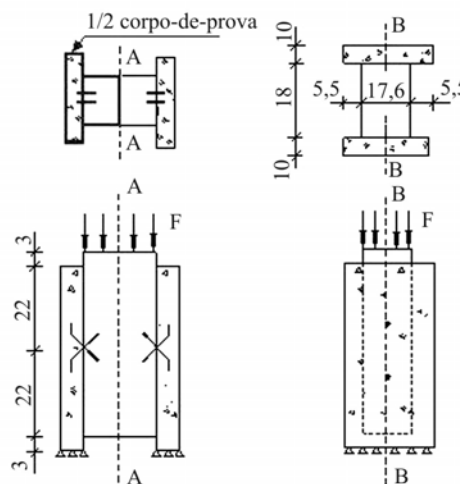


Figura 1. Modelo de corpo-de-prova misto (dimensões em cm).

3.2 Software utilizado na modelagem

Na modelagem do sistema misto analisado utilizou-se o software ANSYS (2005), versão 10.0. A opção pela utilização deste se deu pelo fato das ferramentas disponibilizadas pelo referido software permitirem a análise do modelo em regime de não linearidade física e também geométrica, além da utilização de elementos de contato entre os materiais. A escolha de cada elemento finito utilizado foi feita a partir da consideração de sua representatividade perante o comportamento a ser simulado. Os elementos finitos utilizados são disponibilizados na biblioteca interna do software.

Elemento solid65: foi utilizado na discretização das peças de concreto. A opção por este elemento se deu pelo fato da possibilidade de simulação dos efeitos localizados como, por exemplo, a concentração de tensões junto aos conectores de cisalhamento. O elemento *solid65* é um elemento hexaédrico, que possui oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade, ou seja, translações segundo os eixos x , y e z . Este elemento é capaz de simular o comportamento do concreto com fissuração na tração e esmagamento na compressão, bem como um comportamento com não-linearidade física, o que permite avaliar as deformações plásticas. Além disso, as armaduras podem ser incluídas no concreto pela utilização de elementos barra na forma discreta, ou sob a forma de taxas (Figura 2).

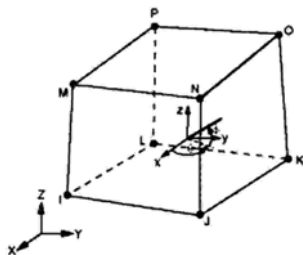


Figura 2. Elemento *solid65*. Fonte: adaptado da documentação do ANSYS (2005).

Elemento solid45: foi utilizado na discretização das peças de madeira e também dos conectores de cisalhamento. O elemento *solid45* também consiste num elemento hexaédrico, com oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade (translações segundo os eixos x , y e z), e permite ainda a consideração de efeitos importantes como, por exemplo, plasticidade e ortotropia para os materiais (Figura 3).

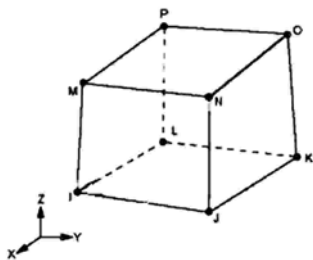


Figura 3. Elemento *solid45*. Fonte: adaptado da documentação do ANSYS (2005).

Elemento link8: foi utilizado na discretização das armaduras de aço imersas no concreto. Este elemento

consiste num elemento tridimensional de barra, que possui dois nós, cada nó com três graus de liberdade (translações segundo os eixos X , Y e Z), e responde a esforços de tração e compressão axiais. O eixo “X” do elemento é orientado segundo o seu comprimento e nenhuma flexão no elemento é considerada. Porém, é possível admitir a ocorrência de deformação plástica para o material (Figura 4).

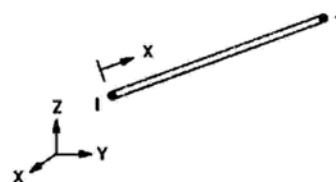


Figura 4. Elemento *link8*. Fonte: adaptado da documentação do ANSYS (2005).

Elementos conta173 e target170: foram utilizados para representar os contatos existentes com possíveis deslocamentos nas seguintes interfaces: madeira-concreto, aço-concreto e aço-madeira. Esses elementos são utilizados com contato do tipo superfície-superfície, que surge do trabalho em conjunto dos elementos *target170* (definido pelo ANSYS como superfície alvo) e *conta173* (definido como superfície de contato). Esses elementos são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos quando há contato e separação entre os mesmos elementos quando não há contato. Os pares de contato utilizados permitem ainda a consideração do atrito entre as partes. Os valores dos coeficientes de atrito, admitidos entre os pares de contato, foram: aço-madeira = 0,50; madeira-concreto = 0,01 (visando eliminar o atrito entre as partes, pois nos ensaios experimentais foram utilizados sacos plásticos nessa interface para eliminar o atrito) e aço-concreto = 0,6 (Figura 5).

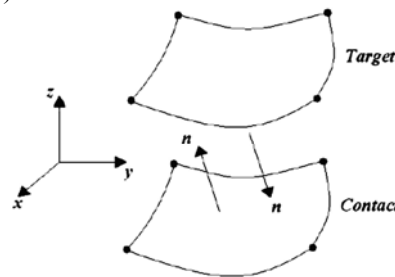


Figura 5. Elementos *conta173* e *target170*. Fonte: adaptado da documentação do ANSYS (2005).

3.3 Definição da malha de elementos finitos

O modelo foi constituído por três principais grupos de elementos: peças de concreto, peças de madeira e conectores de cisalhamento. Um quarto grupo de elementos foi constituído pelos elementos de contato na interface entre os materiais. As malhas dos elementos foram geradas e discretizadas no software TrueGrid (2001), versão 2.10, sendo posteriormente exportadas para o ANSYS (2005), onde receberam as correspondentes propriedades dos materiais, condições de vinculação e carregamentos, necessárias para a análise do sistema (Figura 6). O software TrueGrid (2001) foi uma ferramenta fundamental na geração das malhas dos elementos, devido

a necessidade de obtenção de um maior grau de refinamento nas regiões das conexões. A geração da malha foi, portanto, muito facilitada com a utilização deste *software*. A conversão da linguagem de programação do *software* TrueGrid (2001) para o ANSYS (2005) foi realizada através da utilização do recurso TEdit (2001).

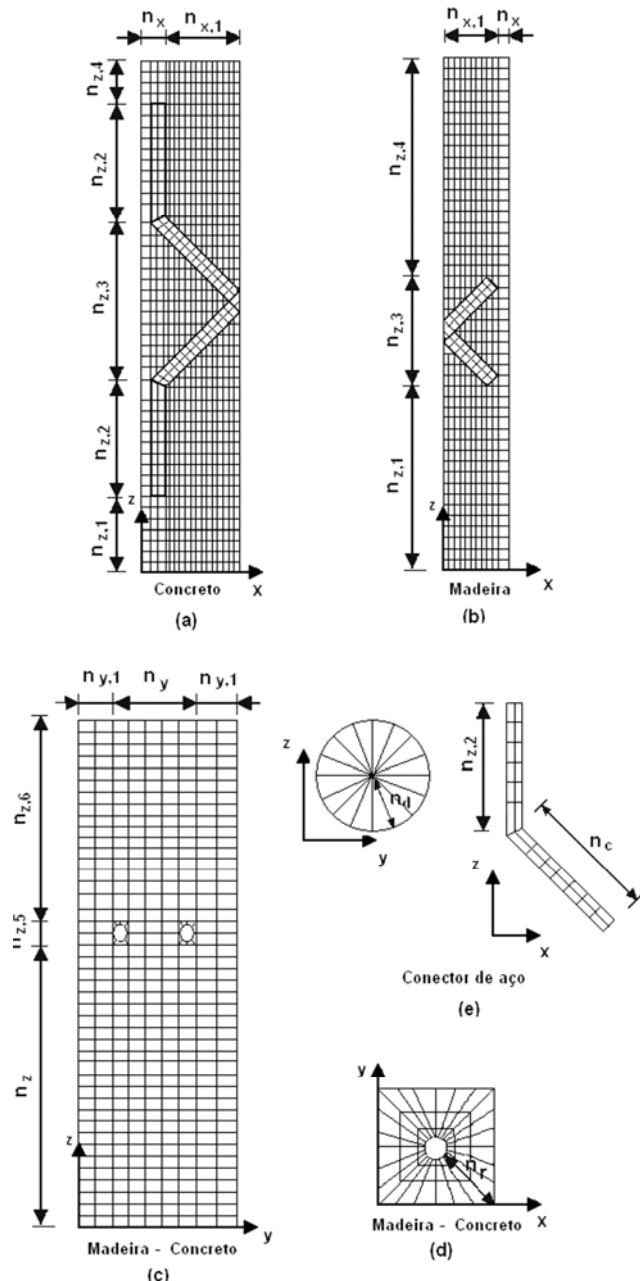


Figura 6. Parâmetros para malha de elementos finitos, considerando meia estrutura.

Onde:

n_x = número de elementos de extremidade na direção da espessura do elemento (concreto ou madeira);
 $n_{x,1}$ = número de elementos na direção da espessura do elemento (concreto ou madeira);
 n_y = número de elementos centrais na direção da largura do elemento (concreto ou madeira);
 $n_{y,1}$ = número de elementos nas extremidades na direção da largura do elemento (concreto ou madeira);

n_z = número de elementos na extremidade inferior, abaixo da linha de conectores, na direção da altura do elemento (madeira ou concreto);
 $n_{z,1}$ = número de elementos na extremidade inferior, na direção da altura do elemento (madeira ou de concreto);
 $n_{z,2}$ = número de elementos na região vertical do conector na direção da altura do elemento (concreto);
 $n_{z,3}$ = número de elementos centrais na direção da altura do elemento (madeira ou concreto);
 $n_{z,4}$ = número de elementos na extremidade superior na direção da largura do elemento (concreto ou madeira);
 $n_{z,5}$ = número de elementos centrais, na linha de conectores, na direção da altura do elemento (concreto ou de madeira);
 $n_{z,6}$ = número de elementos na extremidade superior, acima da linha de conectores, na direção da altura do elemento (madeira ou concreto);
 n_c = número de elementos, na direção inclinada do conector, considerando os trechos de madeira e também de concreto;
 n_r = número de elementos na direção do raio dos conectores (madeira ou concreto);
 n_d = número de elementos na direção da espessura do conector.

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os valores dos parâmetros utilizados na configuração das malhas de elementos finitos admitidos para os materiais. Os valores seguidos do símbolo ^(c) referem-se às peças de concreto e os valores acompanhados do símbolo ^(m) são referentes às peças de madeira.

Tabela 1. Parâmetros das malhas dos elementos.

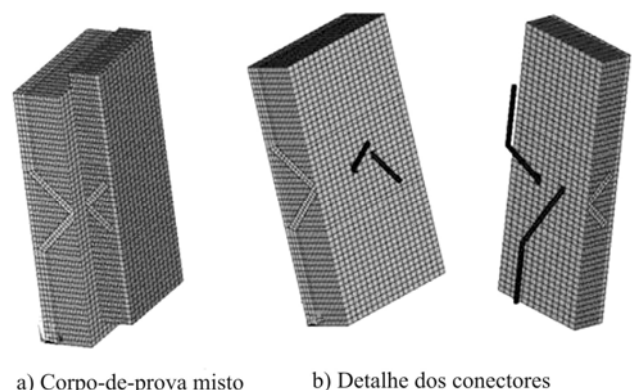
malha	n_x	$n_{x,1}$	n_y	$n_{y,1}$	n_z
m_1	3 ^(c)	14 ^(c)	5 ^(c)	7 ^(c)	24 ^(c)
	1 ^(m)	10 ^(m)	5 ^(m)	4 ^(m)	21 ^(m)

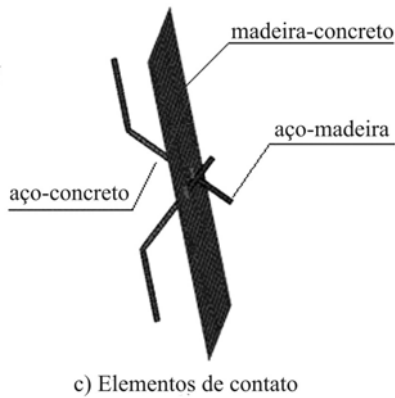
Tabela 2. Parâmetros das malhas dos elementos.

malha	$n_{z,1}$	$n_{z,2}$	$n_{z,3}$	$n_{z,4}$
m_1	7 ^(c)	10 ^(c)	14 ^(c)	4 ^(c)
	17 ^(m)	-	10 ^(m)	20 ^(m)

Tabela 3. Parâmetros das malhas dos elementos.

malha	$n_{z,5}$	$n_{z,6}$	n_r	n_c	n_d
m_1	2 ^(c)	21 ^(c)	2 ^(c)	15 ^(c)	1 ^(c)
	2 ^(m)	24 ^(m)	2 ^(m)	9 ^(m)	1 ^(m)





c) Elementos de contato

Figura 7. Detalhe dos elementos finitos no modelo numérico.

3.4 Relações constitutivas para os materiais

O comportamento do concreto na tração foi representado pelo modelo “concrete”, disponibilizado na biblioteca do ANSYS (2005), que tem como base o modelo de Willan-Warnke, através do qual é possível a simulação da fissuração do concreto quando submetido a tensões de tração. Os parâmetros para a utilização deste modelo foram os seguintes: coeficiente de transferência de cisalhamento para a fissura aberta; coeficiente de transferência de cisalhamento para a fissura fechada; resistência última uniaxial à tração (f_t); resistência última uniaxial à compressão (f_c); resistência última biaxial à compressão (f_{cb}); estado de tensão hidrostática ambiente (σ_{ha}); resistência última biaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático (f_1); resistência última uniaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático (f_2) e coeficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração. Com base no trabalho de Kotinda (2004), foram adotados para os dois primeiros parâmetros do modelo os valores 0,2 e 0,6, respectivamente. Para o terceiro parâmetro foi adotado o valor de 10% da resistência do concreto na compressão. Os últimos cinco parâmetros foram omitidos, permitindo-se ao ANSYS (2005) admitir valores pré-estabelecidos para os mesmos. A resposta do concreto na compressão, disponibilizada pelo modelo “concrete”, foi desabilitada estipulando-se para f_c igual a -1. Admitiu-se, assim, o critério de plastificação de Von Mises para o concreto na compressão. O modelo constitutivo adotado para o concreto na compressão foi do tipo multilinear com encruamento isótropo (Figura 8).

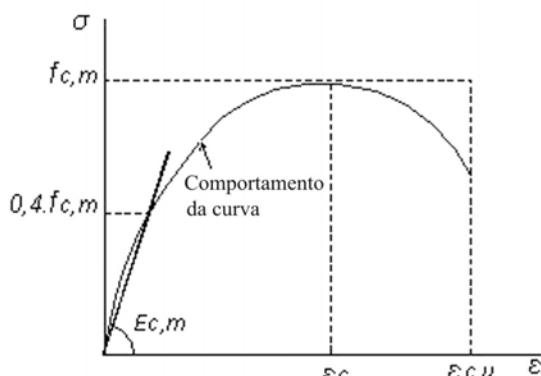


Figura 8. Modelo adotado para o concreto.

Na Figura 8 f_{cm} é o valor médio de resistência à compressão do concreto para corpo-de-prova cilíndrico, ϵ_c a deformação correspondente à tensão máxima de compressão, $\epsilon_{c,u}$ a deformação última na compressão e, $E_{c,m}$, o módulo secante de elasticidade do concreto. A curva tensão-deformação utilizada, neste caso, foi obtida a partir de ensaios experimentais realizados em corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10 cm x 20 cm.

Na modelagem da madeira admitiu-se para o material um comportamento ortotrópico (diferentes propriedades físicas para cada uma das três direções consideradas) com a utilização do critério de resistência de Hill associado ao encruamento isótropo (Figura 9).

O critério de Hill é uma extensão do critério de Von Mises (critério da máxima energia de distorção), para consideração da anisotropia dos materiais, onde a ruptura do material independe das tensões hidrostáticas e considera diferentes tensões de plastificação nas três direções principais do material.

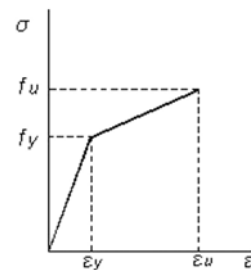


Figura 9. Modelo adotado para a madeira.

A modelagem da madeira exigiu a utilização de um total de 21 constantes, sendo estas constantes referentes às propriedades elásticas e plásticas da madeira. Por simplicidade, os comportamentos da madeira na tração e na compressão foram considerados iguais. Além disso, nenhuma distinção foi feita entre as direções radial e tangencial (isotropia transversal) e os valores considerados, neste caso, corresponderam à direção perpendicular às fibras da madeira (direção radial). As propriedades elásticas da madeira foram obtidas através de ensaios experimentais realizados em corpos-de-prova. As relações entre as propriedades elásticas da madeira foram admitidas com base nos trabalhos desenvolvidos por Ballarin e Nogueira (2003) e também na norma de madeiras ABNT (1997). Os valores das propriedades plásticas da madeira, assim como as relações entre eles, foram tomados com base nos trabalhos de Dias (2005) e Flores, Rioseco e Matamal (2007). Admitiu-se, no presente trabalho, para o valor da tensão última de plastificação da madeira (σ_z), na direção das fibras, o valor da resistência da madeira na compressão. No ANSYS (2005), o eixo de coordenadas “z” correspondeu à direção longitudinal das fibras da madeira, o eixo “y” à direção radial, e o eixo “x” à direção tangencial. As constantes utilizadas para a modelagem numérica da madeira, assim como as relações utilizadas entre elas, estão apresentadas na sequência.

Propriedades elásticas da madeira:

$E_{x\pm}$ = módulo de elasticidade na direção tangencial;

$E_{y\pm}$ = módulo de elasticidade na direção radial;
 $E_{z\pm}$ = módulo de elasticidade na direção longitudinal (compressão);
 ν_{xy} = coeficiente de Poisson no plano xy;
 ν_{yz} = coeficiente de Poisson no plano yz;
 ν_{xz} = coeficiente de Poisson no plano xz;
 G_{xy} = módulo de elasticidade transversal no plano xy;
 G_{yz} = módulo de elasticidade transversal no plano yz;
 G_{xz} = módulo de elasticidade transversal no plano xz;

Propriedades plásticas da madeira:

$\sigma_{x\pm}$ = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção x;
 $\sigma_{y\pm}$ = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção y;
 $\sigma_{z\pm}$ = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção z;
 $E_{Tx\pm}$ = módulo tangente (tração e compressão) na direção x;
 $E_{Ty\pm}$ = módulo tangente (tração e compressão) na direção y;
 $E_{Tz\pm}$ = módulo tangente (tração e compressão) na direção z;
 τ_{xy} = tensão cisalhante de plastificação na direção xy;
 τ_{yz} = tensão cisalhante de plastificação na direção yz;
 τ_{xz} = tensão cisalhante de plastificação na direção xz;
 G_{Txy} = módulo tangente de corte no plano xy;
 G_{Tyz} = módulo tangente de corte no plano yz;
 G_{Txz} = módulo tangente de corte no plano xz;

Relações entre as propriedades elásticas da madeira:

$E_x = E_y = (E_z/10)$;
 $G = G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = (E_z/20)$;
 $\nu_{xy} = 0,23$; $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,013$
 $G_{Txy} = G_{Tyz} = 1,8$; $G_{Txz} = 0,0018$

Relações entre as propriedades plásticas da madeira:

$\sigma_z = f_{c0,m} = f_u$
 $(\sigma_y / \sigma_z) = (\sigma_x / \sigma_z) = 0,19$
 $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0,38\sigma_z$; $\tau_{xz} = 0,038\sigma_z$
 $E_{Tx} = E_{Ty} = 0,41$; $E_{Tz} = 28$

Para os conectores de cisalhamento foi adotado um modelo bi-linear, com encruamento isótropo, e critério de plastificação de Von Mises (Figura 10). A caracterização do comportamento isotrópico admitido para o aço exigiu a utilização de quatro constantes: E (Módulo de elasticidade), σ_p (tensão de plastificação), E_T (módulo tangente) e ν (coeficiente de Poisson). Os valores das referidas constantes, neste caso, foram os mesmos utilizados por Flores, Rioseco e Matamal (2007).

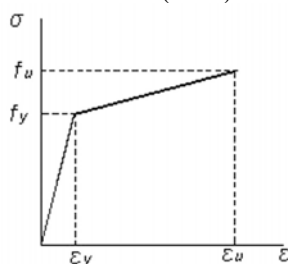


Figura 10. Modelo adotado para o aço dos conectores.

A relação constitutiva utilizada para o aço da armadura também seguiu o critério de Von Mises, sendo representada, neste caso, por meio da curva tensão versus deformação, com base em um modelo elasto-plástico perfeito (Figura 11). A fim de evitar problemas numéricos no trecho da curva que vai de ϵ_y a ϵ_u foi considerada uma pequena inclinação de $E/1000$.

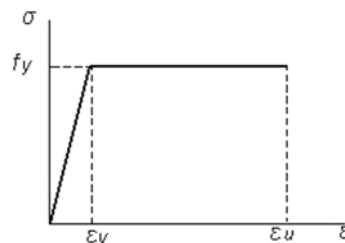


Figura 11. Modelo adotado para o aço da armadura.

3.5 Condições de contorno, vinculação e carregamento

Para garantir a estabilidade do modelo durante a aplicação do carregamento foram respeitadas as condições de simetria e também de vinculação dos nós dos apoios. O modelo analisado foi vinculado em concordância com o ensaio experimental (ver Figura 12), porém, considerando-se metade da estrutura. Vale lembrar que os nós dos elementos utilizados nos modelos apresentam apenas três graus de liberdade que são referentes às translações em X, Y e Z.

A intensidade da força F, aplicada no modelo, foi definida por meio da divisão da força última da ligação, $F_{0,002}$, correspondente a deformação 2%, segundo a ABNT [87, estimada na análise experimental pelo número de nós presentes na região relativa a aplicação da força.

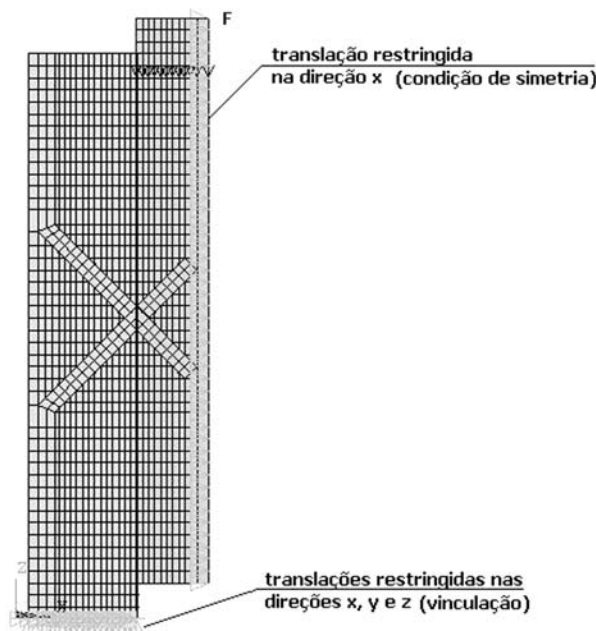


Figura 12. Vinculação e condições de simetria do modelo.

Inicialmente, efetuou-se a calibração do modelo numérico a partir de carregamento estático aplicado, sendo a validação do modelo efetuada a partir da comparação

com a curva experimental força versus deslocamento. Posteriormente, o modelo foi submetido a carregamento cíclico (simulação por carga “quasi” estática) variando entre 40% e 5% (sendo $F_{40\%} = 23,28\text{kN}$ e $F_{5\%} = 2,91\text{kN}$.) do valor $F_{0,002}$, para um total de 20 ciclos de carga (Figuras 13 e 14).

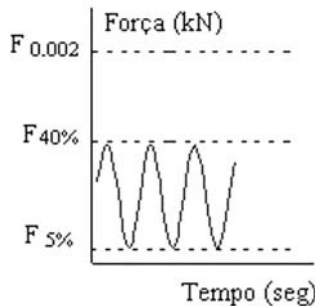


Figura 13. Níveis de carregamento cíclico ($R=0,125$) admitidos na verificação da rigidez (K).

Os valores de rigidez K foram obtidos numericamente a partir da equação (1), para o nível máximo de força aplicada, $F_{40\%}$, a cada cinco ciclos de carga aplicados.

$$K = \frac{F_{40\%}}{\delta_{40\%}} \quad (1)$$

Onde:

$F_{40\%}$ = valor da carga cíclica máxima aplicada no ensaio;

$\delta_{40\%}$ = valor do deslocamento referente a carga $F_{40\%}$.

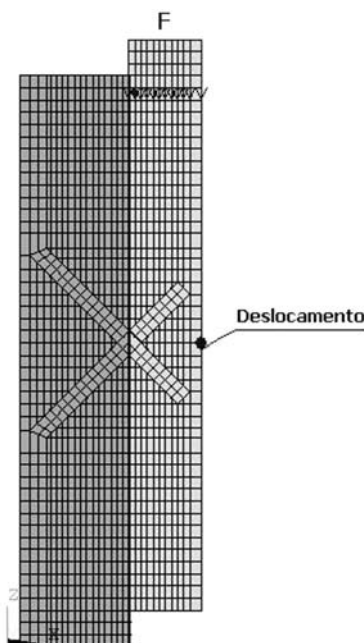


Figura 14. Local de medida dos deslocamentos $\delta_{40\%}$.

3.6 Aspectos da análise não linear

Os carregamentos foram aplicados de forma incremental, devido à consideração da não linearidade física. O incremento de carga foi controlado utilizando-se o recurso do ANSYS (2005) denominado “Automatic Time Stepping”. De acordo com a documentação do ANSYS

(2005), o recurso citado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15%, ou ainda, deslocamentos excessivos. O valor do incremento pode também ser aumentado caso o processo venha a convergir de forma sistemática na primeira iteração. O controle dos passos de carga foi efetuado a partir da opção “Time increment”, onde foram admitidos os seguintes valores: *Time Step Size* = 1,0; *Minimum Time Step* = 0,1 e *Maximum Step Size* = 1,0. Utilizou-se como parâmetro de convergência uma tolerância igual a 0,001.

3.7 Valores de calibração para o modelo numérico

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os valores das constantes dos materiais utilizados na calibração do modelo numérico.

As constantes apresentadas (parâmetros) são relativas às propriedades elásticas e plásticas dos materiais envolvidos.

Tabela 4. Constantes para o aço dos conectores.

Parâmetro	Valor	Unidade
E	21000	kN/cm^2
σ_p	50	kN/cm^2
E_T	380	kN/cm^2
ν	0,3	-
ρ	$7,85\text{E-}05$	kN/cm^3

Tabela 5. Constantes para o aço das armaduras.

Parâmetro	Valor	Unidade
E	21000	kN/cm^2
σ_p	50	kN/cm^2
E_T	21	kN/cm^2
ν	0,3	-
ρ	$7,85\text{E-}05$	kN/cm^3

Tabela 6. Constantes para o concreto.

Parâmetro	Valor	Unidade
E	2632,34	kN/cm^2
σ_p	2,811	kN/cm^2
ν	0,2	-
ρ	$2,50\text{E-}05$	kN/cm^3

Tabela 7. Constantes para a madeira.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
$E_{x\pm}$	197	kN/cm^2	G_{xy}	98,40	kN/cm^2
$E_{y\pm}$	197	kN/cm^2	G_{yz}	98,40	kN/cm^2
$E_{z\pm}$	1968	kN/cm^2	G_{xz}	98,40	kN/cm^2
ν_{xy}	0,23	-	-	-	-
ν_{yz}	0,013	-	-	-	-
ν_{xz}	0,013	-	ρ	$1,0\text{E-}05$	kN/cm^3
$\sigma_{x\pm}$	1,19	kN/cm^2	$E_{Tx\pm}$	0,41	kN/cm^2
$\sigma_{y\pm}$	1,19	kN/cm^2	$E_{Ty\pm}$	0,41	kN/cm^2
$\sigma_{z\pm}$	6,28	kN/cm^2	$E_{Tz\pm}$	28	kN/cm^2
τ_{xy}	2,39	kN/cm^2	G_{Txy}	1,8	kN/cm^2
τ_{yz}	2,39	kN/cm^2	G_{Tyz}	1,8	kN/cm^2
τ_{xz}	0,24	kN/cm^2	G_{Txz}	0,0018	kN/cm^2

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na calibração do modelo, a curva experimental apresentada na Figura 15 foi plotada para o valor último de ruptura, obtido no ensaio experimental ($F=61,16\text{kN}$).

A curva numérica foi plotada até o ponto máximo onde foi possível a convergência dos resultados em correspondência a uma tolerância de 0,001. Neste caso, não foi possível a obtenção do comportamento da curva para o valor de força última aplicada.

Os resultados foram apresentados para um único corpo-de-prova, em função do processamento completo do modelo numérico ter demandado uma grande quantidade de tempo.

Além disso, um dos objetivos deste trabalho foi apresentar a estratégia de modelagem numérica utilizada para a avaliação da rigidez K da ligação mista a partir do número de ciclos de carga aplicados.

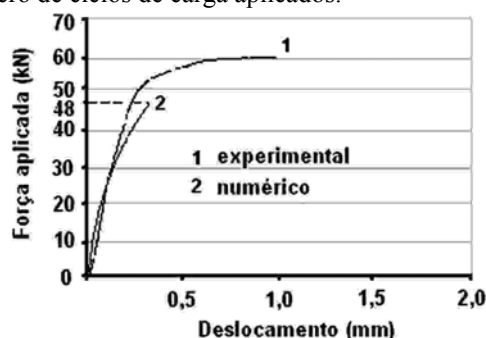


Figura 15. Calibração do modelo numérico.

A curva de calibração força versus deslocamento, obtida para o modelo numérico, tendeu a uma inclinação ascendente, logo após o início do trecho não linear. Esse comportamento, fenômeno conhecido como “travamento numérico” se deve ao fato do elemento finito SOLID45, utilizado na modelagem da peça de madeira, ser um elemento bastante simples e pouco flexível. Neste caso, por mais que se refine a malha dos elementos não se obtém melhoras no comportamento desta curva.

Por outro lado, as diferenças observadas entre as curvas numéricas e experimentais podem ser atribuídas a vários fatores. Dentre eles tem-se que a modelagem da madeira não é uma tarefa fácil devido a possibilidade de existência de imperfeições (distorções nas direções das fibras e presença de nós) que influenciam no seu comportamento. Geralmente a madeira é caracterizada por três direções ortogonais, ou seja, direção longitudinal (paralela as fibras), tangencial e radial, tendo cada uma das direções do material propriedades mecânicas diferentes das outras duas direções, como também comportamentos diferentes na tração e na compressão. Na compressão, o comportamento da madeira é relativamente plástico, podendo ser aproximado por uma lei constitutiva elasto-plástica com endurecimento. Na tração o comportamento da madeira é frágil e, neste caso, o modelo elasto-plástico não representa verdadeiramente o comportamento do material.

As curvas numéricas e experimentais que relacionam a força aplicada com os deslocamentos obtidos estão apresentadas nas Figuras 16 e 17.

O nó da malha do modelo numérico, conforme indicado na Figura 14, para o qual foram tomados os valores de deslocamento, correspondeu ao ponto de medida dos deslocamentos no ensaio experimental, realizado no corpo de prova misto.

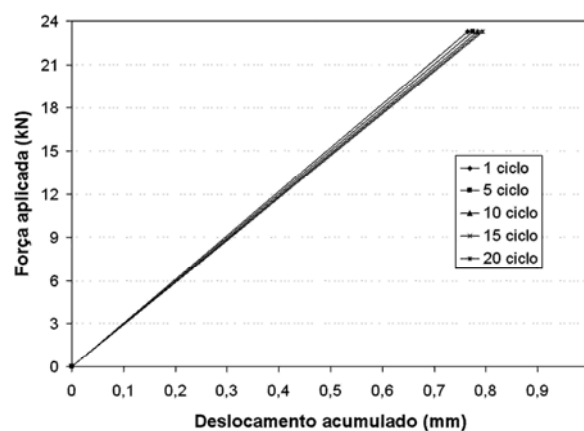


Figura 16. Curvas experimentais Força versus Deslocamento a cada 5 ciclos de carga ($F_{40\%}=23,28\text{kN}$).

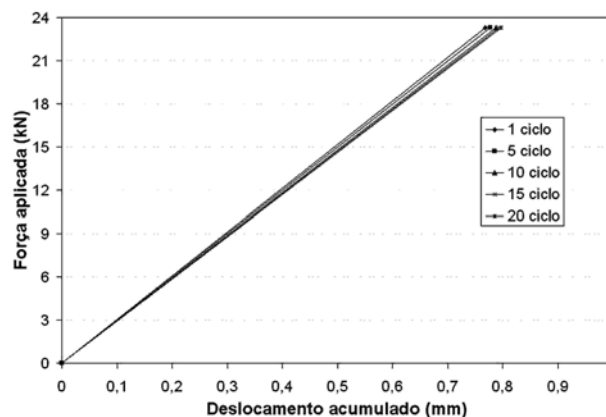


Figura 17. Curvas numéricas Força versus Deslocamento a cada 5 ciclos de carga ($F_{40\%}=23,28\text{kN}$).

Nas Figuras 16 e 17 observou-se que as inclinações das curvas diminuíram com o aumento do número dos ciclos de carga, significando que os ciclos de carga afetam a rigidez do sistema de conexão a partir do acúmulo dos valores de deslocamentos.

A Tabela 8 apresenta a comparação entre os resultados de rigidez, K , obtidos a partir do modelo numérico proposto e também experimentalmente. Os resultados, neste caso, foram apresentados a cada cinco ciclos de carga, para um total de 20 ciclos de carga aplicados.

Tabela 8. Resultados de rigidez “ K ” ($F_{40\%}=23,28\text{kN}$).

Número de ciclos de carga	Rigidez/conector (Experimental) (kN/mm)	Rigidez/conector (Numérico) (kN/mm)
1	30,26	30,63
5	29,94	30,02
10	29,55	29,68
15	29,36	29,49
20	29,17	29,32

Após 20 ciclos de carga (ver Figura 18) observou-se que as tensões equivalentes nos materiais madeira e concreto, nas regiões dos conectores, ultrapassaram as resistências médias à compressão admitidas para os respectivos materiais na calibração do modelo. Em decorrência desse fato surgiram nestas regiões deformações permanentes que provocaram a perda de rigidez “K” do sistema misto de conexão.

Além disso, os valores das máximas tensões de compressão, nas regiões dos conectores, foram aproximadamente quatro a cinco vezes maiores que os valores das tensões nas bases de apoio dos referidos modelos. Observou-se ainda que em nenhuma região dos conectores foi atingida a tensão de escoamento do aço.

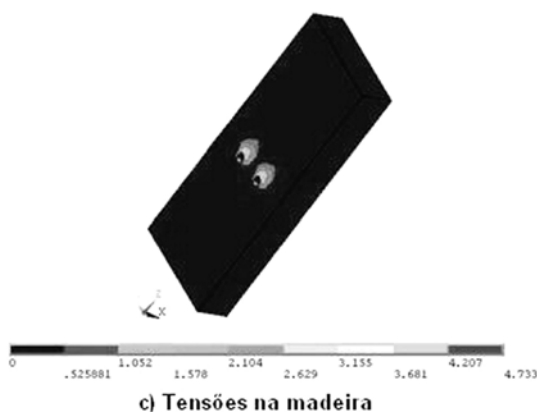
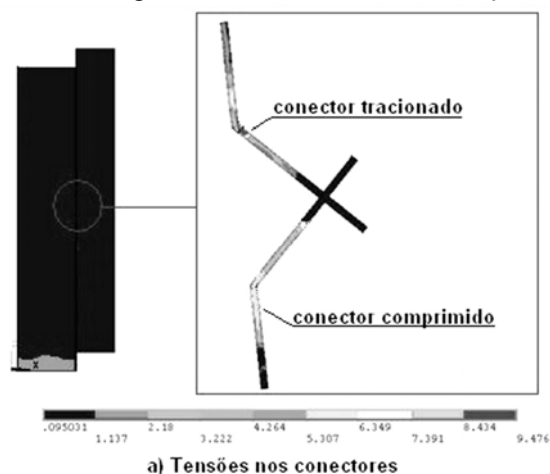


Figura 18. Estado de tensão (kN/cm^2) no modelo após 20 ciclos de carga ($F_{40\%}=23,28\text{kN}$).

Os parâmetros que mais influenciaram na modelagem numérica do sistema misto foram as propriedades físicas da madeira, sendo que as propriedades dos três materiais apresentaram influências.

Das propriedades físicas da madeira a mais importante em termos de simulação numérica foi a tensão de plastificação. Logo que se iniciou o processo de carga, se iniciou também o processo de plastificação e, por esta razão, as propriedades elásticas perderam quase que completamente a influência no início do comportamento da curva força versus deslocamento.

Simulações com baixos valores de tensão de plastificação e de tensão cisalhante de plastificação, para a direção perpendicular às fibras, resultaram em problemas de instabilidades numéricas.

As propriedades plásticas da madeira tiveram grandes influências na rigidez do sistema, pois aumentos na tensão de plastificação implicaram em acréscimos na resistência e rigidez dos sistemas mistos como um todo.

A propriedade elástica da madeira não teve grande influência no comportamento das curvas Força versus Deslocamento. Porém, se os valores dessas propriedades forem muito baixos os cálculos não convergem.

As simulações utilizando diferentes coeficientes de Poisson apresentaram os mesmos resultados, indicando que os modelos não dependem desse coeficiente. No entanto, coeficientes de Poisson com valores próximos de 0,5 tenderam a apresentar problemas de convergência após o trecho linear da curva, fenômeno este conhecido como “travamento volumétrico”.

5 – CONCLUSÕES

A perda de rigidez, K, da conexão pode ser obtida numericamente, a partir de carregamento cíclico, simulado por cargas “quasi-estáticas”, para carregamentos de serviço.

O modelo numérico tridimensional proposto foi capaz de simular o comportamento mecânico do sistema misto analisado, não somente na fase elástica linear, mas também no início da fase não linear, quando se inicia o processo de plastificação dos materiais.

No modelo numérico foi observada uma maior concentração de tensões na dobra do conector tracionado, no interior da peça de concreto.

No conector comprimido, a maior concentração de tensões ocorreu na região da interface madeira-concreto, indicando os possíveis locais de formação de rótulas plásticas, comuns neste tipo de conexão.

Os conectores tracionados foram solicitados em 22% a mais que os conectores comprimidos.

Os resultados obtidos numericamente são válidos, pois apresentaram correspondência com os resultados experimentais, para carregamentos de serviço.

As simulações numéricas, a partir do modelo tridimensional, possibilitaram a análise do comportamento do sistema misto, não somente no que se refere ao aspecto global a partir da relação força versus deslocamento, mas também com relação aos aspectos localizados, como a

verificação das tensões nas regiões dos conectores e demais regiões componentes do modelo.

A estratégia de modelagem desenvolvida pode ser utilizada, apresentando bons resultados, para carregamentos de serviço, desde que as propriedades elásticas e plásticas dos materiais utilizados no modelo sejam definidas.

O erro obtido entre os resultados numéricos e experimentais na calibração do modelo foi de até 15%. Com relação aos valores de rigidez K, o erro obtido de aproximadamente 2%.

A partir do modelo numérico proposto não foi possível prever o comportamento da curva força versus deslocamento para valores últimos de ruptura, pois os elementos finitos utilizados nos referidos modelos consideram somente efeitos de elasticidade e plasticidade dos materiais.

A simulação do comportamento da curva Força versus Deslocamento, em níveis de carga última, requer a utilização de elementos finitos que considerem, além dos efeitos de elasticidade e plasticidade dos materiais, também efeitos de dano.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP pelo apoio financeiro da pesquisa realizada.

REFERÊNCIAS

- ANSYS versão 10.0 Documentation. **ANSYS**, Inc. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. **Projeto de Estruturas de Madeira**. ABNT. Rio de Janeiro. 1997.
- BALARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. **Caracterização elástica da Madeira de Eucalipto citriodora**, Cerne, V9, N.1, p. 066-080. 2003
- DIAS, A. M. P. G. **Mechanical behavior of timber-concrete joints**. Thesis (Doctorate) – University of Coimbra, Portugal, 2005. 293 p.
- FLORES, E. S.; RIOSECO, C. A.; MATAMAL, A. V. **Calibración del modelo de Hill modificado para el Pino Radiata cileno en conexiones de cizalle doble sometidas a compresión paralela**. In: II Jornadas Chilenas de Estructuras de Madera, Santiago, Chile, 12 a 15 de Novembro. 2007.
- KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje – viga**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2004. 87 p.
- PIGOZZO, J. C. **Estudo e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2004. 343 p.
- TGEdit, **TrueGrid Edit Mesh –file**. 2001.
- TRUEGRID versão 2.10 **Documentation**. 2001.