

**DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS MISTAS
MADEIRA/CONCRETO**

Lúcio Flávio Nunes Moreira

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS MISTAS
MADEIRA/CONCRETO"**

Lúcio Flávio Nunes Moreira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Eduardo Chahud
DEES/UFMG - (Orientador)

Prof. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES/UFMG

Prof. Antônio Alves Dias
EESC/USP

Belo Horizonte, 04 de setembro de 2001

Capítulo I

Introdução

1.1. Generalidades

Aplicar o material certo no lugar certo da estrutura, sem dúvida, é um dos requisitos básicos para um projeto ideal. Com este pensamento houve, nas décadas de 30 e 40, um grande desenvolvimento de estudos teóricos / experimentais para a utilização de vigas mistas aço /concreto.

Podemos afirmar que a grande capacidade de resistência à compressão do concreto aliada à grande resistência à tração do aço tornou este tipo de estrutura, extremamente atrativa.

Mais recentemente, tem-se pesquisado outros tipos de estruturas compostas, sendo uma delas, a de madeira/concreto. A madeira, como o aço, resiste bem a tração e sua combinação com o concreto passou a levar interesse em diversas pesquisas analíticas e experimentais. Os resultados destas pesquisas conduziram a projetos e construções de inúmeras estruturas como pontes, edifícios residenciais, comerciais, galpões, etc.. E além disso, a estrutura mista madeira/ concreto, tem grande utilidade em reconstrução e recuperação de pisos antigos, construídos com tábuas de madeira, apoiadas em barrotes (vigas de madeira).

As vantagens da estrutura mista madeira/ concreto em relação ao piso de madeira são várias, entre elas, maior rigidez, melhor resistência ao fogo, melhor comportamento térmico e acústico.

Comparando com a laje maciça de concreto ou com a estrutura mista aço/ concreto, tem-se menor peso próprio e melhor aparência estética.

Deve-se também lembrar que entre os materiais estruturais a madeira é o único renovável e que sua produção exige um baixo consumo energético.

No entanto para se projetar uma viga T com alma de madeira serrada maciça e mesa de concreto armado, solidarizados por pinos metálicos com sucesso, é necessário solucionar alguns problemas básicos, tais como :

1. Análise de tensões e deformações;
2. Escolha e projeto adequados dos elementos de ligação (conectores).

Muito pouco tem-se feito neste campo no Brasil. As Normas Internacionais, na sua grande maioria e as Normas Brasileiras não tratam de dimensionamento à flexão de vigas compostas madeira / concreto.

Devido a isso, e aproveitando os programas experimentais desenvolvidos no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e no laboratório da Universidade de Campinas (UNICAMP), a intenção é apresentar um modelo analítico teórico para dimensionamento de vigas mistas madeira / concreto, juntamente com um modelo numérico, utilizando o programa de computador SAP.2000.

A viga mista madeira/concreto citada neste trabalho é apresentada esquematicamente, na figura 1.1.

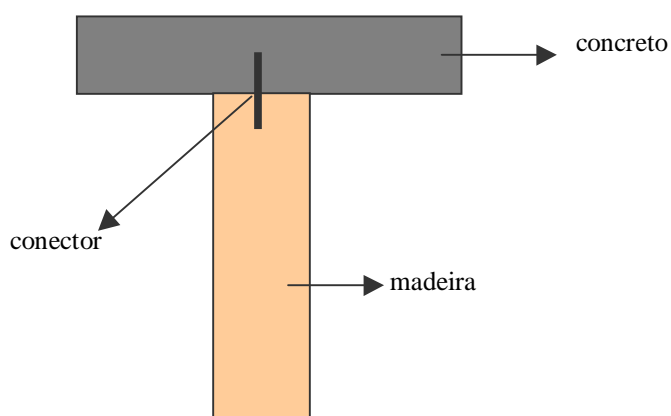


Figura 1.1.

1.2. Objetivos :

Os objetivos deste trabalho são :

- a) Apresentar um modelo analítico / teórico de dimensionamento à flexão de vigas mistas madeira / concreto solidarizados por pinos metálicos.
- b) Apresentar um modelo numérico , com auxílio do programa de computador SAP.2000.
- c) Apresentar resultados experimentais obtidos, em ensaios de flexão em vigas mistas madeira/concreto, na literatura consultada.
- d) Comparar resultados experimentais com os resultados analíticos e numéricos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

1.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre as estruturas mistas madeira/concreto, sobre os tipos de conectores mais utilizados e uma pequena abordagem sobre as estruturas mistas aço/concreto.

A abordagem das estruturas mistas aço/concreto tem como objetivo situar o estágio atual de desenvolvimento das estruturas mistas madeira / concreto.

1.2. Vigas Mistas Aço / Concreto

Vigas de aço encamisadas com concreto foram muito utilizadas por volta de 1900, para proteção contra incêndio. Em 1930 grandes pontes utilizaram vigas compostas aço / concreto e a partir de 1960 tornou-se econômica a utilização de tais vigas em edifícios.

MACKAY et al. [1923] estudaram as vigas encamisadas por concreto e concluíram que para trabalharem monoliticamente era necessário providenciar uma perfeita interação entre o concreto e o aço.

CAUGHEY [1929] recomendou que a viga mista aço / concreto deveria ser dimensionada com base na seção homogênea, onde a área da laje de concreto seria transformada numa área equivalente de aço.

ROS [1934] recomendou que se utilizasse conectores entre o perfil de aço e a laje de concreto para se fazer a ligação entre ambos. Desde 1930 os estudos de conectores já vinham sendo feitos.

A ação composta é desenvolvida quando os dois elementos da seção, laje de concreto e viga de aço, são integralmente conectados e deformam como uma peça única.

MARGUERRE [1952] propôs uma expressão para a rigidez efetiva das seções :

$$(EI)_{comp} = E_s I_s + E_c I_{laje} + \frac{E_s A_s E_c (2tb_{es}) h^2}{E_s A_s + E_c (2tb_{es})}$$

Sendo :

E_s = módulo de elasticidade do aço

E_c = módulo de elasticidade do concreto

$E_s I_s$ = rigidez de flexão da viga de aço

I_{laje} = momento de inércia da laje do concreto

A_s = área da seção transversal da viga de aço

t = metade da espessura da laje de concreto

h = distância entre o eixo neutro da viga de aço e o eixo neutro da laje de concreto.

b_{es} = largura efetiva de cisalhamento

$(EI)_{comp}$ = rigidez efetiva da seção composta.

Para determinar as propriedades geométricas da seção mista é necessário utilizar o conceito de largura efetiva.

A intensidade da tensão de compressão σ_x na seção, é máxima sobre a viga de aço e decresce, não linearmente, à medida que se afasta da viga.

A largura efetiva pode ser tomada então como $b_E = b_f + 2b'$ onde b_f é a largura da viga de aço e $2b'$ é igual à área sob a curva de σ_x , conforme mostrado na Figura 2.1.

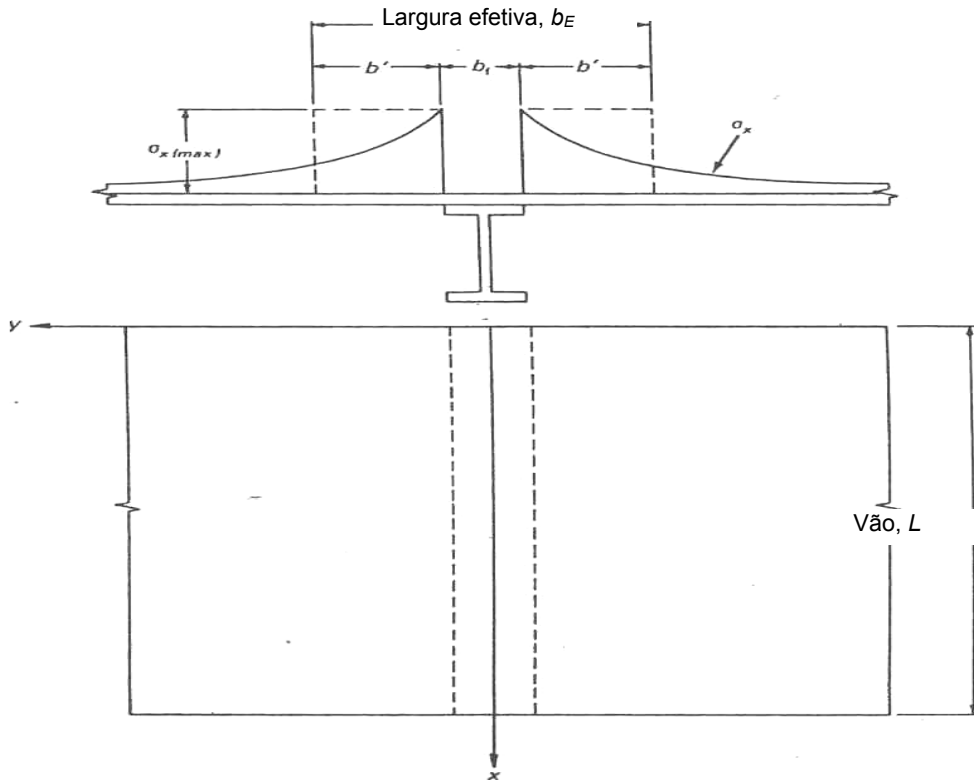


Figura 2.1.

Vários autores estudaram o valor de largura efetiva, incluindo TIMOSHENKO E GOODIER [1959] que realizaram uma análise de sua determinação exata, considerando a teoria de elasticidade aplicada às placas.

VIEST [1960] publicou que um importante fator na ação composta da viga aço / concreto seria a perfeita união entre ambos. Passou-se então a projetar-se os conectores de ligação para suportarem o cisalhamento existente entre a viga de aço e a laje de concreto. O conector provinha a interação necessária para a ação composta da viga mista.

JOHNSON E LEWIS [1966] mostraram que, para carregamento que produz momento fletor com a forma de uma meia senóide, a largura efetiva é dada por :

$$b_E = b_f + \frac{2L}{\pi(3 + 2\mu - \mu^2)}$$

Sendo :

b_E = largura efetiva

L = vão da viga

b_f = largura da viga de aço

μ = coeficiente de Poisson do concreto.

ADEKOLA [1968] propôs uma base racional para a determinação de larguras efetivas. Assumiu a ausência de escorregamento entre a viga de aço e a laje de concreto e empregou séries harmônicas na determinação de larguras efetivas para várias dimensões e espessuras das lajes. Concluiu que a largura efetiva varia apreciavelmente ao longo do vão da viga bi-apoiada e é mínima no ponto de momento máximo.

HIRST E YEO [1980] utilizaram o Método dos Elementos Finitos para análise de vigas mistas já estudadas por outros autores. A viga de aço e a laje de concreto foram simuladas por elementos isoparamétricos parabólicos. Obtiveram resultados bem próximos dos obtidos experimentalmente e analiticamente.

ARIZUMI E HAMADA [1981] também utilizaram o Método dos Elementos Finitos, adicionando um elemento de mola para simular os conectores de cisalhamento. Os resultados encontrados tiveram boa precisão em relação aos ensaios experimentais.

SALMON [1990] demonstrou que o cisalhamento horizontal que se desenvolve entre a mesa de concreto e alma de uma viga mista, pode ser resistido desde que a seção comporte-se como se fosse homogênea.

Não se pode depender apenas da aderência entre o concreto e o aço para se obter a interação necessária, os conectores de cisalhamento devem ser utilizados.

GJELSVILK [1991] realizou trabalho sobre largura efetiva de vigas mistas aço / concreto, desenvolvendo um método que leva em conta o efeito de redução do fluxo de cisalhamento e o deslizamento relativo entre a laje de concreto e a viga de aço.

Concluiu que a utilização do Método dos Elementos Finitos é a melhor ferramenta para resolver os problemas de vigas, envolvendo deformações de cisalhamento,

mas, em geral, por dificuldade de utilização deste método, o cálculo da largura efetiva é realizado através de expressões aproximadas conforme indicadas em Normas, como por exemplo o EUROCODE 4 [1992].

VALLENILLA E BJORHOVDE [1995] realizaram uma análise comparativa entre os vários critérios adotados em Normas, na determinação da largura efetiva das vigas mistas aço / concreto. Concluíram que a flexão de vigas mistas de aço / concreto é mais influenciada pelo vão da viga, pela largura da mesa e pela proporção do esforço de cisalhamento. A geometria da viga, dimensões dos conectores e resistência do concreto não têm grande importância. Com relação a largura efetiva, obtiveram a relação entre os parâmetros que influenciam o comportamento da viga mista e definiram, com base no vão da viga, os seguintes valores para a largura efetiva :

$$\text{Classe 1 : } b_E = L / 12$$

$$\text{Classe 2 : } b_E = L / 8$$

Sendo o fator da Classe 1 utilizado quando o grau de interação é menor do que 0,5 e o fator de Classe 2 para o grau de interação maior ou igual a 0,5.

BATISTA [1995] realizou trabalho com viga composta de aço / madeira, determinando a razão dos módulos de elasticidade de cada material.

$$n = \frac{E_m}{E_a}$$

Equilibrou a força externa P, axial, pelo somatório das cargas absorvidas pelo aço e pela madeira, obtendo a expressão.

$$P = \sigma_m A_m + \sigma_a A_a$$

Sendo:

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m, \quad \sigma_a = E_a \varepsilon_a \quad e \quad \varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_m$$

$$A = A_m + \frac{E_a}{E_m} \cdot A_a$$

Definindo então o módulo de elasticidade da seção transformada:

$$E = \frac{E_m E_a A_a + E_m^2 A_m}{E_m A_m + E_a A_a}$$

e a rigidez do conjunto :

$$EI = (I_m + nI_a)E$$

CORADI [1997] estudou diferentes tipos de pisos mistos sujeitos a cargas uniformemente distribuídas. Utilizou o programa de elementos finitos Ansys, versão 5.0, para desenvolver o modelo e para realizar a análise elástica parametrizada.

Após os resultados recomendou que, para levar em conta o efeito do escorregamento entre a laje e a viga, no caso de interação total, a flecha deve ser multiplicada por 1,10 e para interação parcial o EUROCODE 4 [1992] pode ser seguido.

1.3. Vigas Mistas Madeira / Concreto

A utilização do concreto no lado comprimido e da madeira no lado tracionado faz a viga mista madeira / concreto utilizar as melhores propriedades de cada material. Com isto obtem-se uma estrutura eficiente, rígida e leve ao mesmo tempo.

A estrutura mista madeira / concreto é muito popular em diversos países, tanto para restaurações de velhas estruturas como para novas construções. Nos 30 anos de utilização de seções mistas, poucos problemas têm sido relatados. No entanto em nenhum país existe uma Norma específica para as estruturas mistas madeira / concreto.

Em seguida serão citados alguns artigos que relatam o comportamento de uma viga com seção T em madeira / concreto.

GOMES [1974] realizou estudo teórico experimental de vigas de seção T compostas por madeira / concreto, utilizando pregos como elemento de solidarização entre a mesa de concreto e alma de madeira.

Concluiu que as vigas têm um bom comportamento estrutural e que as cargas admissíveis obtidas experimentalmente coincidem com as cargas admissíveis teóricas, mas as deformações teóricas são bem maiores que as deformações experimentais.

LINDEN [1994] utilizou o Método dos Elementos Finitos para modelar uma viga T composta de madeira / concreto e um piso composto por cinco vigas com a mesma geometria.

Concluiu que a plasticidade é importante para a redistribuição das cargas dentro do sistema. Nestes sistemas o fator de carga depende da geometria do piso. A deformação nas vigas de madeira, as dimensões da laje de concreto e viga de madeira bem como as características dos conectores são fundamentais para o comportamento do sistema.

CECCOTTI [1995] descreveu as estruturas compostas madeira / concreto comentando as diversas vantagens deste tipo de estrutura. Descreveu os diversos tipos de conectores, como pregos, pinos, chapas metálicas, cola e outros, caracterizando as ligações como rígidas ou semi-rígidas. Chamou a atenção para a importância da determinação do módulo de deslizamento, K_{ser} , da conexão, pois é ele que determina a rigidez da ligação, afetando diretamente a distribuição das tensões na seção transversal.

STEVANOVIC [1996] apresentou métodos de cálculo de flechas e forças nas seções de madeira / concreto, bem como esforço cortante entre os dois materiais, para seções compostas submetidas à cargas transversais e axiais. Na ausência de número suficiente de trabalhos teóricos e experimentais para aplicação dos conceitos de estados limites, o estudo foi baseado na teoria da elasticidade.

As hipóteses básicas assumidas foram :

1. A madeira e o concreto são materiais elásticos, isotrópicos e a lei de Hooke é válida.
2. A hipótese de Bernoulli é válida, isto é, as seções planas permanecem planas após a deformação.
3. A seção transversal é constante.
4. A madeira e o concreto têm mesma deformação em qualquer ponto da conexão.
5. A carga axial é aplicada no centro de gravidade da seção de concreto.

Utilizando a teoria da elasticidade, determinou-se os momentos fletores no concreto e na madeira, a força normal no concreto e o esforço cortante entre a madeira e o concreto.

Concluiu que um dos problemas do método utilizado é o fato de ser baseado em que os materiais adotam uma relação linear entre tensões e deformações, o que é válido para materiais elásticos. E é sabido que nas seções mistas madeira / concreto o comportamento não é este.

Considera que talvez este seja um dos motivos da baixa utilização de seções mistas madeira / concreto em edificações.

NATTERER et al. [1996] apresentaram estudo analisando a viabilidade da utilização da seção composta madeira / concreto em pisos de edifícios. Comentaram que as estruturas simples de madeira são utilizadas para vãos entre 3m e 6m. Para vãos entre 7 e 15m a seção mista madeira / concreto é bastante interessante.

Concluíram que os pisos podem ser usados em uma grande variedade de construções, inclusive em pontes.

GUTKOWSKI E CHEN [1996] utilizaram os programas FEABEA (Finite Element Analisis of Beams) e FEAFLo (Finite Element Analisis of Floors) , da Universidade de Colorado para explorarem o comportamento das vigas T de madeira / concreto, obtendo resultados bastante satisfatórios.

CAPRETTI E CECCOTTI [1996] monitoraram vigas compostas madeira / concreto durante 05 anos, para verificar o comportamento delas por longo período perante condições higrotermais variadas.

Três vigas compostas com 10m de vão, em uma escola na Itália, foram monitoradas analisando deflexões, umidade e condições higrotermais em ambiente fechado.

Ao mesmo tempo uma viga com 6m de vão com a mesma composição das anteriores foi testada debaixo de cargas de serviços constantes em ambiente externo. Deslocamento vertical, escorregamento da conexão, umidade e condições higrotermais foram medidas.

Obtiveram diversas conclusões das quais as mais importantes são citadas a seguir:

1. A diminuição da umidade na viga de madeira implica em seu encurtamento fazendo com que os deslocamentos verticais diminuam e os deslizamentos aumentem. Por outro lado o aumento da umidade na viga de madeira faz com ela se alongue aumentando os deslocamentos verticais.

2. O coeficiente de fluência proposto no EUROCODE 5 [1993] não é adequado para estruturas de madeira / concreto, pois os resultados experimentais mostraram-se maiores que o dobro do valor apresentado nesta Norma. Segundo os autores este fato pode ser explicado devido ao EUROCODE 5 [1993] ser uma Norma de estruturas de madeira e não de estruturas mistas.

SORIANO [1999] apresentou as vantagens de utilização de vigas mistas madeira / concreto em pontes, pinguelas e passarelas para pedestres. Sabendo-se que existem problemas que comprometem a utilização de pontes de madeira, relacionados com sua biodeterioração, foram relacionadas as vantagens em substituir as pontes de madeira por pontes mistas de madeira / concreto. Fez uma breve abordagem sobre o dimensionamento, adotando as indicações da Norma DIN 1052/73 [1973], concluindo que a inércia efetiva da seção mista é determinada através da expressão :

$$I_{ef} = I_w + n_c I_c + \frac{1}{1+k} (n_c A_c a_c^2 + A_w a_w^2)$$

$$\text{Onde } k = \frac{\pi^2 s}{\ell^2 K} \frac{E_c A_c E_w A_w}{(E_c A_c + E_w A_w)} \text{ e } n_c = \frac{E_c}{E_w}$$

Sendo :

I_{ef} = inércia efetiva da seção mista

I_w = inércia da viga de madeira

I_c = inércia da laje concreto

A_w = área da seção transversal da viga de madeira

A_c = área da seção transversal da laje de concreto

a_w = distância do baricentro da viga de madeira até o baricentro da seção mista

a_c = distância do baricentro da laje de concreto até o baricentro da seção mista

s = espaçamento dos conectores

K = coeficiente de deslizamento da conexão

ℓ = vão da viga

E_w = módulo de elasticidade da madeira

E_c = módulo de elasticidade do concreto

As tensões de flexão são as seguintes :

$$\sigma_{c1} = n_c \frac{M}{I_{ef}} \left(\frac{a_c}{1+k} + \frac{h_c}{2} \right) \text{ borda superior do concreto}$$

$$\sigma_{cn} = n_c \frac{M}{I_{ef}} \left(\frac{a_c}{1+k} \right) \text{ baricentro do concreto}$$

$$\sigma_{w2} = \frac{M}{I_{ef}} \left(\frac{a_w}{1+k} + \frac{h_w}{2} \right) \text{ borda inferior da madeira}$$

$$\sigma_{wm} = \frac{M}{I_{ef}} \left(\frac{a_w}{1+k} \right) \text{ baricentro da madeira}$$

Sendo:

M = momento fletor

h_c = espessura da laje de concreto

h_w = altura da viga de madeira

ALVIM et al. [2000] apresentaram uma análise do comportamento estrutural de um piso residencial construído com uma placa de concreto armado enrijecido por vigas de madeira.

A investigação foi realizada com ensaios dinâmicos não destrutivos .

Com os resultado obtidos foram determinadas a frequência natural do primeiro modo de vibração e a respectiva taxa de amortecimento.

SORIANO E MASCIA [2000] estudaram o comportamento mecânico de ligações flexíveis em vigas mistas de madeira / concreto executadas com pregos, como conectores.

O comportamento da ligação foi considerada semi-rígida , ocorrendo então pequenos deslizamentos horizontais entre os dois materiais.

O objetivo foi verificar a eficiência do comportamento mecânico dos pregos metálicos 22 x 48 da Gerdau utilizados como conectores flexíveis.

Concluíram que o sistema de conexão com estes tipos de pregos apresenta uma eficiência de pouca relevância em relação às vigas de mesmas características quando executadas sem um sistema de ligação entre os dois materiais.

A redução do espaçamento longitudinal dos pregos para o limite mínimo certamente levaria a uma melhora do comportamento da estrutura.

TACITANO [2000] apresentou métodos para dimensionamento de vigas mistas, Método Exato e Método Aproximado, e fez uma comparação destes dois métodos com valores experimentais da bibliografia.

Concluiu que, em média, as tensões normais tanto no concreto quanto na madeira, na seção no meio do vão da viga, apresentam um erro relativo entre o Método Exato e o Aproximado que varia entre 1% a 5%, excetuando-se os pontos junto à interface, em que os valores sobem para 8% a até 35% de diferença. Isto é devido aos pequenos valores que as tensões, em ambos os materiais, assumem nestes pontos. Para os deslocamentos verticais, o erro relativo entre os dois métodos apresenta valores percentuais mais significativos no caso de carga distribuída, 16,36%, do que para o carregamento concentrado, 6,84%.

2.4. Elementos de ligação

Os principais conectores para peças de madeira são divididos em dois grupos, dependendo da forma com que eles transferem as forças entre os membros conectados.

O grupo principal é formado pelos conectores tipo parafuso. Neste caso a transferência envolve a flexão do conector bem como as tensões de embutimento na madeira, induzidas pela haste do conector.

Grampos, pregos, parafusos e cavilhas pertencem a este grupo.

O segundo grupo inclui conectores como placa de cisalhamento de madeira e de metal, placas metálicas dentadas e “anel metálico”. A transferência de carga é feita através de uma grande área de contato na superfície dos membros conectados.

Para viga mista madeira / concreto o primeiro grupo é mais fácil de executar, especialmente os pregos.

Serão citados, em seguida, alguns artigos que tratam da ligação, madeira / madeira e madeira / concreto.

No passado, a carga de trabalho em conectores tipo pino era determinada através de resultados de testes de curta duração com um número pequeno de repetidas ligações.

As equações usadas no EUROCODE 5 [1993], que determinam a carga característica são baseadas na teoria desenvolvida por JONHANSEN [1949], confirmadas por várias pesquisas. Tais equações prevêm a falência da ligação, ou por embutimento na madeira ou plastificação do conector.

KUENZI E WILKINSON [1971] deduziram expressões que descrevem como a rigidez da ligação alma – mesa de uma viga I de madeira pode afetar o seu comportamento e KUMAR et al [1972] compararam experimentalmente, ligações pregadas, grampeadas ou grampeadas / coladas. Concluíram que a ligação grampeada / colada é 50% mais resistente que as demais.

MORRIS [1973] apresentou estudo do módulo de deslizamento para ligações pregadas, concluindo que tal módulo é função apenas do diâmetro do prego, isto é :

$$K = 350d \text{ (N/mm)}$$

FOSCHI E BONAC [1977] desenvolveram expressão para curva carga – escorregamento de ligações pregadas. A expressão possui três parâmetros : k , P_0 , P_1 que representam respectivamente, o módulo tangente inicial , a interseção do módulo tangente último com o eixo das ordenadas e o módulo tangente último, conforme mostrado na Figura 2.2. . A expressão é dada por :

$$F = (P_0 + P_1 \Delta) [1 - \exp (- k\Delta / P_0)]$$

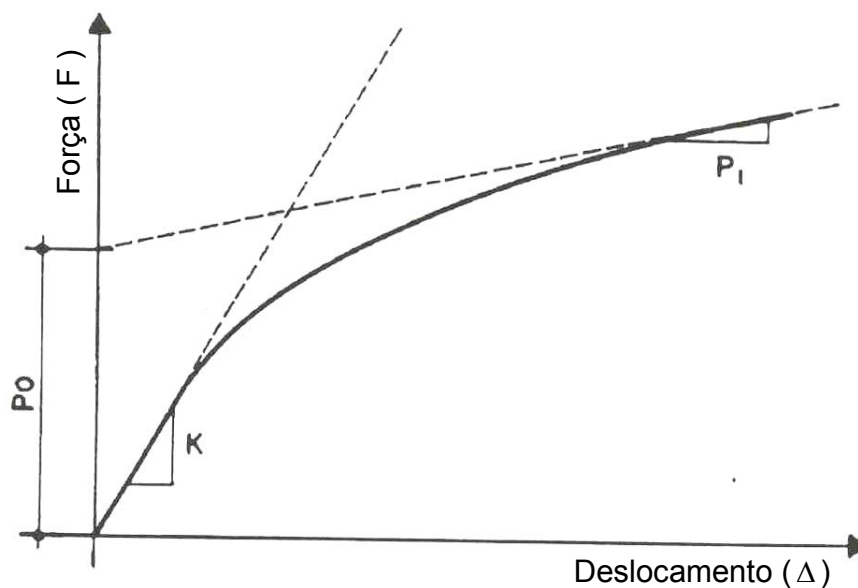


Figura 2.2.

CARRASCO [1983] realizou pesquisa sobre ligações pregadas, apresentando informações a respeito de pregos, demonstrando sua eficiência como elemento de ligação. Apresentou informações a respeito dos diâmetros, dos comprimentos, dos espaçamentos e da capacidade resistente dos pregos.

KAMIYA [1983] apresentou teoria para análise não linear do comportamento de ligações pregadas. A validade dos procedimentos teóricos é examinada comparando com experimentos. Os resultados foram considerados satisfatórios.

MACLAIN [1987] apresentou um completo resumo para vários sistemas de conexões. Para ligações pregadas, são apresentadas várias funções empíricas para descrever as curvas carga-escorregamento de ligações submetidas a carregamento lateral.

LEICHTI E TANG [1989] compararam o comportamento das vigas I de madeira, sujeitas a carregamento de longa duração, e de vigas de madeira serrada. Concluíram que o efeito da deformação ao longo do tempo deve ser considerado na determinação das deflexões, e que não há grandes variações entre os dois tipos de vigas.

ARANTES [1993] comparou os resultados das deformações normais e dos deslocamentos na flexão de vigas compostas de madeira serrada de seção T tendo o prego como elemento de solidarização, obtidos experimentalmente, com resultados de análises via método dos elementos finitos. As principais conclusões foram :

- a) Os diagramas de deformações ao longo da seção transversal das vigas, na fase elástica da sollicitação, apresentam uma boa continuidade aproximando - se de uma viga maciça.
- b) Para os deslocamentos verticais, todas as análises realizadas ficaram bem próximas dos valores obtidos nos ensaios.
- c) A medida que o carregamento era aumentado, a posição da linha neutra da seção composta se posicionava, cada vez mais, abaixo do centro de gravidade da seção.
- d) Para os escorregamentos relativos, inicialmente todas as análises registraram valores bem superiores aos dos ensaios.
- e) Em todas as comparações, as análises aproximadas registraram valores superiores aos medidos em ensaios, com exceção dos escorregamentos

relativos lineares. Portanto a utilização do programa SAP 90 conduzirá a valores de deslocamentos verticais e de deformações a favor da segurança.

ALMEIDA et al. [1995] apresentaram os princípios do método de determinação das resistências de ligações pregadas e parafusadas de estruturas de madeira.

Como hipóteses básicas consideraram:

- a) comportamento da ligação é monolítico.
- b) Os pinos são solicitados por carregamentos transversais distribuído ao longo de seus eixos.
- c) Não existem forças axiais atuando paralelamente aos eixos dos pinos.

As principais conclusões foram:

- a) O critério de determinação do limite de proporcionalidade em função de uma deformação específica da ligação mostrou-se consistente com os valores de outros pesquisadores.
- b) O modelo analítico vem do ajuste de resultados experimentais, portanto reproduzem os valores correspondentes das cargas de primeiro e segundo limites determinadas experimentalmente.

VAN DE KUILEN [1995] estudou a influência da variação da umidade e da fluência nas ligações com pregos, placa-dentada e “anel metálico ” . Concluiu que a umidade tem maior efeito em áreas próximas aos conectores do que em outras partes da estrutura, resultando em aumento de deformação e no coeficiente de deslizamento. Na sequência concluiu que na maioria das vezes o projeto com carga de curta duração é que determina a capacidade de carga da ligação. Nos casos em que há uma grande diferença entre cargas permanentes e cargas variáveis, as cargas de longa duração e que determinarão a capacidade de carga da ligação.

CECCOTTI [1995] mostrou que os parâmetros que determinam a performance mecânica da ligação entre uma viga maciça de madeira e uma laje de concreto são :

- a) No concreto, a resistência característica a compressão f_{ck} , o módulo de deformação longitudinal E_c e o seu respectivo coeficiente de fluência ϵ_c .
- b) Na madeira, a resistência à compressão paralela às fibras característica $f_{wco,k}$, o módulo de elasticidade paralelo às fibras E_{wo} e o respectivo coeficiente de fluência k_{def} .

Ressaltou que é de suma importância o conhecimento das características mecânicas da ligação, principalmente quanto a rigidez, isto é, o módulo de deslizamento K_{ser} da conexão.

Comentou também, sobre a fluência dos elementos da ligação. Com relação ao comportamento a longo prazo, os coeficientes de fluência do concreto, da armadura e dos conectores podem ser usados como fatores de redução.

No entanto, no comportamento da ligação, somente o coeficiente para a madeira pode ser utilizado, considerando que a maior parte da deformação da conexão ocorrerá na madeira.

TAKAC [1996] estudou as vigas compostas madeira / concreto ligadas com conector tipo cavilha. Foram feitos testes com protótipos de dimensões reais com carregamento contínuo e de longa duração. Concluiu que ainda há muito a ser estudado a respeito das ligações de vigas mistas madeira / concreto.

Opina que a madeira é um material apropriado para construções rápidas.

YTTRUP [1996] apresentou trabalho comparando encaixes e conectores metálicos em vigas compostas. Realizou ensaios com madeira serrada e madeira laminada colada. Constatou que as vigas apresentam uma ação composta satisfatória, mesmo sem o uso de conectores. Defendeu os encaixes nas vigas feitos por entalhe na madeira, afirmando que propiciam economia e ação composta mais satisfatória do que pino ou stud.

SOUZA [1997] realizou estudos experimentais sobre corpos de prova de conectores de cisalhamento para ligação madeira / concreto. Nos ensaios dos corpos de prova de cisalhamento foram quantificados escorregamento relativo, escorregamento residual e deformação nos conectores. Foram utilizados

conectores tipo pino metálico, cantoneira metálica e cavilha de seção retangular e circular.

Entre estes conectores, o conector tipo pino (prego e parafuso) apresentou como característica principal a facilidade de colocação nas peças de madeira.

MAGALHÃES [1997] apresentou estudos experimentais e numéricos sobre vigas de seção T compostas de madeira / concreto.

Determinou experimentalmente as características físicas da madeira utilizada na composição das vigas, assim como realizou ensaios preliminares para análise dos conectores de cisalhamento.

Ensaio protótipos de vigas compostas de mesma seção transversal submetidas a flexão e desenvolveu um modelo numérico, utilizando o Ansys versão 5, para comparar com os resultados experimentais.

Concluiu que este tipo de estrutura apresenta um bom comportamento estrutural, tendo em vista que ocorre um aumento de rigidez da viga composta, na fase elástica de solicitação, de 40% em relação a viga de madeira isolada.

Constatou também que os pinos metálicos utilizados na solidarização das vigas compostas são práticos pela facilidade de execução, porém representam o ponto frágil da estrutura.

Propôs que os elementos utilizados na análise numérica sejam revistos pois os resultados numéricos encontrados não foram satisfatórios.

OLIVEIRA [1999] apresentou estudo teórico experimental sobre flexão em vigas T, compostas por madeira laminada colada e concreto, utilizando como elemento de ligação, conectores tipo “chapa metálica com dentes estampados”.

Foram realizados ensaios de cisalhamento, para verificar a capacidade de deslizamento e o módulo de deslizamento.

Concluiu que os conectores apresentaram um bom comportamento quanto à absorção dos esforços atuantes na interface madeira / concreto e que não permitiram que houvesse separação longitudinal entre a viga de madeira e a mesa de concreto.

VALLE et al. [2000] apresentaram estudo para determinação de plastificação de parafusos para projeto de ligações estruturais de madeira. Relataram que a Norma de Projeto de Estruturas de Madeira – NBR 7190/97[1997] possui modelo de cálculo baseado na tensão de escoamento enquanto o EUROCODE 5 [1993] estabelece critérios empregando o momento de plastificação do parafuso. Após diversos ensaios concluíram que o valor médio de tensão de escoamento determinada coincide com a tensão de escoamento estimada a partir da dureza Vickers e que o critério do EUROCODE 5 [1993] resultou em valores inferiores às tensões calculadas pelos ensaios.

VALLE et al. [2000] apresentaram trabalho para determinação experimental da resistência e da rigidez de embutimento da madeira com orientação das fibras variável. Investigaram experimentalmente estes valores em ligações parafusadas em peças de madeira laminada colada. Concluíram que os resultados obtidos foram satisfatórios de acordo com a norma brasileira e que este critério apresenta resultados superiores ao critério do EUROCODE 5 [1993].

RAJCIC E ZAGAR [2000] compararam resultados experimentais de dois tipos de conexões, descontínua e contínua, com resultados numéricos, utilizando o programa de Elementos Finitos COSMOS / M.

Enfatizaram alguns detalhes importantes no modelo utilizado, tais como, a escolha apropriada dos elementos finitos para os diferentes tipos de materiais, a conexão entre a laje de concreto e a viga de madeira, de tal forma que trabalhem monoliticamente.

No caso da conexão descontínua, com parafusos de aço, adotaram para a laje de concreto e a viga de madeira o elemento SOLID e para o parafuso o elemento de barra, PIPE.

No caso da conexão contínua, com placas de aço, adotaram o mesmo elemento SOLID para a laje de concreto e a viga de madeira e, para a placa de aço, adotaram o elemento SHELL4.

Obtiveram resultados muito próximos dos valores obtidos em laboratórios e concluíram que, modelando a seção composta com critério, o programa COSMOS/M é recomendado para a determinação de tensões e deformações.

SORIANO [2001] apresentou testes experimentais em diversas vigas compostas de madeira / concreto.

De posse destes resultados comparou-os com resultados obtidos através de análise numérica, utilizando o Programa SAP 2000.

Na utilização do programa SAP 2000 optou por utilizar elementos de casca, SHELL, para modelar a mesa de concreto, bem como a viga de madeira.

Para modelar os conectores, pregos e parafusos, utilizou elementos de barra, FRAME.

Os dados de entrada para os materiais que constituíram os protótipos ensaiados foram aqueles obtidos através de ensaios de caracterização.

Concluiu que a utilização de elementos SÓLIDOS, provavelmente traria resultados melhores que os que foram obtidos com os elementos SHELL.

Capítulo 3

Metodologia de Dimensionamento

3.1. Generalidades

O objetivo do capítulo 3 desta Dissertação é apresentar uma metodologia analítica de dimensionamento à flexão, para seções T compostas madeira / concreto, conectadas com pinos metálicos.

MAGALHÃES [1997] observa que as recomendações para dimensionamento de vigas compostas submetidas à flexão, fornecem ao projetista poucas informações para se realizar um bom dimensionamento, e sugere como continuação dos estudos, a apresentação de uma metodologia de dimensionamento de vigas compostas madeira / concreto.

Sabendo que hoje existem poucos trabalhos científicos sobre o assunto, apresentar-se-á, então uma metodologia de dimensionamento de vigas compostas com seção T madeira / concreto.

3.2. Ligações semi-rígidas

CECOOTTI [1995] explica que o grau de rigidez de uma conexão de viga composta madeira / concreto pode ser classificado de acordo com os conectores utilizados.

Elementos conectados com pregos, parafusos ou cavilhas são menos rígidos que elementos conectados com colas.

Os primeiros definem as conexões semi – rígidas e a cola, conexão rígida.

Para se projetar seções com ligações rígidas basta transformar a seção de concreto numa seção equivalente de madeira. Mas, para o projeto das ligações semi-rígidas tem que se considerar o deslizamento entre as seções e a rigidez efetiva da ligação.

O EUROCODE 5 [1993], no seu Anexo B, determina o método de dimensionamento para seções compostas de madeira, ligadas por conectores. E no item 5.3.3.6 diz que o método descrito no Anexo B pode ser aplicado para seções compostas de madeira com qualquer outro material.

Sendo assim, as expressões definidas no Anexo B do EUROCODE 5 [1993] podem ser utilizadas para o dimensionamento de vigas compostas madeira / concreto , conectadas com conectores tipos pinos, portanto semi-rígidas.

CECCOTTI [1995] propõe para seções compostas madeira / concreto o seguinte:

- Seção transversal

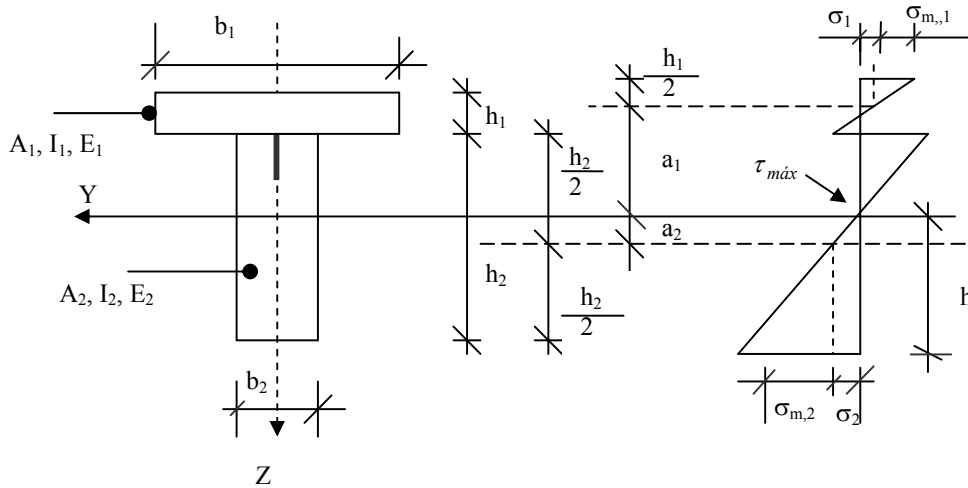


Figura 3.1.

- As expressões são baseadas na teoria da elasticidade linear e assumindo o seguinte:
 - a) As vigas são simplesmente apoiadas .
 - b) A conexão da madeira com o concreto é feita com a utilização de conectores, tendo módulo de deslizamento K .
 - c) O espaçamento s entre os conectores é constante ou varia uniformemente , de acordo com a força cortante, entre s_{min} e s_{max} , com $s_{max} \leq 4 s_{min}$.
 - d) A carga está atuando na direção do eixo Z , proporcionando um momento $M=M(x)$ variando senoidalmente ou parabolicamente, e uma força cortante $V =V (x)$.

- Rigidez Efetiva

$$(EI_{ef}) = E_1 I_1 + E_2 I_2 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2$$

sendo :

$$I_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} \quad e \quad I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}$$

$$A_1 = b_1 h_1 \quad e \quad A_2 = b_2 h_2$$

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 s}{\ell^2 K} E_1 A_1 \right)^{-1} \quad e \quad \gamma_2 = 1$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad e \quad a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1}{\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)$$

Onde :

(EI_{ef}) = rigidez efetiva.

A_1 = área da seção transversal da laje de concreto.

A_2 = área da seção transversal da viga de madeira .

b_1 = largura efetiva da laje de concreto.

b_2 = largura da viga de madeira .

h_1 = altura da laje de concreto.

h_2 = altura da viga de madeira.

I_1 = momento de inércia da laje de concreto.

I_2 = momento da inércia da viga de madeira.

γ_1 = efetividade da ligação.

s = espaçamento entre conectores

K = módulo de deslizamento da conexão.

E_1 = valor nominal do módulo de elasticidade do concreto.

E_2 = módulo de elasticidade médio da madeira.

a_1 = distância entre o centro de gravidade da laje de concreto ao centro de gravidade da seção composta.

a_2 = distância entre o centro de gravidade da viga de madeira ao centro de gravidade da seção composta.

ℓ = vão da viga

- Tensões Normais

$$\sigma_1 = \gamma_1 E_1 a_1 \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad e \quad \sigma_2 = \gamma_2 E_2 a_2 \frac{M}{(EI)_{ef}}$$

$$\sigma_{m,1} = \frac{E_1 h_1}{2} \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad e \quad \sigma_{m,2} = \frac{E_2 h_2}{2} \frac{M}{(EI)_{ef}}$$

Onde:

σ_1 = tensão de compressão na laje de concreto.

σ_2 = tensão de tração na viga de madeira

$\sigma_{m,1}$ = tensão de flexão na laje de concreto.

$\sigma_{m,2}$ = tensão de flexão na viga de madeira.

M = momento fletor segundo o eixo X.

As tensões estão representadas na figura 3.2.

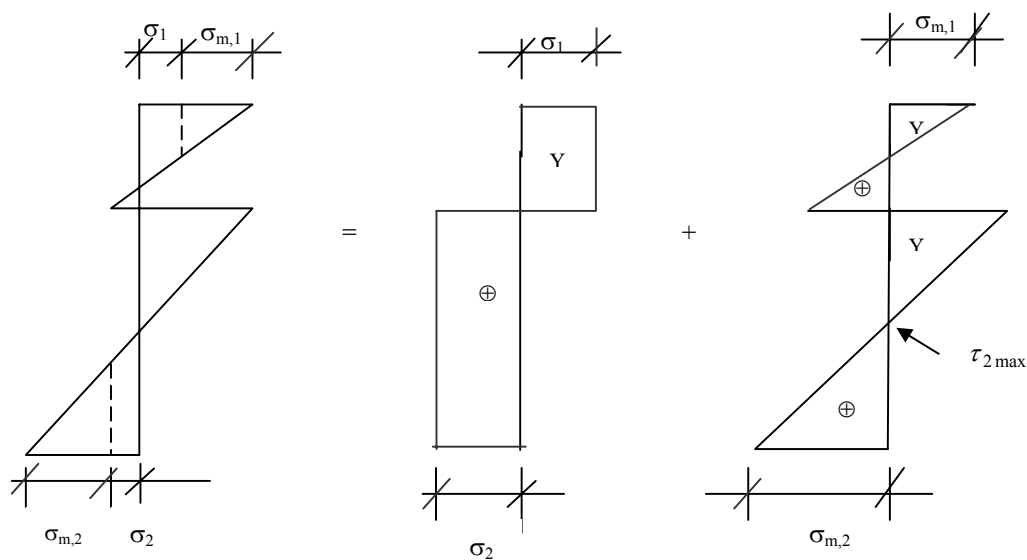


Figura 3.2.

- Tensão de Cisalhamento

$$\tau_{2,\max} = \frac{E_2 h^2 V}{2(EI)_{ef}}$$

Onde :

$\tau_{2,\max}$ = tensão máxima de cisalhamento na viga de madeira.

h = altura do centro de gravidade da seção composta.

V = esforço cortante no apoio da viga.

- Fluxo de Cisalhamento

$$F_1 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s V}{(EI)_{ef}}$$

Na definição da seção transversal , a largura da mesa de concreto a ser considerada deverá ser a largura efetiva, definida como a largura efetiva da seção composta aço / concreto determinada no EUROCODE 4 [11] , ou seja.

$$b_{ef} = 2b_{e1} , \text{ sendo } b_{e1} = \ell_0 / 8 \quad \text{sendo :}$$

b_{e1} [b e b igual a metade da distância entre as vigas ou a distância da viga de extremidade ao final da laje.

ℓ_0 é a distância entre os pontos de momento nulo.

3.3. Efetividade da ligação

O parâmetro γ_1 que influi no cálculo da rigidez efetiva $(EI)_{ef}$ determina a efetividade da ligação. Se o seu valor for zero significa que não existe ligação entre os componentes da seção. E se seu valor for igual a 1 significa que a ligação é rígida.

Portanto para as ligações semi-rígidas γ_1 estará compreendido entre 0 e 1.

O principal parâmetro para a determinação da efetividade da ligação é o módulo de deslizamento da conexão.

A rigidez da ligação é que determina a distribuição das tensões na seção transversal da viga composta.

Na determinação de γ_1 devemos considerar o espaçamento igual a s se ele for constante. Se o espaçamento não for constante devemos considerar um espaçamento efetivo dado por.

$$s_{ef} = 0,75s_{min} + 0,25s_{max}$$

3.4. Módulo de Deslizamento das Conexões

O módulo de deslizamento pode ser obtido através de ensaios padronizados, como por exemplo o apresentado pela Norma ISO 6891 [1983] .

Deve-se ressaltar que esta norma é destinada a estruturas de madeira e não madeira / concreto, mas CECOTTI [1995] a utilizou para estruturas compostas.

O módulo de deslizamento é definido como a razão entre a força de cisalhamento no conector, F, e o deslizamento entre a madeira e concreto, u, isto é :

$$K = \frac{F}{u}$$

Como afirmaram GUTKOWISK e CHEN [1996] , muitos autores examinaram o deslizamento relativo entre elementos conectados e derivaram métodos de ensaio para medirem o módulo de deslizamento, bem como expressões empíricas para sua determinação.

O módulo de deslizamento é a inclinação da curva carga x deslizamento para um ensaio de cisalhamento.

Eles compararam a influência do tipo de prego e da resistência do concreto em relação ao módulo de deslizamento, verificando que a resistência do concreto possui grande influência no módulo de deslizamento, e que o tipo de prego possui grande influência em relação à carga última. Assim , quando o deslizamento inicia, a maior deformação ocorre na região de interação entre concreto, madeira e pregos, mas a falha é no prego.

A NBR 7190/97 [1997] no seu anexo C determina como se deve calcular a resistência da ligação, através de ensaios de ligações com pinos ou cavilhas.

A Norma Brasileira de Estruturas de Madeira é bastante precisa com relação às dimensões dos corpos de prova, procedimentos de carregamento, instrumentação

e medição. Porém, nada se sabe sobre sua utilização para estruturas madeira / concreto.

CAPRETTI e CECOTTI [1996] chamam a atenção para um ponto apresentado na bibliografia pertinente, que consiste na pequena variação da rigidez efetiva (EI)_{ef} para grandes alterações no módulo de deslizamento K , o que pode justificar não haver um grande rigor na determinação experimental deste parâmetro.

O EUROCODE 5 [1993] apresenta expressões empíricas para estimar os valores do módulo de deslizamento de serviço:

- Parafusos e pregos com pré-furação

$$K_{\text{ser}} = \rho_k^{1,5} d / 20 \text{ N/mm}$$

- Pregos sem pré-furação

$$K_{\text{ser}} = \rho_k^{1,5} d^{0,8} / 25 \text{ N/mm}$$

Sendo :

ρ_k = valor característico da densidade da madeira, em Kgf/m^3

d = diâmetro do prego, em mm

- Para os casos em que os materiais conectados possuam densidades diferentes, deve-se considerar uma densidade equivalente dada por:

$$\rho_k = \sqrt{\rho_{k,1} \rho_{k,2}}$$

ρ_k = valor característico da densidade equivalente, em Kgf/m^3

$\rho_{k,1}$ = valor característico da densidade da madeira 1, em Kgf/m^3

$\rho_{k,2}$ = valor característico da densidade da madeira 2, em Kgf/m^3

ALVIM et al. [2000] utilizaram esta última expressão para calcular o módulo de deslizamento para seção composta madeira / concreto.

O EUROCODE 4 [1992] define que para conexões entre aço e concreto o módulo de deslizamento pode ser determinado através de :

- $K_{ser} = 0,125 d E_a \text{ N/mm}$

Sendo :

E_a = módulo de elasticidade do aço

d = diâmetro do conector

CECCOTTI [1995] utilizou esta expressão para calcular o módulo de deslizamento para seção composta madeira / concreto, substituindo o módulo de elasticidade do aço, pelo módulo de elasticidade médio da madeira.

Em ambos os casos anteriores pode-se estimar K_u (estado limite último) através de :

$$K_u = 2/3 K_{ser}$$

Fica claro, então, que para análise de vigas mistas madeira / concreto devem ser efetuados ensaios de ligações para a determinação do módulo de deslizamento da conexão, mas que na ausência do ensaio, as expressões empíricas podem ser utilizadas.

A seguir, será apresentado o critério de dimensionamento para estruturas mistas madeira / concreto, proposto por CECCOTTI [1995].

3.5. Tensões Normais

O diagrama de tensões normais na seção da viga composta, mostrado na figura 3.1. pode ser decomposto da seguinte forma.

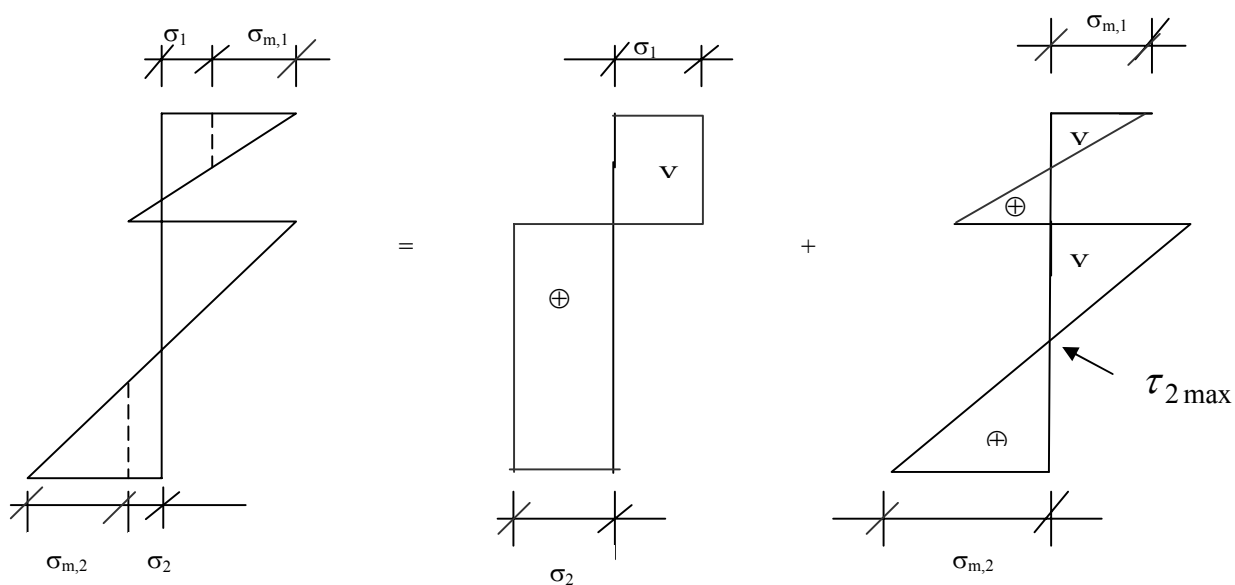


Figura 3.3.

Nas expressões seguintes o índice 1 representa tensões atuantes no elemento 1 (mesa) e o índice 2 representa as tensões atuantes no elemento 2 (alma).

Pode-se então concluir que, a tensão máxima de compressão na mesa de concreto, na parte superior será dada por :

$$\sigma_c = \sigma_1 + \sigma_{m,1},$$

e que na parte inferior tem-se tensão de compressão ou tração dependendo do resultado da soma algébrica de σ_1 com $\sigma_{m,1}$, isto é :

$$\sigma_c = \sigma_1 + \sigma_{m,1} \text{ se } \sigma_1 > \sigma_{m,1}$$

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_{m,1} \text{ se } \sigma_1 < \sigma_{m,1}$$

As tensões de cálculo $\sigma_{c,d}$ e $\sigma_{t,d}$ deverão ser comparadas com as resistências de cálculo à compressão e à tração do concreto isto é :

$$\sigma_{c,d} \leq f_{cd} \text{ e } \sigma_{t,d} \leq f_{ctmd}$$

Onde :

$\sigma_{c,d}$ = tensão de compressão de cálculo na laje de concreto.

$\sigma_{t,d}$ = tensão de tração de cálculo na laje de concreto

$f_{c,d}$ = resistência de cálculo à compressão do concreto.

f_{ctmd} = resistência de cálculo à tração do concreto.

Com relação a madeira a verificação a ser feita é a seguinte:

$$\frac{\sigma_{2,d}}{f_{t,o,d}} + \frac{\sigma_{m,2,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Onde :

$\sigma_{2,d}$ = tensão da tração de cálculo na viga de madeira.

$\sigma_{m,2,d}$ = tensão de flexão de cálculo na viga de madeira.

$f_{t,o,d}$ = resistência de cálculo à tração da madeira

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo a flexão da madeira

3.6. Tensão de Cisalhamento na Madeira

A tensão máxima de cisalhamento de cálculo na madeira deverá ser comparada com a resistência ao cisalhamento :

$$\tau_{2\max,d} \leq f_{v,d}$$

sendo :

$\tau_{2\max,d}$ = tensão máxima de cisalhamento de cálculo

$f_{v,d}$ = resistência de cálculo ao cisalhamento

3.7. Força nos conectores

Para o cálculo da força nos conectores, $F_1 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s V}{(EI)_{ef}}$ deve-se verificar se o espaçamento entre eles é constante ou não.

Se o espaçamento for constante, o valor que aparece na expressão de F_1 será o valor s .

No entanto, se o espaçamento não for constante, deve-se adotar o espaçamento mínimo, s_{min} , no cálculo de F_1 .

Na conexão a falha pode ocorrer em um dos três pontos seguintes:

- Concreto

$$R_d = 0,23d^2 \sqrt{f_{ck} \frac{E_{cm}}{\gamma_c}}$$

Onde :

d = diâmetro do conector

f_{ck} = resistência característica do concreto

γ_c = coeficiente de minoração da resistência do concreto

E_{cm} = valor nominal do módulo de elasticidade do concreto

- Conector

$$R_d = 0,8 f_u \frac{\pi d^2}{4 \gamma_s}$$

Onde :

f_u = resistência à tração do aço

γ_s = coeficiente de minoração da resistência do aço

- Madeira

$$R_d = 1,5 \sqrt{2M_{yd} f_{h,2,d} d}$$

Onde :

M_{yd} = momento de cálculo de flexão do conector

$f_{h,2,d}$ = resistência de cálculo de embutimento da madeira.

O EUROCODE 5 [1993] recomenda para ligações pregadas o seguinte :

$$M_{y,k} = 180 d^{2,6} \text{ N.mm}$$

$$f_{h,o,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \text{ N/mm}^2 \text{ (sem pré - furação)}$$

$$f_{h,o,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \text{ N/mm}^2 \text{ (com pré - furação)}$$

sendo :

$M_{y,k}$ = momento característico de flexão do conector

$f_{h,o,k}$ = resistência característica ao embutimento da madeira

Para ligações com pinos sem rosca o EUROCODE 5 [1993] recomenda :

$$M_{y,k} = 0,8 f_{uk} \frac{d^3}{6} \quad \text{N.mm}$$

$$f_{h,o,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad \text{N/mm}^2$$

sendo:

f_{uk} = resistência característica à tração do conector

O valor de $F_{1,d}$, força de cálculo no conector, deverá ser menor do que os três valores descritos anteriormente, ou seja :

$$F_{1,d} \quad [\text{Rd}$$

3.8. Fluência nas ligações madeira / concreto

Em geral a determinação do comportamento mecânico das estruturas é feito por meio de ensaios de curta duração. Nestes ensaios não são considerados os efeitos decorrentes do tempo de duração do carregamento na estrutura, que são muito importantes na consideração das condições de serviço. Para isto, é necessário a aplicação de carregamentos de longa duração.

Estes ensaios são conhecidos como ensaios de deformação lenta ou ensaios de fluência.

O EUROCODE 5 [1993] e a NBR 7190/97 [1997] classificam a duração das ações em cinco categorias conforme a figura 3.4.

Classes de Carregamento	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
<ul style="list-style-type: none"> • Permanente • Longa Duração • Média Duração • Curta Duração • Duração instantânea 	<p>Vida útil da construção</p> <p>Mais de 6 meses</p> <p>1 semana a 6 meses</p> <p>Menos de 1 semana</p> <p>Muito curta</p>

Tabela 3.1.

Os efeitos estruturais nas madeiras causados pela duração do carregamento dependem da umidade inicial da madeira e das condições ambientais.

Os valores de resistência estabelecidos pelas Normas devem ser modificados por meio de coeficientes de modificação K_{mod} , determinados em função do tempo de carregamento e da classe de umidade ambiente.

Além disso, deve-se considerar o aumento de deformação com o tempo devido à combinação dos efeitos de fluência e umidade. O coeficiente que define este aumento de deformação, k_{def} , é definido pelo EUROCODE 5 [1993] para madeiras maciças como :

Duração do Carregamento	Umidade [12%	Umidade [20%
Permanente	0,60	0,80
Longa Duração	0,50	0,50
Média Duração	0,25	0,25
Curta Duração	0,00	0,00

Tabela 3.2.

Estes fenômenos de fluência também ocorrem no concreto. Modelos que levam em consideração a deformação lenta no concreto estão presentes nas normas pertinentes ao material.

Portanto nas ligações madeira / concreto o fenômeno da fluência deve ser considerado.

Na determinação, tanto das tensões quanto dos deslocamentos verticais, verifica-se os valores para as condições iniciais e para o estágio final, isto é, quando toda a fluência no concreto e na madeira tiver ocorrido.

Para simular este fenômeno na seção composta, o módulo de elasticidade da madeira e o módulo de deformação longitudinal do concreto são reduzidos de acordo com o que propõe CECCOTTI [1995] :

$$E_{1,fluência} = E_1 \left(\frac{\%g}{1 + \Phi_{\infty,to}} + \frac{\%q}{1 + \Phi_{t,to}} \right)$$

$$E_{2,fluência} = E_2 \left(\frac{\%g}{1 + k_{def,g}} + \frac{\%q}{1 + k_{def,q}} \right)$$

Onde :

$E_{1,fluência}$ = módulo de elasticidade do concreto considerando-se a fluência.

$E_{2,fluência}$ = módulo de elasticidade da madeira considerando-se a fluência

E_1 = valor nominal do módulo de elasticidade do concreto.

E_2 = módulo de elasticidade médio da madeira.

% g = porcentagem do carregamento permanente com relação ao total.

% q = porcentagem do carregamento variável com relação ao total.

$\Phi_{\infty,to}$ = coeficiente de fluência do concreto para carga permanente.

$\Phi_{t,to}$ = coeficiente de fluência do concreto para carga variável.

$k_{def,g}$ = coeficiente de fluência da madeira para carga permanente.

$k_{def,q}$ = coeficiente de fluência da madeira para carga variável

Como o coeficiente de fluência do concreto é maior do que o da madeira, em geral, as tensões migram do concreto para a madeira com o passar do tempo. Por isto as tensões na seção composta devem ser verificadas no estágio inicial e final.

Já os conectores devem ser verificados somente para o estágio inicial de carregamento, sem fluência, pois o fluxo de cisalhamento na interface madeira / concreto diminuirá com o tempo.

Capítulo 4

Análise de Dados Experimentais Existentes

4.1. Generalidades

A metodologia mostrada no Capítulo 3 será aplicada em três vigas compostas já analisadas experimentalmente por três autores diferentes, a saber:

- Viga V1 : Uma das vigas (V03) analisadas por ARANTES [1993] em sua dissertação de Mestrado.
- Viga V2 : Uma das vigas (Protótipo 2) analisadas por MAGALHÃES [1997] em sua dissertação de Mestrado.
- Viga V3 : Viga citada por TACITANO [2000] em sua dissertação de Mestrado.

4.2. Viga V1

A metodologia apresentada no capítulo 3, proposta por CECCOTTI [1995] refere-se a dimensionamento de vigas compostas madeira / concreto, mas é baseada no Anexo B do EUROCODE 5 [1993] que trata das estruturas de madeira. Em função desse fato, com o objetivo de verificar a proposta de dimensionamento apresentada, foi escolhida a viga V03 do trabalho experimental desenvolvido por ARANTES [1993].

Essa viga, executada com alma de madeira e mesa também de madeira, apresenta valores de módulos de elasticidade bem diferentes entre a peça da alma e a peça da mesa, podendo então serem tratados como materiais diferentes

A viga V03 foi composta com madeira da família Angelim (*Vataireopsis*), tanto na alma como na mesa.

A seção transversal da viga esta apresentada na figura 4.1. :

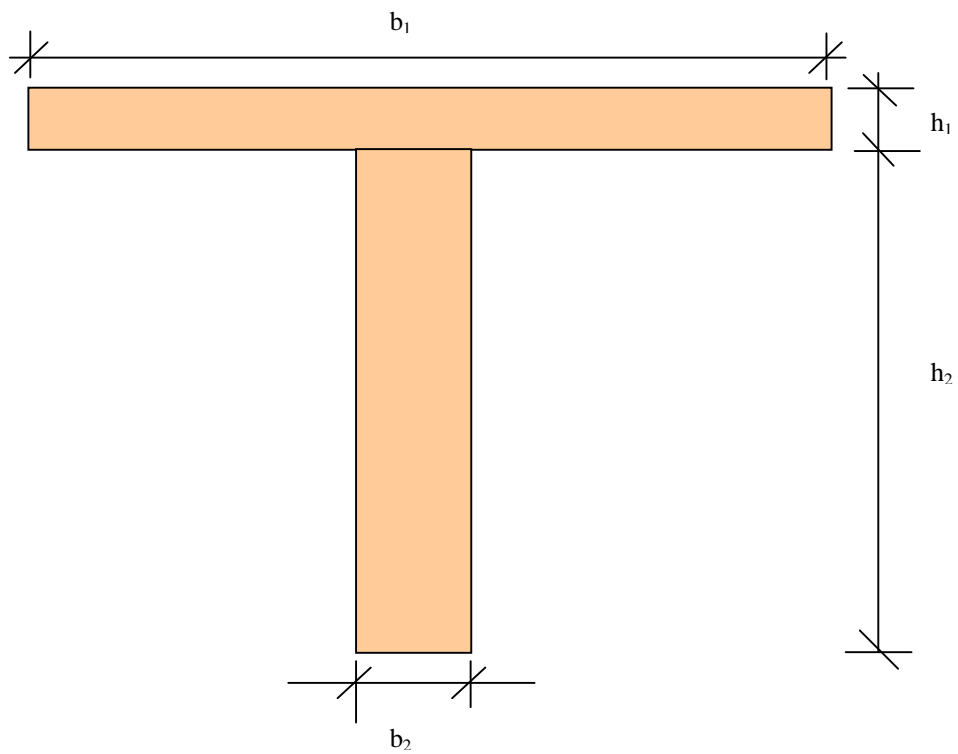


Figura 4.1.

Sendo :

$$b_1 = 139,2 \text{ mm}$$

$$h_1 = 30,1 \text{ mm}$$

$$b_2 = 60,2 \text{ mm}$$

$$h_2 = 139,5 \text{ mm}$$

Para a ligação da alma com a mesa foi utilizado prego de fabricação da Siderúrgica Mendes Júnior (21 x 42) com diâmetro de aproximadamente 5 mm e comprimento de 95mm.

O espaçamento adotado entre os pregos foi de 50mm, constante ao longo da viga, e eles foram pregados utilizando-se pré-furação.

O módulo de deslizamento obtido experimentalmente foi $K = 3463\text{N} / \text{mm}$.

Os módulos de elasticidade obtidos para a mesa e a alma foram respectivamente:

$$E_1 = 14160 \text{ N} / \text{mm}^2 \text{ e}$$

$$E_2 = 7270 \text{ N} / \text{mm}^2$$

O modelo estrutural da viga testada em laboratório está apresentado na figura 4.2.:

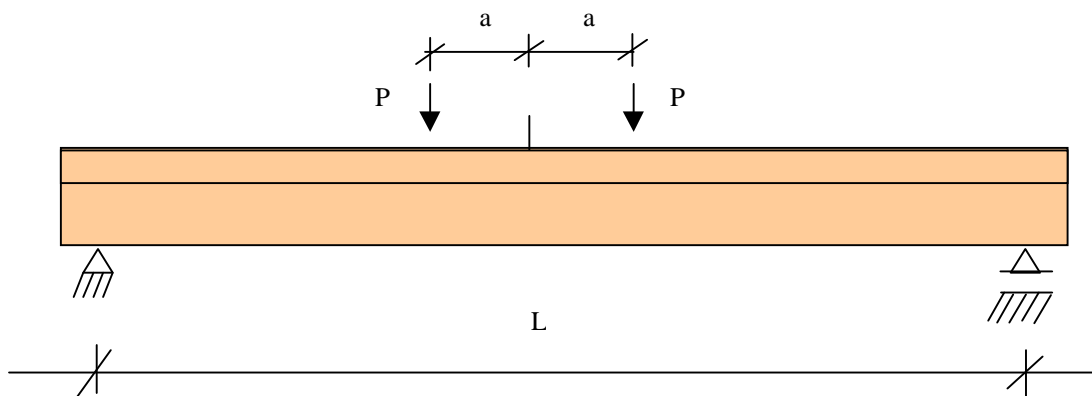


Figura 4.2.

Sendo :

$$L = 4300\text{mm}$$

$$a = 500\text{mm}$$

Os extensômetros foram distribuídos na seção do meio do vão da viga, conforme mostrado na figura 4.3.

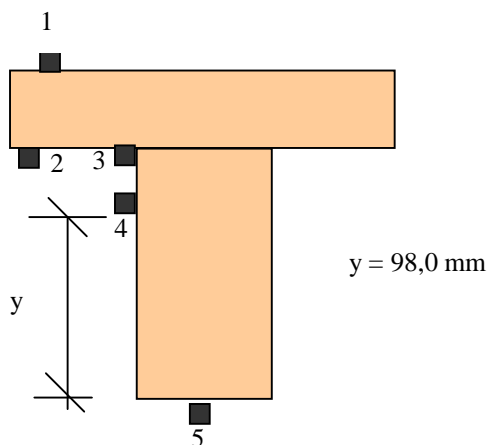


Figura 4.3.

Observando-se os gráficos ($\sigma \times \varepsilon$) obtidos por ARANTES [1993], pode-se concluir que, os resultados de deslocamentos verticais e deformações para a carga de 10076N, encontram-se no limite da lei de Hooke, portanto $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

O deslocamento vertical, no meio do vão da viga para essa carga foi de $f = 50,30\text{mm}$.

As deformações e tensões, para a carga em questão, estão apresentadas na tabela 4.1.

Deformações	Tensões (N / mm ²)
$\varepsilon_1 = - 1361 \times 10^{-6}$	$\sigma_1 = - 19,272$
$\varepsilon_2 = - 656 \times 10^{-6}$	$\sigma_2 = - 9,290$
$\varepsilon_3 = - 800 \times 10^{-6}$	$\sigma_3 = - 5,816$
$\varepsilon_4 = - 252 \times 10^{-6}$	$\sigma_4 = - 1,832$
$\varepsilon_5 = + 2211 \times 10^{-6}$	$\sigma_5 = + 16,074$

Tabela 4.1 .

4.2. Viga V2

O protótipo 2 foi composto com laje de concreto e a alma de madeira Paraju (*Vantanea paniculata*)

A seção transversal da viga está apresentada na figura 4.4.:

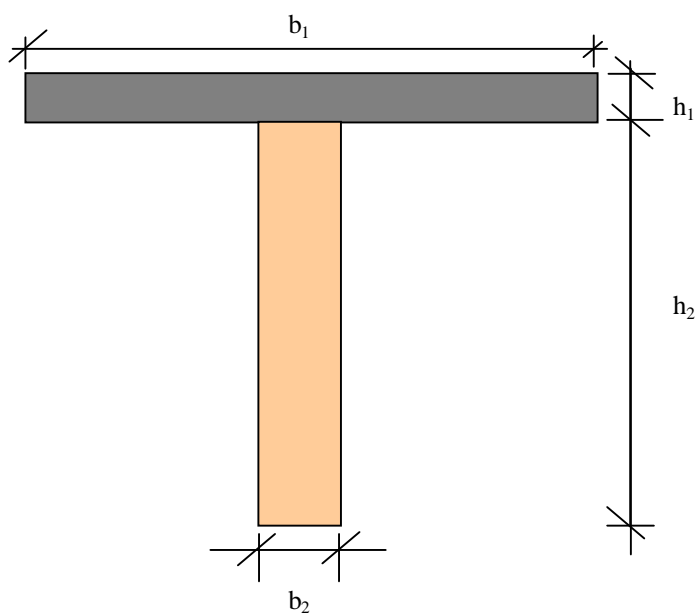


Figura 4.4.

Sendo :

$$b_1 = 550\text{mm}$$

$$h_1 = 50\text{mm}$$

$$b_2 = 150\text{mm}$$

$$h_2 = 150\text{mm}$$

Para a ligação da alma de madeira com a laje de concreto foram utilizados pregos com dimensões de $\phi 3,6 \times 52,7$.

O espaçamento adotado entre os pregos foi de 150mm, constante ao longo da viga, sem a utilização da pré-furação.

No trabalho de MAGALHÃES [1997] não está especificado o módulo de deslizamento da conexão, mas é citado no trabalho desenvolvido por SOUZA [1997].

Analisando o ensaio com o prego (PINO1), pode-se estimar o módulo de deslizamento, que apresentou valor de $K = 3125 \text{ N / mm}$.

O módulo de elasticidade do concreto obtido foi $E_1 = 28746 \text{ N / mm}^2$ e o módulo de elasticidade da madeira obtido foi $E_2 = 21660 \text{ N / mm}^2$

O modelo estrutural do protótipo 2, testado em laboratório está apresentando na figura 4.5. :

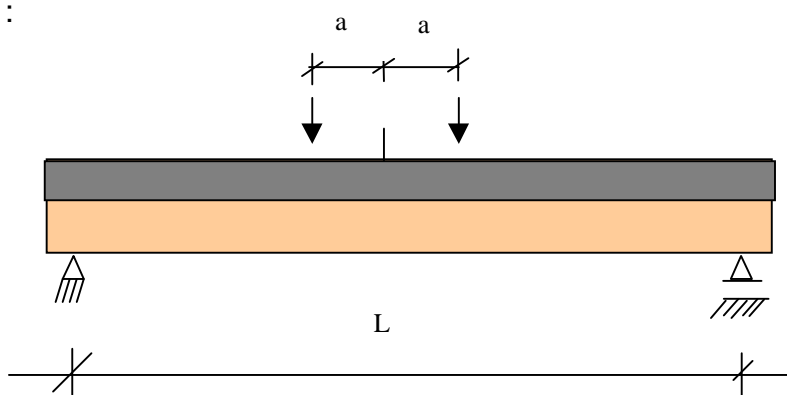


Figura 4.5.

Sendo :

$L = 3200\text{mm}$

$a = 375\text{mm}$

A distribuição dos extensômetros, na seção do meio do vão da viga, foi realizada conforme a figura 4.6..

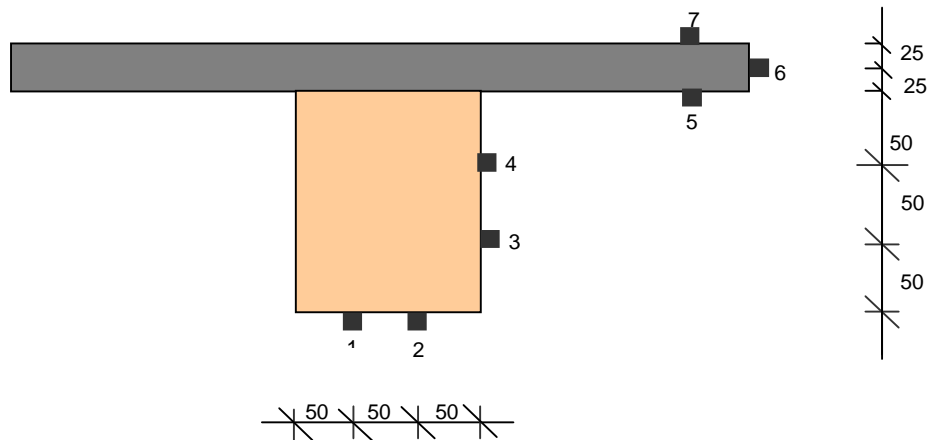


Figura 4.6.

Analisando-se os gráficos ($\sigma \times \varepsilon$) obtidos por MAGALHÃES [1997], pode-se afirmar que os deslocamentos verticais e deformações devido a carga de 9316 N encontram-se no limite da Lei de Hooke, portanto $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

O deslocamento vertical, do meio do vão da viga, para essa carga foi de $f = 4,65\text{mm}$.

As deformações e tensões, para a carga em questão, estão apresentadas na tabela 4.2..

Deformações	Tensões (N / mm ²)
$\epsilon_1 = + 173 \times 10^{-6}$	$\sigma_1 = + 3,747$
$\epsilon_2 = +147 \times 10^{-6}$	$\sigma_2 = + 3,184$
$\epsilon_3 = + 80,7 \times 10^{-6}$	$\sigma_3 = + 1,748$
$\epsilon_4 = - 61,7 \times 10^{-6}$	$\sigma_4 = - 1,336$
$\epsilon_5 = + 12,5 \times 10^{-6}$	$\sigma_5 = + 0,359$
$\epsilon_6 = - 19,1 \times 10^{-6}$	$\sigma_6 = - 0,549$
$\epsilon_7 = - 69 \times 10^{-6}$	$\sigma_7 = - 1,983$

Tabela 4.2.

4.3. Viga V3

A viga analisada por TACITANO [2000] em sua dissertação foi composta com laje de concreto e alma de madeira Peroba Rosa (*Aspidosperma peroba*).

A seção transversal da viga está apresentada na figura 4.7. :

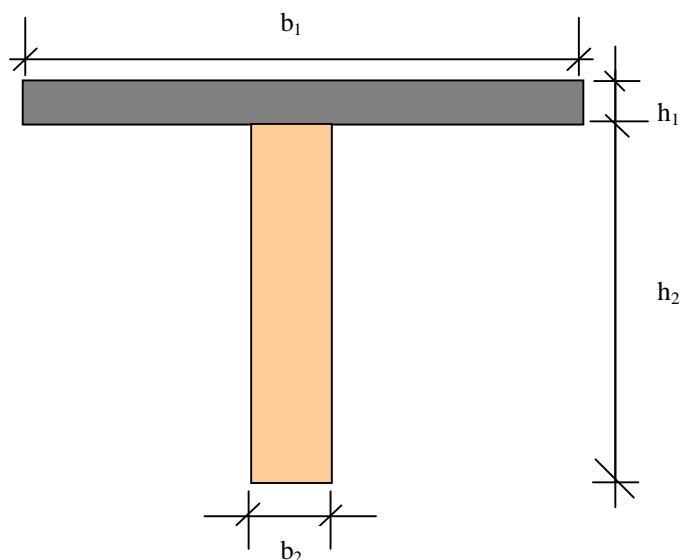


Figura 4.7.

Sendo :

$$b_1 = 300\text{mm}$$

$$h_1 = 40\text{mm}$$

$$b_2 = 60\text{mm}$$

$$h_2 = 160\text{mm}$$

Para a ligação da alma de madeira com a laje de concreto foram utilizados pregos da Gerdau (24 x 60) com dimensões de ϕ 6,58 x 126,5.

O espaçamento adotado entre os pregos foi de 60mm, constante ao longo da viga.

O módulo de deslizamento obtido experimentalmente foi $K = 13000 \text{ N / mm}$.

O módulo de elasticidade do concreto obtido foi $E_1 = 35419 \text{ N / mm}^2$ e o módulo de elasticidade da madeira foi $E_2 = 11970 \text{ N / mm}^2$.

O modelo estrutural da viga testada em laboratório está apresentado na figura 4.8. :

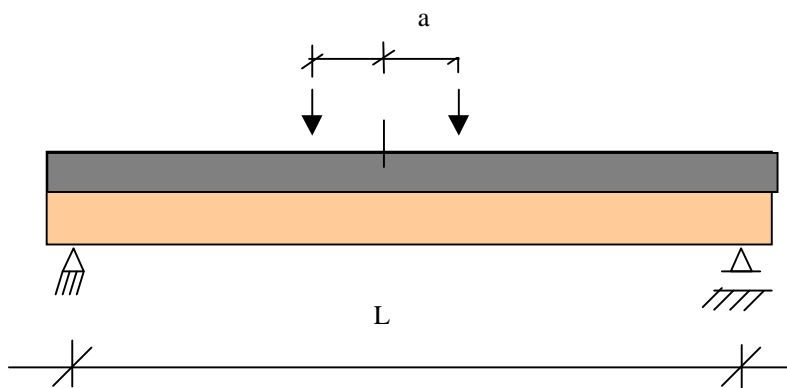


Figura 4.8.

Sendo :

$$L = 2000\text{mm}$$

$$a = 333,5\text{mm}$$

A distribuição dos extensômetros, na seção do meio do vão da viga, foi realizada conforme a figura 4.9. :

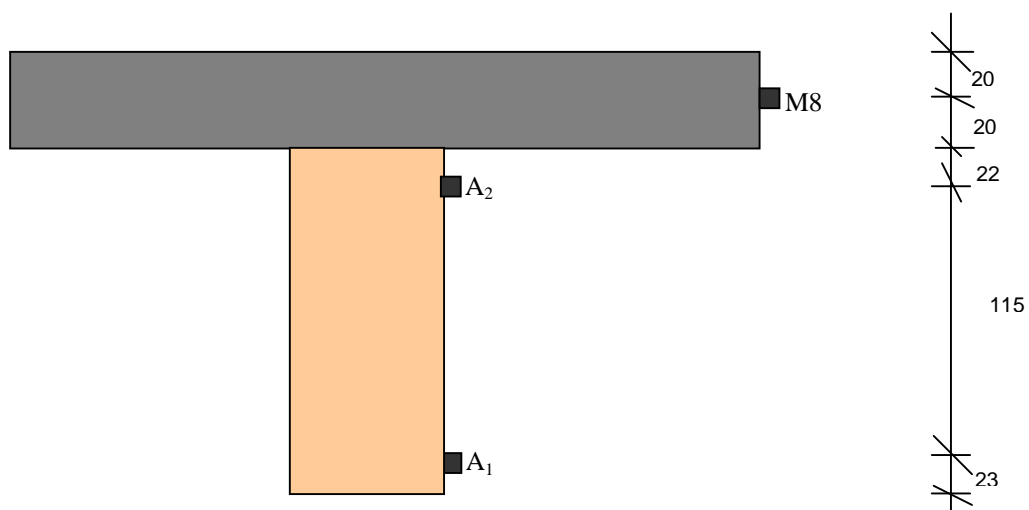


Figura 4.9.

Para uma carga de 30000N, os deslocamentos e deformações encontram-se no limite da Lei de Hooke, portanto $\sigma = E.\epsilon$.

O deslocamento vertical no meio do vão da viga, para essa carga foi de $f = 8,15\text{mm}$.

As tensões normais estão representadas na tabela 4.3. :

Extensômetro	Tensões (N/mm ²)
A ₁	$\sigma = + 21,067$
A ₂	$\sigma = - 1,436$
M8	$\sigma = - 5,667$

Tabela 4.3.

Capítulo 5

Cálculos Analíticos

5.1. Generalidades

Neste capítulo as tensões e deformações das Vigas V1, V2 e V3 serão determinadas analiticamente, para posterior comparação com os resultados obtidos experimentalmente, apresentados no capítulo 4.

5.2. Expressões para cálculos

A seguir estão apresentadas as principais informações sobre as vigas a serem analisadas.

- Modelo Estrutural

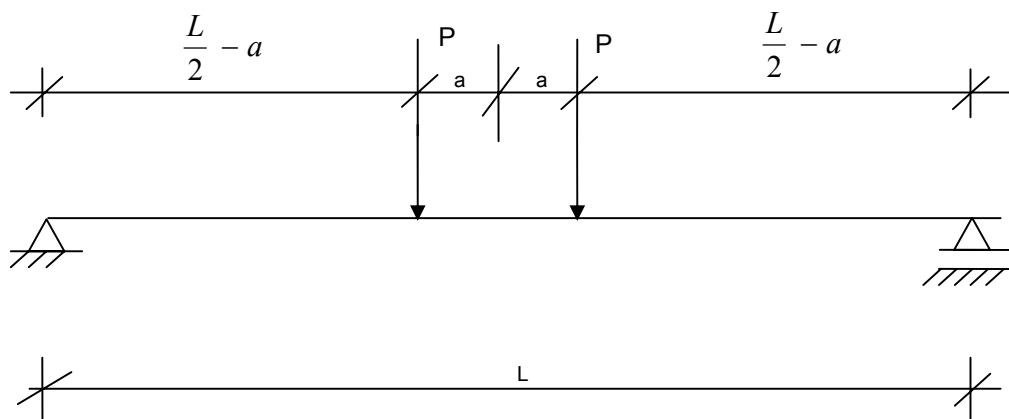


Figura 5.1.

- Diagrama de momentos fletores :

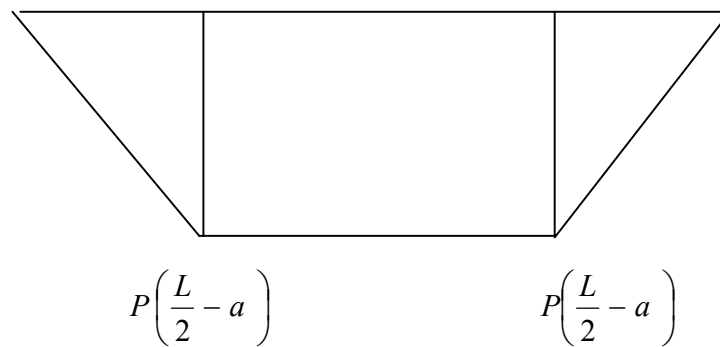


Figura 5.2.

- Flecha no meio de vão :

$$f = \frac{P}{(EI)_{ef}} \left(\frac{L^3}{24} - \frac{La^2}{4} + \frac{a^3}{6} \right)$$

- Módulo de Deslizamento :

a) Valor obtido experimentalmente em cada caso – $(K_{ser})_1$

b) $(K_{ser})_2 = 0,125 dE_2$

c) $(K_{ser})_3 = \rho_k^{1,5} \frac{d}{20}$, (com pré - furação)

$(K_{ser})_3 = \rho_k^{1,5} \frac{d^{0,8}}{25}$, (sem pré - furação)

$$\text{sendo } \rho_k = \sqrt{\rho_{k,1} \rho_{k,2}}$$

5.3. Resultados da Viga V1

$$A_1 = 4190\text{mm}^2$$

$$A_2 = 8398\text{mm}^2$$

$$I_1 = 0,316 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 13,619 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_1 = 14160 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 7270 \text{ N/mm}^2$$

$$M = 8,313 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

	$(K_{\text{ser}})_1$	$(K_{\text{ser}})_2$	$(K_{\text{ser}})_3$
K_{ser} (N/mm)	3463	4544	4570
γ_1 -	0,686	0,742	0,743
$(EI)_{\text{ef}}$ (N/mm ²)	$0,278 \times 10^{12}$	$0,287 \times 10^{12}$	$0,288 \times 10^{12}$
σ_{c1} (N/mm ²)	-21,088	-21,162	-21,136
σ_{t1} (N/mm ²)	-8,364	-8,806	- 8,816
σ_{c2} (N/mm ²)	-7,787	-7,228	- 7,186
σ_{t2} (N/mm ²)	+22,487	+22,170	+ 22,132
f (mm)	55,44	53,843	53,614

Tabela 5.1.

5.4. Resultados da Viga V2.

$$A_1 = 27500\text{mm}^2$$

$$A_2 = 22500\text{mm}^2$$

$$I_1 = 5,729 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 42,188 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_1 = 28746 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 21660 \text{ N/mm}^2$$

$$M = 5,706 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

		(K _{ser}) ₁	(K _{ser}) ₂	(K _{ser}) ₃
K _{ser}	(N/mm)	3125	9747	7547
γ ₁	-	2,662 x 10 ⁻²	7,858 x 10 ⁻²	6,194 x 10 ⁻²
(EI) _{ef}	(N/mm ²)	1,280 x 10 ¹²	1,573 x 10 ¹²	1,523 x 10 ¹²
σ _{c1}	(N/mm ²)	-3,531	-3,334	-3,299
σ _{t1}	(N/mm ²)	+2,877	+1,880	+2,086
σ _{c2}	(N/mm ²)	-6,842	-5,004	-5,346
σ _{t2}	(N/mm ²)	+7,641	+6,781	+6,827
f	(mm)	4,591	3,736	3,859

Tabela 5.2.

5.5. Resultados da viga V3

$$A_1 = 12000\text{mm}^2$$

$$A_2 = 9600\text{mm}^2$$

$$I_1 = 1,600 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 20,480 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_1 = 35419 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 11970 \text{ N/mm}^2$$

$$M = 9,998 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

	$(K_{ser})_1$	$(K_{ser})_2$	$(K_{ser})_3$
K_{ser} (N/mm)	13000	9845	9226
γ_1 -	0,171	0,135	0,128
$(EI)_{ef}$ (N/mm ²)	$0,747 \times 10^{12}$	$0,685 \times 10^{12}$	$0,671 \times 10^{12}$
σ_{c1} (N/mm ²)	-14,443	-14,991	- 15,140
σ_{t1} (N/mm ²)	+4,518	+5,688	+ 5,970
σ_{c2} (N/mm ²)	-6,605	-8,150	- 8,537
σ_{t2} (N/mm ²)	+19,029	+19,804	+ 19,999
f (mm)	5,701	6,217	6,347

Tabela 5.3.

Capítulo 6

Análise Numérica

6.1. Generalidades

Neste capítulo serão apresentados os critérios de modelagem e os resultados via Métodos dos Elementos Finitos, através do programa SAP 2000.

Foram modeladas as vigas V1, V2 e V3 já discutidas anteriormente. Os resultados serão, posteriormente, comparados com os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos analiticamente.

6.2. Modelagem Através do Método dos Elementos Finitos

A Engenharia Civil teve ganhos enormes com o advento dos computadores, já que trouxe a possibilidade de resolver de maneira confiável sistemas com elevado número de equações. Nos dias atuais, a capacidade dos computadores permite a realização de análise de diversos modelos estruturais, por programas desenvolvidos em diferentes universidades e empresas. Para este estudo, será feita uma análise numérica através do Método dos Elementos Finitos pelo programa SAP 2000 da empresa CSI de Berkeley, EUA, comercializado no Brasil e com número razoável de usuários.

Vários modelos poderão ser contemplados. Parece ser uma boa aproximação a discretização da mesa e da alma utilizando-se elementos SHELL retangulares de 4 nós e os pregos serem discretizados através do elemento FRAME . Os elementos SHELL funcionam como cascas, podendo distinguir os comportamentos de placa ou de membrana. O elemento FRAME é próprio para estruturas formadas por barras.

As malhas de elementos para as mesas foram definidas no plano horizontal situadas à meia espessura real da peça. No caso das almas, elas foram modeladas por uma malha no plano vertical, cuja espessura corresponde à da

peça de madeira. A espessura do elemento finito gera um elemento de volume, importante para se considerar a rigidez da seção transversal.

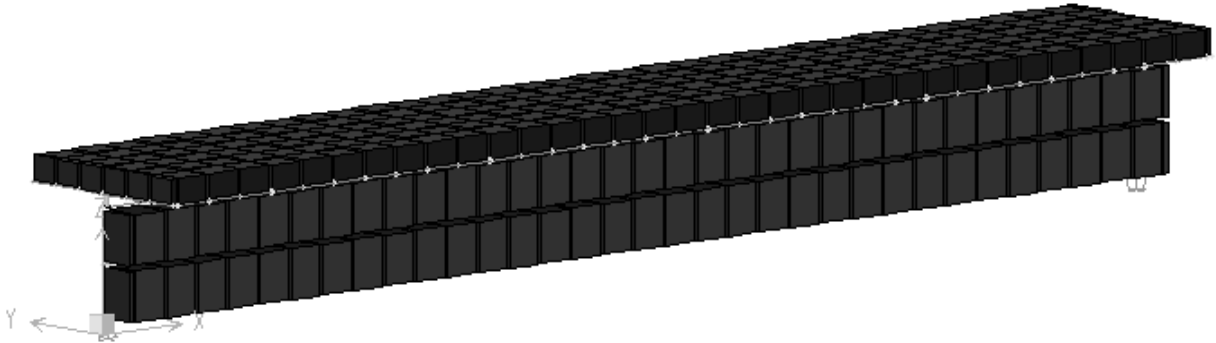


Figura 6.1.

Os pregos foram representados por elementos de barra com os respectivos diâmetros, e com os comprimentos iguais a meia espessura da mesa.

Cada barra está vinculada a um nó na malha que modela a mesa e a outro nó na face superior da malha que modela a alma. Como uma das hipóteses básicas assumidas para a estrutura mista é que os pontos de qualquer seção transversal tenham o mesmo deslocamento vertical, os dois nós, de cada uma das barras, são restringidos utilizando o comando “constraints”

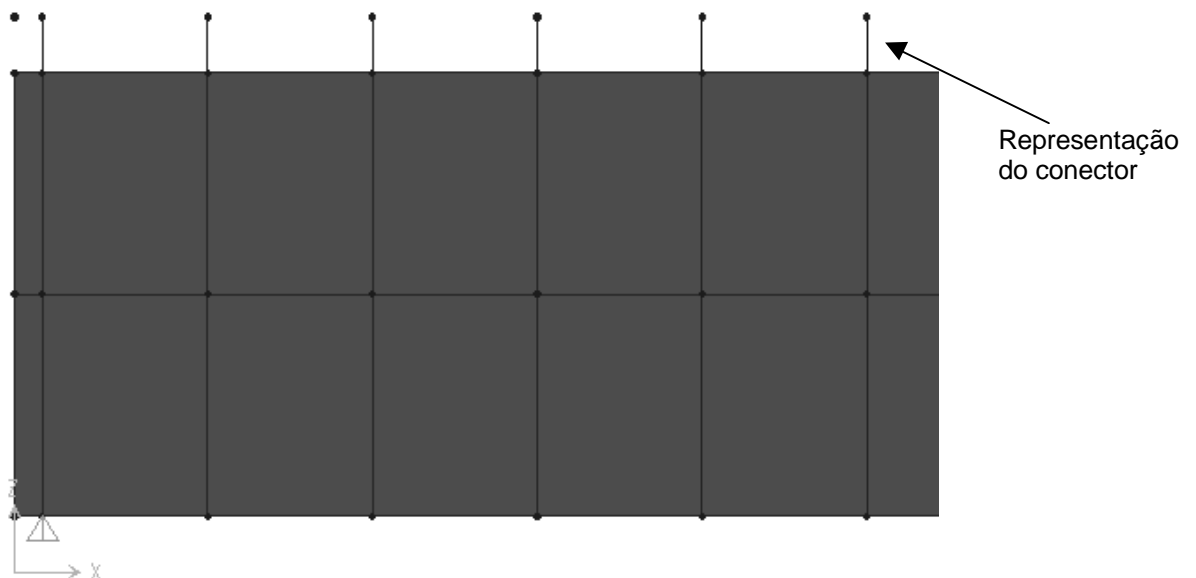


Figura 6.2.

Os dados de entrada para os materiais que constituíram os protótipos modelados foram aqueles vistos no capítulo 4, exceto o material do conector. Para simular o deslizamento existente entre a alma e a mesa, considerou-se que o elemento de ligação está rotulado na mesa e engastado na alma e com isto tem um coeficiente de rigidez dado por :

$$K = \frac{3EI}{\lambda^3}$$

Sendo :

K = módulo de deslizamento da conexão determinado experimentalmente

λ = comprimento do elemento de barra

I = momento de inércia da seção transversal do prego.

E = módulo de elasticidade longitudinal do elemento de ligação

Através do módulo de deslizamento de cada conexão chegou-se ao módulo de elasticidade equivalente para cada elemento de ligação.

O primeiro nó situado na parte inferior da alma foi restringido verticalmente e horizontalmente para formar o apoio articulado fixo e o último nó foi restringido verticalmente para simular o apoio móvel, através do comando “restraint”.

O carregamento externo foi aplicado aos nós da mesa equidistantes do meio do vão das vigas, conforme visto no capítulo 4, através de cargas concentradas com valores iguais à metade da carga do cilindro hidráulico.

Como resultado, o programa SAP 2000, fornece para :

- Nó da estrutura: três deslocamentos de translação e três rotações (figura 6.3.)
- Apoios: todas as reações;
- Barras: diagramas de esforços axiais e transversais;
- Elemento de casca: forças e tensões tangenciais e normais (figura 6.4.)

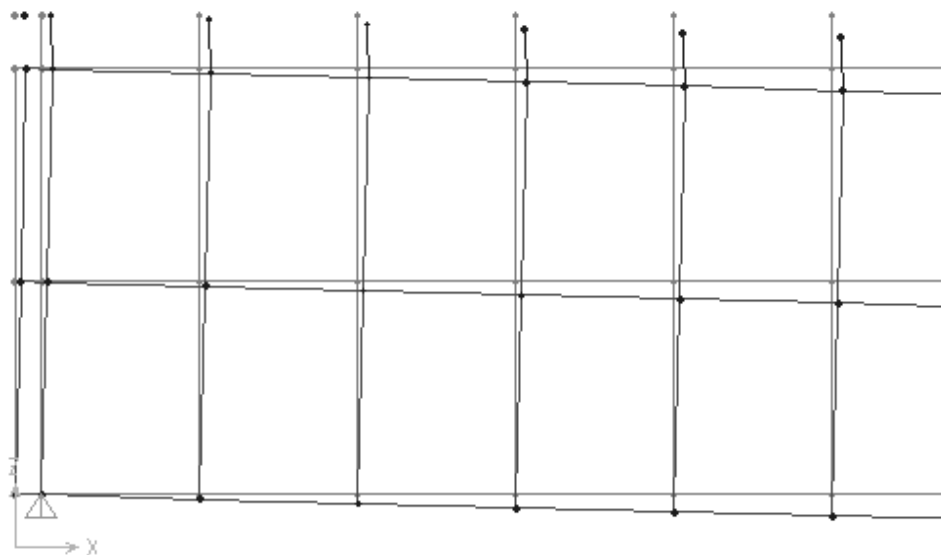


Figura 6.3
Deformações

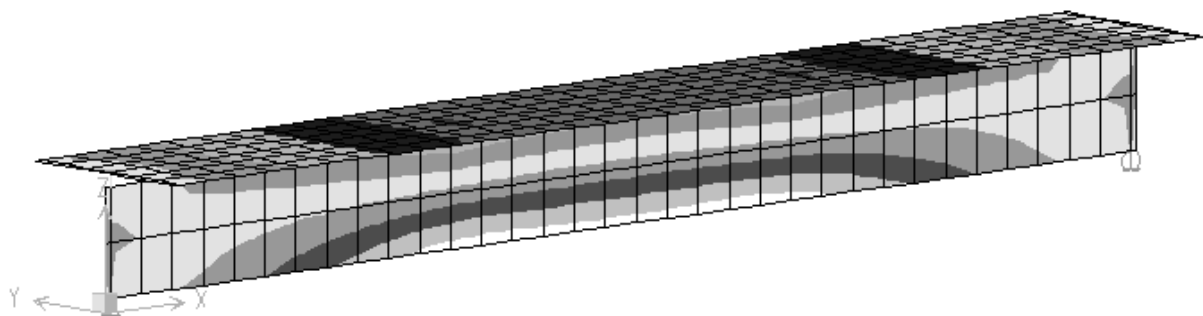


Figura 6.4
Tensões

Os resultados apresentados a seguir foram retirados da seção no meio do vão das vigas.

6.3. Resultados Numéricos para a Viga V1

K_{ser}	(N / mm)	3463
2P	(N)	10076
σ_{c1}	(N / mm ²)	- 21,697
σ_{t1}	(N / mm ²)	- 10,161
σ_{c2}	(N / mm ²)	- 6,540
σ_{t2}	(N / mm ²)	+ 22,455
f	(mm)	51,958

Tabela 6.1.

6.4. Resultados Numéricos para a viga V2

K_{ser}	(N / mm)	3125
2P	(N)	9316
σ_{c1}	(N / mm ²)	- 4,822
σ_{t1}	(N / mm ²)	+ 2,445
σ_{c2}	(N / mm ²)	- 7,000
σ_{t2}	(N / mm ²)	+ 9,798
f	(mm)	5,105

Tabela 6.2.

6.5. Resultados Numéricos para a viga V3

K_{ser}	(N / mm)	13000
2P	(N)	30000
σ_{c1}	(N / mm ²)	- 13, 361
σ_{t1}	(N / mm ²)	+ 0,879
σ_{c2}	(N / mm ²)	- 2, 242
σ_{t2}	(N / mm ²)	+ 17,719
f	(mm)	4,610

Tabela 6.3.

Capítulo 7

Comparação de Resultados

7.1. Generalidades

Neste capítulo serão comparados os resultados obtidos experimentalmente com os resultados analíticos e os resultados numéricos. Optou-se por apresentar os resultados obtidos com a carga indicada, uma vez que o comportamento das vigas para outras cargas apresentou a mesma tendência da carga escolhida.

7.2. Comparação de resultados para a Viga 1 (P=10076N)

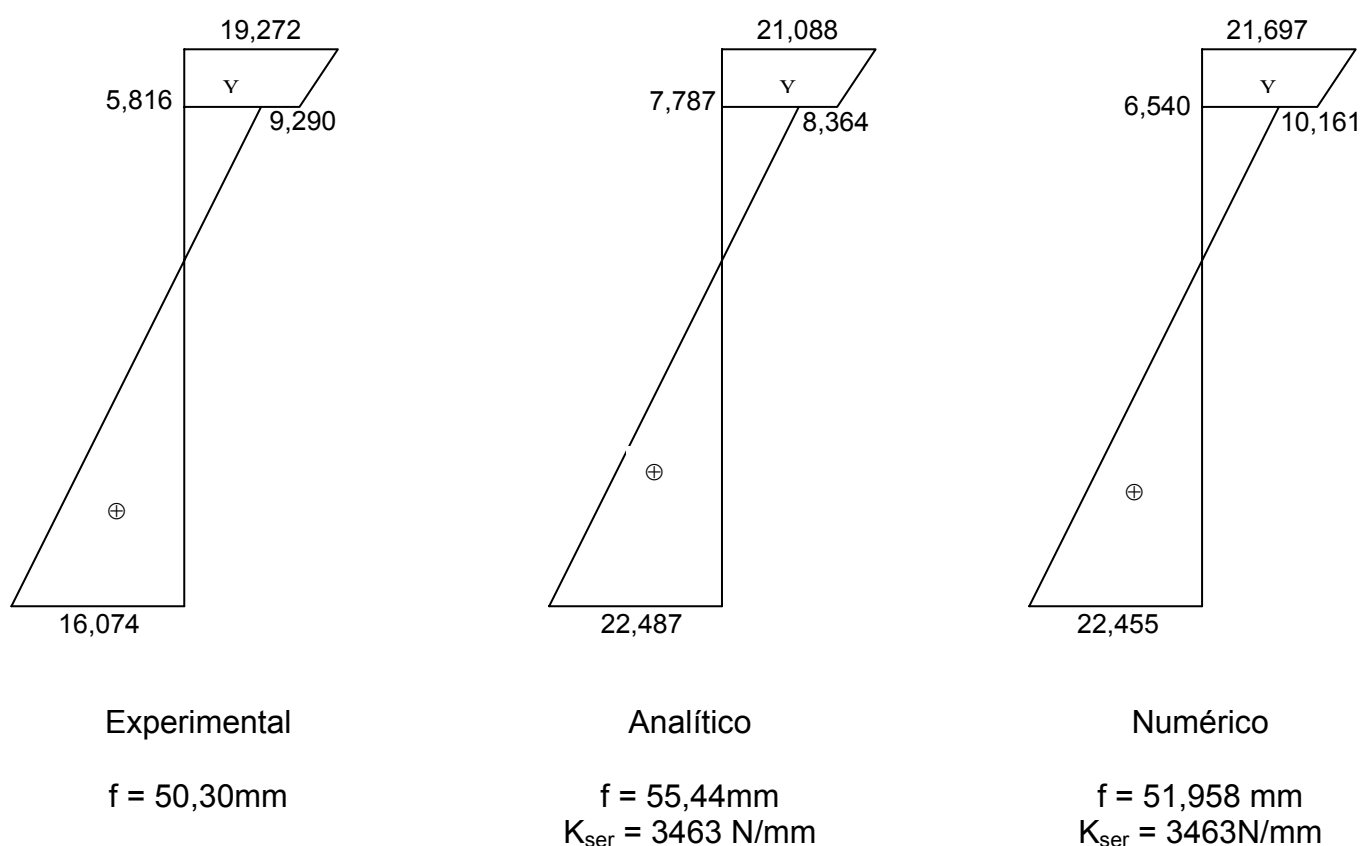
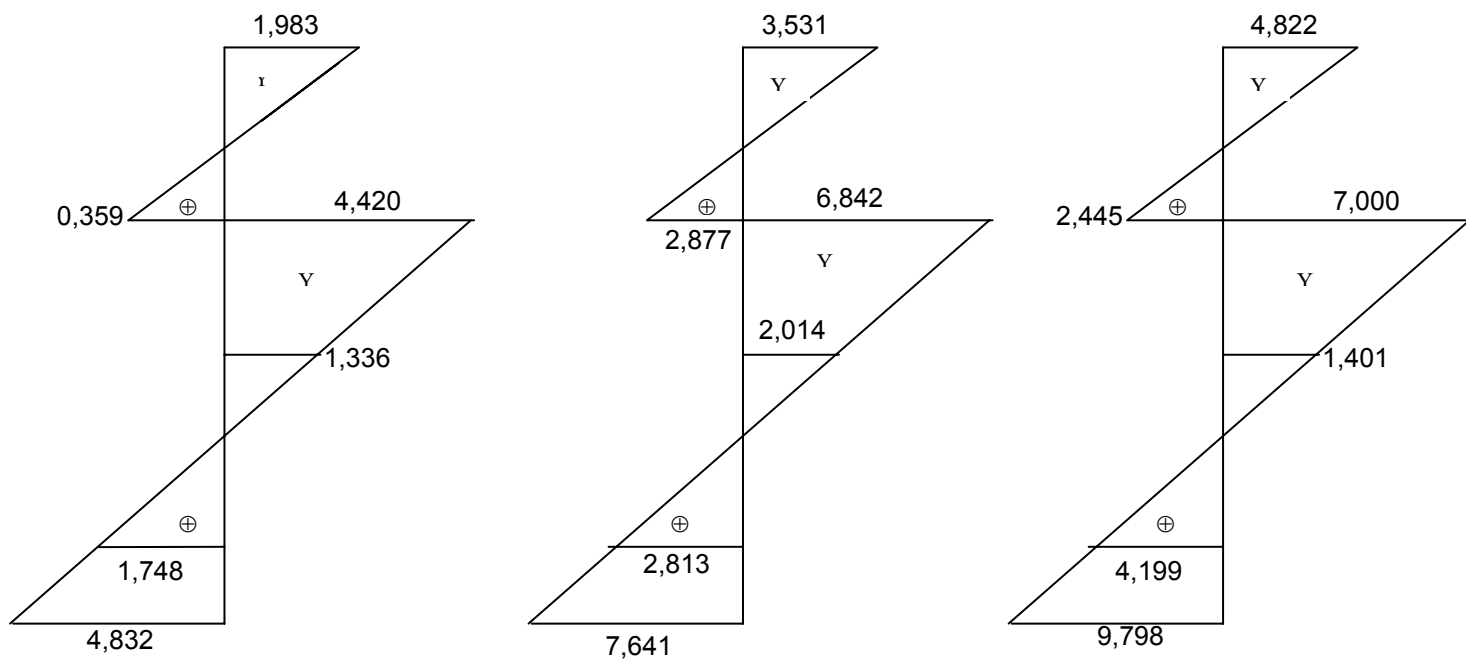


Figura 7.1. Diagrama de Tensões

7.3. Comparação de resultados para Viga 2 (P=9316N)



Experimental

$f = 4,65\text{mm}$

Analítico

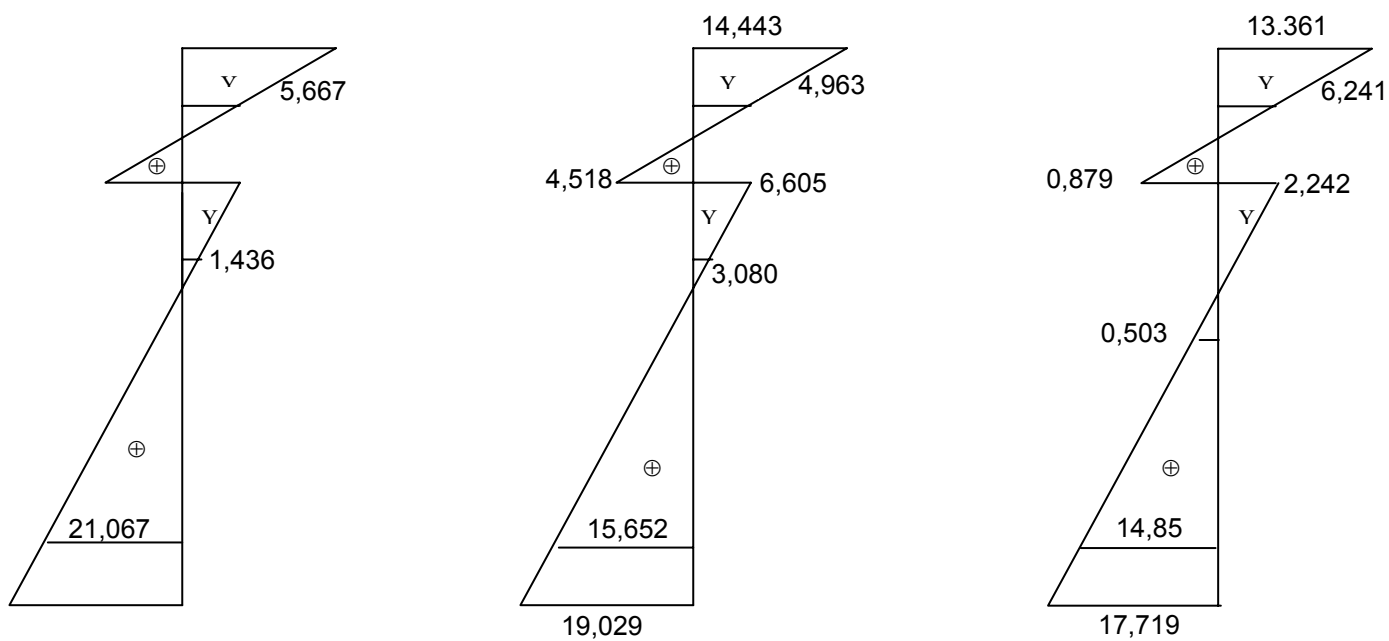
$f = 4,591\text{mm}$
 $K_{\text{ser}} = 3125\text{ N/mm}$

Numérico

$f = 5,105\text{ mm}$
 $K_{\text{ser}} = 3125\text{N/mm}$

Figura 7.2. Diagrama de Tensões

7.4. Comparação de resultados para Viga 3 (P = 30000N)



Experimental

$f = 8,15 \text{ mm}$

Analítico

$f = 5,701 \text{ mm}$
 $K_{\text{ser}} = 13000 \text{ N/mm}$

Numérico

$f = 4,610 \text{ mm}$
 $K_{\text{ser}} = 13000 \text{ N/mm}$

Figura 7.3. Diagrama de Tensões

7.5. Observações

- A flecha no meio do vão da viga V1 testada experimentalmente foi de 50,30mm, o que indica que o módulo de deslizamento da conexão é maior do que o obtido experimentalmente, e que os obtidos através das expressões empíricas.
- A flecha no meio do vão da viga V2 testada experimentalmente foi de 4,65mm, o que indica que o módulo de deslizamento da conexão é menor do que o obtido experimentalmente, e que os obtidos através das expressões empíricas.
- A flecha no meio do vão da viga V3 testada experimentalmente foi de 8,15mm, o que indica que o módulo de deslizamento da conexão é menor do que o obtido experimentalmente e os obtidos através das expressões empíricas.

Capítulo 8

Conclusões

8.1. Generalidades

Os objetivos principais deste estudo foram : apresentar um modelo analítico de dimensionamento à flexão de vigas mistas madeira / concreto solidarizadas com pinos metálicos e um modelo numérico para determinação de tensões e deformações destas vigas utilizando o programa SAP 2000.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 7, na revisão bibliográfica e nas aproximações alcançadas, estão resumidas, a seguir, as conclusões finais deste trabalho:

1. A revisão da bibliografia existente sobre vigas mistas madeira / concreto mostra o quanto é importante o desenvolvimento de novas pesquisas sobre esse tipo estrutural;
2. As expressões analíticas apresentadas por CECCOTTI (1995), derivadas das expressões do EUROCODE 5 (1993), que trata somente de vigas compostas madeira / madeira, apresentam resultados que comprovam sua validade para as estruturas mistas madeira / concreto;
3. A utilização do modelamento numérico com o SAP2000, foi possível quando o módulo de elasticidade do conector (dado de entrada para o programa), foi obtido através de ensaios de corpos de prova das ligações, conforme apresentado no item 6.2.;
A utilização dos módulos de elasticidade do material utilizado como conector, leva a resultados muito diferentes dos reais;
4. Os resultados analíticos e numéricos da Viga V1 são os que mais se aproximam da viga testada experimentalmente. Esta viga é composta madeira / madeira para qual a determinação do módulo de deslizamento da

conexão está normalizado, o que não ocorre com a viga composta madeira / concreto .

5. A conexão utilizada na Viga V2 apresenta uma efetividade γ_1 muito baixa, conforme verifica-se na tabela 5.2.

Os resultados analíticos e numéricos do deslocamento vertical estão muito próximos do resultado obtido experimentalmente.

Com relação às tensões há uma pequena divergência entre os resultados.

6. Os resultados analíticos e numéricos da Viga V3 diferem dos resultados da viga testada experimentalmente, o que pode confirmar que a determinação experimental do módulo de deslizamento da viga V3 não foi realizada corretamente, como observa TACITANO [2000] em sua dissertação.

Capítulo 9

Sugestões para Continuação dos Estudos

Entre os temas importantes para continuação desse estudo destacam-se os seguintes:

1. Normatizar o ensaio para obtenção do módulo de deslizamento da conexão;
2. Verificar, experimentalmente, outros tipos de conexão em viga T de madeira / concreto;
3. Modelar as peças ensaiadas utilizando-se outros programas de análise estrutural, principalmente os que levem em consideração o regime plástico da estrutura.
4. Verificar o comportamento dessas estruturas quando submetidas a carregamento de longa duração.