

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Estruturas

**“Contribuição para a análise de vigas mistas de
madeira laminada colada e concreto
(MLC/concreto)”**

Ana Lúcia Crespo Oliveira

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Belo Horizonte
Julho de 2002

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

**"CONTRIBUIÇÃO PARA A ANÁLISE DE VIGAS MISTAS DE
MADEIRA LAMINADA COLADA E CONCRETO
(MLC/CONCRETO)"**

Ana Lúcia Crespo Oliveira

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. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES/UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES/UFMG

Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
UNICAMP

Belo Horizonte, 19 de julho de 2002

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Eng. Civil Lysandro Albernaz Crespo e
Maria Christina dos Santos Crespo.

Ao meu esposo, Hélio Nonato de Oliveira e
nosso filho, Lucas Crespo Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Neste momento, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para que este trabalho se concluísse:

Primeiramente, à Deus, fonte de toda inspiração;

Ao meu pai Lysandro, pelo exemplo de dedicação e respeito à profissão abraçada;

À minha mãe, Christina, pelo exemplo de amor e confiança nos filhos;

Aos meus irmãos, Lysandro Jr., Eduardo, Tereza, Néio, Scheila e Tina, pelo carinho que nos une;

Aos demais familiares e amigos, pelas palavras de incentivo e pela paciência;

Ao meu esposo Hélio e Lucas, nosso filho, pela constante presença e compreensão;

Ao Prof. Edgar, orientador deste trabalho, pela competência e dedicação;

Aos demais professores do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, pela constante cooperação;

Aos funcionários da Secretaria e do Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, pela constante atenção;

A todos os colegas de mestrado, pela alegre convivência e companheirismo;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa parcial;

Ao provedor do programa ANSYS, pela viabilidade de uso desse programa;

o meu sincero reconhecimento.

“Se consegui ver mais além, foi por me colocar sobre os ombros de gigantes”.
Isaac Newton

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1- Critérios de dimensionamento de vigas mistas.....	7
2.2- Vigas mistas madeira/concreto, MLC/concreto e aço/concreto.....	10
2.3 - Coeficientes de Ponderação Para Materiais no Método dos Estados Limites.....	19
2.4 - Módulo de Elasticidade Secante do Concreto.....	20
2.5 - Cálculo da Largura Efetiva da Mesa de Concreto.....	23
2.6 - Módulo de deslizamento do elemento de ligação mecânica.....	30
2.7 - Modelos de Simulação Numérica Para Análise de Vigas Mistas madeira/concreto e MLC/concreto.....	42
2.8 - Situação da fronteira do conhecimento.....	43
3 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO.....	46
3.1 - Sobre o critério de dimensionamento.....	46
3.2 - Sobre os Coeficientes de Ponderação.....	47
3.3 - Sobre o Módulo de Elasticidade Secante do Concreto.....	47
3.4 - Sobre a Largura Efetiva da Laje de Concreto.....	48
3.5 - Sobre a Determinação da Resistência da Ligação Mecânica.....	49
3.6 - Sobre o Módulo de Deslizamento de Elementos de Ligação.....	49
4 ELEMENTOS DAS VIGAS MISTAS.....	51
4.1 - Introdução.....	51
4.2 - O material concreto.....	51
4.3 - O elemento de ligação.....	52
4.4 - O material madeira laminada colada.- MLC.....	53
4.4.1 - Análise teórica de vigas de MLC.....	53
4.4.2 - Procedimentos de dimensionamento de vigas de MLC segundo a NBR 7190 (1997).....	60
5 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO OS CRITÉRIOS PROPOSTOS.....	62

5.1 - Introdução	62
5.2 - Viga mista VC1- OLIVEIRA (1999).....	62
5.3 - Viga mista Protótipo 2 – MAGALHÃES (1997).....	76
5.4- Viga mista VPR-2 – SORIANO (2001).....	81
6 MODELO VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	87
6.1 - Introdução	87
6.2 - O modelo.....	87
6.3 - Simulação numérica 1	92
6.4 - Simulação numérica 2	97
6.5 - Simulação numérica 3	100
7 CONCLUSÕES	104
SUGESTÕES.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXO 1	114
APÊNDICE 1.....	118

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estrutura com arcos de MLC para cobertura de hangar para helicóptero. Fonte: ESTRUTURAL (2001).....	1
FIGURA 2 – Cobertura de ginásio esportivo utilizando vigas de MLC. Fonte:UNALAM (2002).	2
FIGURA 3 – Estrutura apertada em MLC. Fonte: UNALAM (2002)	2
FIGURA 4 – Ponte Vihantasalmi – Finlândia. Fonte: home page de MESTRA Engineering Ltd.....	3
FIGURA 5 – Esquema de viga mista MLC/concreto	4
FIGURA 6 - Comparação dos módulos de elasticidade secante do concreto. (formulações x valores experimentais)	23
FIGURA 7 – Definição da largura efetiva da laje de vigas mistas. Fonte: ELKELISH E ROBINSON (1986).....	26
FIGURA 8 – Definição das dimensões. Fonte EUROCODE 2 (1991).....	29
FIGURA 9 – Fixação das chapas metálicas. Fonte: OLIVEIRA (1999).....	36
FIGURA 10 - Definição das dimensões da largura efetiva. Fonte: EUROCODE 2 (1991).....	48
FIGURA 11 – Esquema de viga mista MLC/concreto	51
FIGURA 12 – Esquema da seção de uma viga de MLC. Fonte: CARRASCO (1989)..	54
FIGURA 13 - Esquema da seção de uma viga de MLC Fonte: CARRASCO (1989) ...	59
FIGURA 14 – Geometria e dimensões da VC1- MLC/concreto	63
FIGURA 15 – Fixação das chapas com dentes estampados. Fonte: OLIVEIRA (1999)	63
FIGURA 16 – Esquema das 11 lâminas da viga de MLC – VC1	65
FIGURA 17- Seção transversal de viga mista MLC/concreto.	68
FIGURA 18 – Seção transversal da laje de concreto.....	68
FIGURA 19 – Seção transversal da viga de MLC.....	69
FIGURA 20 – Aplicação de cargas e posição dos extensômetros. Unidade: cm	71
FIGURA 21 – Esquema da viga mista MLC/concreto e diagrama de tensões.....	71
FIGURA 22 - Geometria e dimensões do Protótipo 2. Unidade: cm	76
FIGURA 23 – Seção transversal da laje de concreto.....	77
FIGURA 24 - Seção transversal da viga de madeira.	78
FIGURA 25 – Seção transversal de viga mista madeira/concreto. Fonte: EUROCODE 5 (1994), parte 1-1	78
FIGURA 26 - Aplicação de cargas em Protótipo 2	80
FIGURA 27- Geometria e dimensões da VPR–2. Unidade: cm.....	81
FIGURA 28 – Seção transversal da laje de concreto.....	82
FIGURA 29 – Seção transversal da viga de madeira.	83
FIGURA 30 – Seção transversal de viga mista madeira/concreto. Fonte: EUROCODE 5 (1994), parte 1-1	84
FIGURA 31 – Sistema global adotado no modelo numérico	89
FIGURA 32 – Metade da seção transversal e malha da VC1.....	92
FIGURA 33 – Um quarto da viga mista VC1.	93
FIGURA 34 – Simulação da flexão de VC1.....	94
FIGURA 35 – Comparação de deslocamentos verticais para VC1	95

FIGURA 36- Comparação de tensões para VC1 – P = 40,13 KN.....	96
FIGURA 37- Comparação de tensões para VC1 – P = 145 KN.....	96
FIGURA 38 – Seção transversal e malha da metade da viga Protótipo 2.....	97
FIGURA 39 – Simulação da viga mista Protótipo 2.....	98
FIGURA 40 – Comparação de deslocamentos verticais para Protótipo 2.....	99
FIGURA 41 – Simulação de flexão da viga mista Protótipo 2. Unidades: cm.....	100
FIGURA 42 – Seção transversal e malha da metade da VPR2.....	100
FIGURA 43 – Simulação da metade da viga mista VPR2.....	102
FIGURA 44 – Simulação de flexão da VPR2. Unidades: cm.....	102
FIGURA 45 – Comparação dos deslocamentos verticais para VPR2.....	103
FIGURA A1- Esquema de viga T e diagrama de tensões. Fonte: EUROCODE 5, parte 1-1 (1994) – Anexo B.....	114
FIG. AP1 – Viga mista sem interação e diagrama de deformação.....	118
FIG.AP2 – Viga mista com interação total e diagrama de deformação.....	118
FIG.AP3 – Viga mista com interação parcial e diagrama de deformação.....	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Coeficientes de ponderação da resistência dos materiais	19
TABELA 2 - Valores de k_{ser} para elementos tipo pino (N/mm)	34
TABELA 3 - Coeficientes de ponderação propostos.....	47
TABELA 4 - Comparação de valores de módulo de deslizamento	50
TABELA 5 – Propriedades das lâminas homogeneizadas	65
TABELA 6 - Valores de tensões pelo método proposto- P1 = 145000N.....	72
TABELA 7 - Valores de tensões pelo método proposto P=40130 N.....	73
TABELA 8 - Carregamentos e esforços solicitantes	73
TABELA 9 - Valores de tensão- P1=145000 N	74
TABELA 10 - Valores de tensão- P=40130 N	74
TABELA 11 – Cálculo de flecha máxima para VC1	75
TABELA 12 – Flecha máxima teórica para Protótipo 2	81
TABELA 13 – Flecha máxima para VPR-2	86
TABELA 14 - Valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal	91
TABELA 15 - Tabela de valores médios de coeficientes de Poisson	91
TABELA 16 – Comparação dos valores de deslocamentos verticais para VC1	94
TABELA 17 – Comparação dos valores de deslocamentos verticais para Protótipo 2..	99
TABELA 18 - Comparação dos valores de deslocamentos verticais para VPR-2	103

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma contribuição para a sistemática de dimensionamento de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto (MLC/concreto) sujeitas à flexão pura. O objetivo principal é a complementação de um trabalho experimental com vigas mistas de MLC/concreto desenvolvido anteriormente no Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Visando atender ao objetivo principal foi proposto um critério de dimensionamento teórico assim como um modelo numérico via método de elementos finito para uma avaliação mais completa do comportamento da viga mista em questão. Após uma criteriosa revisão da bibliografia de normas técnicas, nacionais e internacionais, adotou-se como modelo os critérios da EUROCODE 5, parte 1-1/1994 e da EUROCODE 5, parte 2/1997. Levando-se em consideração a realidade brasileira e a revisão bibliográfica, o seguinte passo consistiu na definição de alguns parâmetros básicos, tais como: os coeficientes de ponderação para materiais no método dos estados limites; o módulo de elasticidade secante para o concreto; as equações para se determinar a largura efetiva da mesa de concreto e o módulo de deslizamento dos elementos de ligação mecânica. Foram adotadas as seguintes hipóteses para o critério de dimensionamento e para o modelo numérico: o concreto foi considerado um material isotrópico, a madeira foi considerada um material ortotrópico, foi realizada uma análise estática com comportamento elástico e linear para o concreto e a madeira. Buscando-se ampliar a abrangência de aplicação dos critérios e método numérico propostos, resolveu-se utilizá-los para analisar outras vigas mistas de madeira/concreto. Os resultados obtidos através das análises experimentais demonstram que todas as vigas mistas de MLC/concreto e madeira/concreto apresentam um comportamento não-linear. Apesar desta constatação, considerou-se que os resultados obtidos, tanto através da sistemática proposta para o dimensionamento quanto através do modelo numérico, foram amplamente satisfatórios, mesmo trabalhando-se com a hipótese de linearidade.

Palavras-chave: vigas mistas, madeira laminada colada e concreto, análise numérica.

ABSTRACT

This work presents a contribution to the design of glulam and concrete mixed beams subject to pure bending loading. The main purpose of this work is to perform complementar analysis about recent laboratory tests of glulam/concrete mixed beams which has been developed at *Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas of Universidade Federal de Minas Gerais*. By the proposed design specification in this work, a glulam/concrete mixed beam and another two wood/concrete composite beam have been analyzed. All of them have been previously experimentally analyzed by brazilian researchers. A post critical review of the international and national literature made possible the adoption of the procedure included in European Standard, EUROCODE 5, part 1-1/1994 and EUROCODE 5, part 2/1997, as design model. The brazilian materials and the parameters of the Brazilian and international codes have been taken into account with basic parameters proposed, such as partial safety factors for material properties for ultimate limit states, the secant elastic modulus of concrete, the equation to obtain the effective width of the concrete flange and the equation to obtain the instantaneous slip modulus of the shear connection. The ANSYS program, version 5.7, has been used to perform the numerical analysis. Linear elastostatic analysis has been considered. The concrete is taken to be an isotropic material and the wood is considered orthotropic. The final results of stresses and displacements obtained by ANSYS and the proposed design specification have been in good agreement with the values obtained in the laboratory tests.

Keywords: mixed beam, glulam and concrete, design structures, numerical analysis.

1

INTRODUÇÃO

A madeira laminada colada (MLC), desde as suas primeiras peças construídas no início do século XX, vem sendo utilizada em edificações na Europa, Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia. No Brasil encontra-se em fase de franco desenvolvimento como atesta a obra com arcos de 21 m de vão e seção variável mostrada na FIG.1.



FIGURA 1 – Estrutura com arcos de MLC para cobertura de hangar para helicóptero.
Fonte: ESTRUTURAL (2001)

Na FIG. 2, pode-se observar a estrutura de cobertura de um ginásio esportivo, constituída de vigas de MLC, executada nos Estados Unidos. Para termos uma noção de vãos adotados, as quadras internacionais apresentam comprimentos entre 38 e 42 m e largura entre 18 e 22 m.



FIGURA 2 – Cobertura de ginásio esportivo utilizando vigas de MLC.
Fonte: UNALAM (2002).

Na FIG.3 pode-se apreciar uma estrutura aporticada, mostrando toda a versatilidade das obras com MLC. Esta estrutura apresenta vãos de aproximadamente 18 m.



FIGURA 3 – Estrutura aporticada em MLC. Fonte: UNALAM (2002)

O uso de vigas de MLC associadas à uma laje de concreto armado foi uma consequência natural, acompanhando-se a tendência mundial para se executar estruturas mistas. Um dos usos mais significativos deste tipo de estrutura, encontra-se nas pontes executadas com vigas mistas MLC/concreto.

A Ponte Vihantasalmi, construída na Finlândia e mostrada na foto da FIG.4, é um dos mais recentes exemplos.



FIGURA 4 – Ponte Vihantasalmi – Finlândia.
Fonte: home page de MESTRA Engineering Ltd.

Considerada uma das maiores pontes de madeira construídas no mundo, utilizou o estado-da-arte da tecnologia de construção da madeira. Apresenta a estrutura constituída de laje em concreto armado e vigas de MLC solidarizadas como uma estrutura mista através de barras de aço. Vãos centrais de 42 m e laterais de 21 m. As vigas secundárias de MLC nos vãos principais, foram suportadas por treliças e cabos de aço. Foi aberta ao tráfego no período 1999-2000.

Encontra-se na literatura, também, diversas referências de vigas mistas de madeira/concreto e MLC/concreto usadas para pisos de edificações comerciais, passarelas e sobre restauração de edificações históricas, além de referências sobre recuperação de pontes de madeiras que, após alterações na sua concepção original, passaram de pontes totalmente executadas em madeira para pontes mistas, com vigas constituídas de madeira e laje em concreto armado.

Os critérios de dimensionamento propostos neste trabalho destinam-se ao dimensionamento de vigas mistas MLC/concreto solicitadas à flexão.

Na FIG. 5 é mostrado o esquema das vigas mistas de MLC/concreto. Elas apresentam seção transversal em forma de T, podendo, também, ter a forma de L, nas quais o elemento (1) corresponde à laje de concreto; o elemento (2) corresponde à viga de MLC e o elemento (3) corresponde ao elemento de ligação mecânica.

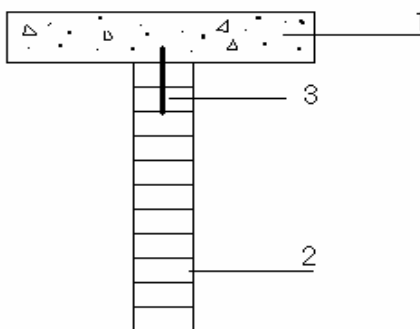


FIGURA 5 – Esquema de viga mista MLC/concreto

Estes elementos proporcionam a ligação mecânica entre a laje de concreto armado e a viga de madeira e na superfície de contato entre os dois materiais desenvolve-se um esforço horizontal que impede o deslizamento relativo entre as partes. Estes elementos devem ser capazes de garantir o trabalho conjunto entre a laje e a viga de madeira viabilizando a viga mista. As ligações podem possibilitar uma interação total ou parcial entre a laje e a viga. Em uma interação total a ligação é rígida. Em uma interação parcial se utiliza uma ligação flexível na qual a laje de concreto fica solicitada à tração no seu bordo inferior e a viga de madeira fica solicitada à compressão no seu bordo superior. Ver as figuras no Apêndice 1.

Para uniformização de conceitos, desde o início do trabalho, será adotado o termo: *elemento de ligação mecânica* no lugar do termo: *conector* visto que, o termo de origem inglesa “conector” é, freqüentemente, utilizado como sinônimo de elemento de ligação mecânica nas normas EUROCODE 4 e 5, NBR 8800 (1986) e por diversos pesquisadores mas, para a NBR 7190 (1997) e a DIN 1052 (1988), “conectores” correspondem a anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados.

São várias as vantagens apresentadas por diversos pesquisadores nacionais e internacionais na utilização do sistema misto madeira/concreto, dentre elas destacam-se: o aumento da capacidade resistente da viga mista em relação à viga simples; a redução dos problemas relacionados com vibrações, muito comuns em estruturas de madeira; acréscimo na resistência ao fogo¹, comparando-se com estruturas constituídas somente de elemento madeira devido à associação com o elemento concreto; redução do peso próprio da estrutura em relação às estruturas de concreto armado ou de aço/concreto e conseqüente diminuição no custo total. Se usada em construções industriais, especialmente em lajes de pisos, apresenta vantagens como melhoria nas características acústicas comparadas aos sistemas constituídos somente de aço e/ou concreto .

O objetivo principal desta dissertação é a complementação do trabalho experimental desenvolvido pelo pesquisador Siderlan Vieira de Oliveira no Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG. Esse trabalho experimental consistiu de ensaios realizados com vigas mistas de madeira laminada colada e concreto e foram realizados conforme OLIVEIRA (1999).

Para atender ao objetivo proposto foi necessário:

- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica para conhecer a situação da fronteira do conhecimento relativo às vigas mistas madeira/concreto e às vigas mistas MLC/concreto.
- ✓ Analisar os critérios de dimensionamento propostos nas literaturas técnicas internacionais sobre vigas mistas madeira/concreto solicitadas à flexão pura e, após diversas análises e considerações, adotar um critério como modelo.
- ✓ Analisar os parâmetros básicos necessários ao dimensionamento de vigas mistas MLC/concreto e madeira/concreto apresentando proposta de acordo com os materiais brasileiros e com os parâmetros apresentados pelas diversas normas técnicas.

¹ A EUROCODE 5 apresenta um suplemento para dimensionamento das estruturas de madeira em situação de incêndio.

- ✓ Apresentar uma proposta de critério de dimensionamento.
- ✓ Desenvolver um modelo numérico através do programa ANSYS.
- ✓ Realizar um dimensionamento teórico adotando o critério de dimensionamento proposto.
- ✓ Realizar uma análise numérica utilizando o modelo proposto.
- ✓ Realizar uma comparação de resultados fornecidos através das três análises: experimental, teórica proposta e numérica.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Realizou-se a revisão bibliográfica de normas técnicas e trabalhos de pesquisadores de acordo com os seguintes itens:

- ✓ Critérios de dimensionamento de vigas mistas;
- ✓ Vigas mistas madeira/concreto, MLC/concreto e aço/concreto;
- ✓ Coeficientes de ponderação para materiais no método dos estados limites;
- ✓ Módulo de elasticidade secante do concreto;
- ✓ Cálculo da largura efetiva da mesa de concreto;
- ✓ Módulo de deslizamento dos elementos de ligação mecânica;
- ✓ Modelos de simulação numérica para análise de vigas mistas.

2.1- Critérios de dimensionamento de vigas mistas

A AITC nas versões 1966, 1985 e 1994 apresenta uma metodologia de dimensionamento de vigas mistas de madeira/concreto para pontes com base no método das tensões admissíveis. Orienta sobre o uso combinado de entalhes de 1/2" a 3/4" no topo da viga de madeira e cavilhas de seção retangular associadas a pregos ou parafusos com o objetivo de prevenir a separação entre os dois materiais na interface e resistir ao cisalhamento horizontal. Considera que as tensões secundárias de cisalhamento, devidas à temperatura e induzidas pela expansão térmica ou contração do concreto, sejam resistidas pela madeira; toda a carga permanente seja resistida pela madeira sendo que a

estrutura mista suporta o momento de flexão positivo. São utilizadas barras de aço e a rigidez da própria madeira para promover a resistência ao momento de flexão negativo sobre os apoios em vãos contínuos.

A norma alemã, DIN 1052 (1969), apresenta uma metodologia de dimensionamento de vigas mistas de madeira/madeira, considerando a união não rígida, também, pelo método das tensões admissíveis. São analisadas seções T, I simétrico, I não simétrico e seção caixão. Posteriormente, surge uma nova versão modificada e ampliada, a DIN 1052 (1988), parte 1 (referente ao dimensionamento) e parte 2 (referente às ligações mecânicas), apresentando critérios para o dimensionamento de “Vigas mistas com ligações não rígidas entre flange e alma”, de acordo com a Teoria de Möhler apud WAGNER et al (1983). As vigas mistas aqui tratadas são constituídas somente de madeira e/ou compostos de madeira. Em relação à versão anterior, houve alterações nas formulações para o cálculo das tensões em vigas mistas, para o cálculo do momento de inércia efetivo e uma ampliação, na parte 2, sobre ligações mecânicas, com a inclusão de uma extensa tabela contendo equações para o cálculo de valores de módulos de deslizamento para uma série de elementos de ligação.

A EUROCODE 5, parte 1-1 (1994), apresenta critérios mais modernos de dimensionamento baseados nos estados limites. Os estados limites de utilização são caracterizados “pelas deformações das estruturas que resultam dos efeitos das ações como força axial e de cisalhamento, momentos de flexão e deslizamento das juntas de união e aquelas devido à umidade e à vibração excessiva”. Os estados limites últimos são caracterizados pela consideração da presença de deslizamento entre os elementos. Os cálculos assumem uma relação linear entre força e deslizamento. O método para o cálculo da capacidade resistente de vigas com juntas unidas mecanicamente é apresentado no anexo B da EUROCODE 5, onde se afirma que o método proposto pode ser aplicado em peças mistas feitas com madeira em combinação com “outros materiais”. Para a verificação das ligações mecânicas, considera-se que a capacidade de resistência característica de uma união com múltiplos elementos de ligação irá, freqüentemente, ser menor do que a soma das capacidades individuais de cada elemento; considera-se que a capacidade resistente característica da junta será, com freqüência, reduzida se estiver sujeita a uma reversão de carregamento em ações de

longa e média duração; considera que se a carga na junta for transferida através de mais de um tipo de elemento de ligação deve ser considerado o efeito das diferentes propriedades destes elementos de ligação. Observa-se que colas e elementos mecânicos apresentam diferentes propriedades de rigidez e não devem atuar juntos.

A EUROCODE 5, parte 2 (1997), destinada ao dimensionamento de pontes, apresenta orientações adicionais às indicadas na EUROCODE 5, parte 1-1. Para peças mistas de madeira/concreto sujeitas, principalmente, à flexão; verifica os estados limites últimos nas ligações e nos elementos que constituem as vigas mistas madeira/concreto; as ligações poderão ser determinadas para transmitir todas as forças devido à ação mista e à aderência natural entre os elementos não deve ser considerada; a condição de equilíbrio deve ser verificada para todas as partes da viga mista; para outros estados limites além da fadiga, o comportamento elasto-plástico da ligação pode ser levado em consideração; para as partes individuais (madeira e concreto) pode ser aceita uma distribuição linear de deformação; a resistência à tração do concreto pode ser desprezada para a verificação da capacidade resistente. As concentrações de tensão podem ser consideradas devido a mudanças abruptas no módulo das seções, entalhes, descontinuidade nos dispositivos de ligação (causada pela distribuição e/ou diferença de rigidez) ou introdução de forças localizadas. Os elementos de ligação mecânica indicados são elementos tipo pino, como pregos e parafusos ou entalhes na madeira. A resistência de uniões realizadas com elementos tipo pinos entre madeira/concreto poderia ser tomada 20% maior do que para as correspondentes juntas entre madeira/madeira, de acordo com a EUROCODE 5, parte 1-1 e a rigidez das juntas com os mesmos materiais (madeira/concreto), poderia ser tomada 100% maior do que para as correspondentes juntas entre madeira/madeira.

A NBR 8800 (1986), utiliza o método dos estados limites para o dimensionamento de vigas mistas de aço/concreto baseando-se nos critérios das normas americanas. Devem ser verificados os seguintes limites: a resistência última da seção mista; a resistência última da seção de aço, durante a construção, caso o sistema seja não escorado; a avaliação da flecha máxima do piso; avaliação do seu comportamento à vibração e o estado de fissuração da laje de concreto, sob cargas de serviço. Nos estados limites

últimos, deve-se verificar a ligação, através de pinos metálicos soldados na viga mista aço/concreto, à ruína do concreto por esmagamento/fendilhamento; ou ruptura do elemento de ligação por corte.

A EUROCODE 4 (1992) também utiliza critérios de dimensionamento nos estados limites últimos para estruturas mistas aço/concreto realizando as seguintes verificações: resistência das seções transversais críticas; resistência ao cisalhamento longitudinal; resistência à flambagem por torção lateral no caso de vãos contínuos ou vigas em balanço; resistência à flambagem por cisalhamento e flambagem da alma; desconsidera-se o efeito de atrito natural entre o aço e o concreto. Esta norma considera, nas ligações de cisalhamento, tanto o uso de pinos flexíveis quanto o uso de pinos rígidos. O elemento dútil ou flexível é caracterizado pelo elemento que apresenta uma capacidade de deformação suficiente que justifique a suposição de um comportamento plástico ideal dos elementos de ligação mecânica na estrutura. Sobre a utilização de concreto normal ou concreto leve, orienta que devem ser seguidas as orientações da EUROCODE 2 (1991).

2.2- Vigas mistas madeira/concreto, MLC/concreto e aço/concreto

WAGNER e MONGE (1983) apresentam o estudo da Teoria de Möhler² desenvolvida em 1956 e que trata do comportamento de vigas mistas de madeira com elementos de ligação flexíveis sujeitas à flexão. A teoria consiste na adaptação dos critérios de dimensionamento às características elásticas da ligação entre as peças individuais de forma que, as modificações devem incorporar as reduções que ocorrem nas propriedades geométricas da seção transversal, devido aos deslizamentos relativos que se originam entre as peças individuais ao flexionar-se a viga mista. Estes fatores de redução analíticos foram desenvolvidos a partir de princípios estáticos e da resistência dos materiais. De acordo com os autores, a norma DIN 1052 (1969) adota esta teoria em

² Möhler, K. 1956. Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengestezten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln. Habilitation, Technische Universität Karlsruhe. . (Comportamento de vigas à flexão e pilares à compressão em seções mistas com elementos de ligação flexíveis).

seu critério de dimensionamento de vigas mistas. A teoria de ligação elástica assimila o efeito da disposição, em uma junta de união entre madeiras, de “n” fileiras de meios de união mecânicos caracterizados por seu módulo de deslizamento “C” (kgf/cm), com um espaçamento “e” (cm) entre elementos vizinhos de uma fileira, a uma ligação de natureza elástica entre as peças unidas, expressa na equação 1.

$$\bar{C} = \frac{C}{e/n} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

O significado desta equação equivale a substituir o efeito da distribuição discreta de meios de união deformáveis por uma ligação de cisalhamento de efeito contínuo, que permite, por sua vez, estimar os deslizamentos relativos “S” que se produzem entre as peças de madeira ao atuar na união uma força de cisalhamento “T” (kgf/cm), segundo a equação 2:

$$S = \frac{T}{\bar{C}} \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

A hipótese simplificadora desta teoria admite que a madeira e os meios de união ficam solicitados no regime elástico. Os resultados permitem estabelecer uma expressão do momento de inércia efetivo conforme a equação 3:

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^n I_{i_i} + \gamma \sum_{i=1}^n A_{i_i} (a_{i_i})^2 \quad (\text{cm}^4) \quad (3)$$

com

I_{i_i} = momento de inércia de cada uma das seções transversais, com relação ao seu eixo de gravidade, paralelo ao eixo neutro de flexão, em cm^4 ;

A_{i_i} = área das seções transversais individuais, em cm^2 ;

a_{i_i} = distância entre o centro de gravidade da seção transversal do elemento i, e o eixo de gravidade da seção transversal mista, em cm;

n = número de peças individuais;

γ = fator de redução da inércia do conjunto, tal que $0 \leq \gamma \leq 1$, sendo

representado pela equação 4:

$$\gamma = \frac{I}{I+k} \quad (4)$$

na qual k , é uma função de diversas variáveis, tais como: do módulo de elasticidade e da área da seção transversal das peças, da distância entre elementos de ligação, do vão da viga e da rigidez da ligação mecânica.

Já CECCOTTI (1995) apresenta um estudo sobre a resistência de estruturas mistas de madeira/concreto e discute os parâmetros que afetam o seu dimensionamento. Considera que, a princípio, é difícil obter um entrosamento entre esses materiais porque suas propriedades mecânicas e seus comportamentos higro-térmicos são diferentes. No entanto, esta diferença não tem impedido um trabalho de certa forma eficiente do conjunto. Na avaliação do autor, tanto o módulo de elasticidade do concreto quanto o módulo de deslizamento dos elementos de ligação, ou seja, os módulos de rigidez dos materiais, são determinados na fase de comportamento elástico-linear. Por esta razão é coerente a realização do dimensionamento no regime elástico-linear. Este artigo apresenta um exemplo de dimensionamento orientando-se pelas EUROCODES 2, 4 e 5 e pelos trabalhos do Step/Eurofortech, Step 1³. O autor apresenta exemplos de sistemas de ligações mecânicas entre madeira/concreto, mais utilizados, classificando-os quanto à rigidez efetiva à flexão.

Em 1996, CECCOTTI e CAPRETTI (1996) apresentaram as conclusões sobre o monitoramento de vigas mistas MLC/concreto com chapa de aço incorporada. Durante 5 anos foi estudado o comportamento de três vigas de 10 metros de vão. Tais vigas são parte integrante da laje de piso da estrutura de um prédio e apresentam, como elementos de ligação, barras de aço para concreto armado de 18 mm de diâmetro colocadas em intervalos variáveis de 150 a 300 mm. Como parte do monitoramento, foram

³ Step / EUROFORTECH – na initiative under the EU Comett Programme – STEP – The Structural Timber Education programme. Delft University of Technology. The Netherlands.

construídas, em escala natural, duas vigas T de 6 m de vão, interligadas por laje de concreto com as seguintes características: como elementos de ligação, foram utilizadas barras de aço para concreto armado de 14 mm de diâmetro colocadas em intervalos variáveis de 150 a 450 mm, utilizando-se pré-furação e fixação com resina epóxi; foram colocadas em ambiente descoberto, para acompanhamento de variações ambientais e de temperaturas e as influências no comportamento estrutural do sistema misto. Segundo os autores, no estado limite de serviço, as deformações deste tipo de estrutura representam um aspecto importante tanto na análise elástica de curta duração quanto no comportamento de longa duração. Para o dimensionamento, foram seguidas as orientações da EUROCODE 5, parte 1-1, 1993. As análises do monitoramento mostram que as curvas de flechas e deslizamentos se alternam, apresentando fases opostas, isto é, onde uma é máxima a outra apresenta um mínimo, devido à influência do efeito higro-mecânico entre madeira e concreto. Este fenômeno se processa da seguinte maneira: a retração na madeira diminui a flecha na viga e aumenta o deslizamento, enquanto o inchamento da madeira aumenta a flecha e, conseqüentemente, diminui o deslizamento. Nos primeiros meses do monitoramento ocorreu uma significativa recuperação nas flechas devido à forte redução da umidade na madeira.

Já STEVANOVIC (1996) considera que em todas as vigas mistas madeira/concreto, que apresentam ligações mecânicas, existe relativo deslizamento na ligação devido às cargas externas assim como devido às características próprias da madeira. Segundo o autor, métodos desenvolvidos pela teoria da elasticidade tornam possível o cálculo das tensões e deformações de vigas mistas entretanto, são válidos para material elástico ideal, o que não corresponde ao comportamento real de estruturas mistas madeira/concreto. Afirma também que, até o momento, os métodos de acordo com a teoria da elasticidade são satisfatórios, em uso prático, adotando-se algumas considerações para a sua análise, tais como: a madeira e o concreto serem materiais isotrópicos e elásticos, as seções planas permanecerem planas e perpendiculares ao eixo deformado da seção; os meios de ligação estarem igualmente espaçados e poderem ser considerados como ligações contínuas equivalentes; as seções transversais de concreto e madeira serem constantes ao longo do vão; madeira e concreto apresentam flechas iguais em todos os pontos da ligação e as cargas axiais serem aplicadas no centro de gravidade do flange de concreto.

Para MAKIPURO e JUTILA (1999), o comportamento de estruturas mistas com componentes de madeira nem sempre obedece às leis da teoria de flexão, existindo fatores que freqüentemente são desconsiderados como, por exemplo, a variação das características do concreto devido às mudanças na umidade, a deformação transversal da madeira e a participação das extremidades da viga antes da linha dos apoios. Segundo os autores, o objetivo deste trabalho é esclarecer sobre os fundamentos de alguns fenômenos freqüentes em estruturas mistas e apresentar algumas diretrizes para analisá-las. Os autores afirmam que, “em estruturas mistas, em que a madeira seja um componente dominante, as propriedades específicas da madeira afetam o comportamento da estrutura mais do que em uma estrutura, puramente de madeira. Valores característicos da madeira ou produtos compostos de madeira, podem ser encontrados nos manuais mas, em muitos casos, estão camuflados devido às considerações de segurança feitas por outras razões. Citam como exemplo, o módulo de elasticidade da madeira ser freqüentemente muito menor comparado ao valor real.” Devido a estes fatos, o projetista de estruturas mistas deve continuamente buscar respaldo em informações avaliadas na literatura e relatórios de ensaios experimentais. Com relação ao concreto armado, os autores afirmam que o efeito do peso próprio é considerável nas estruturas mistas, executadas com um sistema de não escoramento, sendo esta a razão da preferência de utilização de concreto de alta resistência associado à menor espessura das lajes, mas que a quantidade de cimento, no entanto, deve ser capaz de reduzir efeitos de contração do concreto”. Com relação aos elementos de ligação, sem especificar os diferentes tipos desenvolvidos e utilizados, os autores esclarecem que “a análise das curvas carga/deslizamento pode ser realizada tanto no estado de utilização quanto no estado último. Estas relações podem ser bastante diferentes dependendo do tipo de elemento de ligação adotado. A elasticidade e mesmo a plasticidade são características desejadas dos elementos de ligação uma vez que a distribuição da força de cisalhamento entre os elementos de ligação vizinhos torna-se ainda maior. O comportamento plástico, entretanto, não pode ser tolerado no estado de utilização, pois poderia conduzir a uma ruptura precoce devido à fadiga. De maneira similar, se as deformações elásticas são muito grandes, a ação do sistema misto é enfraquecida desnecessariamente”. Os autores ainda esclarecem que “a rigidez de elementos de ligação rígidos é tão alta que possíveis efeitos de deslizamento nas juntas

são desprezados quando se analisa o comportamento da estrutura como um todo. Um bom exemplo, neste sentido, encontra-se nas barras de aço para concreto armado afixadas com adesivos, tipo epóxi, e ligações através de entalhes na madeira. A ligação mecânica do tipo rígida evita a ruptura brusca, da madeira, por cisalhamento, devido às deformações serem menores”.

AMADIO, CECCOTTI et al. (2000) consideram que, sob um ponto de vista prático, fórmulas aproximadas para o dimensionamento de estruturas mistas madeira/concreto como as propostas pela EUROCODE 5 (1994), são usadas para os estados limites últimos e de utilização, em situações de curta duração. Nesta situação, adota-se o módulo de deslizamento secante para as ligações mecânicas obtido experimentalmente através de ensaios de cisalhamento de corpos-de-prova. Os autores citam o seguinte: “quando os fenômenos de longa duração são relevantes, como por exemplo, com vigas de vãos longos e/ou condições ambientais mais severas, aproximações podem conduzir a erros, sendo conveniente adotar-se modelos numéricos mais refinados que levam em consideração o comportamento estrutural de longa duração”. Este artigo apresenta os aspectos teóricos básicos de um algoritmo numérico/genérico além de uma análise preliminar de longa duração de vigas mistas de madeira/concreto. O algoritmo permite considerar a deformação lenta do concreto e da madeira, e os efeitos higro-mecânicos da madeira, a deformação inelástica da madeira e do concreto, variações térmicas e de umidade considerando uma lei de deformação lenta genérica. As estruturas analisadas são as mesmas apresentadas em CAPRETTI e CECCOTTI (1996). Através deste trabalho, foi possível obter dados experimentais que mostram um aumento geral na flecha máxima, nas forças internas e de deslizamento em relação ao caso de deformabilidade elástica da ligação mecânica e da visco-elasticidade do concreto e da madeira. Por estas razões, os autores sentem a necessidade de se realizar uma aproximação numérica que pode se tornar uma ferramenta útil na avaliação da importância desses efeitos e, desta maneira, permitir um dimensionamento mais refinado para este tipo de sistema estrutural. As conclusões do trabalho foram: “o modelo de elementos finitos proposto pelos autores apresenta grandes possibilidades de uso considerando ser necessário o prosseguimento das pesquisas com a realização de mais ensaios experimentais para a calibração do mesmo. Consideram que o

comportamento das ligações mecânicas precisam ser estudadas particularmente com relação à deformação lenta e ao efeito higro-mecânico da madeira. Ensaios experimentais de longa duração também precisam ser realizados bem como a verificação da influência da expansão do concreto e as modalidades de construção (escoradas e não escoradas), uma vez que as deformações inelásticas representam um aspecto importante no comportamento estrutural de vigas mistas madeira/concreto”.

AASHEIM (2000), apresenta os aspectos desenvolvidos no “Programa de pontes de madeira dos países nórdicos”, iniciado em 1994. A primeira fase, de 1994 a 1997 contou com a participação da Dinamarca, Noruega, Finlândia e Suécia. Dentre os objetivos principais do programa , além de demonstrar que pontes de madeira são duráveis e ecologicamente corretas, desenvolver soluções para incrementar o uso de pontes de madeira e disseminar o conhecimento sobre o tema para projetistas, usuários e compradores. Destaca-se o estudo das pontes mistas madeira/concreto na segunda fase, de 1997 a 1999. Neste aspecto, as principais metas foram: desenvolver elementos de ligação do tipo barras, de forma que pudessem ser usados para unir partes de concreto ou madeira, pré-fabricados, a elementos de vigas constituídas de MLC; desenvolver métodos analíticos para vários tipos de elementos de ligação e um procedimento para dimensionamento de pontes mistas madeira/concreto considerando o método de dimensionamento da EUROCODE 5; adquirir importantes informações sobre o comportamento das pontes mistas de madeira/concreto monitorando o comportamento das pontes já executadas e em serviço. Segundo o autor, a primeira ponte mista de madeira / concreto construída nos países nórdicos foi inaugurada em 1993 na Finlândia. A continuidade da pesquisa deste sistema estrutural foi o principal tema de estudo no período compreendido entre 1999 e 2001.

YTTRUP e NOLAN (2000) investigam o sistema de ligação entre madeira/concreto denominado “concrete enhanced timber”. O sistema consiste de pequenos entalhes realizados no topo da viga de madeira, de maneira que, durante a concretagem, o concreto preencha os entalhes. Para os autores, este procedimento permite uma efetiva transferência de cisalhamento entre a viga de madeira e a laje de concreto. Concluem, também, que os ensaios de partes das vigas envolvidas pelo concreto, sugerem que uma

ação total de viga mista madeira/concreto é obtida sem o uso de qualquer elemento de aço.

YTTRUP (2000) investiga o uso do sistema de entalhes na madeira, preenchidos com concreto, aplicado a vigas pré-fabricadas de madeira. Para o autor, o sistema de entalhe, como elemento de cisalhamento, aumenta a carga de ruptura em torno de 250 %, demonstrando a efetividade deste procedimento de ligação na produção de um sistema misto.

Segundo QUEIROZ (a) (2001), os sistemas construtivos de vigas mistas aço/concreto determinam os critérios de dimensionamento. No sistema escorado, toda a carga é resistida pelo sistema misto. A viga será escorada até que o concreto atinja uma resistência suficiente para que a ação mista possa ser desenvolvida. No sistema não escorado, a viga de aço, trabalhando isoladamente, é dimensionada para resistir ao peso próprio do concreto fresco e outras cargas da construção que, por ventura, sejam aplicadas antes da cura do concreto.

Na *home page* da INFRATECH (2001) encontra-se um informativo sobre os ensaios dinâmicos na ponte rodoviária “Maria River Bridge”, Austrália, construída em 1955, considerada a primeira ponte a usar uma estrutura mista madeira/concreto, conforme pesquisa da citada empresa. A laje foi executada em concreto armado e as vigas constituídas de troncos de madeira roliça. A ponte, de três vãos, apresenta ainda troncos de madeira funcionando como pilares e possui uma faixa de tráfego de 6,7 m. Os objetivos da investigação foram: determinar se a ponte poderia permanecer em serviço, com segurança; compreender o comportamento da estrutura depois de 40 anos em funcionamento; determinar a resposta da estrutura para um tráfego expresso considerando-se que, na época de sua construção, o fluxo de veículos era menor, verificando, inclusive, os efeitos causados por uma rodovia de traçado antigo. Como resultado do programa, a empresa avaliadora acredita que a ponte em estudo poderá permanecer em serviço com segurança, e o conhecimento adquirido será incorporado à recuperação de outras pontes mistas de madeira/concreto naquele país.

SORIANO (2001) apresenta pesquisa experimental na área de estruturas em concreto/madeira abordando diferentes tipos de ligação: prego comum, 24 x 60, de corpo liso e parafusos com rosca soberba, com diâmetros de 3/8'' (9,5 mm) e 1/2'' (12,7 mm), afixados à estrutura através de pré-furação. Foram avaliados os desempenhos mecânicos de estruturas ensaiadas em tamanho real: 06 vigas de seção T, com 3,00 m de vão, alma em madeira serrada de seção 5 cm x 15 cm da espécie *Goupia glabra* (cupiúba) de densidade média de 838 kg/m³ e laje de concreto com seção 30 cm x 4 cm empregando-se uma malha com barras de aço CA-50 com 5 mm de diâmetro. Também foram ensaiados painéis e realizados ensaios de corpos-de-prova para determinação do módulo de deslizamento dos elementos de ligação. Para o dimensionamento e verificação das estruturas mistas foi adotado um método de cálculo, segundo o autor, adaptado da EUROCODE 5 (1993) e indicado pelo pesquisador CECCOTTI (1995).

MOREIRA (2001) apresenta um cálculo analítico para dimensionamento à flexão de vigas mistas madeira/concreto com seção T, solidarizadas através de pinos metálicos (pregos lisos), aplicados com pistola, seguindo os procedimentos apresentados pelo pesquisador CECCOTTI(1995).

A empresa MESTRA ENGINEERING LTD (2002), apresenta em sua *home page* os projetos desenvolvidos na área de pontes com vigas mistas. Dentre estes projetos, destaca-se a Ponte Vihantasalmi, apresenta em foto na FIG.4, anteriormente mostrada, construída na Finlândia e aberta ao tráfego, em 1999. Esta estrutura consiste de cinco vãos, com um total de 168 metros entre os suportes, e um comprimento total de 182 metros. A largura da pista de tráfego apresenta 11 metros e a pista para pedestres e bicicletas, três metros. As vigas principais estão representadas por um par de vigas de MLC de 1350 mm x 265 mm cada uma. No topo das vigas de MLC foram realizados entalhes (dentes) para promover na interface de MLC/concreto uma transferência de cisalhamento. A altura de navegação é de 4,05 m. A estrutura do tabuleiro utilizou o estado-da-arte da tecnologia de construção em madeira na qual a laje de concreto armado e as vigas de madeira laminada colada foram unidas como uma estrutura mista através de barras de aço. As vigas secundárias nos vãos principais estão suportadas através de contraventamentos de treliças de aço. Desta maneira o tabuleiro da estrutura

sintetiza uma combinação de três materiais. Os vãos laterais utilizam o mesmo procedimento estrutural.

2.3 - Coeficientes de Ponderação Para Materiais no Método dos Estados Limites

Para a verificação dos coeficientes de ponderação adotados nas verificações pelos estados limites de utilização e pelos estados limites últimos, foi realizada a revisão bibliográfica das seguintes normas técnicas: NBR 6118 (1978), NBR 7190 (1997), NBR 8800 (1986), EUROCODE 4 (1992) e EUROCODE 5, parte 2 (1997). As informações obtidas foram as seguintes:

Para os estados limites de utilização, todas as normas pesquisadas adotam o coeficiente de ponderação (γ_M) igual a 1.

Para os estados limites últimos as normas adotam os valores especificados conforme TAB.1.

TABELA 1 - Coeficientes de ponderação da resistência dos materiais

MATERIAL (solicitações)	SÍMBOLO	NBR6118 1978 concreto	NBR7190 1997 madeiras	NBR8800 1986 aço/ concreto	EC4 1992 aço/ concreto	EC5 1997 madeira/ concreto
Aço Estrutural (plastificação ou flambagem)	Ya	—	1,1	1,1	1,1	1,1
Concreto (compressão)	Yc	1,4	—	1,4	1,5	1,5
Armadura de Concreto (tração)	Ys	1,15	—	1,15	1,15	1,15
Ligações Mecânicas (cisalhamento)	Yv	—	1,33	Não especificado	1,25	1,25
Madeira (compressão // às fibras)	Yc	—	1,4	—	—	—
Madeira (tração // às fibras)	Yt	—	1,8	—	—	—
Madeira (cisalhamento // às fibras)	Yv	—	1,8	—	—	—

A NBR 7190 (1997) adota a NBR 8800 (1986) como referência para a determinação da resistência e demais procedimentos de cálculo das ligações metálicas. Por este motivo

aparece na coluna da NBR 7190, TAB. 1, o coeficiente de ponderação $\gamma_v = 1,33$, para ligações mecânicas que utilizam elementos de ligação do tipo parafuso, exceto elementos de ligação de cisalhamento em sistemas mistos, para o qual não é especificado nenhum coeficiente de ponderação. Segundo QUEIROZ (1993), os valores dos coeficientes apresentados pela NBR 8800 (1986), para elementos de ligação tipo parafusos é 1,33.

2.4 - Módulo de Elasticidade Secante do Concreto

A resistência do concreto e o seu módulo de elasticidade ou módulo de deformação são características importantes que têm merecido muitas pesquisas, pois envolvem diversos fatores na sua determinação. No dimensionamento de vigas mistas, o módulo de elasticidade secante do concreto tem participação no cálculo da resistência dos elementos de ligação mecânica.

Conforme SUSSEKIND (1987), em termos práticos, é de grande importância a introdução do conceito de módulo de elasticidade secante (E_{cs}), pois para as cargas de serviço $f_s \leq 0,40f_r$, sendo f_s , a carga de serviço e f_r , a carga de ruptura. Ao ser utilizado o módulo secante, poderá ser eliminado o erro que se cometeria se se trabalhasse com o módulo tangente na origem.

Através da revisão bibliográfica, foi observado que as normas técnicas nacionais e internacionais apresentam formulações diferentes para o cálculo aproximado do módulo de elasticidade secante, na ausência dos valores determinados experimentalmente. Desta maneira, para que se pudesse definir a formulação que correspondesse aos valores experimentais, medidos por diversos pesquisadores, foi realizada uma análise comparativa de algumas normas selecionadas.

A NBR 6118 (1978) adota para o módulo de elasticidade secante, 90% do valor do módulo tangente na origem, isto é:

$$E_{cs} = 0,90E_c \quad (5)$$

sendo o módulo de tangente na origem dado pela equação 6:

$$E_c = 21000\sqrt{f_{cm}} \quad (6)$$

obtém-se para o módulo de elasticidade secante, a equação 7:

$$E_{cs} = 0,90 \cdot 21000\sqrt{f_{cm}} \quad (7)$$

Na ausência de dados experimentais a NBR 6118 permite considerar:

$$f_{cm} = (35 + f_{ck}) \quad (8)$$

Adotando-se E_{cs} , f_{ck} e f_{cm} , em kg/cm^2 .

Tomando-se as equações 7 e 8 e realizando-se a conversão de E_{cs} , f_{ck} e f_{cm} para MPa, obtém-se as equações 9 e 10:

$$E_{cs} = 0,90 \cdot 6641\sqrt{f_{cm}} \quad (9)$$

$$f_{cm} = (3,5 + f_{ck}) \quad (10)$$

Sendo:

f_{ck} = resistência característica do concreto,

f_{cm} ($= f_{cj}$) = resistência média do concreto.

O CEB (1990), adota para o módulo de elasticidade secante, a equação 11, aplicando-se E_{cs} e f_{cm} em MPa.

$$E_{cs} = 0,85 \times 2,15 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}} \quad (11)$$

A equação 11 é indicada quando se adota o agregado de quartzito, que é o material mais comum de se encontrar na região de Belo Horizonte. Para outros tipos de agregados, o CEB fornece outras equações.

Também foi verificado o projeto de reforma da norma de concreto, a NBR 6118 (2000), em que, considerando-se E_{cs} , f_{ck} e f_{cm} em MPa, tem-se as equações 12 e 13:

$$E_{cs} = 0,85E_c \quad (12)$$

sendo

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

A EUROCODE 2 (1991) apresenta a mesma formulação da EUROCODE 4 (2000), conforme equação 14, adotando-se E_{cs} e f_{ck} em MPa:

$$E_{cs} = \left(9,5 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}\right) \cdot 1000 \quad (14)$$

A ACI (2000) apresenta a mesma formulação da NBR 8800 (1986), de acordo com a equação 15:

$$E_{cs} = 42 \cdot \gamma_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (15)$$

considerando-se $\gamma_c \geq 15 \text{ KN/m}^3$ (peso específico do concreto) com E_{cs} e f_{ck} em MPa.

Foram pesquisados dados experimentais sobre resistência e módulo de elasticidade secante do concreto, nas referências: SOUZA (1997); MAGALHÃES (1997); MATTHISEN, (1999); SORIANO e MASCIA (1999); OLIVEIRA (1999); SORIANO (2000) e CAMPOS, (2001)

Elaborou-se uma planilha e gerou-se o gráfico de comparação dos dados obtidos através das formulações e através dos ensaios experimentais, mostrado na FIG.6.

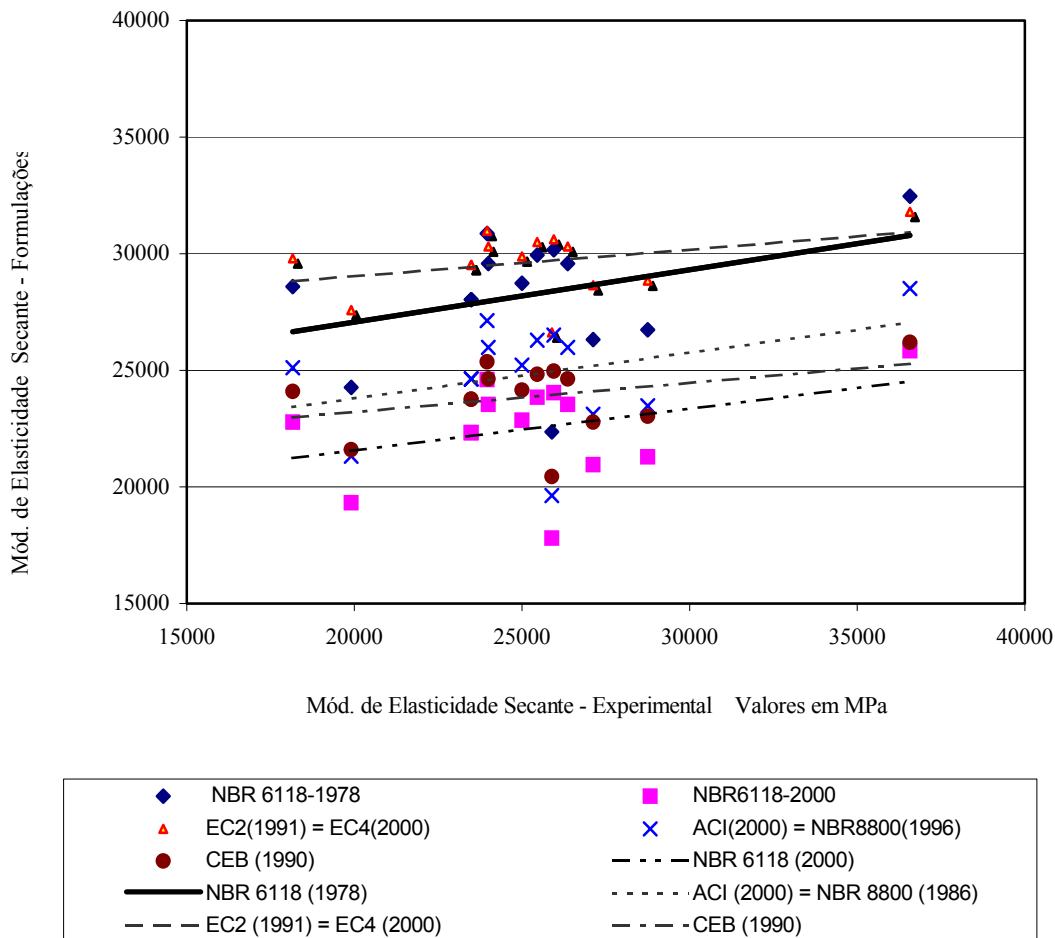


FIGURA 6 - Comparação dos módulos de elasticidade secante do concreto.
(formulações x valores experimentais)

Para efetivar esta comparação, foi realizada a plotagem de dados para verificação da hipótese de diferenças nulas, colocando-se no eixo dos “x” os valores experimentais e no eixo dos “y” os dados fornecidos pelas formulações. A diferença nula indicaria retas a 45° . No entanto, as retas foram de, no máximo, 10° e correspondem às equações das normas NBR 6118 (1978), ACI (2000) e NBR 8800 (1986) indicando ser necessário coeficientes de correção.

2.5 - Cálculo da Largura Efetiva da Mesa de Concreto

Nas vigas mistas de concreto com outros materiais considera-se a laje de concreto como um flange da viga de seção T. É importante conhecer a parcela da laje de concreto que efetivamente trabalha como parte da viga T para que o dimensionamento possa ser o mais eficiente possível.

Através da revisão da bibliografia nacional e internacional, não foi encontrada nenhuma pesquisa experimental relacionada com a definição da largura efetiva em vigas de MLC/concreto. Por este motivo, a definição da largura efetiva da laje de concreto no presente trabalho baseou-se na análise das equações apresentadas pelas normas técnicas nacionais e internacionais e nas pesquisas sobre vigas mistas com diversos materiais desenvolvidas por vários pesquisadores.

A AITC (1966) em seu capítulo sobre vigas de seção T, destinadas a pontes madeira/concreto, especifica que a largura efetiva da laje de concreto, como flange de uma viga interna não pode exceder qualquer dos seguintes valores: $1/4$ do vão da viga mista; a distância, centro a centro, das vigas mistas ou 12 vezes a menor espessura da laje. Para vigas de bordo, com o flange em um lado apenas da viga, a largura efetiva da laje de concreto não pode exceder o menor dos seguintes valores: $1/12$ do vão da viga mista; metade da distância, centro a centro, das vigas adjacentes ou 6 vezes a menor espessura da laje.

ADEKOLA dedicou grande parte de suas pesquisas ao estudo da largura efetiva da laje de concreto. Pode-se destacar dois de seus artigos sobre o assunto. ADEKOLA (1968) considera os parâmetros da geometria e propriedades dos materiais da seção como bases para se determinar a largura efetiva, assumindo a ausência de deslizamento na união do aço com o concreto. ADEKOLA apresentou as bases teóricas acerca do trabalho de Marguerre apud ADEKOLA (1968) e a avaliação da largura efetiva de cisalhamento de acordo com outros pesquisadores, procurando determinar uma única largura efetiva que considerasse a resistência ao cisalhamento e a resistência à flexão da placa para uma viga T isolada, assim como para uma laje nervurada com vários vãos. O autor conclui que o método de análise usado fornece uma base para a determinação da largura efetiva combinando membrana e efeitos de tensão de flexão para vigas mistas de aço/concreto; a largura efetiva no ponto de máximo momento obtido através desta análise, representa a largura efetiva devido à combinação de efeitos de carregamento pontuais e uniformes (carga uniformemente distribuída e peso próprio da viga).

ADEKOLA (1974) parte do princípio de que o tratamento do problema da dependência da faixa de cisalhamento (shear lag), em uma interação parcial em vigas mistas de aço/concreto é pouco conhecido do ponto de vista da elasticidade clássica. Existem várias soluções aproximadas que tratam da interação parcial sozinha, ignorando o efeito da faixa de cisalhamento e existem soluções que tratam do efeito da faixa de cisalhamento sozinha, sem a consideração de interação parcial. Por conveniência, a laje de concreto é tratada dentro da teoria clássica para materiais isotrópicos. As equações referentes à interação parcial com faixas de cisalhamento são formuladas e resolvidas através de séries numéricas para flechas e tensões no plano da laje para satisfazer todas as condições de contorno conhecidas. Os resultados demonstraram a influência dos elementos de ligação flexível, usados nas vigas mistas, e mostraram que a definição da largura efetiva origina-se das considerações das flechas e que a largura efetiva aumenta com o aumento do grau de interação. O aumento do grau de interação está relacionado ao aumento do número de elementos de ligação. Também ficou determinado que existe um limite no grau de interação além do qual as flechas não são sensivelmente influenciadas. Conforme o autor, as análises têm demonstrado a dependência da interação parcial das faixas de cisalhamento e tem levado à conclusão de que o conceito de largura efetiva deve considerar, primeiramente, as flechas e depois as tensões. Conclui que a teoria de seção transformada possibilita uma aproximação da rigidez equivalente em termos de largura efetiva da laje.

ELKELISH e ROBINSON (1986) investigaram a largura efetiva de vigas mistas com forma de aço nervurada incorporada nos estágios elástico e inelástico e para carregamento último. Foram considerados, na análise por método de elementos finitos, os seguintes parâmetros: o fendilhamento do concreto, o efeito da forma metálica e o escoamento da viga de aço. Foram estudadas a variação da largura efetiva em relação à variação do vão da viga/largura efetiva, e as propriedades da seção transversal, considerando-se, principalmente, a largura efetiva para carregamento uniformemente distribuído sobre a área da laje de concreto. Conforme os autores, a largura efetiva da laje de concreto de uma viga mista é usada na determinação de seu momento resistente e do momento devido à carga de serviço sendo usualmente aceito que a mesma largura efetiva da laje de concreto possa ser usada tanto nos cálculos de resistência última quanto no estágio elástico. Foi investigada a variação de alguns parâmetros e como

conclusões pode-se relacionar: a variação da largura efetiva devido à mudança na resistência do concreto foi menor do que 1%; a largura efetiva usada para o dimensionamento de vigas mistas sob um carregamento uniformemente distribuído, como é feito em muitos casos, é significativamente diferente daquele usado em outros tipos de carregamento (cargas concentradas, por exemplo); o efeito do tamanho da viga de aço teve a sua influência desprezada na determinação da largura da laje de concreto; a pesquisa demonstra que a largura é máxima no meio do vão da viga e reduz na direção dos apoios; também mostra que, as relações da largura efetiva podem assumir ser constante entre o meio do vão e um quarto do vão; a largura efetiva aumenta com o aumento da relação L/b (vão da viga/distância entre vigas adjacentes); os autores concluem que, a relação b_e/b é constante no regime elástico e para carga última, a largura efetiva é sempre maior do que aquela no regime elástico com diferença da ordem de 4%, sendo conservativo e completamente aceitável, o uso da largura efetiva estimada no regime elástico no cálculo da capacidade última de vigas mistas com forma nervurada incorporada à laje de concreto. Segundo os autores, a teoria de flexão simples fornece uma boa aproximação da tensão máxima no ponto $x=0$, se a largura real b , da laje de concreto for substituída pela largura fictícia b_e , referida como largura efetiva, conforme FIG.7.

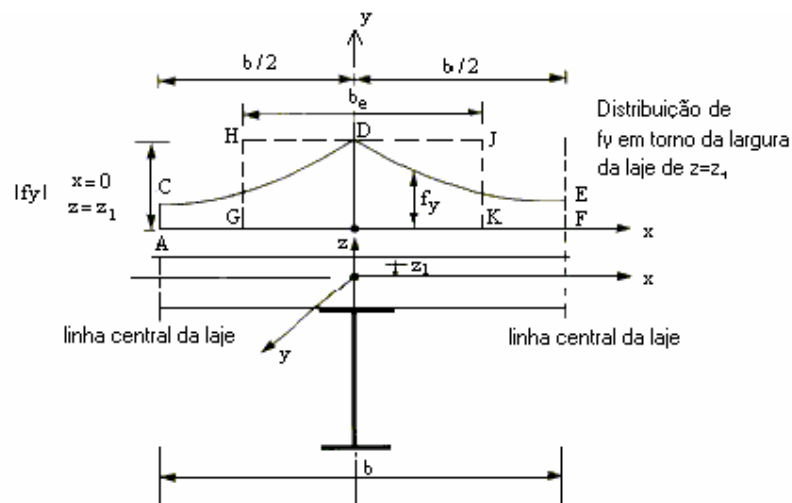


FIGURA 7 – Definição da largura efetiva da laje de vigas mistas.
Fonte: ELKELISH E ROBINSON (1986)

As tensões longitudinais são consideradas constantes na largura b_e , e igual à máxima tensão de compressão na laje. A força total dentro da área GHJK pode ser considerada igual à força real, resultante da distribuição de tensões reais, dentro da área ACDEF. Sobre as tensões geradas na laje de concreto em vigas mistas ELKELISH e ROBINSON (1986) concluem que: “as ligações de cisalhamento restringem a laje de concreto imediatamente acima da viga gerando uma tensão longitudinal não uniforme, distribuída em torno da seção transversal da laje. Portanto, quando a laje da viga mista está sujeita a cargas que produzem flexão transversal, as tensões transversais na laje não podem ser obtidas com exatidão a partir da teoria elementar de flexão para a totalidade da viga mista. Devido à deformação de cisalhamento no plano da laje, as partes da laje que permanecem distantes da viga, de certa forma, retardam a deformação devido à flexão longitudinal em partes da laje perto da viga, gerando uma distribuição de tensões não uniforme em torno da largura da laje”. Conforme os autores, “este efeito, freqüentemente denominado “shear lag”, foi estudado por vários pesquisadores, como Timoshenko e Goodier, em 1951, por Cook, em 1977 e por Moffatt e Dowling, em 1978.”

JONHSON (1994), explica que é possível usar a largura efetiva de forma a permitir o uso de “shear lag”, ou seja, utilizar a camada de concreto como um retardador do efeito do cisalhamento. Segundo o autor, “a presença da forma de aço incorporada à laje de concreto é normalmente ignorada quando a laje é considerada como parte do flange superior de uma viga mista. O cisalhamento longitudinal na laje causa deformação de cisalhamento em seu plano, resultando que a seção transversal vertical através da viga mista T não permaneça plana quando a viga é carregada. Na seção transversal, a tensão média através da espessura da laje varia como conforme o esquema da FIG. 7, anteriormente mostrada. A teoria de flexão simples é capaz, ainda, de fornecer o valor correto da tensão máxima (no ponto D), se a largura real do flange de concreto(b), for trocada pela largura efetiva do flange de concreto (b_e) de maneira que a área GHJK seja igual à área ACDEF. Conforme Jonhson, para vigas em edificações é suficientemente preciso assumir que a largura efetiva seja $L_0/8$, para cada lado da alma de aço, onde L_0 corresponde à distância entre pontos, de momentos de flexão nulo.

A NBR 8800(1986) recomenda adotar, para lajes em ambos os lados da viga de aço, o menor dos seguintes valores: 1 / 4 do vão da viga mista, considerado entre linhas, de eixo a eixo dos apoios; 16 vezes a espessura da laje de concreto mais a largura da mesa superior da viga de aço ou a largura da mesa superior da viga de aço mais a metade das distâncias livres entre esta mesa e as mesas superiores das vigas adjacentes. Para vigas de bordo em um dos lados do perfil, adota o menor dos seguintes valores: metade do vão da viga mista mais a largura da mesa superior da viga de aço; 6 vezes a altura da laje de concreto mais a largura da mesa superior da viga metálica ou a largura da mesa superior da viga de aço mais a metade da distância livre entre esta mesa e a mesa superior da viga adjacente.

Para o cálculo da largura efetiva da laje de concreto em vigas com seção T, a DIN 4224 segundo LEONHARDT e MÖNNIG (1977), adota a expressão abaixo:

$$b = \frac{L_0}{3} \quad (16)$$

onde L_0 é a distância entre pontos de momento igual a zero. De maneira simplificada, pode-se adotar os seguintes valores de L_0 , considerando L = vão: em vigas de um só vão, $L_0 = L$; em vigas em balanço, com laje comprimida, $L_0 = 1,5 L$; em vãos internos de vigas contínuas, $L_0 = 0,6 L$; em vão extremo de vigas contínuas, $L_0 = 0,8 L$. Os autores indicam que: "o desenvolvimento das tensões na laje depende do tipo de carregamento, do tipo e do afastamento entre apoios, da relação entre a rigidez da laje e a rigidez da alma e da esbeltez da viga T; também apresenta influência se os bordos da laje são livres (em vigas isoladas) ou se a laje é contínua sobre várias vigas".

A ACI(1995) determina que a largura da laje efetiva como um flange de viga T não exceda 1 / 4 do comprimento do vão da viga. A largura do balanço do flange em cada lado da alma não deve exceder os seguintes valores: 8 vezes a espessura da laje ou metade da distância até a alma da viga adjacente. Para vigas com laje em um lado apenas, a largura efetiva do flange em balanço não deve exceder a metade do comprimento do vão da viga ou 6 vezes a espessura da laje ou metade da distância até a alma da viga adjacente.

Para vigas isoladas, onde a seção T é utilizada para proporcionar um flange com área adicional de compressão, a espessura do flange não deve ser menor do que metade da largura da alma da viga e a largura do flange efetivo não mais do que 4 vezes a largura da alma.

A EUROCODE 5 (1997), parte 2, capítulo 6, determina que a largura efetiva da mesa de concreto das placas nervuradas mistas madeira/concreto precisam ser determinadas como uma seção T, conforme a EUROCODE 2.

A norma européia para dimensionamento em concreto armado, a EUROCODE 2 (1991), no item 2.5.2.2.1, trata da largura efetiva dos banzos comprimidos, para todos os estados limites de vigas de seção T. A largura efetiva para o cálculo, nos casos em que não seja necessário uma grande precisão (por exemplo, vigas contínuas de edifícios), pode-se admitir uma largura constante em todo o vão. A FIG.8 apresenta a definição das dimensões envolvidas no cálculo da largura efetiva.

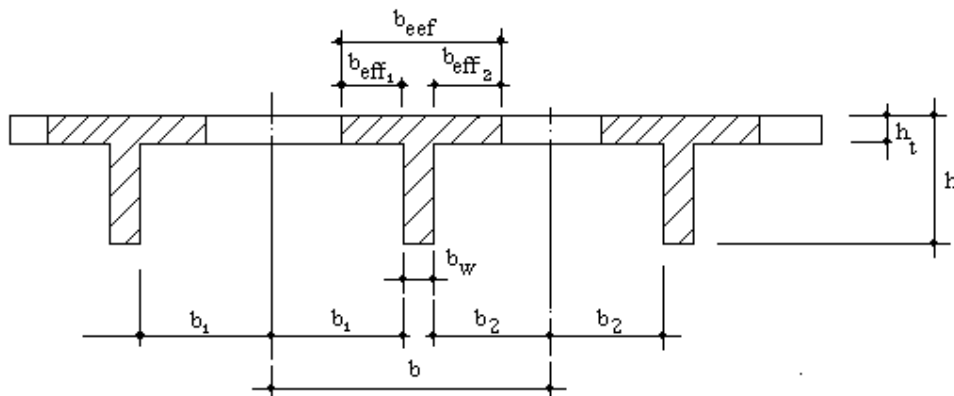


FIGURA 8 – Definição das dimensões. Fonte EUROCODE 2 (1991)

A largura efetiva em vigas com banzo nos dois lados é calculada pela equação 17:

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{5} < b \quad (17)$$

Para uma viga com o banzo apenas de um dos lados, usa-se a equação 18 :

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{10} < b_1 \text{ (ou } b_2) \quad (18)$$

O valor de l_0 corresponde à distância entre pontos de momento nulo, depende dos tipos de apoio nas extremidades das vigas e para uma melhor definição a EUROCODE 2 deve ser consultada.

De acordo à EUROCODE 4 (1992) e conforme o ECCS, 1993, a largura efetiva em uma análise global elástica, pode assumir ser constante na totalidade de cada vão. A largura efetiva para verificação da seção transversal deve ser adotada como o valor no meio do vão (para seções com momentos positivos) ou como o valor nos apoios (para seções com momento negativo). Para vigas simplesmente apoiadas, a largura efetiva em cada lado da alma de aço, deve ser tomada como: 1/8 do vão da viga, medido de centro a centro dos apoios, porém, não maior do que a metade da distância até a linha de eixo da viga adjacente.

Segundo a AISC-LRFD (1993), a largura efetiva da laje de concreto, em cada lado do eixo da viga de aço não pode exceder de: 1/8 do vão da viga, medido de eixo a eixo dos apoios; metade da distância até o eixo da viga adjacente; distância até a face da laje.

2.6 - Módulo de deslizamento do elemento de ligação mecânica

A norma DIN 1052 (1988), parte 2, apresenta um amplo formulário para o cálculo do módulo de deslizamento de diversos elementos de ligação mecânica em membros compostos de madeira, com ligação flexível, sujeitos à flexão e deslizamento. Esta norma permite a cooperação de diferentes elementos de ligação apenas se os valores dos módulos de deslizamento forem aproximados. Como a DIN 1052 (1988) não trata de vigas mistas madeira/concreto, as equações, se utilizadas, precisariam ser verificadas para este tipo de situação.

Segundo JOHNSON (1994), a propriedade mais importante do elemento de ligação mecânica é o seu módulo de deslizamento, obtido da relação entre a força de cisalhamento por elemento de ligação e o deslizamento na interface dos materiais. Esta relação carga/deslizamento deve ser encontrada, preferencialmente, de forma experimental, em testes com vigas mistas, mas na prática, são aceitos ensaios em corpos-de-prova. Nestes ensaios de cisalhamento ou “push tests”, deve-se verificar a

resistência do concreto, a resistência da madeira e a resistência das ligações pois todos estes fatores influenciam o modo de ruína. A norma inglesa BS5400 (1979) apud JOHNSON (1994) apresenta um procedimento para ensaios de cisalhamento de corpos-de-prova constituídos de aço/concreto assim como a EUROCODE 4 (1992), sendo que, esta última acrescentou exigências importantes relativas às especificações das dimensões da laje de concreto e sua armadura de reforço, possibilitando resultados menos influenciados pelas trincas nas lajes de concreto do corpo-de-prova.

Através da análise de ensaios experimentais, JOHNSON (1994), concluiu que, mesmo para pequenas cargas, existe deslizamento nas ligações. Comparando-se a força de cisalhamento na interface por unidade de comprimento (fluxo de cisalhamento), calculada para interação total e para interação parcial, o autor observa que: no regime elástico, a distribuição de carregamento nos elementos de ligação é similar à distribuição através da teoria de interação total; quanto ao espaçamento dos elementos de ligação, a distribuição de cisalhamento longitudinal é influenciada pelas deformações, pelo espaçamento dos elementos de ligação, pela curva carga/deslizamento, pela retração e deformação lenta da laje de concreto. Por estas razões, sempre que possível, os elementos de ligação são uniformemente espaçados ao longo do vão. Segundo o autor, em uma viga mista de aço/concreto a ligação atinge a sua carga de ruptura quando o concreto localizado nas vizinhanças da ligação perde a sua rigidez. Utilizando-se um concreto forte, reduz-se as forças que provocam a perda de rigidez do concreto. Neste caso, as ligações mecânicas passam a ser mais solicitadas. Por este motivo são verificadas a resistência dos pinos ao corte e a resistência do concreto ao esmagamento.

A EUROCODE 5, parte 2 (1994) orienta que os valores dos módulos de deslizamento para os elementos de ligação mecânica devem ser verificados experimentalmente através de ensaios realizados de acordo com EN 26891(1991)⁴.

Conforme CECCOTTI (Step lecture, 1995)“a rigidez da ligação determina a distribuição das tensões ao longo do elemento estrutural composto”. De acordo com o

⁴ EN 26891:1991-Timber structures- Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics.

autor, a norma EN 26891(1991) fornece as seguintes equações para a obtenção dos valores de referência dos módulos de deslizamento:

- módulo de deslizamento inicial, cujos dados são obtidos experimentalmente:

$$k_{ser} = 0,4 \cdot \frac{F_{max}}{V_{0,4}} \quad (19)$$

- para o estado limite último, o valor do módulo de deslizamento da junta é:

$$k_u = 0,6 \cdot \frac{F_{max}}{V_{0,6}} \quad (20)$$

Sendo F_{max} a força máxima de ruptura por elemento de ligação e $v_{0,4}$ e $v_{0,6}$ os valores de deslizamento correspondentes aos valores $0,4F_{max}$ e $0,6F_{max}$, respectivamente.

GUTKOWSKI e CHEN (1996) realizaram ensaios de cisalhamento em corpos de prova para a verificação do módulo de deslizamento dos elementos de ligação e testes em 04 vigas construídas em escala real. Foi selecionado um método de ensaio, com uma seção de corte, sendo executados um total de 72 corpos de prova construídos com madeira, concreto e pregos. Foram utilizados pregos com quatro diâmetros diferentes, divididos em oito tipos de acordo com as diferentes profundidades de penetração na madeira. Cada tipo de corpo de prova foi testado 9 vezes (6 testes se verificaram para corpos de prova com cura do concreto aos 14 dias e 3 testes se verificaram com o concreto de 28 dias). Quatro vigas foram testadas em flexão. Os autores consideraram como variáveis no teste de cisalhamento, o tipo de prego, a penetração na madeira e a idade do concreto. Os autores concluíram que a resistência do concreto não foi a única variável que afeta o módulo de deslizamento da ligação. O deslizamento ocorre na interação de concreto/madeira/prego e a falha ocorre no prego. Os autores observaram que as vigas executadas e testadas experimentalmente não apresentaram nenhum mérito prático direto pois muitos pregos seriam necessários para garantir uma completa ação mista e acrescentaram que pesquisas estariam em desenvolvimento na Colorado State

University com muito mais alternativas de ligações viáveis para sistemas madeira/concreto destinados a pisos de edificações comerciais e pontes.

TAKAC (1996) através de ensaios experimentais pesquisou o comportamento reológico de estruturas mistas de MLC/concreto utilizando como elementos de ligação mecânica, conectores E 75M16 tipo C, Bulldog dowels (ver DIN 1052), espaçados de 20 cm, e afixados com pregos de madeira de diâmetro 16 mm. Foram realizados testes em modelos com dimensões reais, com carregamento contínuo, de longa duração. Foram medidas flechas no meio do vão e os deslizamentos dos conectores foram monitorados. As constantes elásticas e mecânicas dos materiais escolhidos foram: concreto ($E_B=30000 \text{ N/mm}^2$); madeira conífera de primeira classe ($E_D=11000 \text{ N/mm}^2$); conector Bulldog ($N_{1d}=9000\text{N}$, $C=30000\text{N/mm}$). O modelo construído para os testes constou-se de duas vigas de MLC, com dimensões de 14 cm x 20 cm x 350 cm, espaçadas de 60 cm e reforçadas com laje de concreto de 7 cm de espessura. De acordo com o autor, as investigações reológicas do sistema descrito indicam valores consideráveis no campo de transferência em função do tempo, sendo maior após os sete primeiros dias.

SOUZA (1997) realizou um estudo experimental de corpos-de-prova de elementos de ligação entre madeira/concreto solicitados a cisalhamento. O concreto ensaiado apresentou resistência média de 20 MPa. Foram ensaiados elementos do tipo pino metálico (prego e parafuso), cantoneira metálica e cavilhas de madeira (seções retangular e circular), determinando-se a carga última para cada tipo de elemento de ligação. Foram apresentadas as seguintes conclusões: a maneira de aplicação do carregamento (se contínuo ou em ciclos) influenciou na carga de ruptura dos elementos de ligação; os modos de ruptura observados nos corpos de prova com cantoneiras foram: embutimento do prego na madeira e ruptura do concreto na região próxima à cantoneira com flexão e arrancamento do prego; os modos de ruptura para pregos e parafusos foram arrancamento e embutimento do conector na madeira, observando-se que a pré-furação diminuiu a eficiência da ligação, apesar de impedir a ocorrência de fendilhamento e tensões residuais na madeira; nas cavilhas, observou-se o esmagamento e ruptura do concreto e a diminuição da resistência da madeira devido à pré-furação. Foi utilizada a máquina finca-pinos para instalação do prego do tipo especial. O autor

forneceu os valores de resistência à ruptura (F_{max}) por unidade de elemento de ligação em KN.

Na ausência de dados experimentais o EUROCODE 5 (1997), parte 2, orienta que para o cálculo da rigidez das ligações madeira/concreto realizadas com elementos de ligação tipo pinos, os valores de rigidez poderiam ser tomados 100% maiores do que para as correspondentes juntas entre madeira/madeira, de acordo com EUROCODE 5, (1994), parte 1-1.” Com base nestas informações, foi elaborada a TAB. 2, que apresenta as equações para o cálculo do módulo de deslizamento k_{ser} , para elementos tipo pino considerando a união de materiais com densidades diferentes. São admitidos elementos de ligação do tipo barras, parafusos, pregos com ranhuras anelares e pregos com ranhuras helicoidais.

TABELA 2 - Valores de k_{ser} para elementos tipo pino (N/mm)

Elementos	EUROCODE 5, parte 1-1	EUROCODE 5, parte 2
	madeira/madeira	madeira/concreto
Barras, parafusos e pregos (com pré-furação)	$\rho_k^{1,5} \cdot \frac{d}{20}$	$\rho_k^{1,5} \cdot \frac{d}{10}$
Pregos (sem pré-furação)	$\rho_k^{1,5} \cdot \frac{d^{0,8}}{25}$	$\rho_k^{1,5} \cdot \frac{d^{0,8}}{12,5}$

Considera-se que ρ_k seja o valor característico da densidade equivalente, em kg/m^3 , tal que, $\rho_k = \sqrt{\rho_{k1} \cdot \rho_{k2}}$, para ρ_{k1} = valor característico da densidade do concreto, em kg/m^3 e ρ_{k2} = valor característico da densidade da madeira, em kg/m^3 e d = diâmetro do prego em mm.

MAGALHÃES (1997) realizou ensaios experimentais em duas vigas mistas madeira/concreto, ambas com alma de madeira, da espécie maçaranduba de densidade 1072 kg/m^3 , apresentando seção transversal em uma única peça de 15 cm x 15 cm e laje de concreto de 5 cm x 55 cm; a viga apresentava um vão de 3,20m entre as linhas de eixo dos apoios Foram utilizados pregos especiais de 3,6 cm de diâmetro, aplicados com

máquina finca pinos, com as mesmas características dos pregos especiais ensaiados por Souza (1997). Realizaram-se as medições de flechas e deformações longitudinais causadas pela aplicação de duas cargas concentradas.

CAPRETTI, CECCOTTI, et al. (1998) realizaram ensaios experimentais em corpos-de-prova mistos de madeira/concreto . Conforme os autores, de acordo com a EUROCODE 5, parte 1.1 e parte 2, testes experimentais precisam ser realizados em ligações simples para se determinar o módulo de deslizamento e resistência para cada tipo de ligação. Foi utilizada a espécie “spruce timber”, apresentando densidade 410 kg/m^3 e concreto de resistência 20/25 MPa. Como elemento de ligação, foram empregadas barras de aço para concreto armado de 12 e 16 mm de diâmetro inseridas com pré-furação, sendo que os furos foram preenchidos com resina epóxi. Este procedimento, na opinião dos autores, é largamente utilizado em obras de restauração na Itália. O carregamento foi aplicado até a obtenção de deslizamento de no máximo 15 mm. De acordo com os autores, as formulações apresentadas pela EUROCODE 5, parte 2, para o cálculo de rigidez dos elementos de ligação, devem ser reavaliadas.

OLIVEIRA (1999) realizou ensaios experimentais para caracterização de vigas mistas MLC/concreto. Para a confecção das vigas de madeira laminada colada foi utilizada a espécie *Eucalyptus Grandis*. A primeira parte do trabalho consistiu na determinação de todas as características físicas e mecânicas da madeira, tais como: resistências e módulos de elasticidade e determinação das características do concreto a ser utilizado. Foram realizados, também, ensaios de corpos-de-prova confeccionados de madeira/concreto, utilizando como elementos de ligação, cantoneiras constituídas de chapas metálicas de dentes estampados. O valor do módulo de deslizamento da ligação utilizada foi de 183,69 KN/cm. Para a realização de ensaios de flexão, foram ensaiadas três vigas de MLC em tamanho real, constituídas de 11 lâminas de 2,7 cm de espessura, coladas entre si, perfazendo uma viga de altura total de 29,7 cm e um vão de 400 cm entre as linhas de eixo dos apoios. Após os ensaios de flexão realizados nas vigas de MLC, as mesmas foram preparadas para receber uma laje de concreto armado a ser moldado “in loco”. O procedimento consistiu de impermeabilização da superfície de madeira e na fixação, sobre as duas vigas de MLC, de 42 chapas metálicas de dentes

estampados com dimensões de 9,9 cm x 7,1 cm e 1,35 mm de espessura, pré-dobradas formando um ângulo de 90° (ver FIG.9). As chapas foram pressionadas sobre as superfícies de madeira nos intervalos da malha de diâmetro 5 cm instalada à cada 10 cm. Em seguida foi realizada a concretagem das lajes de seção 6 cm x 60 cm, criando-se duas vigas mistas de seção T.

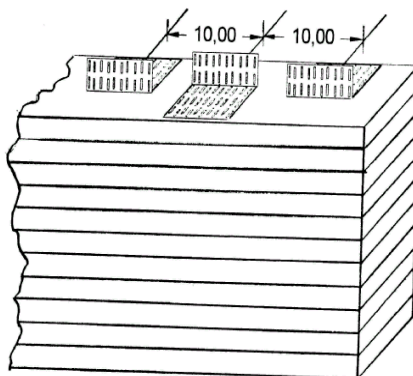


FIGURA 9 – Fixação das chapas metálicas. Fonte: OLIVEIRA (1999)

As vigas mistas foram ensaiadas à flexão e os resultados de flechas e deformações foram comparados com os resultados anteriores obtidos para vigas simples. Os resultados aprovaram o sistema de ligação através de chapas de aço com dentes estampados.

BREMER (1999) realizou ensaios experimentais para verificação da rigidez em ligações entre peças de MLC da espécie eucalipto grandis, unidas através de tubos galvanizados de diversos diâmetros. As peças foram solicitadas a momento fletor e força cortante. Foi determinada, experimentalmente, a relação entre o módulo de deslizamento no sentido paralelo às fibras e o módulo de deslizamento transversal às fibras para o elemento de ligação. A relação obtida, para o diâmetro de 3/4" foi a seguinte:

$$\frac{k_0}{k_{90}} = 0.692185 \quad (21)$$

sendo K_{90} o módulo de deslizamento transversal às fibras (a rigidez no sentido transversal) e K_0 o módulo de deslizamento no sentido paralelo às fibras (rigidez no sentido longitudinal). Esta equação será adotada, posteriormente, no capítulo 6.

BLASS, SCHMID et al. (2000) apresentam um modelo teórico para calcular a capacidade resistente de ligações com elementos do tipo barra, reforçadas com chapas de metal com dentes estampados. Os resultados obtidos, através do modelo numérico, apresentaram uma boa aproximação com os resultados obtidos através de ensaios experimentais. O objetivo dos ensaios é a determinação da carga de ruptura comparando-se ligações reforçadas e não reforçadas com a chapa metálica. O comportamento das ligações reforçadas apresentou-se mais dúctil conduzindo a um aumento na capacidade de dissipação de energia. Segundo os autores torna-se possível a utilização deste tipo de ligação em áreas sujeitas a terremotos. Os reforços possibilitam um aumento da capacidade resistente das ligações prevenindo, preliminarmente, o deslizamento dos membros de madeira e providenciando um aumento na resistência ao embutimento do elemento de ligação tipo barra.

Para AMADIO, CECCOTTI et al. (2000), "a maioria dos sistemas de ligação mecânica propostos pela literatura apresenta um comportamento deformável e não permite que toda a seção mista permaneça plana, mas apenas a planicidade dos componentes. Por esta razão, para se resolver o problema da viga mista e determinar as forças internas e os deslocamentos é necessário considerar a deformabilidade das ligações mecânicas". De acordo com os autores, por ser um problema teoricamente bastante complicado, é necessário definir hipóteses simplificadoras do problema. Segundo os autores, as normas técnicas correntes, como a EUROCODE 5, partes 1 e 2, adotam a formulação simplificadora de Möhler (1956). Do ponto de vista prático, as fórmulas aproximadas do tipo propostas pela EUROCODE 5 são usadas para um controle dos estados de utilização e estados últimos em situações de curta duração, adotando-se um módulo de deslizamento secante para as ligações obtido experimentalmente em ensaios de corpos-de-prova. De acordo com os pesquisadores, o mesmo formulário é também empregado para a verificação do comportamento de longa duração, substituindo o módulo de deslizamento do concreto e da madeira e das ligações pelo módulo de elasticidade "efetivo" para levar em consideração o comportamento de deformação lenta, conforme CECCOTTI (1995). De acordo com as análises dos autores, "o comportamento real de uma estrutura mista não respeita completamente estas hipóteses simplificadoras. As ligações apresentam um comportamento não linear mesmo para pequenas forças de

cisalhamento, e, desta forma, para correta avaliação da capacidade resistente da estrutura mista, é necessário considerar este aspecto. A madeira e o concreto apresentam um pronunciado comportamento de deformação lenta que não pode ser negligenciado no estado limite de utilização e a madeira está sujeita também a efeitos de expansão e retração devido à variações nas condições ambientais e à expansão térmica do concreto, que devem ser levadas em consideração em situações de longa duração. De forma a considerar todas estas variáveis, é necessário uma aproximação numérica mais refinada principalmente em situações de longa duração”. Para esta pesquisa, foram executados 2 protótipos diferentes, em tamanho real, de vigas mistas madeira/concreto simplesmente apoiadas, com vão de 5,70 m. A primeira constituiu-se de uma viga em MLC com altura de 50 cm combinada com uma laje de concreto apresentando forma de aço incorporada, típica das novas construções, conforme os autores. A segunda estrutura consistiu-se de uma viga de madeira maciça associada a uma laje de concreto que incorpora uma chapa de madeira, representando os antigos pisos em fase de restauração. As ligações mecânicas foram realizadas utilizando-se barras de aço utilizado para reforço de concreto armado, de 18 mm, instaladas com pré-furação, preenchendo-se os furos com resina epóxi, variando-se os espaçamentos. Foi adotado um módulo de deslizamento para a ligação de 50000N/mm obtida através de ensaio experimental. Foi elaborado um modelo numérico representativo destas estruturas considerando funções de deformação lenta, variação de umidade e temperatura de maneira que pudesse analisar estruturas em diferentes condições ambientais. Conforme os autores, novos ensaios experimentais serão necessários para calibração do modelo.

BATHON e GRAF (2000) desenvolveram um trabalho experimental que também foi analisado via método de elementos finitos. Os autores apresentaram um sistema inovador de composição entre uma viga de madeira unida continuamente à uma laje de concreto através de uma malha de aço. A malha atua como um elemento contínuo porém dúctil que é inserido em um entalhe na viga de madeira e fixado através de adesivo resistente ao fogo em temperaturas superiores a 200° C , que apresenta um tempo de cura de 30 minutos. Este tipo de sistema misto exige um material que seja rígido mas que apresente ductilidade entre a madeira e o concreto moldado no local e, desta forma, permita um comportamento não linear. Como conclusões, o autor apresenta

que a comparação entre o modelo real e o modelo mecânico computacional mostrou uma boa correlação colocando esperanças na inovação que apresenta potencial de utilização em pisos e forros de residências, prédios comerciais e pontes estruturais. Segundo o autor, pesquisas considerando a influência de variação climáticas serão consideradas futuramente.

BENÍTEZ (2000) apresenta o resultado de testes experimentais e avaliações analíticas sobre três tipos de elementos de ligação mecânica destinados ao dimensionamento de pontes novas executadas com madeira ou restauração de pontes antigas com vigas em madeira e laje em concreto. Os três elementos utilizados são constituídos de aço, variando de 250 a 350 MPa. O primeiro constitui-se de uma barra de aço (steel dowel type connector) conforme o autor, o mais típico e comum elemento de ligação; o segundo constitui-se de elemento de ligação de seção circular anexado de parafuso (circular hollow section – CHS); o terceiro elemento de ligação, constituiu-se de coluna universal (universal column section – UC). O critério adotado levou à escolha de elementos de ligação mais adequados, econômicos e que não exigissem equipamentos especializados. Segundo o autor, elementos de ligação fabricados de aço, utilizados para unir madeira e concreto como um sistema misto, foram desenvolvidos nos EUA por volta de 1930 na Universidade do Oregon. Como conclusões, o autor indica que as imperfeições da madeira produziram variações nos deslocamentos e que o elemento tipo dowel apresentou a performance mais fraca dos três com relação à resistência e ao comportamento à flexão. Conforme o autor, as pesquisas terão prosseguimento para os elementos de seção circular e tipo coluna universal que serão verificados ao cisalhamento puro e ao cisalhamento devido à flexão.

GUTKOWSKI, NATTERER et al. (2000) realizaram diversos ensaios para verificação do comportamento de carga/deslizamento de sistemas de pisos mistos madeira/concreto utilizando um modelo novo de ancoragem constituído de parafuso afixado em entalhe na madeira preenchido por concreto. Os entalhes transferem as tensões de flexão e de cisalhamento na junta dos materiais. O objetivo dos ensaios era determinar a dimensão apropriada do detalhe da ancoragem. Foram realizados ensaios em corpos-de-prova de

madeira e madeira/concreto. Os autores concluíram que é possível obter significativa ação mista do sistema apresentado, utilizando este sistema de ancoragem.

PIAZZA e BALLERINI (2000) apresentam um resumo sobre a avaliação da influência da rigidez dos sistemas de ligação no comportamento geral da estrutura mista madeira/concreto. Esta pesquisa faz parte de um programa de pesquisa experimental que está ocorrendo na Universidade de Trento, Itália e focaliza testes físicos em modelos em tamanho real de vigas mistas de madeira/concreto, diferenciando apenas nos elementos de ligação e os ensaios correspondentes de cisalhamento. Até aquele momento, 8 ensaios de flexão até a ruptura haviam sido efetuados. Os resultados experimentais e numéricos mostraram significativas variações de performance das diferentes espécies testadas em termos de carga de ruptura, comportamento em serviço e também relativo ao deslizamento entre a viga e a laje nos apoios. Algumas propostas foram dadas para se adaptar a simulação do comportamento estrutural através de modelos de FEM e obter uma melhor compreensão da distribuição real de tensões e a influência das ligações. Os pesquisadores pretendem quantificar a eficiência dos diferentes elementos de ligação no comportamento global da estrutura. Os principais benefícios adquiridos com este tipo de estrutura nos projetos de restauração são, além da performance estática, o aumento na resistência e rigidez do piso, maior capacidade de isolamento acústico e a garantia de um elemento incombustível entre os diferentes pavimentos.

Segundo QUEIROZ (2001) “o comportamento de estruturas mistas é baseado na ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto armado. Para que isto ocorra é necessário que na interface aço/concreto desenvolvam-se forças longitudinais de cisalhamento. A aderência natural entre os dois materiais e as forças de atrito presentes não são, normalmente, levados em conta no cálculo. É necessário, portanto, o uso de elementos de ligação de cisalhamento para transmitir o cisalhamento na interface aço/concreto, conforme disposto na NBR 8800 (1986), AISC-LRFD (1993) e EUROCODE 4 (1992).” Conforme o autor, na ausência de qualquer ligação ou atrito na interface os dois elementos se deformam de maneiras independentes: a superfície superior da viga de aço apresenta tensões de compressão e se encurta; a superfície inferior da laje de concreto, está sujeita a tensões de tração e se alonga, promovendo assim um deslizamento relativo entre as superfícies na região de contato. No outro extremo, se for adotada, entre os dois

materiais, uma ligação de rigidez e resistência infinitas desenvolvem-se forças horizontais que tendem a encurtar a face inferior da laje de concreto e, simultaneamente, a alongar a face superior da viga de tal forma que não haja deslizamento relativo entre o aço e o concreto. Quando a interligação não for tão rígida ou resistente ocorre uma situação intermediária, dependente do grau de interação entre os dois materiais. Este caso é denominado interação parcial sendo o mais utilizado em vigas mistas aço/concreto por razões de ordem econômica. As principais razões para se calcular vigas mistas de piso utilizando-se interação parcial são: a redução da resistência da viga mista é menor do que se verificaria calculando a viga mista como totalmente rígida, com posterior redução no número de elementos de ligação; no sistema de construção não escorado, a seção de aço selecionada para resistir às cargas durante o processo de construção não necessita de interação completa para suportar o carregamento como sistema misto, exceto para cargas muito elevadas; o auto custo do elemento de ligação. Para o pesquisador, a experiência demonstra que graus de interação da ordem de 70% a 90% são bastante interessantes do ponto de vista econômico. Ainda segundo QUEIROZ (2001), a NBR 8800 (1986) e o AISC-LRFD (1993) indicam, somente, o uso de elementos de ligação dúcteis. Os elementos dúcteis apresentam capacidade de deformação suficiente para justificar a suposição de comportamento plástico ideal da ligação ao cisalhamento longitudinal. São dúcteis, os elementos cujo comprimento após a soldagem seja maior ou igual a 4 vezes o diâmetro do elemento. Já o EUROCODE 4 (1992) prescreve a possibilidade de se utilizar tanto o elemento de ligação rígido quanto o elemento ductil. Conforme QUEIROZ (2001), o elemento de ligação tipo pino com cabeça é o mais utilizado na prática. Consiste de um pino especial, projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico e ao mesmo tempo, após a soldagem, trabalhar como elementos de cisalhamento. O aço utilizado na sua fabricação é o ASTM A-108, produzido com resistência mínima de 415 MPa e limite de escoamento não inferior a 345 MPa. Os diâmetros mais utilizados são 3/4" (19,1 mm) e 7/8" (22,2mm), que apresentam uma rigidez de 100 KN/mm e 120 KN/mm, respectivamente.

NICOLAS (2001) realizou um estudo teórico-experimental sobre elementos de ligação no qual determinou o valor do módulo de deslizamento através de curvas cargas x

deslizamentos obtidas a partir de ensaios de laboratório. Foram utilizados pregos e parafusos como elementos discretos e cola epóxi como elemento contínuo. Conclui que são vários os fatores que podem interferir nos resultados do módulo de deslizamento visto que os valores de módulo de deslizamento obtidos por vários pesquisadores variam muito entre si. Tais fatores poderiam ser: ausência de um corpo-de-prova padronizado por norma, a resistência do concreto utilizado, a espécie de madeira adotada, o tipo de elemento de ligação e o sistema de medida do módulo de deslizamento.

2.7 - Modelos de Simulação Numérica Para Análise de Vigas mistas madeira/concreto e MLC/concreto

VAN DER LINDEN e BLASS (1994) apresentam um trabalho relativo ao estudo da aplicabilidade de vigas mistas em pisos como um sistema estrutural nos Países Baixos (Holanda) e os respectivos tipos de elementos de ligação. Iniciaram o programa em 1992 realizando testes de cisalhamento em diferentes tipos de elementos de ligação na Universidade de Karlsruhe, na Alemanha, enquanto testes em vigas foram realizados em 1994. Modelos via método de elementos finitos desenvolvidos na Delft University of Technology foram utilizados para analisar as vigas testadas. Algumas simulações utilizando o programa Monte Carlo foram realizadas variando as propriedades dos materiais das vigas de madeira e dos elementos de ligação tornando possível obter-se uma expectativa dos modos de ruptura. Todas as vigas mistas madeira/concreto consistiram de uma ou mais vigas de madeira com uma laje de concreto no topo. Uma das simulações consistia de uma viga de MLC/concreto de 6,00 m de vão; a viga de seção transversal de 10 cm x 20 cm unida a uma laje de concreto de 6 cm x 30 cm através de chapas com dentes estampados. Neste modelo de simulação, os elementos de ligação foram substituídos por molas horizontais com uma relação carga/deslizamento não linear. Segundo os autores, a influência da classe de resistência das vigas de madeira, as dimensões do concreto e da madeira e as características dos elementos de ligação são importantes para a compreensão do comportamento deste sistema misto.

RAJCIC e ZAGAR (2000) apresentam os princípios do dimensionamento de estruturas de piso misto de concreto leve/madeira. Enfatizam que para realizar o dimensionamento

através de modelos de elementos finitos é importante escolher o elemento mais apropriado aos tipos de materiais, verificar quais condições de contorno melhor representam a ligação entre os materiais e o comportamento do conjunto. Os resultados obtidos através do programa COSMOS/FEM são comparados com resultados de testes em modelos em tamanho real, apresentando mesma geometria, mesmas condições de contorno e de carregamento, estes últimos de acordo com a EUROCODE 5. O modelo apresentou um resultado bastante próximo dos valores experimentais podendo, de acordo com os autores, ser adotado no dimensionamento de estruturas mistas. Foram pesquisados dois tipos de elementos de cisalhamento: um de tipo descontínuo (*steel bolts*, com diâmetro de 20 mm) e outro de tipo contínuo (*steel plate*, apresentando 2 mm de espessura). Apenas um quarto da viga foi modelada. As vigas e a laje de concreto foram modeladas como elemento sólido; a madeira definida como material ortotrópico e concreto como material isotrópico. O tipo descontínuo modelado como elástico linear, foi definido como *Pipe elements*. O tipo contínuo foi modelado como *Shell4 elements*. A malha de reforço foi modelada como *Truss 3D elements*.

SORIANO (2001) realizou um modelamento de vigas mistas utilizando o programa SAP 2000 optando por utilizar elementos de cascas para representação das peças de concreto e madeira; os elementos de ligação (pregos e parafusos) foram representados por elementos de barra, considerando no modelamento das peças a não linearidade geométrica. Segundo o autor, dentre os modelos utilizados para determinação dos esforços e dos deslocamentos verticais nos elementos estruturais, verificou-se que a modelagem através do programa acima apresentou resultados mais distantes daqueles observados nos ensaios.

2.8 - Situação da fronteira do conhecimento.

Nesta parte do trabalho é realizada uma avaliação de toda a revisão bibliográfica. Não foi a intenção, realizar um “Estado da Arte” sobre vigas mistas madeira/concreto e MLC/concreto. Seria uma proposta bastante difícil nos dias de hoje, com inúmeros trabalhos em congressos, revistas técnicas e páginas na Internet para se consultar. No entanto, a revisão apresentada possibilita conhecer-se a fronteira do conhecimento.

Existem critérios de dimensionamento de vigas mistas madeira/concreto à flexão, baseados nas tensões admissíveis, como os critérios da AITC (1966, 1985, 1994) e da DIN 1052 (1969,1988) e critérios mais modernos, baseados nos métodos dos estados limites, como a EUROCODE 5, (1994), parte 1-1 e a EUROCODE 5 (1997), parte 2.

A pesquisa sobre largura efetiva da mesa de concreto em vigas mistas MLC/concreto e madeira/concreto encontra-se em aberto. As informações acerca de vigas T em concreto armado e vigas mistas aço/concreto fornecem, no entanto, importantes parâmetros de comparação.

As características da madeira permitem a utilização de uma grande variedade de elementos de ligação. Praticamente todos os elementos já conhecidos como elementos de ligação entre peças de madeira, estão sendo ou já foram verificados na união da mesa de concreto com a alma de madeira. Estão sendo verificadas, também, as performances de elementos diferentes trabalhando em conjunto. Os elementos de ligação mecânica mais utilizados são:

- pregos (lisos aplicados com máquinas especiais, com ranhuras helicoidais, com ranhuras anelares, com ou sem pré-furação);
- parafusos;
- barras de aço para reforço de concreto armado associados à massa epóxi;
- cavilhas (pinos de madeira torneados);
- conectores metálicos (anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados);
- entalhes na madeira preenchidos com concreto;
- cantoneiras metálicas;
- tubos metálicos;
- malhas de aço contínuas, afixadas em entalhes e coladas à madeira utilizando-se adesivos resistentes à altas temperaturas.

É um tema que encontra-se em fase de experimentações, não havendo, no momento, uma definição sobre qual elemento de ligação seja mais conveniente nas estruturas mistas MLC/concreto e madeira/concreto nos sentidos econômico, executivo, de instalação e/ou de eficiência.

Os critérios de dimensionamento da EUROCODE 5, (1994), parte 1-1 e a EUROCODE 5 (1997), parte 2 e da DIN 1052 (1988) consideram que as ligações entre os materiais numa união mista apresentam um comportamento flexível. O dimensionamento da viga mista, neste caso, leva em conta o deslizamento relativo entre a madeira e o concreto e considera a efetividade da ligação conforme a teoria de Möhler, desenvolvida em 1956.

Recentemente, para utilização em estruturas mais robustas, como laje de piso em edifícios comerciais e pontes, os pesquisadores estão utilizando barras de aço (do tipo utilizado em reforço de concreto armado), com diâmetro variando de 12 a 18 mm, afixadas com pré-furação e reforçadas com adesivo epóxi. Tais adesivos reagem com a madeira de forma a permitir uma reação química entre a madeira e o adesivo, o que possibilita uma grande aderência entre as partes. O resultado é uma ligação rígida. Isto indica que, modificações devem ser realizadas nas normalizações de maneira a se incluir a situação de ligação rígida.

Para a obtenção da curva carga/deslizamento em corpos de prova de madeira/concreto os pesquisadores nacionais vêm buscando respaldo em normas internacionais, principalmente na norma inglesa BS5400 (1979) ou na EUROCODE 4 (1992).

Estão sendo pesquisados elementos de ligação que propiciem a união de lajes de concreto pré-fabricadas com vigas de MLC, visando a racionalização na construção civil. Algumas pesquisas utilizam concretos de alta resistência enquanto outras utilizam o concreto leve.

Os modelos numéricos tem se mostrado uma ferramenta fundamental para a otimização e comparação dos resultados.

3

PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo serão definidos os parâmetros necessários ao dimensionamento de vigas mistas MLC/concreto através de algumas propostas, considerando a realidade brasileira e tendo como base a revisão bibliográfica.

3.1 - Sobre o critério de dimensionamento

Analisando e comparando todos os dados, em um estudo minucioso dos critérios de dimensionamento existentes, concluiu-se que as prescrições contidas na EUROCODE 5 (1994), parte 1-1 e EUROCODE 5 (1997), parte 2, seriam adotadas como base deste trabalho. Para esta decisão, considerou-se que, a NBR 7190 (1997) adota o método de estados limites para o dimensionamento de estruturas de madeira e considera a EUROCODE 5 como uma referência normativa e também, que os pesquisadores de estruturas mistas de madeira/concreto, de vários países, adotam como referência esta mesma norma existindo inclusive, exemplos de edificações e pontes calculadas e executadas através desses critérios.

Entretanto, a adoção da EUROCODE 5 como modelo de critérios de dimensionamento, não significou a adoção de todos os seus parâmetros. Observou-se, através da revisão das normas técnicas, uma variação em parâmetros básicos como, valores dos coeficientes de ponderação para a resistência de materiais, no método dos estados limites, variação nas fórmulas para o cálculo da largura efetiva da mesa de concreto, e também, variação nas fórmulas para definição do módulo de elasticidade secante do

concreto, e do cálculo da rigidez dos elementos de ligação mecânica, na ausência de dados experimentais.

O passo seguinte consistiu na determinação desses parâmetros de acordo com os materiais nacionais e com base na investigação e análise dos resultados dos ensaios experimentais efetuados por diversos pesquisadores nacionais.

3.2 - Sobre os Coeficientes de Ponderação

Após análises e estudos de todos os dados, a proposta para os coeficientes de ponderação a serem adotados no presente trabalho para os estados limites últimos no dimensionamento de uma viga mista de MLC/concreto está representada na Tab. 3.

TABELA 3 - Coeficientes de ponderação propostos

MATERIAL (solicitações)	SÍMBOLO	MLC/concreto
Aço Estrutural (plastificação ou flambagem)	γ_a	1,1
Concreto (compressão)	γ_c	1,5
Armadura do concreto (tração)	γ_s	1,15
Ligações mecânicas, através de elementos metálicos (cisalhamento)	γ_v	1,33
Madeira (compressão // fibras)	γ_{wc}	1,4
Madeira (tração // às fibras)	γ_{wt}	1,8
Madeira (cisalhamento // às fibras)	γ_{wv}	1,8

3.3 - Sobre o Módulo de Elasticidade Secante do Concreto

Na ausência de dados experimentais é necessário calcular o valor do módulo de elasticidade secante do concreto. Após a análise de todas as informações resolveu-se adotar as formulações da NBR 6118 (1978) por ser a norma de concreto vigente no país, e que corresponde às equações 9 e 11, do capítulo 2, transcritas a seguir.

$$E_{cs} = 0,90 \cdot 6641 \sqrt{f_{cm}} \quad (22)$$

$$f_{cm} = (3,5 + f_{ck}) \quad (23)$$

Para valores em Mpa, sendo:

E_{cs} = módulo de elasticidade secante;

f_{ck} = resistência característica do concreto;

f_{cm} (= f_{cj}) = resistência média do concreto.

3.4 - Sobre a Largura Efetiva da Laje de Concreto

Após a análise de todas as informações e da comparação dos dados numéricos e gráficos obtidos sobre cálculo de largura efetiva, decidiu-se adotar as equações propostas pela EUROCODE 2 (1991), transcrita a seguir:

A largura efetiva de uma viga T, simétrica, pode ser considerada como:

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{5} < b \quad (24)$$

e, para uma viga de bordo (isto é, com o banzo apenas de um dos lados):

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{10} < b_1 \text{ (ou } b_2) \quad (25)$$

conforme FIG. 10, sendo l_0 a distância entre pontos de momento nulo (ver na EUROCODE 2, 1991 as diversas considerações de apoio e l_0).

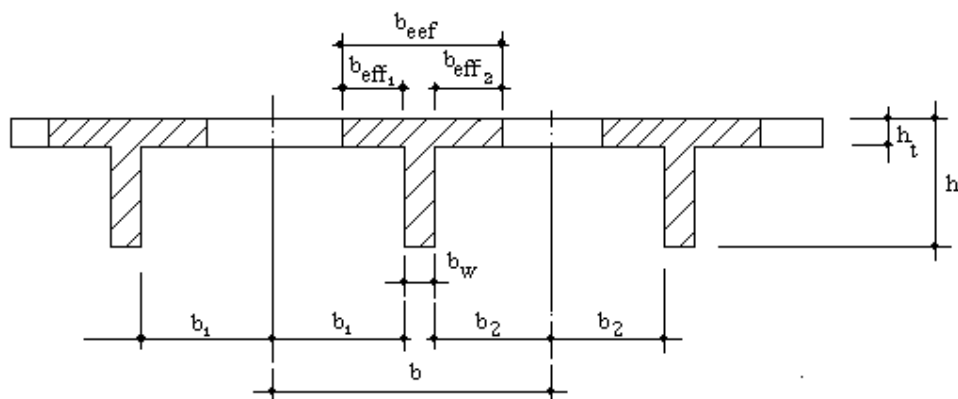


FIGURA 10 - Definição das dimensões da largura efetiva.

Fonte: EUROCODE 2 (1991)

3.5 - Sobre a Determinação da Resistência da Ligação Mecânica

No caso de vigas mistas MLC/concreto, é possível realizar uma analogia com o dimensionamento de estruturas mistas aço/concreto, madeira/madeira e madeira/chapa metálica. Desta forma, para a determinação da resistência de uma ligação efetuada entre MLC e concreto, correspondente à uma única seção de corte, poderiam ser consideradas as seguintes situações:

- embutimento da ligação na madeira, conforme NBR 7190 (1997);
- ruína do concreto, por esmagamento ou fendilhamento, conforme NBR 8800 (1986) e EUROCODE 4 (1992);
- ruptura do elemento de ligação, por cisalhamento, conforme NBR 8800 (1986) e EUROCODE 4 (1992);
- flexão do pino, conforme NBR 7190 (1997).

3.6 - Sobre o Módulo de Deslizamento de Elementos de Ligação

Diversos pesquisadores nacionais realizaram ensaios de corpos-de-prova madeira/concreto. Utilizaram pregos (comuns e especiais), parafusos, chapas com dentes estampados, cantoneiras, cavilhas, retangular e cilíndrica, com o objetivo de determinar o módulo de deslizamento dos elementos de ligação.

Todos os valores calculados, experimentalmente, foram comparados com os valores determinados através das formulações fornecidas pela EUROCODE 5, parte 2, considerando a pré-furação e sem considerar a pré-furação, para os mesmos elementos de ligação, conforme a TAB. 4.

TABELA 4 - Comparação de valores de módulo de deslizamento

Pesquisas	Diâmetro d (mm)	Tipos de elementos de ligação	Madeira	Densidade experimental madeira (kg/m ³)	Fórmula EC5	Fórmula EC5	Valor experimental da rigidez (N/mm)
					(pre-furacao) Kser(N/mm)	(sem pre-fur.) (N/mm)	
Soriano	6,58	prego24x60	cupiúba	838	35141	19287	14427
Soriano	10	parafuso3/8	cupiúba	838	50869	25928	11471
Soriano	12,7	parafuso1/2	cupiúba	838	67826	32638	15464
Soriano	5,4	prego22x48	cupiúba	838	28839	16466	6012
Souza	3,6	prego-1	parajú	1072	21577	13360	21250
Souza	4	prego-2	parajú	1072	23941	14515	14000
Souza	5,2	parafuso-4	parajú	1072	31284	17997	16360
Matthiesen	9,525	parafuso	pinus	516	35360	18023	14750
Matthiesen	12,7	parafuso	pinus	516	47146	22687	18060
Matthiesen	9,525	parafuso	Eucalipto gr.	703	44590	22728	15250
Matthiesen	12,7	parafuso	Eucalipto gr.	703	59454	28609	17810
Matthiesen	12,7	parafuso	cupiúba	764	63282	30452	30680
Oliveira		chapa-prego	Eucalipto gr.				18369

O pesquisador Souza (1997), forneceu em sua dissertação os valores de carga máxima de ruptura (F_{max}) dos elementos ensaiados. Para se obter o valor de K_{ser} procedeu-se da seguinte maneira: tomou-se 40 % da carga máxima ($0.4.F_{max}$) e o seu respectivo deslocamento, verificado, através da respectiva curva carga/deslocamento. O seguinte passo consistiu em aplicar a equação 26 transcrita a seguir:

$$k_{ser} = 0,4 \cdot \frac{F_{max}}{V_{0,4}} \quad (26)$$

obtendo-se os valores correspondentes ao K_{ser} dos elementos de ligação mecânica.

Verificou-se que os valores dos módulos de deslizamento obtidos ao se utilizar a norma EUROCODE 5 (1997) parte 2, são superiores aos valores obtidos experimentalmente, especialmente na situação de pré-furação. Na TAB. 4 pode-se observar os valores calculados utilizando a equação 26 juntamente com outros valores experimentais dos módulos de deslizamento coletados na revisão bibliográfica nacional. Como proposta deve-se seguir a orientação indicada pela própria EUROCODE 5, ou seja: considerar os valores determinados experimentalmente e na ausência deles, utilizar as formulações propostas.

4

ELEMENTOS DAS VIGAS MISTAS

4.1 - Introdução

Conforme o esquema mostrado na FIG. 11, em uma viga mista MLC/concreto, encontram-se os seguintes elementos:

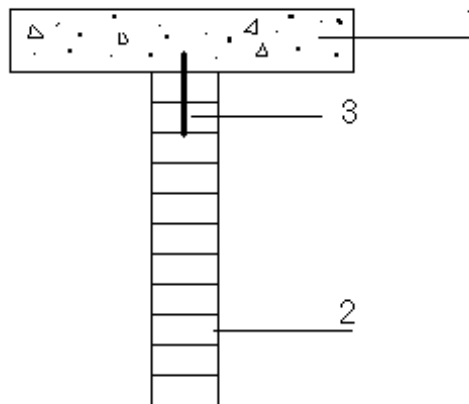


FIGURA 11 – Esquema de viga mista MLC/concreto

(1) corresponde ao material concreto; (2) corresponde à MLC e (3) corresponde ao elemento de ligação mecânica.

4.2 - O material concreto

Existem diferentes tipos de concreto. Segundo LEONHARDT e MÖNNIG (1978), o concreto, chamado normal, apresenta textura densa, é obtido à partir de agregados

naturais (areia, cascalho, brita) e apresenta massa específica aparente, ρ , compreendida entre 2,0 e 2,8 t/m³. O concreto leve, indicado para a construção civil, pode ser armado ou protendido, apresenta textura densa, agregados porosos (argila expandida ou ardósia expandida) e ρ entre 0,8 e 2,0 t/m³. O fluxo de esforços no concreto leve diferencia-se, substancialmente, do que ocorre no concreto normal. No concreto leve, a argamassa endurecida é mais rígida do que o agregado, e no concreto normal, os grãos de agregados são mais duros do que a argamassa. Por isso, os esforços de compressão no concreto normal transmitem-se preferencialmente de partícula a partícula e no concreto leve, através da argamassa, desviando-se dos grãos do agregado.

Conforme KATTAR e ALMEIDA (2000), o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos, no produto final desejado (viga, laje, etc). De uma maneira geral, os diversos tipos de cimento atendem às necessidades das obras. Entretanto, a escolha do tipo a ser adotado depende das condições climáticas, do meio ambiente, do tempo de desforma, do custo, etc. A título de exemplo, apresenta-se algumas especificações: os Cimentos Portland Composto, CPIIE-32 e CPIIE-40, são recomendadas no preparo de concretos de uma maneira geral, em ambientes normais; a especificação CPV-ARI, do tipo V, possui alta resistência inicial e final, podendo ser utilizada na fabricação de pré-moldados, pisos industriais, pontes, viadutos, grandes edificações, etc, podendo ser utilizado, também, na fabricação de concretos de alta resistência. Possui diversas vantagens como oferecer menor tempo para a desforma, velocidade na obra, construção de estruturas com resistências mais elevadas, possibilitando a redução da seção das peças, dentre outras.

A laje de concreto armado deve ser calculada de acordo com a NBR 6118 (1978). No caso de a proposta da nova NBR 6118 ser aprovada, deve-se adotá-la.

4.3 - O elemento de ligação

Como foi mencionado antes, os elementos de ligações mecânicas podem ser: do tipo pinos (pregos, parafusos e barras de aço corrugados), cavilhas (pinos de madeira torneados), conectores metálicos (anéis metálicos, chapas metálicas com dentes

estampados), entalhes na madeira, cantoneiras metálicas, malhas de aço contínuas coladas à madeira, dentre outros.

4.4 - O material madeira laminada colada.- MLC

As características da MLC conferem a este material uma grande versatilidade. Tecnicamente, é possível a execução de vigas de MLC com seções transversais variadas e comprimentos bem maiores do que é possível executar com madeira serrada. Devido a estas características, as vigas executadas com MLC possuem capacidade suficiente para vencer vãos longos, tanto como vigas simplesmente apoiadas quanto como vigas contínuas. Sobre os apoios, oferecem a garantia de continuidade, desde que executadas dentro dos padrões de qualidade e das recomendações da NBR 7190(1997). Se forem executadas com madeiras de reflorestamento, agregam um valor ainda maior devido à contribuição com o processo de economia auto sustentável.

4.4.1 - Análise teórica de vigas de MLC.

Segundo CARRASCO (1989), existem basicamente dois tipos de análise teórica de vigas de MLC:

- através da teoria clássica de vigas;
- através da teoria da elasticidade.

A partir de uma revisão bastante ampla das diversas teorias de cálculo das solicitações nas vigas de MLC, o autor concluiu que “os métodos, considerando a homogeneização das lâminas (teoria clássica de vigas), já apresentam uma boa aproximação em relação aos métodos exatos (teoria da elasticidade), chegando ao máximo de 3,5% de diferença”.

Por este motivo, foi enfocada a formulação desenvolvida para laminados ortotrópicos. conforme o método de BODIG e JAYNE (1982), que leva em consideração a teoria clássica de vigas. Como cada lâmina de madeira da viga de MLC apresenta um valor de módulo de elasticidade diferente (E), foi adotada a formulação para laminados

ortotrópicos assimétricos, utilizando a homogeneização da largura e mantendo-se constantes os módulos de elasticidade das lâminas.

CARRASCO (1989) também apresenta a homogeneização da seção transversal das vigas de madeira laminada colada pela teoria de Ethington (1960) para três lâminas, generalizando-a para “n” lâminas, com espessuras diferentes e mesma largura, onde qualquer lâmina pode ser tomada como referência.

A seguir, são apresentadas as formulações de BODIG et al.(1982), para a análise teórica de vigas de MLC, considerada como formada por laminados assimétricos ortotrópicos de múltiplas camadas visto que, cada uma das lâminas de madeira da viga de madeira laminada colada apresenta um valor de módulo de elasticidade diferente. Para uma melhor compreensão das formulações deve-se considerar a FIG.12 adaptada por CARRASCO (1989) na qual aparece o esquema de uma seção de viga de MLC de múltiplas camadas.

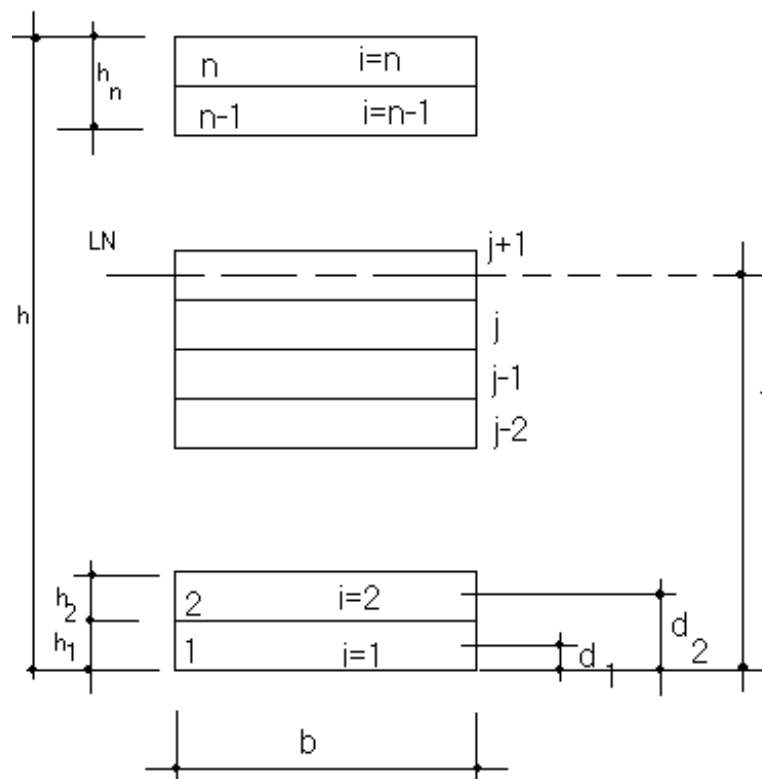


FIGURA 12 – Esquema da seção de uma viga de MLC.
Fonte: CARRASCO (1989)

São adotadas as seguintes hipóteses: a linha adesiva é rígida e infinitesimal; a lâmina é homogênea e ortotrópica; os eixos ortotrópicos e geométricos coincidem; as hipóteses de flexão clássica são aceitas.

A lâmina de referência para a homogeneização poderá ser qualquer. Nesta análise, foi adotada a lâmina inferior. Desta maneira, $b = b_n$. A largura homogeneizada de todas as outras lâminas, é obtida usando a equação 27

$$b_i = b_n \left(\frac{E_i}{E_r} \right). \quad (27)$$

sendo

b_i = largura de uma determinada lâmina i da seção homogeneizada;

b_n = largura real da lâmina da seção original;

E_i = módulo de elasticidade da lâmina i ;

E_r = módulo de elasticidade da nova seção homogeneizada (lâmina de referência).

Devido à assimetria, o plano neutro não se encontra mais na metade da altura da viga. A posição do centro de gravidade é dado pela equação 28. Então, a posição da linha neutra, considerando que o E na tração é o mesmo na compressão, será:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n A_i d_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (28)$$

sendo

$$A_i = b_i \cdot h_i \quad (29)$$

$$d_i = \sum_{j=1}^{i-1} h_j + \left(\frac{h_i}{2} \right) \quad (30)$$

Substituindo-se as equações 27, 29 e 30 na equação 28, obtêm-se, finalmente, a posição da linha neutra:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i \left[\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \left(\frac{h_i}{2} \right) \right]}{\sum_{i=1}^n E_i h_i} \quad (31)$$

na qual

t = distância do centro de gravidade da seção homogeneizada ao eixo

horizontal adotado;

A_i = área da lâmina i ;

b_i, h_i = altura e largura da lâmina i ;

d_i = distância do centro de gravidade da lâmina i até a linha neutra da seção.

O momento de inércia, usando a teoria dos eixos paralelos, será:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n \left[I_i + A_i (\bar{d}_i)^2 \right] \quad (32)$$

sendo

$$I_i = \frac{b_i (h_i)^3}{12} \quad (33)$$

$$\bar{d}_i = t - d_i \quad (34)$$

Substituindo-se as equações 29, 30, 33, na equação 32, obtêm-se o momento de inércia, da peça de MLC homogeneizada, conforme equação 35:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{b_i h_i^3}{12} + b_i h_i \left\{ \left[t - \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \frac{h_i}{2} \right) \right]^2 \right\} \right] \quad (35)$$

O momento estático máximo homogeneizado é dado por:

$$\bar{S}_{\max} = \sum_{i=1}^j A_i \bar{d}_i \quad (36)$$

ou, substituindo as equações 29, 30, e 34 na equação 36 obtêm-se a equação 37 para o momento estático máximo homogeneizado:

$$\bar{S}_{\max} = \sum_{i=1}^n h_i b_i \left[t - \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \frac{h_i}{2} \right) \right] \quad (37)$$

O momento estático na interface da lâmina i e $i+1$, é dado por:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^i h_j b_j \left[t - \left(\sum_{k=1}^{j-1} h_k + \frac{h_j}{2} \right) \right] \quad (38)$$

O momento estático no meio da lâmina i ($\bar{S}_{\max,i}$), é o seguinte:

$$\bar{S}_{\max,i} = h_i b_i \left[t - \left(\sum_{k=1}^{i-1} h_k + \frac{h_i}{4} \right) \right] + \sum_{j=1}^{i-1} h_j d_j \left[t - \left(\sum_{k=1}^{j-1} h_k + \frac{h_j}{2} \right) \right] \quad (39)$$

sendo

\bar{I} = momento de inércia da seção homogeneizada;

I_i = momento de inércia da lâmina.

Considerando uma viga simplesmente apoiada, com carga central, os valores de tensão e as flechas serão:

As tensões normais na lâmina i são dadas por

$$\sigma_i = \frac{M}{\bar{I}} \left(\frac{E_i}{E_r} \right) (t - y) \quad (40)$$

As tensões de cisalhamento, considerando o momento estático na interface das lâminas i e $i+1$:

$$\bar{\tau}_i = \frac{V\bar{S}_i}{\bar{I}b} \quad (41)$$

As flechas (w) no meio do vão são:

$$w = \frac{Pl^3}{48E_r\bar{I}} \quad (42)$$

para V = cortante máximo, b = largura da lâmina i , P = carga concentrada, l = vão da viga mista.

Realizando a homogeneização das vigas de MLC segundo as formulações de BODIG et al.(1982) e segundo as formulações de Ethington/CARRASCO (1989), os valores de rigidez à flexão efetiva $(EI)_{ef}$ devem apresentar o mesmo valor. Veja-se a seguir a formulação de Ethington (1960), generalizada por CARRASCO (1989), de acordo com o esquema mostrado na FIG. 13.

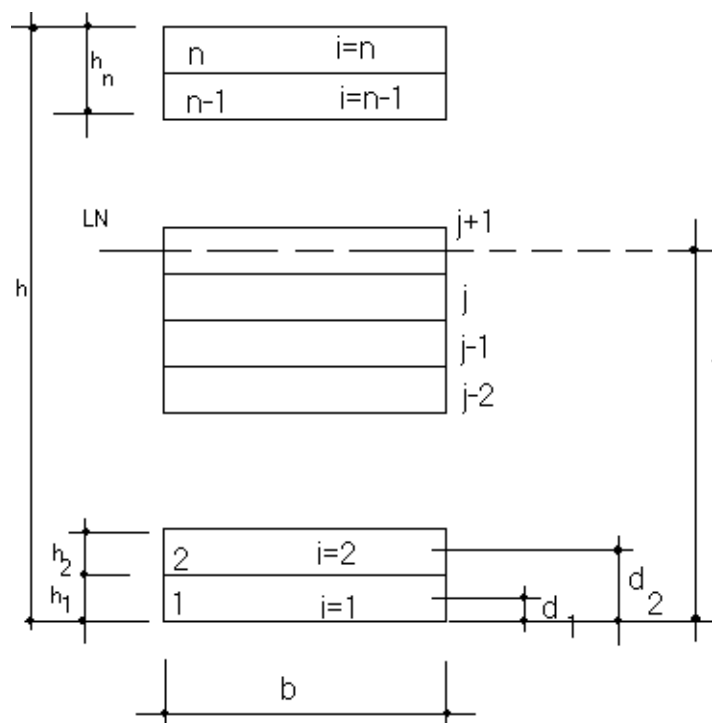


FIGURA 13 - Esquema da seção de uma viga de MLC
 Fonte: CARRASCO (1989)

As hipóteses principais são: o efeito da concentração de tensões devido à linha adesiva é desprezado, as seções planas permanecem planas e o limite de proporcionalidade não é ultrapassado.

A deformação em qualquer ponto da seção transformada é fornecida por:

$$\varepsilon_x = ky \quad (43)$$

A tensão correspondente, na lâmina j , aplicando a lei de Hooke é:

$$\sigma_x = kE_j y \quad (44)$$

A tensão em um ponto da lâmina j é:

$$\sigma_i^j = \frac{ME_j}{EI} y \quad (45)$$

sendo

k = constante de proporcionalidade;

E_j = módulo de elasticidade da lâmina j ;

y = posição na qual se deseja a tensão.

A posição da linha neutra é fornecida pela equação:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i d_i}{\sum_{i=1}^n E_i h_i} \quad (46)$$

sendo,

$$d_i = \sum_{j=1}^{i-1} h_j + \left(\frac{h_i}{2}\right) \quad (47)$$

têm-se a equação 48 para a posição da linha neutra:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i \left[\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \left(\frac{h_i}{2}\right) \right]}{\sum_{i=1}^n E_i h_i} \quad (48)$$

Finalmente, a rigidez da viga de MLC é dada por:

$$\bar{EI} = \sum_{i=1}^n E_i I_i + b \sum_{i=1}^n E_i h_i \left\{ \left[t - \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \frac{h_i}{2} \right) \right]^2 \right\} \quad (49)$$

Substituindo-se a equação 49 na equação 45 e fazendo $y = t - y_j$, obtêm-se a tensão, em um ponto da lâmina j , representada na equação 50.

$$\sigma_i^j = \frac{ME_j}{\bar{EI}} (t - y_j) \quad (50)$$

Equação generalizada para o cálculo da tensão de cisalhamento de todas as lâminas:

$$\tau_j = \frac{R}{\bar{EI}} \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} E_j \left[t h_j - \left(\sum_{i=1}^j h_i \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{j-1} h_k \right)^2 \right] + E_i \left\{ t \left[y - \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j \right) \right] - \frac{y^2}{2} + \frac{\left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j \right)^2}{2} \right\} \right\} \quad (51)$$

4.4.2 - Procedimentos de dimensionamento de vigas de MLC segundo a NBR 7190 (1997)

Além das considerações para madeira serrada, a NBR 7190, faz algumas considerações para a MLC.

A resistência de cálculo, f_d , é fornecida por:

$$f_d = K_{\text{mod}} \cdot \frac{f_k}{\gamma_w} \quad (52)$$

a qual é majorada por um coeficiente de modificação K_{mod} e por um coeficiente de ponderação para minoração das propriedades da madeira γ_w (apresentados no capítulo anterior). O coeficiente de modificação, K_{mod} , afeta os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de umidade admitida e do eventual emprego de madeira de segunda categoria e é formado pelo produto de:

$$K_{\text{mod}} = K_{\text{mod}1} \cdot K_{\text{mod}2} \cdot K_{\text{mod}3} \quad (53)$$

Os coeficientes parciais de modificação, $K_{\text{mod}1}$ e $K_{\text{mod}2}$, apresentam os mesmos valores, tanto para madeira serrada como para MLC. No entanto, o valor de $K_{\text{mod}3}$ para MLC leva em conta a curvatura da peça (valendo 1 para peça reta e sendo menor do que 1 para peças curvas).

O item 6.3.6. da NBR 7190/1997, determina que, para o emprego da MLC, devem ser realizados os seguintes ensaios específicos: a) cisalhamento na lâmina de cola; b) tração normal à lâmina de cola; c) resistência das emendas dentadas e biseladas.

Sobre dimensionamento em estado limite último, “os esforços atuantes nas peças devem ser calculados de acordo com os princípios da estática das construções, admitindo-se, em geral, a hipótese de comportamento elástico-linear dos materiais”.

5

DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO OS CRITÉRIOS PROPOSTOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento de três vigas mistas de madeira e concreto que foram ensaiadas experimentalmente. O dimensionamento leva em consideração os parâmetros que foram analisados e propostos no capítulo 3. As vigas e os respectivos pesquisadores são:

- VC1, de OLIVEIRA (1999);
- Protótipo 2, de MAGALHÃES (1997) e
- VPR2, de SORIANO (2001).

5.2 - Viga mista VC1- OLIVEIRA (1999)

5.2.1 - Características

A VC1 é uma viga mista composta de MLC e concreto constituída de 11 lâminas de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* de 2,7 cm de espessura, perfazendo uma viga de altura total de 29,7 cm e vão de 400 cm entre as linhas de eixo dos apoios, conforme a FIG. 14

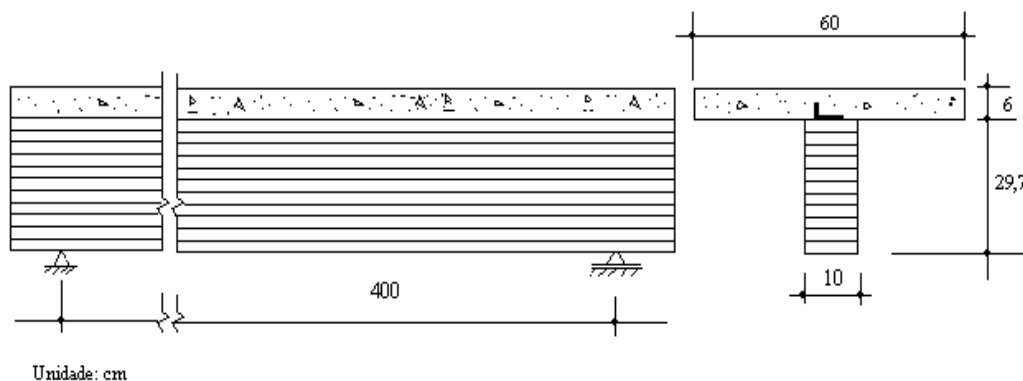


FIGURA 14 – Geometria e dimensões da VC1- MLC/concreto

Foram utilizadas, como elementos de solidarização, 42 chapas metálicas de dentes estampados, com dimensões de 9,9 cm x 7,1 cm com 1,35 mm de espessura, dobradas formando um ângulo de 90°, conforme FIG.15. Foi adotada uma malha de aço de diâmetro 5 mm, disposta a cada 10 cm e realizada a concretagem da laje de concreto com seção 60 cm x 6 cm.

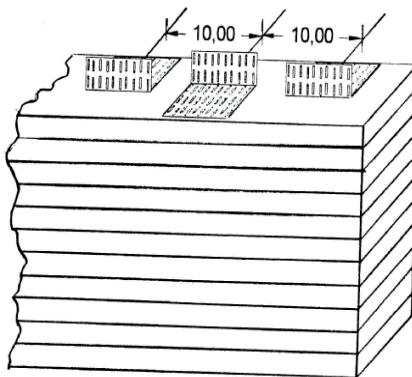


FIGURA 15 – Fixação das chapas com dentes estampados.
Fonte: OLIVEIRA (1999)

5.2.2- Dimensionamento

A EUROCODE 5 (1994), parte 1-1, considera que, na viga de seção T, a mesa corresponde ao material 1 e a alma, ao material 2.

5.2.2.1-Largura efetiva

Conforme a proposta apresentada anteriormente a largura efetiva de vigas simplesmente apoiadas, apresentada na equação 24, transcrita a seguir, vale:

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{5} \quad (54)$$

sendo:

$$b_{eff} = 10 + \frac{400}{5} = 90cm .$$

Como a viga foi ensaiada com largura da laje de concreto igual a 60 cm, adotou-se este mesmo valor no dimensionamento. Assim, $b_1 = 60$ cm.

5.2.2.2- Módulo de deslizamento da ligação

A EUROCODE 5 (1994) orienta que devem ser adotados os valores de rigidez determinados experimentalmente. Durante os ensaios de corpos-de-prova, OLIVEIRA (1999) determinou, para a chapa com dentes estampados, o valor de $K_{ser} = 183690$ N/cm.

5.2.2.3- Características geométricas e mecânicas da laje de concreto (elemento 1)

- A área $A_1 = 60$ cm x 6 cm = 360 cm²
- O módulo de elasticidade, $E_1 = 2635984$ N/cm² (determinado experimentalmente). Na ausência de valor experimental, a resistência do concreto e o módulo de elasticidade podem ser calculados pelas equações 22 e 23 (capítulo 3, seção 3.3). O momento de inércia vale

$$I_1 = \frac{bh^3}{12} = 1080 \text{ cm}^4 .$$

5.2.2.4- Características geométricas e mecânicas da viga de MLC (elemento 2)

Na FIG.16 é mostrada a localização e numeração das lâminas da viga de MLC.

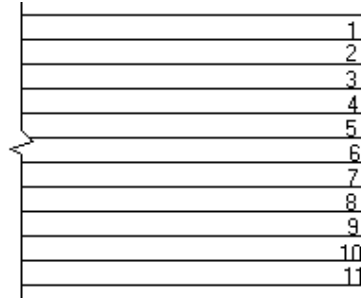


FIGURA 16 – Esquema das 11 lâminas da viga de MLC – VC1

a) Homogeneização da seção da viga

Cada uma das lâminas apresenta um valor de módulo de elasticidade diferente, determinado experimentalmente, conforme TAB. 5.

TABELA 5 – Propriedades das lâminas homogeneizadas

Lâmina	Módulo de elasticidade E_i N/cm ²	Largura homogeneizada $b_i = b_n(E_i/E_r)$ (cm)	Área $A_i = b_i \cdot h_i$ (cm ²)	Momento de inércia (cm ⁴)
1	1697266	15,5668	42,03	7617,64
2	1269457	11,6431	31,44	3645,2
3	1771533	16,248	43,87	2862,45
4	1815871	16,6546	44,97	1319,59
5	1767961	16,2152	43,78	331,73
6	1137033	10,4285	28,16	17,21
7	1090310	10	27	222,08
8	1339818	12,2884	33,18	1009,27
9	1897349	17,4019	46,99	3157,08
10	1757872	16,1227	43,53	5160,5
11	1481066	13,5839	36,68	6766,13
			421,61	32098,87

Para o cálculo das propriedades geométricas da seção homogeneizada da viga de MLC, com os valores experimentais de E_i , foram utilizadas as formulações de BODIG et al.(1982), ampliada por CARRASCO (1989). Para o desenvolvimento desta análise usou-se a lâmina com menor valor de E como referência, assim:

$$E_r = 1090310 \text{ N/cm}^2$$

Para a homogeneização da largura das demais lâminas utiliza-se a equação 27, transcrita a seguir. Os valores de b_i encontram-se na TAB.5, coluna 3.

$$b_i = b_n \left(\frac{E_i}{E_r} \right) \quad (55)$$

sendo,

b_i = largura de uma determinada lâmina i da seção homogeneizada;

b_n = largura real da lâmina da seção original;

E_i = módulo de elasticidade da lâmina i da seção original;

E_r = módulo de elasticidade da nova seção homogeneizada (referência).

Como o sistema é assimétrico, o plano neutro não se encontra mais na metade da altura da viga. Assim, a posição da linha neutra, deve ser calculada pela equação 28, transcrita a seguir:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n A_i d_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (56)$$

na qual

t = distância do centro de gravidade da seção homogeneizada ao eixo horizontal adotado;

A_i = área da lâmina i ;

b_i, h_i = altura e largura da lâmina i , homogeneizada, apresentada na coluna 4, TAB.5;

d_i = distância do centro de gravidade da lâmina i até a linha neutra da seção.

Assim, $t = 14,91$ cm

O momento de inércia, usando a teoria dos eixos paralelos, será calculado pela equação 33, transcrita a seguir:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n \left[I_i + A_i (\bar{d}_i)^2 \right] \quad (57)$$

$$\text{para } \bar{d}_i = t - d_i \quad (58)$$

e I_i = momento de inércia da lâmina i em relação ao seu eixo, considerando a largura homogeneizada.

Substituindo-se a equação 58 na equação 57, obtêm-se a equação 59, para o cálculo do momento de inércia da peça de MLC homogeneizada.

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{b_i h_i^3}{12} + b_i h_i \left\{ \left[t - \left(\sum_{j=1}^{i-1} h_j + \frac{h_i}{2} \right) \right]^2 \right\} \right] \quad (59)$$

Substituindo-se todos os valores na equação dada obtêm-se o valor de \bar{I} que corresponde ao momento de inércia do elemento 2 homogeneizado. Como o material madeira recebeu o índice 2 este momento de inércia homogeneizado passará a ser portanto, I_2 . Assim, têm-se

$$I_2 = 32098,87 \text{ cm}^4.$$

5.2.2.5- Homogeneização da viga mista MLC/concreto

Depois de se homogeneizar a viga de madeira laminada colada determinando-se um único momento de inércia para o elemento 2 (madeira) a seguinte etapa consiste em homogeneizar os elementos da viga mista, ou seja, o material (1) concreto e o material (2) MLC. Para isto será seguido todo o procedimento apresentado pela EUROCODE 5, (1994), parte1-1 (Ver anexo 1) e o esquema mostrado na FIG.17 seguinte:

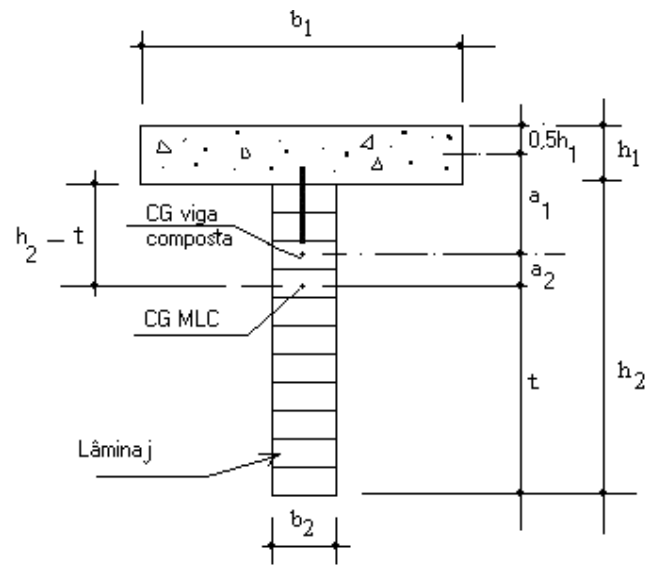


FIGURA 17- Seção transversal de viga mista MLC/concreto.

As características geométricas e mecânicas, para os elementos 1 e 2, são apresentadas a seguir.

Para o elemento 1, laje de concreto, FIG.18:

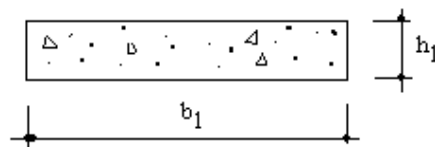


FIGURA 18 – Seção transversal da laje de concreto

$$E_1 = 2635984 \text{ N/cm}^2$$

$$I_1 = 1080 \text{ cm}^4$$

$$b_1 = 60 \text{ cm}$$

$$h_1 = 6 \text{ cm}$$

$$A_1 = 360 \text{ cm}^2$$

Para o elemento 2, viga de MLC, homogeneizada, FIG.19:

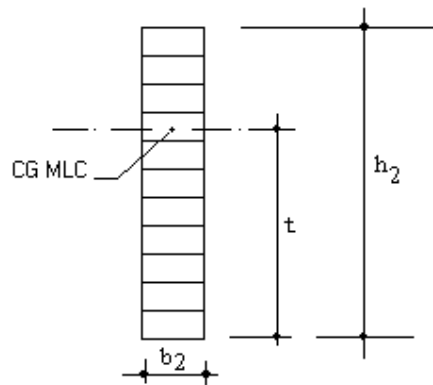


FIGURA 19 –Seção transversal da viga de MLC.

$$E_2 = 1090310 \text{ N/cm}^2$$

$$I_2 = 32098,87 \text{ cm}^4$$

$$b_2 = 10 \text{ cm}$$

$$h_2 = 29,7 \text{ cm}$$

$$A_2 = 421,61 \text{ cm}^2$$

$$t = 14,91 \text{ cm.}$$

A posição da L.N. da seção mista homogeneizada, será calculada a partir da posição das linhas neutras de cada elemento, modificadas pelos coeficientes γ_1 e γ_2 , que levam em consideração a rigidez dos elementos de ligação. Conforme a EUROCODE 5, γ_1 é calculado de acordo com a equação apresentada no anexo I, A1.8, transcrita a seguir:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 S_1}{kL^2} \right)^{-1} \quad (60)$$

$$\gamma_1 = 0.2388$$

sendo,

S_1 = espaçamento dos elementos de ligação = 10 cm;

$k = K_{\text{ser}} = 183690 \text{ N/cm}$

e

$\gamma_2 = 1$. Conforme DIN 1052 (1988) e EUROCODE 5 (1995), PARTE 1-1, o elemento 2 é adotado como referência, por isto, o valor adotado ser igual a 1.

A distância entre as linhas neutras da viga de MLC e a linha neutra do conjunto, será conforme a equação A1.9, transcrita a seguir:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2)} \quad (61)$$

$$a_2 = 5,89 \text{ cm}$$

A distância entre as linhas neutras da laje de concreto e a linha neutra do conjunto, será:

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad (62)$$

$$\text{Assim, } a_1 = 11,96 \text{ cm}$$

A rigidez efetiva à flexão da viga mista será:

$$(EI)_{ef} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) \quad (63)$$

$$\text{sendo, } (EI)_{ef} = 86212446650 \text{ N.cm}^2$$

5.2.2.6- Esforços solicitantes e combinação de ações.

A combinação das ações (F_d) deve ser feita de acordo à NBR 7190/1997, tanto para os estados limites últimos como para os estados limites de utilização. Na análise em questão, apenas será considerado o carregamento permanente nominal, $F_{G,K}$, e a carga aplicada nos ensaios experimentais. Assim, o $F_{G,K}$ será o somatório dos valores:

- viga de MLC = $(0.10 \times 0.297) \text{ m}^2 \times 795 \text{ kg/m}^3 = 23.61 \text{ kg/m}$
- laje de concreto = $(0.06 \times 0.60) \text{ m}^2 \times 2500 \text{ kg/m}^3 = 90 \text{ kg/m}$
- ligações = $(0.099 \times 1.35 \text{ E-}3) \text{ m}^2 \times 7800 \text{ kg/m}^3 = 1.04 \text{ kg/m}$

$$\text{Sendo, } F_{G,K} = 114,65 \text{ kg/m} = 11,47 \text{ N/cm}$$

5.2.2.7- Distribuição de tensões.

Segundo OLIVEIRA (1999), as vigas mistas foram ensaiadas à flexão, com a aplicação de carga no meio do vão e a instalação de extensômetros na viga, posicionados a 180 cm do apoio esquerdo, conforme FIG. 20.

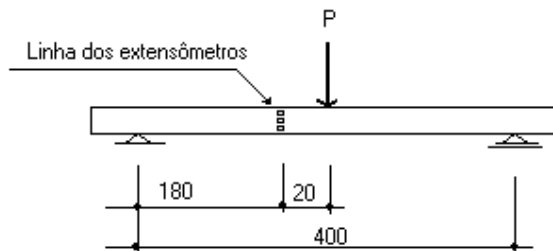


FIGURA 20 – Aplicação de cargas e posição dos extensômetros. Unidade: cm

A carga foi aplicada paulatinamente, sendo feita a leitura das deformações nos extensômetros, a intervalos definidos de carga, até atingir a ruptura. O autor apresenta valores de deformação dos extensômetros para cargas de $P_1 = 145000$ N e $P_2 = 40130$ N, valores estes que serão utilizados posteriormente para comparação dos resultados experimentais com os resultados teóricos e numéricos.

Nas vigas de MLC/concreto, a distribuição de tensões apresenta o aspecto mostrado na FIG. 21, (lado direito).

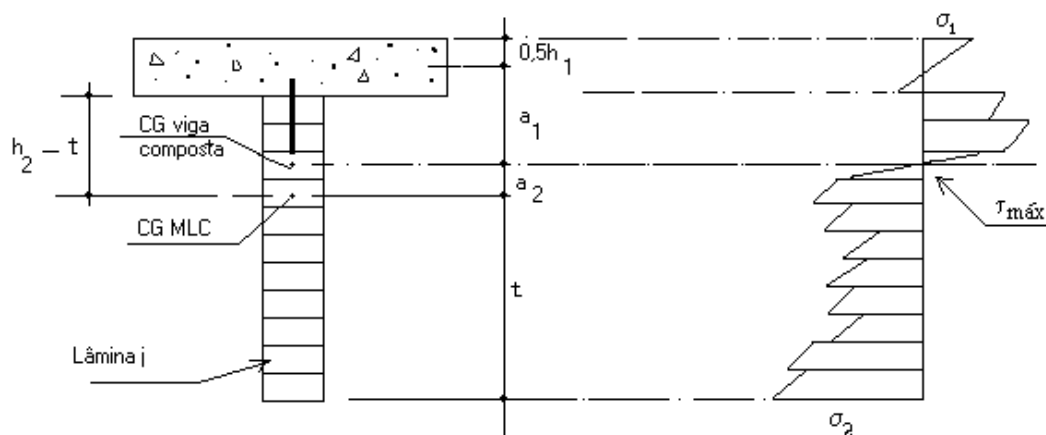


FIGURA 21 – Esquema da viga mista MLC/concreto e diagrama de tensões

Cada lâmina possui uma distribuição linear de tensões, sendo que, na interface das lâminas, existe uma descontinuidade, dando assim, um formato de “dente-de-serra”. A explicação deste comportamento, encontra-se na própria teoria de análise de vigas de MLC, na qual a tensão em um ponto da lâmina j , é dada pela equação 50, transcrita a seguir:

$$\sigma_i^j = \frac{ME_j}{EI} (t - y_j) \quad (64)$$

Nesta equação, observa-se que o momento M e a rigidez da viga homogeneizada \bar{EI} , são constantes, na seção considerada; já o módulo de elasticidade de cada lâmina, E_j , é diferente, isto explica a linearidade das tensões na altura da lâmina e a descontinuidade devido à mudança de módulo de elasticidade. Com o objetivo de comparar os gráficos de tensão obtidos experimentalmente com os gráficos obtidos através do método teórico proposto, decidiu-se calcular a tensão no meio de cada lâmina, já que os extensômetros foram posicionados desta maneira. Assim, para cargas de $P_1 = 145000$ N, aplicando-se a metodologia proposta obtêm-se os valores de tensão mostrados na TAB.6.

TABELA 6 - Valores de tensões pelo método proposto- $P_1 = 145000$ N

Tensões na viga composta com P = 145 000 N - Método proposto				
Laminas	Ej (N/cm2)	t - yj (cm)	Tensão (N/cm2)	Altura da viga composta (cm)
concreto fibra superior	2635984	5,855425956	-2377	0
concreto fibra média	2635984	2,855425956	-1159	3
concreto fibra inferior	2635984	-0,144574044	59	6
L1 - fibra superior	1697266	-10,30538731	-2694	6,1
L1 - fibra média	1697266	-7,605387306	-1988	7,35
L2-fibra média	1269457	-4,905387306	-959	10,05
L3 - fibra média	1771533	-2,205387306	-602	12,75
L4 - fibra média	1815871	0,494612694	138	15,45
L5 - fibra média	1767961	3,194612694	870	18,15
L6 - fibra média	1137033	5,894612694	1032	20,85
L7 - fibra média	1090310	8,594612694	1443	23,55
L8 - fibra média	1339818	11,29461269	2331	26,25
L9 - fibra média	1897349	13,99461269	4089	28,95
L10 - fibra média	1757872	16,69461269	4520	31,65
L11 - fibra média	1481066	19,39461269	4424	34,35
L11 - fibra inferior	1481066	20,74461269	4732	35,7

A mudança de sinal na coluna das tensões calculadas indica a posição da linha neutra na laje de concreto (entre a fibra média e a fibra inferior) e na viga de madeira (entre a lâmina 3 e a lâmina 4).

Para cargas de $P_2 = 40130$ N, aplicando-se a metodologia proposta obtêm-se os valores de tensão mostrados na TAB.7.

TABELA 7 - Valores de tensões pelo método proposto $P=40130$ N

Tensões na viga composta com $P = 40\ 130$ N - Método proposto				
Laminas	Ej (N/cm²)	t - yj (cm)	Tensão (N/cm²)	Altura da viga composta (cm)
concreto fibra superior	2635984	5,855425956	-687	0
concreto fibra média	2635984	2,855425956	-335	3
concreto fibra inferior	2635984	-0,144574044	17	6
L1 - fibra superior	1697266	-10,30538731	-779	6,1
L1 - fibra média	1697266	-7,605387306	-575	7,35
L2-fibra média	1269457	-4,905387306	-277	10,05
L3 - fibra média	1771533	-2,205387306	-174	12,75
L4 - fibra média	1815871	0,494612694	40	15,45
L5 - fibra média	1767961	3,194612694	251	18,15
L6 - fibra média	1137033	5,894612694	298	20,85
L7 - fibra média	1090310	8,594612694	417	23,55
L8 - fibra média	1339818	11,29461269	674	26,25
L9 - fibra média	1897349	13,99461269	1182	28,95
L10 - fibra média	1757872	16,69461269	1307	31,65
L11 - fibra média	1481066	19,39461269	1279	34,35
L11 - fibra inferior	1481066	20,74461269	1368	35,7

A mudança de sinal na coluna das tensões calculadas indica a posição da linha neutra na laje de concreto (entre a fibra média e a fibra inferior) e na viga de madeira (entre a lâmina 3 e a lâmina 4).

Também calculou-se os valores de cortante máximo em $x = 0$ e os momentos na seção localizada a uma distância do apoio esquerdo de $x = 180$ cm. Estes valores são apresentados na TAB. 8, para as duas cargas concentradas de 40130 N e 145000 N.

TABELA 8 - Carregamentos e esforços solicitantes

carga distribuida (N/cm)	carga conc. (N)	Cortante máximo (N) Reação	M em $x=180$ cm (N.cm)
11,47	40130	22359	3838806
11,47	145000	74794	13277106

Para efeito de comparação, são apresentados nas TABELAS 9 e 10, os valores de tensão, determinados a partir dos gráficos de carga/deformação, fornecidos por OLIVEIRA (1999). Dos valores dos gráficos foram obtidas as deformações e aplicando a Lei de Hooke, foram obtidas as tensões.

TABELA 9 - Valores de tensão- $P_1=145000$ N

Tensão (N/cm ²)	Altura da viga composta (cm)
-3890	7,35
0	18,15
872,25	23,55
4660,42	34,35
4818,40	35,7

TABELA 10 - Valores de tensão- $P=40130$ N

Tensão (N/cm ²)	Altura da viga composta (cm)
-170	7,35
177	18,15
238,00	23,55
821,00	34,35

Na viga mista com ligação flexível, existem duas linhas neutras, FIG.21. Portanto, dois pontos de tensão normal nula, e consequentemente, tensões de cisalhamento máximas. Apenas será considerada a tensão de cisalhamento máxima que ocorre no elemento 2, na lâmina i e na cota $(t + a_2)$.

A tensão de cisalhamento máxima, considerando o momento estático na metade da lâmina i , conforme equação 41, transcrita a seguir, é:

$$\bar{\tau}_i = \frac{V\bar{S}_i}{\bar{I}b} \quad (65)$$

sendo

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^i h_j b_j \left[t - \left(\sum_{k=1}^{j-1} h_k + \frac{h_j}{2} \right) \right] \quad (66)$$

Entretanto, neste trabalho, não foi calculada a tensão de cisalhamento máxima porque não existiam valores experimentais para comparação.

5.2.2.8- Determinação das flechas.

A flecha máxima foi calculada considerando uma carga concentrada no meio do vão e uma carga distribuída que considera o peso próprio da estrutura.

O pesquisador OLIVEIRA (1999) realizou os ensaios aplicando as cargas de: 125000 N, 69700 N e 43200 N.

No dimensionamento teórico proposto, utilizou-se a seguinte equação para o cálculo da flecha máxima, no meio do vão:

$$w_{\text{máx}} = \frac{PL^3}{48(EI)_{ef}} + \frac{5F_{GK}L^4}{384(EI)_{ef}} \quad (67)$$

Na TAB. 11 são apresentados os valores das flechas para as cargas concentradas aplicadas por OLIVEIRA (1999).

TABELA 11 – Cálculo de flecha máxima para VC1

1carga concentrada P (N)	Carga distribuída F _{GK} (N/cm)	Flechas (mm)
125000	14.91	19.91
69700	14.91	11.36
43200	14.91	7.26

5.3 - Viga mista Protótipo 2 – MAGALHÃES (1997)

5.3.1 - Características

A viga Protótipo 2 é um exemplo de viga mista madeira/concreto, FIG.22. Estava constituída de mesa de concreto armado, de seção 55 cm x 5 cm e viga de madeira da espécie *Manikara spp*, (parajú) em peça única, com vão, entre linhas de eixo dos apoios, de 320 cm. O sistema de ligação adotado consistiu de pregos especiais de diâmetro 3,6 cm, aplicados com pistola. Este tipo de ligação foi ensaiado por SOUZA (1997).

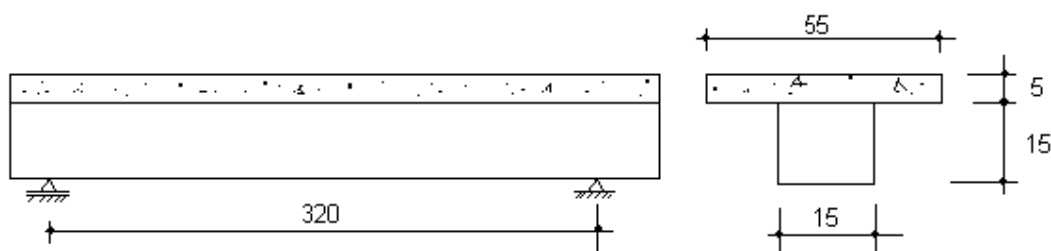


FIGURA 22 - Geometria e dimensões do Protótipo 2. Unidade: cm

5.3.2- Dimensionamento

A EUROCODE 5 (1994), parte 1-1, considera que, na viga de seção T, a mesa corresponde ao material 1 e a alma, ao material 2.

5.3.2.1-Largura efetiva

Conforme a proposta apresentada anteriormente a largura efetiva de vigas simplesmente apoiadas, apresentada na equação 24, transcrita a seguir, vale:

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{5} \quad (68)$$

sendo:

$$b_{eff} = 15 + \frac{320}{5} = 79cm$$

Como a laje foi ensaiada com largura de 55 cm , considerou-se este valor como largura efetiva, assim, $b_1 = 55$ cm.

5.3.2.2- Módulo de deslizamento da ligação

A EUROCODE 5 (1994) orienta que devem ser adotados os valores de deslizamento da ligação determinados experimentalmente. Durante os ensaios de corpos-de-prova, SOUZA (1997) determinou, para os pregos especiais de diâmetro 3,6 mm, o valor de $K_{ser} = 212200$ N/cm.

5.3.2.3- Características geométricas e mecânicas da laje de concreto (elemento 1), como na FIG.23.

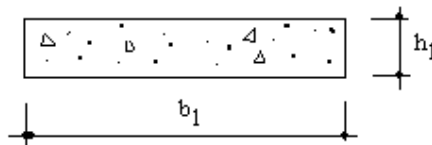


FIGURA 23 – Seção transversal da laje de concreto.

- $b_1 = 55$ cm e $h_1 = 5$ cm
- A área $A_1 = 55$ cm x 5 cm = 275 cm²
- O módulo de elasticidade, $E_1 = 2874600$ N/cm² (determinado experimentalmente).

Na ausência de valor experimental, a resistência do concreto e o módulo de elasticidade podem ser calculados pelas equações 22 e 23. Já o momento de inércia vale,

$$I_1 = \frac{bh^3}{12} = 573 \text{ cm}^4$$

5.3.2.4- Características geométricas e mecânicas da viga de madeira (material 2)

Como a viga de madeira constitui-se de peça única, não há necessidade de homogeneização. Assim, conforme FIG.24:

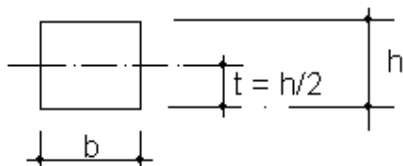


FIGURA 24 - Seção transversal da viga de madeira.

Para:

$$b_2 = 15 \text{ cm}, h_2 = 15 \text{ cm}, A_2 = 15 \times 15 = 225 \text{ cm}^2,$$

$$t = h_2/2 = 15/2 = 7,5 \text{ cm}$$

Módulo de elasticidade secante determinado experimentalmente, $E_2 = 2166000 \text{ N/cm}^2$

Momento de inércia, $I_2 = 4220 \text{ cm}^4$.

5.3.2.5 - Homogeneização da viga mista madeira/concreto

Esta etapa consiste em homogeneizar os elementos da viga mista, concreto (1) e madeira (2). Para isto, será seguido o procedimento apresentado pela EUROCODE 5, (1994), parte 1-1 (Ver anexo 1) e o esquema mostrado na FIG.25 seguinte:

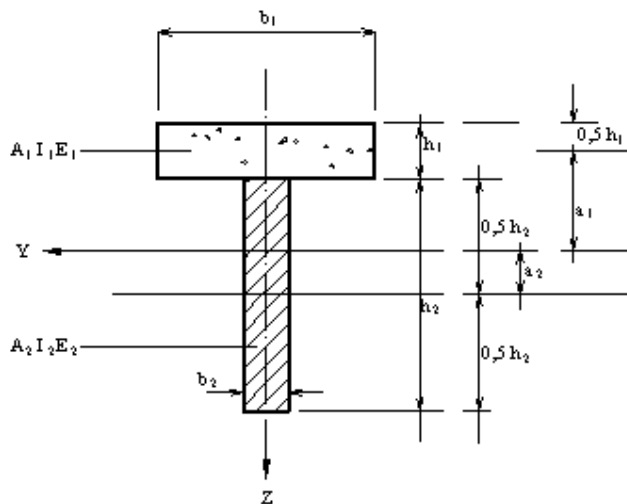


FIGURA 25 – Seção transversal de viga mista madeira/concreto.

Fonte: EUROCODE 5 (1994), parte 1-1

A posição da L.N. da seção mista, será calculada a partir da posição das linhas neutras de cada elemento, modificadas pelos coeficientes γ_1 e γ_2 , que levam em consideração a

rigidez dos elementos de ligação. Conforme a EUROCODE 5, γ_1 é calculado conforme a equação A1.8, transcrita a seguir:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 S_1}{kL^2} \right)^{-1} \quad (69)$$

$$\gamma_1 = 0.1566$$

sendo,

S_1 = espaçamento dos elementos de ligação = 15 cm;

$k = K_{ser} = 212200$ N/cm

e

$\gamma_2 = 1$, pois a DIN 1052 (1988) e a EUROCODE 5 (1994), adotam o elemento 2 como referência.

A distância entre as linhas neutras da viga de madeira e a linha neutra do conjunto, será conforme a equação A1.9, transcrita a seguir:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2)} \quad (70)$$

Substituindo-se os valores obtêm-se, $a_2 = 2,025$ cm.

A distância entre as linhas neutras da laje de concreto e a linha neutra do conjunto, será:

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad (71)$$

Desta forma, $a_1 = 7,97$ cm

A rigidez efetiva à flexão da viga mista será:

$$(EI)_{ef} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) \quad (72)$$

assim, $(EI)_{ef} = 20655916722$ N.cm²

5.3.2.6 - Esforços solicitantes e combinação de ações.

A combinação das ações (F_d) deve ser feita de acordo a NBR 7190/1997, tanto para os estados limites últimos como para os estados limites de utilização. Na análise em questão, apenas serão considerados o carregamento permanente nominal, $F_{G,K}$, e a carga aplicada nos ensaios experimentais.

Assim, o $F_{G,K}$ será o somatório dos itens seguintes:

- viga de madeira = $(0.15 \times 0.15) \text{ m}^2 \times 1072 \text{ kg/m}^3 = 24,12 \text{ kg/m}$
- laje de concreto = $(0.05 \times 0.55) \text{ m}^2 \times 2500 \text{ kg/m}^3 = 68,75 \text{ kg/m}$
- ligações = $\sim 10\%$ peso da viga = $9,3 \text{ kg/m}$.

Assim, $F_{G,K} = 102,15 \text{ kg/m} \sim 10 \text{ N/cm}$

5.3.2.7 - Determinação das flechas

Cálculo da flecha máxima, considerando duas cargas concentradas e carregamento distribuído devido ao peso próprio da estrutura e ao perfil metálico, auxiliar na aplicação das cargas concentradas simétricas, conforme o esquema da FIG. 26.

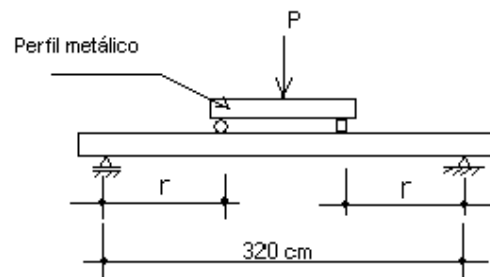


FIGURA 26 - Aplicação de cargas em Protótipo 2

MAGALHÃES (1997) realizou os ensaios aplicando os carregamentos conforme os valores mostrados na TAB. 12, colunas 1 e 2.

Para o cálculo das flechas, foi adotada a seguinte equação da resistência dos materiais:

$$w_{\max} = \frac{Pr(3L^2 - 4r^2)}{48(EI)_{ef}} + \frac{5F_{G,K}L^4}{384(EI)_{ef}} \quad (73)$$

sendo, $L = 320$ cm, $r = 120$ cm e $(EI)_{ef} = 20655916722$ N.cm².

Os valores obtidos para as flechas máximas, seguindo o procedimento teórico proposto, estão representados na TAB.12, coluna 3.

TABELA 12 – Flecha máxima teórica para Protótipo 2

2 cargas concentradas P/2 (N)	Carga distribuída $F_{G,K}$ (N)	Flechas (mm)
21368	10	13.57
35343	10	22.01
51648	10	31.86

5.4- Viga mista VPR-2 – SORIANO (2001)

5.4.1 - Características

A viga VPR – 2 consiste de viga mista madeira/concreto. Apresenta laje de concreto armado, de seção 30 cm x 4 cm, e viga de madeira da espécie *Goupia glabra* (cupiúba), em peça única, de 15 cm x 5 cm e vão de 300 cm, conforme FIG.27.

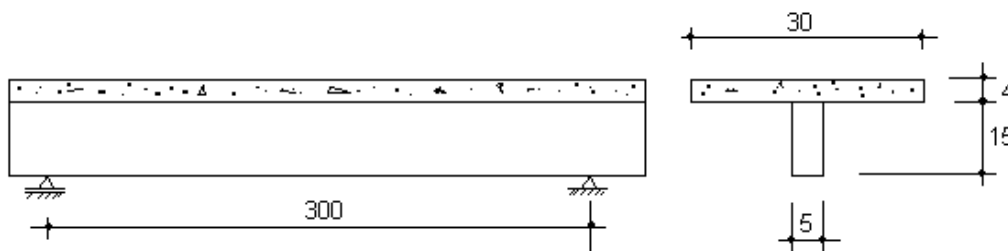


FIGURA 27- Geometria e dimensões da VPR-2. Unidade: cm

A laje foi armada com malha de aço CA – 50 e diâmetro 5 mm O sistema de ligação adotado consistiu de pregos 24 x 60, espaçados de 5 cm.

5.4.2- Dimensionamento

A EUROCODE 5 (1994), parte 1-1, considera que, na viga de seção T, a mesa corresponde ao material 1 e a alma, ao material 2.

5.4.2.1-Largura efetiva

Conforme a proposta apresentada anteriormente, a largura efetiva de vigas simplesmente apoiadas, apresentada na equação 24, transcrita a seguir, vale:

$$b_{eff} = b_w + \frac{l_0}{5} \quad (74)$$

sendo, $b_{eff} = 5 + \frac{300}{5} = 65cm$

Como a laje foi ensaiada com largura de 30 cm , considerou-se este valor como largura efetiva, assim, $b_1 = 30 cm$.

5.4.2.2- Módulo de deslizamento da ligação

A EUROCODE 5 (1994) orienta que devem ser adotados os valores de módulo de deslizamento determinados experimentalmente. Durante os ensaios de corpos-de-prova, SORIANO determinou, para os pregos 24 x 60, o valor de $K_{ser} = 144270 N/cm$. Na ausência de valores experimentais, adotar as formulações da EUROCODE 5 (1994), para calculá-los.

5.4.2.3- Características geométricas e mecânicas da laje de concreto (elemento 1)

Conforme FIG.28:

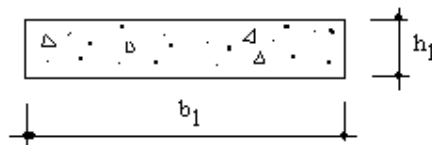


FIGURA 28 – Seção transversal da laje de concreto.

Sendo $b_1 = 30$ cm, $h_1 = 4$ cm, a área $A_1 = 30$ cm x 4 cm = 120 cm², e o módulo de elasticidade, $E_1 = 1929700$ N/cm² (determinado experimentalmente).

Na ausência de valor experimental, a resistência do concreto e o módulo de elasticidade podem ser calculados pelas equações 22 e 23.

O momento de inércia vale,

$$I_1 = \frac{bh^3}{12} = 160 \text{ cm}^4$$

5.4.2.4- Características geométricas e mecânicas da viga de madeira (material 2)

Como a viga de madeira constitui-se de peça única, não há necessidade de homogeneização. Assim, de acordo com FIG.29:

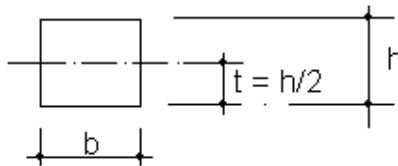


FIGURA 29 – Seção transversal da viga de madeira.

Sendo, $b_2 = 5$ cm; $h_2 = 15$ cm; $A_2 = 5 \times 15 = 75$ cm²; $t = h_2/2 = 15/2 = 7,5$ cm, o módulo de elasticidade secante determinado experimentalmente, $E_2 = 867000$ N/cm², e o momento de inércia, $I_2 = 1406,25$ cm⁴.

5.4.2.5- Homogeneização da viga mista madeira/concreto

Esta etapa consiste em homogeneizar os elementos da viga mista concreto (1) e madeira (2). Para isto será seguido o procedimento apresentado pela EUROCODE 5, (1994), parte1-1 (Ver anexo 1) e o esquema mostrado na FIG.30 seguinte:

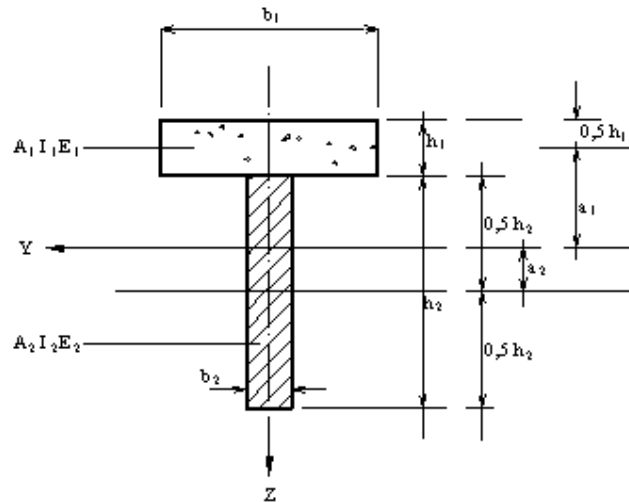


FIGURA 30 – Seção transversal de viga mista madeira/concreto.
Fonte: EUROCODE 5 (1994), parte 1-1

A posição da L.N. da seção mista, será calculada a partir da posição das linhas neutras de cada elemento, modificadas pelos coeficientes γ_1 e γ_2 , que levam em consideração a rigidez dos elementos de ligação. Conforme a EUROCODE 5, γ_1 é calculado conforme a equação A1.8, transcrita a seguir:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 S_1}{k L^2} \right)^{-1} \quad (75)$$

$$\gamma_1 = 0.5318$$

sendo,

S_1 = espaçamento dos elementos de ligação = 5 cm;

$$k = K_{\text{ser}} = 144270 \text{ N/cm}$$

e

$\gamma_2 = 1$. De acordo com a DIN 1052 (1988) e EUROCODE 5 (1994), parte 1-1, o elemento 2 é tomado como referência.

A distância entre as linhas neutras da viga de madeira e a linha neutra do conjunto, será conforme a equação A1.9, transcrita a seguir:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2)} \quad (76)$$

$$a_2 = 6,217 \text{ cm}$$

A distância entre as linhas neutras da laje de concreto e a linha neutra do conjunto, será:

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad (77)$$

Assim, $a_1 = 3,28 \text{ cm}$.

A rigidez efetiva à flexão da viga mista será:

$$(EI)_{ef} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) \quad (78)$$

sendo $(EI)_{ef} = 5368721914 \text{ N.cm}^2$

5.4.2.6- Esforços solicitantes e combinação de ações.

A combinação das ações (F_d) deve ser feita de acordo a NBR 7190/1997, tanto para os estados limites últimos como para os estados limites de utilização. Na análise em questão, apenas será considerado o carregamento permanente nominal, $F_{G,K}$, e a carga aplicada nos ensaios experimentais. O $F_{G,K}$ será o somatório dos valores seguintes:

- viga de madeira = $(0,05 \times 0,15) \text{ m}^2 \times 838 \text{ kg/m}^3 = 6,285 \text{ kg/m}$
- laje de concreto = $(0,04 \times 0,30) \text{ m}^2 \times 2500 \text{ kg/m}^3 = 30 \text{ kg/m}$
- ligações = $\sim 10\%$ peso da viga = 0.62 kg/m

Assim, $F_{G,K} = 36.62 \text{ kg/m} \sim 3.6 \text{ N/cm}$.

5.4.2.7- Determinação das flechas

Cálculo da flecha máxima, considerando uma carga concentrada no meio do vão e o carregamento distribuído, devido ao peso próprio da estrutura. SORIANO (2001)

realizou os ensaios aplicando os cargas conforme os valores mostrados na TAB. 13, colunas 1 e 2.

Para o cálculo das flechas, foi adotada a equação 66, transcrita a seguir.

$$w_{\text{máx}} = \frac{PL^3}{48(EI)_{ef}} + \frac{5F_{GK}L^4}{384(EI)_{ef}} \quad (79)$$

sendo, $L = 300$ cm e $(EI)_{ef} = 5368721914$ N.cm².

Os valores obtidos para as flechas máximas, seguindo o procedimento teórico proposto, estão representados na TAB.13, coluna 3.

TABELA 13 – Flecha máxima para VPR-2

1 carga concentrada	Carga distribuída	Flechas
P (N)	F _{G,K} (N/m)	(mm)
10000	3.6	11.19
20000	3.6	21.66
25000	3.6	26.90

6

MODELO VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

6.1 - Introdução

Como parte desta dissertação, foram realizadas as avaliações numéricas do comportamento de vigas mistas de seção T, constituídas de alma em madeira ou MLC e mesa em concreto armado. Para estas avaliações, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando o programa ANSYS, versão 5.7. A princípio, foi concebido um modelo sólido que representasse o comportamento da viga mista VC1 de OLIVEIRA (1999), que consiste em uma viga de MLC, solidarizada a uma laje de concreto através de chapas metálicas com dentes estampados. Como os resultados da análise foram bastante satisfatórios e o modelo não se prende à forma do elemento de ligação, mas ao seu módulo de deslizamento, nos sentidos longitudinal e transversal, resolveu-se analisar outras vigas mistas de madeira/concreto solidarizadas através de pregos e parafusos. Os resultados foram, também, satisfatórios.

6.2 - O modelo

No modelo desenvolvido, as vigas de MLC ou de madeira e a laje de concreto foram representadas por elementos do tipo sólido estrutural de 8 nós, **solid 45**. A ligação mecânica foi representada por elemento de combinação do tipo mola, **Combin 14**, posicionado em uma área de influência do elemento de ligação mecânica. O tamanho da

área de influência foi definido em relação ao comprimento do elemento de malha e será explicado para cada viga analisada. Foram definidas duas molas, uma no sentido longitudinal e outra no sentido transversal.

Para a realização da análise simulada de flexão, de viga simplesmente apoiada, foram adotadas algumas hipóteses. Adotou-se, primeiramente, um comportamento elástico - linear para os materiais constituintes da viga mista. Conforme GUTKOWSKI e CHAN (1996), diversos pesquisadores analisaram os resultados dos deslizamentos na interface de materiais diferentes e elaboraram vários métodos de avaliação, para medir o módulo de deslizamento. Estes pesquisadores verificaram o comportamento não linear, mas indicam que a relação pode ser simplificada e adotada como linear.

A madeira foi considerada um material ortotrópico o qual é caracterizado, segundo BODIG et al (1982), por apresentar seis módulos de elasticidade, conforme as equações seguintes:

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = E_1, \quad \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = E_2, \quad \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} = E_3, \quad (80)$$

$$\frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} = G_{12}, \quad \frac{\sigma_{13}}{\gamma_{13}} = G_{13}, \quad \frac{\sigma_{23}}{\gamma_{23}} = G_{23}.$$

sendo,

E_1, E_2, E_3 = módulos de elasticidade, correspondem às relações das tensões normais pelas deformações normais, nas direções principais.

G_{12}, G_{13}, G_{23} = módulos de deformação transversal, correspondem às relações das tensões de cisalhamento pelas distorções, nos planos ortotrópicos.

Segundo MASCIA (1993), “a adequação da madeira ao modelo ortotrópico demonstrou ser plenamente viável. A simetria do tensor constitutivo S_{ijkl} constitui-se num importante subsídio a esta adequação”.

O sistema global estabelecido para o modelo numérico realizado através do programa ANSYS está mostrado na FIG. 31.

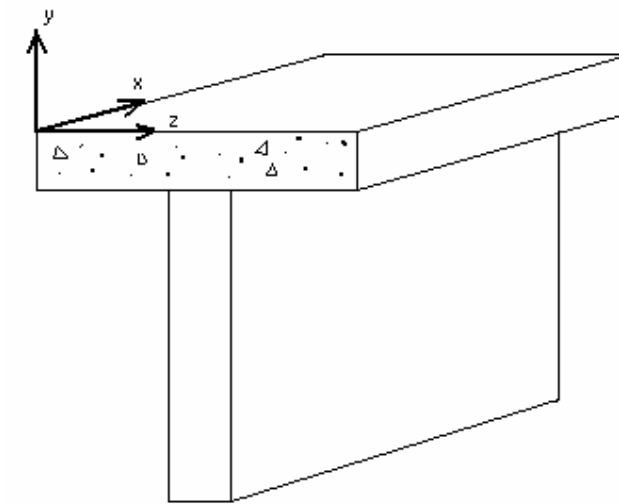


FIGURA 31 – Sistema global adotado no modelo numérico

Desta maneira, têm-se:

$$E_1 = E_x = E_L;$$

$$E_2 = E_y = E_R;$$

$$E_3 = E_z = E_T;$$

$$G_{12} = G_{xy} = G_{LR}$$

$$G_{13} = G_{xz} = G_{LT}$$

$$G_{23} = G_{yz} = G_{RT}$$

Sendo

L = o sentido das fibras da madeira;

R = o sentido radial da madeira e

T = o sentido transversal da madeira.

Os três módulos de elasticidade (E_1 , E_2 , E_3), os três módulos de deformação transversal (G_{12} , G_{13} , G_{23}) e a relação entre eles deveriam ser determinados experimentalmente. Porém, todos os pesquisadores determinaram experimentalmente somente o E_1 . Na ausência dos demais valores resolveu-se adotar as relações fornecidas através de

MASCIA (1993), que pesquisou os parâmetros de elasticidade em espécies de madeiras duras e macias nativas do Brasil. A partir desses dados, foram definidas as seguintes relações:

$$E_2 = \frac{E_1}{10.8} \quad (81)$$

$$E_3 = \frac{E_1}{18.65} \quad (82)$$

$$G_{12} = \frac{E_1}{22.44} \quad (83)$$

$$G_{13} = \frac{G_{12}}{0.75} \quad (84)$$

$$G_{23} = \frac{G_{12}}{1.94} \quad (85)$$

Utilizando-se estas relações foi possível determinar os módulos de elasticidade longitudinal E_2 e E_3 e os três módulos de elasticidade transversal para todas as peças de madeira, utilizadas nas vigas mistas analisadas através do ANSYS. Segundo MASCIA (1993), o módulo de elasticidade E_L é numericamente bem maior que E_R e este pouco maior que E_T . Os módulos transversais G_{LT} e G_{LR} são próximos entre si e superiores a G_{RT} . Os valores determinados encontram-se na TAB.14, sendo que, na coluna 1, estão relacionadas as peças de madeira correspondentes às vigas mistas VC1 (cada uma das 11 lâminas de madeira), Protótipo 2 e VPR2 e na coluna 2, os valores de módulo de elasticidade determinados experimentalmente (E_I).

TABELA 14 - Valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal

Vigas	E1=EX=EL (N/cm2)	E2=EY=ER (N/cm2)	E3=EZ=ET (N/cm2)	G12=GXY=GLR (N/cm2)	G13=GXZ=GLT (N/cm2)	G23=GYZ=GRT (N/cm2)
VC1-Oliveira						
Lâmina 1	1697266	157154	91006	75636	100848	38987
Lâmina 2	1269457	117542	68067	56571	75428	29160
Lâmina 3	1771533	164031	94988	78945	105260	40693
Lâmina 4	1815871	168136	97366	80921	107895	41712
Lâmina 5	1767961	163700	94797	78786	105048	40611
Lâmina 6	1137033	105281	60967	50670	67560	26119
Lâmina 7	1090310	100955	58462	48588	64784	25045
Lâmina 8	1339818	124057	71840	59707	79609	30777
Lâmina 9	1897349	175680	101735	84552	112736	43584
Lâmina 10	1757872	162766	94256	78337	104449	40380
Lâmina 11	1481066	137136	79414	66001	88002	34021
Protótipo 2	2166000	200556	116139	96524	128699	49755
VPR2	867000	80278	46488	38636	51515	19916

Com a finalidade de pesquisar, também foram verificadas as relações fornecidas por BODIG e JAYNE (1982), de parâmetros de elasticidade de 53 espécies comerciais de madeiras duras nativas dos Estados Unidos da América. Os valores das relações estão bem próximos dos valores obtidos por MASCIA (1993), que foram utilizados.

Para a análise numérica seria necessário determinar os valores dos seis coeficientes de Poisson para todas as peças de madeira adotando-se os valores fornecidos pelo pesquisador MASCIA (1993) que pouco diferem daqueles obtidos por BODIG e JAYNE (1982). Os valores médios dos coeficientes de Poisson para as madeiras nacionais duras e macias, conforme MASCIA (1993), estão relacionados na TAB.15.

TABELA 15 - Tabela de valores médios de coeficientes de Poisson

Coeficientes de Poisson	Madeira	
	macia	dura
$\nu_{LR} = \nu_{12}$	0,51	0,471
$\nu_{LT} = \nu_{13}$	0,558	0,467
$\nu_{RT} = \nu_{23}$	0,79	0,71
$\nu_{TR} = \nu_{32}$	0,49	0,425
$\nu_{RL} = \nu_{21}$	0,07	0,043
$\nu_{TL} = \nu_{31}$	0,05	0,025

6.3 - Simulação numérica 1

Realizou-se uma simulação numérica da viga mista ensaiada por OLIVEIRA (1999) apresentando-se uma análise dos resultados de flechas e tensões. Foi realizado um modelamento sólido que representasse o comportamento da viga mista de MLC solidarizada a uma laje de concreto através de chapas metálicas com dentes estampados (detalhes no capítulo 5, seção 5.2). Representou-se um quarto da viga aplicando-se as condições de contorno de simetria correspondentes.

O tamanho da malha foi de 2,5 cm. Esta dimensão foi definida tomando-se como referência a metade da espessura de cada lâmina de madeira que forma as vigas de MLC. A metade da seção transversal da viga mista VC1 está mostrada na FIG.32.

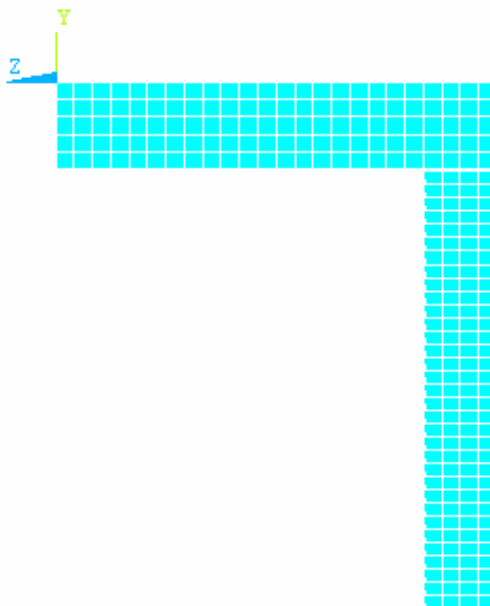


FIGURA 32 – Metade da seção transversal e malha da VC1

O valor do módulo de deslizamento de cada par de molas, foi determinado dividindo o módulo de deslizamento $K_{ser} = 183690$ N/cm. (TAB. 4, coluna 8), por 9 nós.

$$K_0 = \frac{183690}{9} = 20410 \text{ N/cm.}$$

Aplicando-se a equação 21 apresentada por BREMER (1999), transcrita a seguir, obtêm-se:

$$\frac{k_0}{k_{90}} = 0,692185 \quad (86)$$

sendo k_{90} a rigidez no sentido transversal e K_0 a rigidez no sentido longitudinal. Desta maneira, têm-se, para $k_0 = 20410$ N/cm e $K_{90} = 20410 \times 0,692185 = 14127$ N/cm. Nos nós da simetria, as molas recebem a metade destes valores.

A FIG.33 mostra um quarto da viga mista VC1, as condições de contorno de simetria (em azul), o sistema global adotado, e a aplicação das cargas concentradas nos nós, no meio do vão.

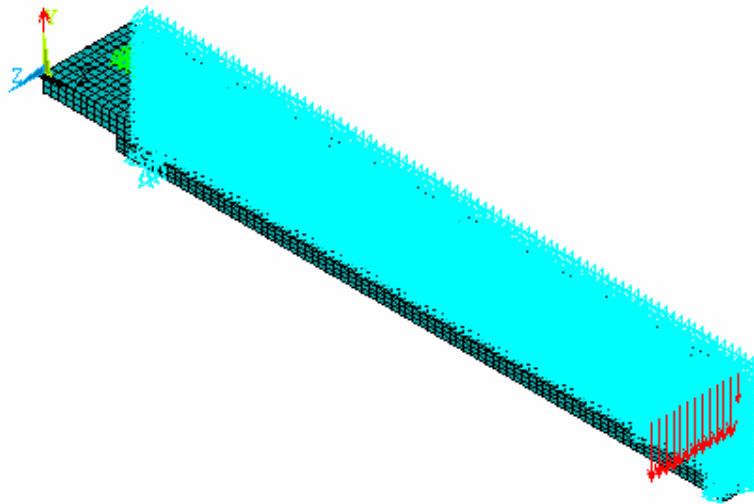


FIGURA 33 – Um quarto da viga mista VC1.

A FIG.34 apresenta a simulação da flexão da viga mista VC1, apresentando a relação de valores de deslocamentos verticais, para o carregamento concentrado de 125 KN.

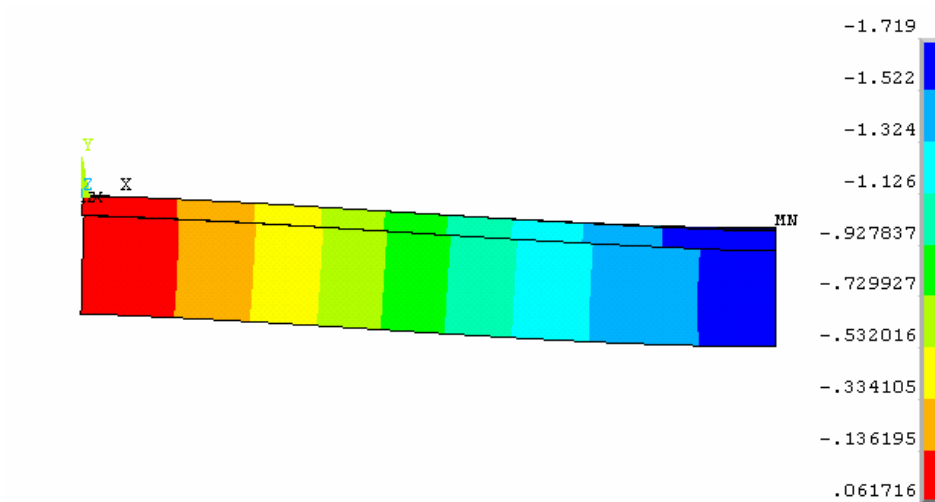


FIGURA 34 – Simulação da flexão de VC1. Unidade: cm

Para a comparação dos resultados de deslocamentos verticais (flechas) foi confeccionada a TAB. 16 na qual estão relacionados, na coluna 1, os valores de cargas concentradas aplicadas durante os ensaios, e os respectivos valores de flechas, determinados de três maneiras: experimentalmente, através dos critérios propostos e do modelo simulado no ANSYS.

TABELA 16 – Comparação dos valores de deslocamentos verticais para VC1

Carga concentrada no meio do vão (N)	Deslocamento Experimental (mm)	Deslocamento pelo Critério proposto (mm)	Deslocamento pelo Ansys (mm)
125000	25	19,91	17,195
69700	10	11,36	9,071
43200	5,5	7,26	5,6918

A seguir apresenta-se a comparação dos deslocamentos verticais considerando-se as três análises para a VC1 de OLIVEIRA (1999) na FIG.35.

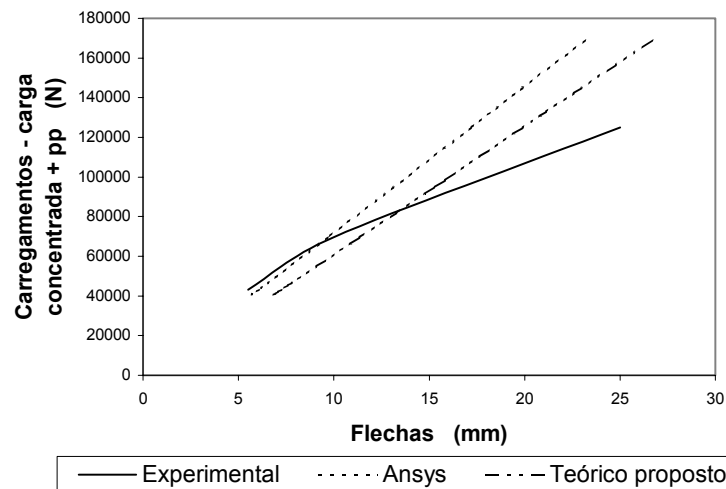


FIGURA 35 – Comparação de deslocamentos verticais para VC1

Com relação à FIG. 35 observa-se que as três curvas estão, a princípio, bem próximas, apresentando um comportamento linear, afastando-se após um carregamento entre 60000 N e 80000 N. Após este intervalo, a curva experimental apresenta um comportamento não-linear e as outras curvas, que adotam a hipótese de linearidade, não se alteram.

Para este trabalho de OLIVEIRA (1999) foi possível realizar a comparação dos valores de tensão obtidos através das três análises: experimental, numérico via programa ANSYS e através dos critérios de dimensionamento propostos nesta dissertação. A FIG.36 refere-se à comparação de tensões determinadas para uma carga concentrada de 40,13 KN.

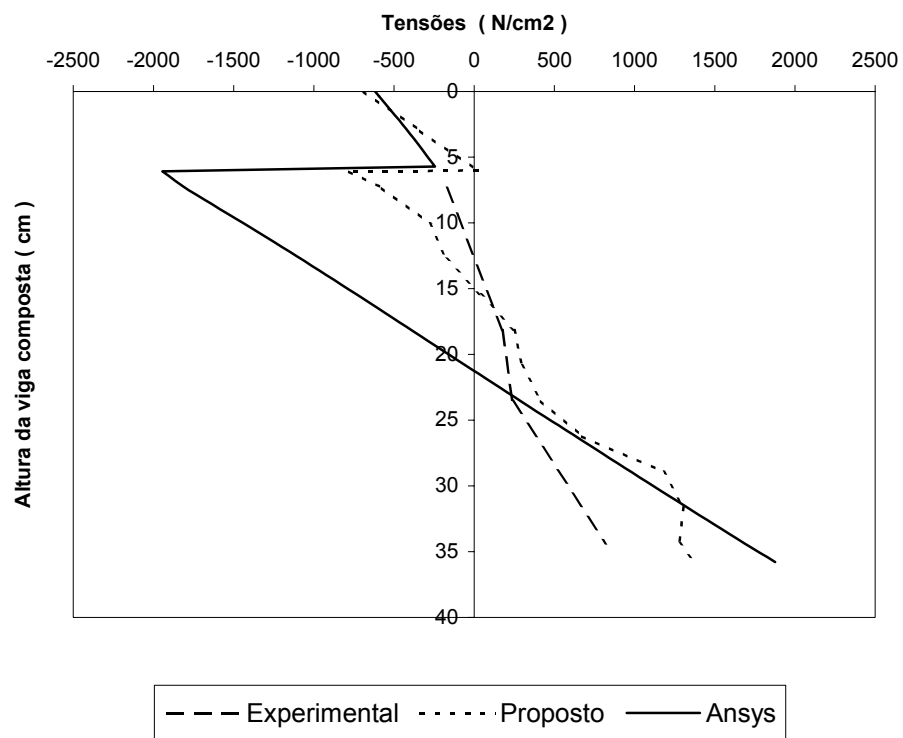


FIGURA 36- Comparação de tensões para VC1 – P = 40,13 kN

A FIG.37 refere-se à comparação de tensões para uma carga concentrada de 145 kN.

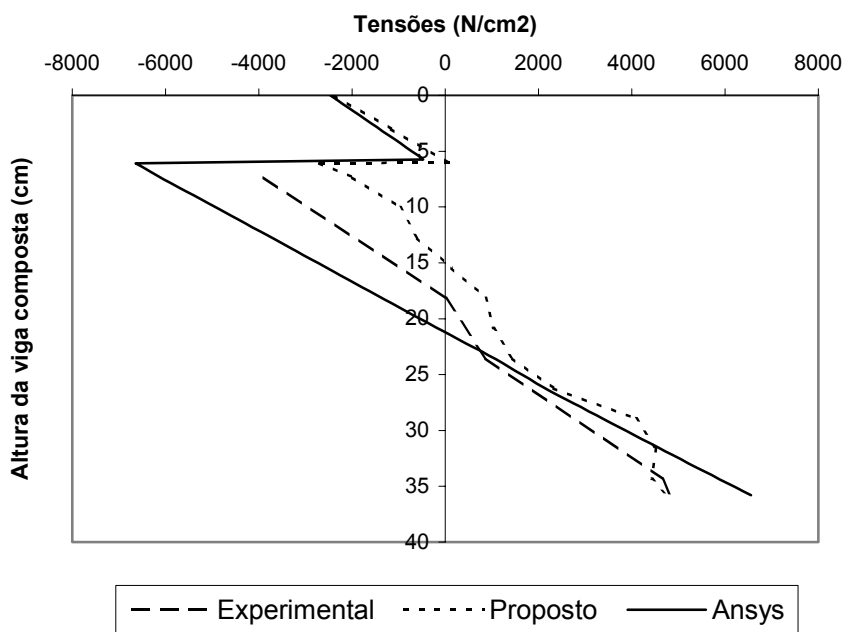


FIGURA 37- Comparação de tensões para VC1 – P = 145 kN

O diagrama de tensão experimental, infelizmente, não apresenta os dados das tensões verificadas na interface dos materiais e na laje de concreto pois, conforme o pesquisador, as informações se perderam durante os ensaios. O pesquisador também não forneceu as tabelas com todos os dados obtidos, somente os diagramas de tensão.

Pode-se observar a descontinuidade de tensão entre a mesa de concreto e a alma de MLC nas curvas representativas do modelo teórico proposto e no modelo do ANSYS. A posição das linhas neutras da viga mista, pelas três análises, apesar de próximas, estão em lâminas diferentes. A laje de concreto (até a cota 6 cm) encontra-se em compressão e a viga de MLC trabalhando à compressão e à tração.

6.4 - Simulação numérica 2

Consiste na simulação numérica da viga mista ensaiada por MAGALHÃES (1997) e a análise dos resultados de flechas. Foi realizado um modelamento sólido que representasse o comportamento da viga mista de madeira solidarizada a uma laje de concreto através de pregos de diâmetro 3,6 mm (detalhes no capítulo 5, seção 5.3). O tamanho da malha foi de 2,5 cm, conforme FIG.38.

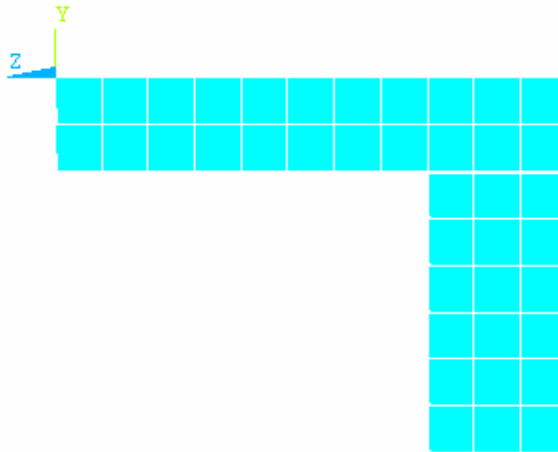


FIGURA 38 – Seção transversal e malha da metade da viga Protótipo 2

Foi modelada metade da viga no sentido do comprimento e aplicadas as condições de contorno de simetria. As cargas concentradas foram aplicadas a 120 cm do apoio esquerdo, e à mesma distância do lado direito. As cargas foram consideradas aplicadas

nos nós nas seções transversais correspondentes. O elemento de ligação foi substituído por nove pares de molas aplicados em uma área de influência do prego. Cada par possui um nó na laje de concreto e outro, na viga de madeira. O valor de rigidez de cada par de molas, foi determinado dividindo-se o módulo de deslizamento $K_{ser} = 212200$ N/cm. (TAB. 4, coluna 8) por 9, isto é:

$$k_0 = \frac{212200}{9} = 23578 \text{ N/cm.}$$

Aplica-se a equação 21 apresentada por BREMER (1999) e transcrita a seguir.

$$\frac{k_0}{k_{90}} = 0,692185 \quad (88)$$

sendo k_{90} a rigidez no sentido transversal e K_0 a rigidez no sentido longitudinal. Desta maneira, têm-se para $k_0 = 23578$ N/cm, $K_{90} = 23578 \times 0,692185 = 16320$ N/cm. Na simetria, as molas recebem a metade destes valores.

Na FIG.39 é mostrada a representação da viga mista Protótipo 2, a malha , a aplicação das cargas nos nós, a reação de apoio e o sistema global adotado na simulação numérica.

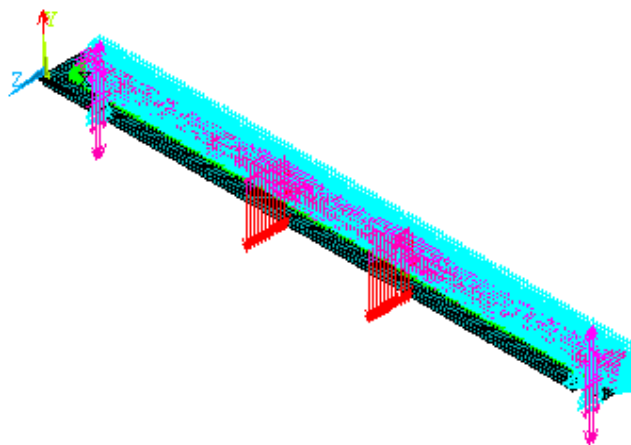


FIGURA 39 – Simulação da viga mista Protótipo 2.

Para a comparação dos deslocamentos verticais foi confeccionada a TAB. 17.

TABELA 17 – Comparação dos valores de deslocamentos verticais para Protótipo 2

Carga concentrada em dois pontos (N)	Deslocamento experimental (mm)	Deslocamento pelo critério proposto (mm)	Deslocamento pelo Ansys (mm)
20961	10,97	13,57	11,59
34936	19,3	22,01	18,74
51241	29,74	31,86	27,08

Na TAB.17 estão relacionados na coluna 1, os valores de cargas concentradas aplicadas durante os ensaios e nas colunas 2, 3 e 4, os respectivos valores de deslocamentos verticais, determinados experimentalmente, através dos critérios propostos e do modelo simulado no ANSYS.

No gráfico apresentado na FIG. 40 encontra-se a comparação de deslocamentos verticais para Protótipo 2. A carga de ruptura desta viga mista, determinada experimentalmente, foi de 97820 N. Pode-se observar no gráfico que em torno de 25000 N a viga mista apresenta uma mudança de comportamento, de linear para não linear.

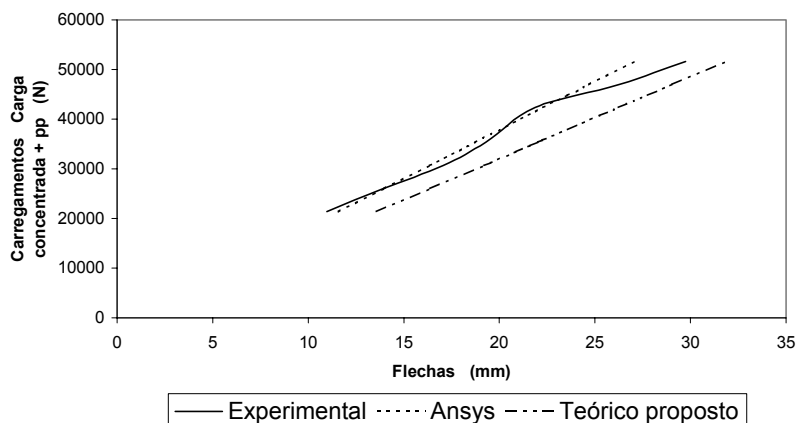


FIGURA 40 – Comparação de deslocamentos verticais para Protótipo 2

Apresenta-se na FIG.41, a simulação de flexão realizada através do programa ANSYS, para o carregamento concentrado de 20961 N.

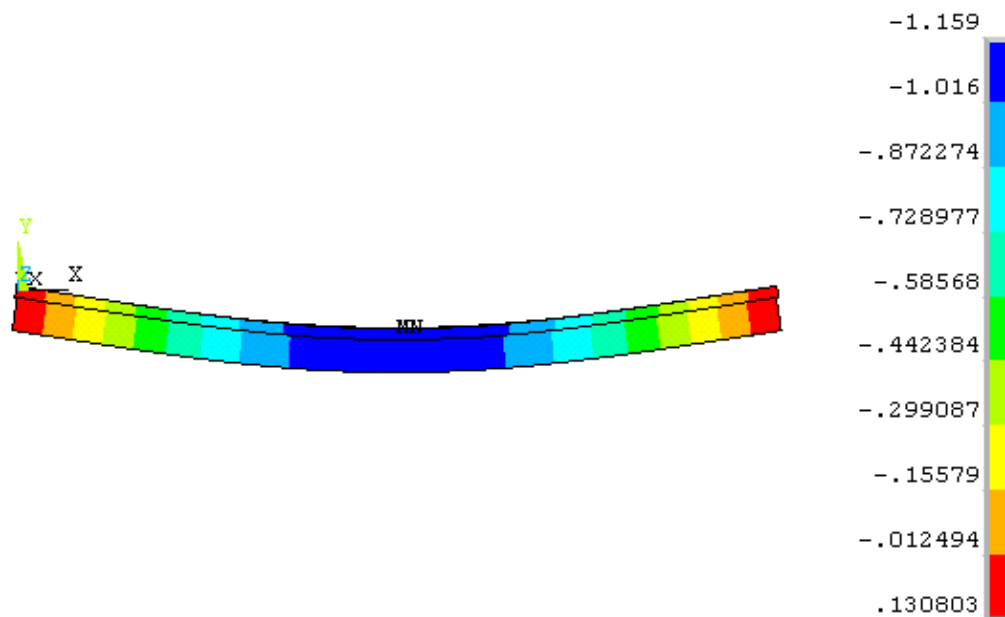


FIGURA 41 – Simulação de flexão da viga mista Protótipo 2. Unidades: cm.

6.5 - Simulação numérica 3

Simulação numérica da viga mista ensaiada por SORIANO (2001) e análise dos resultados obtidos para as flechas. Consistiu de um modelamento sólido que representasse o comportamento da viga mista de madeira solidarizada a uma laje de concreto. O tamanho da malha foi de 1,25 cm, conforme a FIG. 42.

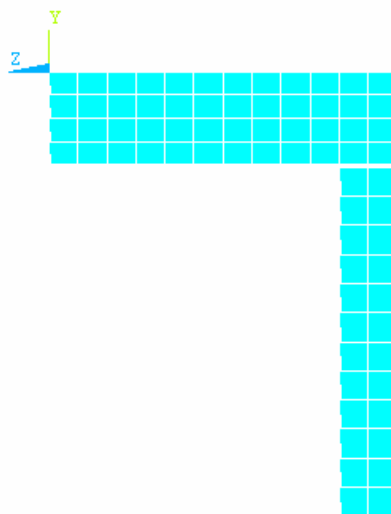


FIGURA 42 – Seção transversal e malha da metade da VPR2.

Para a união da laje de concreto com a viga de madeira foram utilizados pregos 24 x 60 (detalhes no capítulo 5, seção 5.4). Foi realizado o modelamento de metade da viga no sentido do comprimento e aplicadas as condições de contorno de simetria. As cargas concentradas foram aplicadas no meio do vão e consideradas aplicadas nos nós, na seção transversal correspondente. O elemento de ligação foi substituído por nove pares de molas aplicados em uma área de influência do prego. Cada par possui um nó na laje de concreto e outro, na viga de madeira.

O valor do módulo de deslizamento de cada par de molas, foi determinado dividindo-se o módulo de deslizamento do prego 24 x 60, conforme TAB. 4, coluna 8, por nove, ou seja,

$$k_0 = \frac{144270}{9} = 16030 \text{ N/cm.}$$

Aplica-se a equação 21 representada por BREMER (1999), transcrita a seguir,

$$\frac{k_0}{k_{90}} = 0,692185 \tag{84}$$

sendo k_{90} a rigidez no sentido transversal e K_0 a rigidez no sentido longitudinal.

Desta maneira, $k_0 = 16030 \text{ N/cm}$ e $K_{90} = 16030 \times 0,692185 = 11096 \text{ N/cm}$. Na simetria, as molas recebem a metade destes valores.

Na FIG. 43 está representada a metade da viga mista VPR-2, com o sistema de coordenadas globais, as condições de simetria, a aplicação de cargas concentradas nos nós no meio do vão e as reações de apoio.

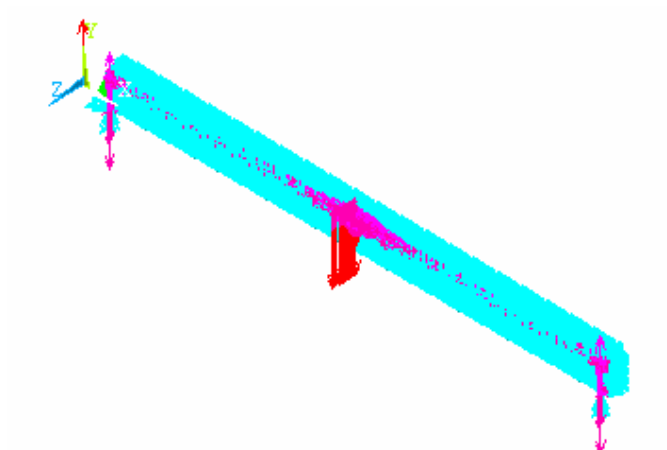


FIGURA 43 – Simulação da metade da viga mista VPR2.

A FIG.44 apresenta a simulação de flexão da viga mista VPR2 com os respectivos valores de deslocamento vertical para o carregamento concentrado de 10000 N.

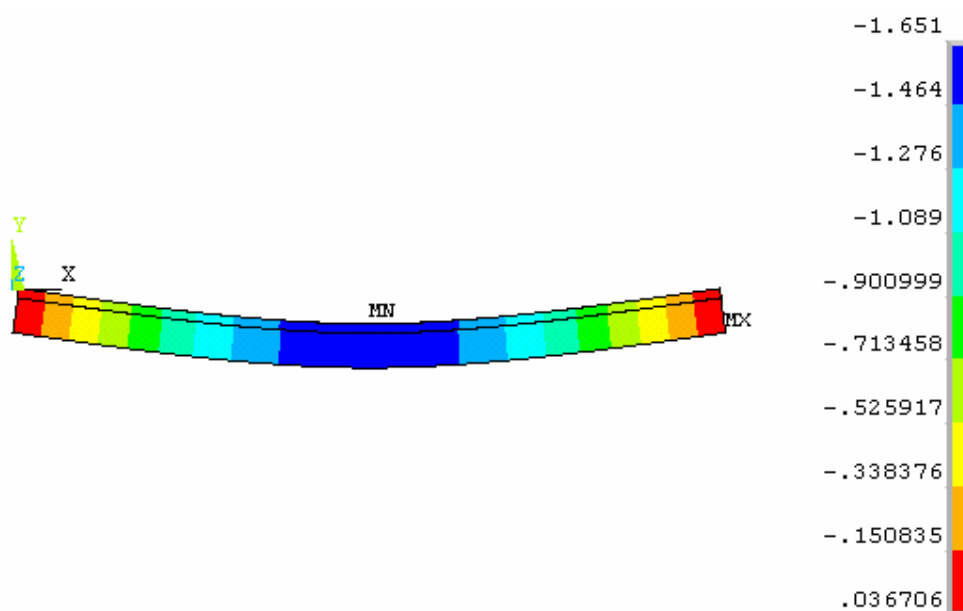


FIGURA 44 – Simulação de flexão da VPR2. Unidades: cm

Para a comparação dos resultados de deslocamentos verticais (flechas), foi confeccionada a TAB. 18 na qual estão relacionados na coluna 1, os valores de cargas concentradas aplicadas durante os ensaios e os respectivos valores de deslocamentos verticais, determinados através das três análises: experimental, teórica proposta e numérica utilizando a simulação no ANSYS.

TABELA 18 - Comparação dos valores de deslocamentos verticais para VPR-2

Carga concentrada no meio do vão (N)	Deslocamento experimental (mm)	Deslocamento pelo Método proposto (mm)	Deslocamento pelo Ansys (mm)
10000	9,46	11,19	6,93
20000	20,89	21,66	13,32
25000	25	26,9	16,51

Os valores obtidos pelo método teórico proposto comparados aos valores obtidos na análise experimental, foram mais aproximados do que os valores obtidos pela simulação através do ANSYS.

O gráfico apresentado na FIG.45 apresenta a comparação dos deslocamentos verticais para VPR2.

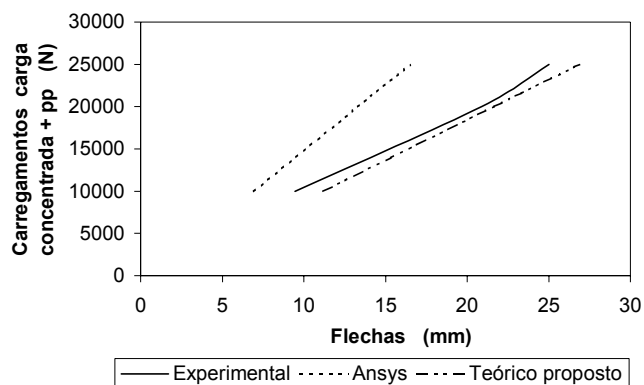


FIGURA 45 – Comparação dos deslocamentos verticais para VPR2

Pode-se observar que, a curva dos resultados experimentais na FIG. 45, mostra uma mudança de comportamento, em torno de 20000 N, apresentando-se, porém, próxima da curva correspondente aos resultados determinados através do método teórico proposto.

7

CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica possibilitou conhecer a fronteira do conhecimento relativo ao estudo de vigas mistas madeira/concreto e vigas mistas MLC/concreto.

Analisando-se os critérios existentes na literatura internacional de dimensionamento de vigas mistas madeira/concreto solicitadas à flexão, conclui-se que, para o critério proposto, as diretrizes da EUROCODE 5 (1994), parte 1-1 e a EUROCODE 5, (1997), parte 2, se adaptam plenamente à análise proposta.

A definição dos parâmetros necessários ao dimensionamento de vigas mistas MLC/concreto e madeira/concreto, de acordo com os materiais brasileiros, representam uma consolidação de propostas de diversos pesquisadores e normas nacionais e internacionais.

O modelamento, via método de elementos finitos, destas mesmas vigas, utilizando-se o programa ANSYS, versão 5.7 apresenta como destaque a representação dos elementos de ligação mecânica como um elemento de mola. As molas apresentam um módulo de deslizamento em duas direções, distribuídas entre nove pares de nós. Os resultados obtidos foram bem próximos dos resultados experimentais, para três tipos diferentes de elementos de ligação. Conclui-se que este modelo apresenta um potencial muito grande

para analisar vigas mistas MLC/concreto e madeira/concreto solidarizadas através de elementos de ligação.

Os valores das flechas (deslocamentos verticais) calculados seguindo a metodologia proposta, mostraram-se bem próximos dos valores experimentais, bem como dos valores obtidos através do modelo realizado no ANSYS, indicando que a metodologia proposta, representa, satisfatoriamente, o comportamento das vigas mistas de MLC/concreto e madeira/concreto.

Quanto à distribuição de tensões na viga mista de MLC/concreto, notou-se que, tanto nos resultados experimentais quanto nos resultados obtidos pelo critério proposto e pela análise numérica, que a viga mista apresentou a laje de concreto trabalhando à compressão e a viga de MLC trabalhando tanto à compressão quanto à tração.

O diagrama de tensões demonstra, também, que o elemento de ligação adotado por OLIVEIRA (1999) na VC1, chapas metálica com dentes estampados, dobrada como cantoneira a 90^0 , espaçada a cada 10 cm, obteve um bom comportamento

Com relação aos demais elementos de ligação mecânica, observou-se que as formulações apresentadas pela EUROCODE 5 (1994), parte 1-1 e EUROCODE 5 (1997), parte 2, para determinação do módulo de deslizamento dos elementos de ligação, na ausência de dados experimentais, apresentaram valores muito diferentes daqueles determinados pelos pesquisadores. Foram adotados os valores experimentais de k_{ser} , tanto no dimensionamento teórico proposto quanto no modelo numérico, e os resultados foram bem próximos dos resultados experimentais. Após as análises realizadas, concluiu-se que, as formulações da EUROCODE 5 fornecem valores muito elevados para o módulo de deslizamento dos elementos de ligação.

SUGESTÕES

Para a continuidade das pesquisas sobre vigas mistas MLC/concreto e madeira/concreto, apresenta-se algumas sugestões.

- avaliar o comportamento de outras espécies de madeiras com potencial para a utilização em vigas mistas madeira/concreto e MLC/concreto, em especial, as madeiras de reflorestamento, acompanhando a tendência mundial de realização de estruturas ecologicamente corretas, com a utilização de materiais renováveis;
- pesquisar mais as ligações rígidas, visto que a normas de madeira analisadas tratam de uniões semi-rígidas ou flexíveis;
- definir o método de ensaio para determinação do módulo de deslizamento, para que os resultados obtidos por diversos pesquisadores possam ser comparados, pois foi observado que os pesquisadores adotaram critérios diferenciados para a execução dos corpos-de-prova e, também, para o cálculo dos valores de módulos de deslizamento das ligações;
- verificar o modelo numérico apresentado considerando o comportamento não-linear das ligações mecânicas;
- verificar ensaios experimentais em vigas mistas quanto à deformação lenta ;
- definir o dimensionamento de vigas mistas MLC/concreto em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, Committee 318- Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Detroit, MI: American Concrete Institute, 1989.

ADEKOLA, A . O . ,”Effective widths of composite beams of steel and concrete” , The Structural Engineer, no. 9, volume 46, setembro,1968.

ADEKOLA, A . O . . , “The dependence of shear lag on partial interaction in composite beams”, International Journal of Solids and Structures, volume 10, pp. 389-400, 1974.

AISC – American Institute of steel construction, LRFD – Load and resistance factor design of, 1993.

AITC, American Institute of Timber Construction, Timber construction manual, 1.º edição, Washington, 1966.

AITC, American Institute of Timber Construction, Timber construction manual, 3.º edição, Washington, 1985.

AITC, American Institute of Timber Construction, Timber construction manual, 4.º edição, Washington, 1994.

AASHEIM, E. “Development of timber in the Nordic countries”, research engineer of Norwegian Institute of wood technology, Oslo, Norway, paper 9.3.2 pdf in WCTE Canada.,2000.

BATHON, L. A. e GRAF, M. “ A continous wood-concrete-composite system”, Dept. Of Civil Engineering, FH Wiesbaden University of Applied Sciences, Germany, paper 8.2.4 pdf in WCTE, Canada., 2000.

BENÍTEZ, M. F. "Development and testing of timber/concrete shear connectors", project engineer, Faculty of Engineering, Austrália, in WCTE , Canadá, 2000.

BLASS, H., SCHMID, M., LITZE, H. e WAGNER, B., "Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners". In WCTE, Canadá, 2000.

BODIG, J. e JAYNE, B. Mechanics of wood and wood composites, Apêndice I, p.684-686. EUA. 1982.

BREMER, C. F. Ligações com tubos galvanizados em madeira laminada colada de eucalipto grandis, solicitadas a momento fletor e força cortante. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Minas Gerais, 210 p. 1999

BROSNAN, D . P .e UANG, C .M . , "Effective width of composite L-beams in buildings", Engineering Journal / second quarter, pp. 73-80, 1995.

CAMPOS, P. C. "Efeito da continuidade no comportamento e na resistência de lajes mistas com fôrma de aço incorporada", Dissertação de Mestrado, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2001.

CAPRETTI, S. e CECCOTTI, A . "Service behaviour of timber-concrete composite beams: a 5-year monitoring and testing experience", Proceedings of the International wood engineering conference, volume 3, pp. 3-443 a 3-449, New Orleans, USA, 1996

CARRASCO, E. V.M. "Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensão nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC) – Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1989.

CECCOTTI, A. - STEP lecture E13: "Timber-concrete composite structures". Timber Engineering- STEP 2 , E13/1- E13/12, 1995 (?)

DIN 1052 - Hoja 2 - Redacción 1969. Norma alemana para el calculo y ejecucion de estructuras de madera y anexos; traduccion de Mario Wagner M., Santiago - Chile - 1979.

DIN 1052- Deutsche Norm, Part 1 Structural use of timber; design and construction. German/ Berlin, april, 1988.

DIN 1052- Deutsche Norm Part 2 Structural use of timber; mechanically fastened joints. German/ Berlin, april, 1988.

ELKELISH, S .e ROBINSON, H ., “Effective width of composite beams with ribbed metal deck”, Canadian Journal of Civil Engineering, 13, pp. 575 – 582, 1986.

ESTRUTURAL, Tecnologia em Estruturas de Madeira Colada – Endereço eletrônico: estrutur@uol.com.br

EUROCODE 2- EN1992 EUROCODE2 -Design of concrete structures, ENV 1992-1-1 1991, Brussels.

EUROCODE 4 - Design of composite steel and concrete structures.Part 1-1: General rules and rules for buildings-october 1992

EUROCODE 5 - Design of timber structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings- ENV 1995-1-1 1993 AC: 1994, september 1994, Brussels.

EUROCODE 5 - Design of timber structures – Part 2: Bridges- ENV 1995-2: 1997, july 1997, Brussels.

ECCS- Technical committee 11- composite structures- Composite beams and columns to EUROCODE 4, no 72, first edition, 1993

GUTKOWSKI, R. M. e CHEN, T-M. "Tests and analysis of mixed concrete-wood beams", Colorado State University, USA, in Proceedings of the International wood engineering conference, volume 3, pp. 3-436 a 3-442, New Orleans, Louisiana, USA, 1996.

GUTKOWSKI, R., BALOGH, J., NATTERER, J., BROWN, K., KOIKE, e., ETOURNAUD, P. "Laboratory tests of composite wood-concrete beam and floor specimens", in WCTE Canadá,- 2000.

INFRATECH-Systems&Services-(2001)

<http://www.infratech.com.au/consultingservices/dynamic99.html>

JOHNSON, R. P., e ANDERSON, D. "Designers' handbook to Eurocode 4- Part 1.1: Design of composite steel and concrete structures, 182 páginas, London, 1993.

JOHNSON, R.P. "Composite structures of steel and concrete", volume 1, Oxford, 1994.

KATTAR, J. E. e ALMEIDA, N. J. "Concreto de cimento Portland – Orientações básicas. 8ª edição, Editora Holdercin-Brasil, 2000.

LEONHARDT, F. e MONNIG, E. Construções de concreto, volume 1: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado; tradução de David Fridman. Rio de Janeiro, Interciência, 336 páginas, 1977.

LEONHARDT, F. e MONNIG, E. Construções de concreto, volume 2: Casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado; capítulo 7 – Concreto leve estrutural. Tradução de João Luís Escosteguy Merino. Rio de Janeiro, Interciência, 161 páginas, 1978.

MAGALHÃES, L. N. "Vigas mistas madeira/concreto", Dissertação de Mestrado, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da UFMG, Brasil, 1997.

MASCIA, N.T., “Valores das constantes de Elasticidade na madeira”. 11º. Encontro Nacional da Construção Civil, 1, 59, 1993.

MATTHIESEN, J.A. Estudo da ligação madeira-concreto com parafusos auto-atarrachantes comerciais. VII EBRAMEM- 1999

MESTRA Engineering Ltd, 2002

<http://sange.fi/mestra/en/projects/cbb.php>

MOREIRA, L. F. N. “Dimensionamento à flexão de vigas mistas madeira/concreto”, Dissertação de Mestrado, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2001.

NBR-7190, Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Dimensionamento de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997.

NBR- 8800, Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Projeto e execução de estruturas de aço e de edifícios, Rio de Janeiro, 1986.

NICOLAS, E. A . Estudo de ligações em estruturas mistas de concreto-madeira. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, Campinas, 2001.

OLIVEIRA, S. V. Vigas mistas de madeira laminada colada e concreto solidarizadas por chapas metálicas com dentes estampados. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999

QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., MATA, L. A . C. “Elementos das estruturas mistas aço-concreto”. Belo Horizonte, Editora O Lutador, 336 p., 2001.

QUEIROZ, G., “Elementos das estruturas de aço”. Belo Horizonte, 1993.

SOUZA, A . J . “Análise experimental do comportamento de conectores entre madeira e concreto em corpos de prova de cisalhamento: efeitos da variação do tipo de conector.”, Dissertação de Mestrado, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da UFMG, Brasil, 1997.

STEVANOVIC, B., University of Belgrade, Yugoslavia: "Elastically coupled timber-concrete beams", in Proceedings of the International wood engineering conference", volume 3, pp.3-425 a 3-430, New Orleans, USA, 1996.

SORIANO, J. "Estruturas mistas em concreto e em madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil", Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, São Paulo, Brasil, 2001.

SORIANO, J. e MASCIA, N. T. “Comportamento mecânico de ligações flexíveis em vigas mistas de concreto-madeira”. VII EBRAMEM, 1999.

SÜSSEKIND, J. C. “Curso de concreto”. Editora Globo, Rio de Janeiro, 1987.

TAKAC, S., Faculty of Civil Engineering Sciences, Croatia: "Experimental research of wood-concrete composite structures joined by bulldog dowels", in Proceedings of the International wood engineering conference", volume 3, pp.3-299 a 3-303, New Orleans, Louisiana, USA, 1996.

UNALAM (2002)

<http://www.unalam.com/application>

VAN DER LINDEN, M. e BLASS, H. J. “Load-sharing in timber-concrete composite floors”, Delft University Technology, Netherlands, in Pacific Timber Conference, volume 1-1- Conference Proceedings, july, Austrália, 1994.

WAGNER M. M. e MONGE, E. J. “Cr terios modernos para el diseño estructural em madera.” Departamento de Ingenieria Estructural y construction- Universidad de Chile, Santiago- Chile, 1983.

YTTRUP, P. “Concrete and timber composite construction for enhanced strength, stiffness and service life for timber bridges”. Pp 1 a 6.
<http://oak.arch.utas.edu.au/research/bridge>. 2000.

YTTRUP, P. e NOLAN, G. “Concrete enhanced timber”.
<http://oak.arch.utas.edu.au/research/bridge>. 2000.

ANEXO 1

Este anexo apresenta as orientações da EUROCODE 5, (1994), parte 1-1, para o dimensionamento de vigas mistas pelos estados limites últimos (Anexo B).

Método para o cálculo da capacidade resistente de vigas unidas mecanicamente, baseado na teoria de elasticidade linear. Para vigas constituídas de dois materiais, compondo uma seção T, o esquema da geometria da seção transversal e o diagrama de tensões correspondente está representado na figura A1.

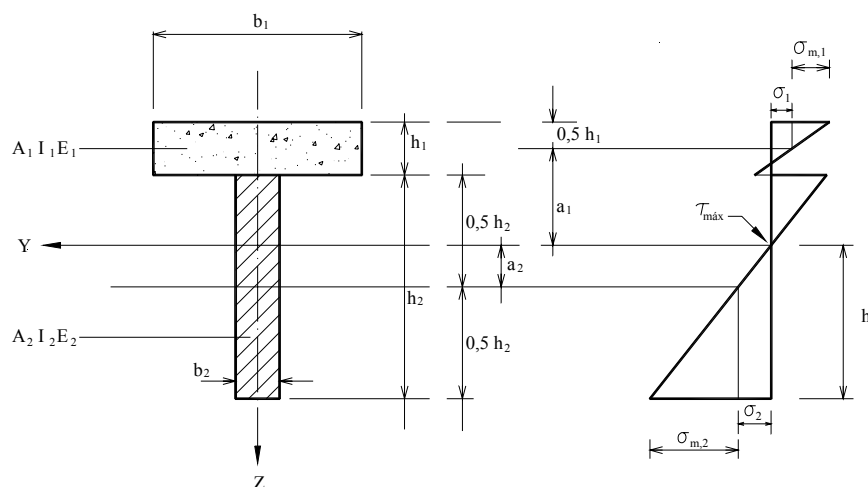


FIGURA A1- Esquema de viga T e diagrama de tensões.
Fonte: EUROCODE 5, parte 1-1 (1994) – Anexo B

Para vigas simplesmente apoiadas, deve-se adotar um vão L ; para vigas contínuas pode-se usar as mesmas fórmulas, considerando o vão igual a $0,8L$; as partes, podendo ser de materiais diferentes, são ligadas uma à outra através de ligações mecânicas com um módulo de deslizamento K ; o espaçamento s entre os elementos de ligação pode ser constante ou variar uniformemente ou variar de acordo com a força de cisalhamento entre s_{min} e s_{max} sendo $s_{max} \leq 4s_{min}$. Pode-se adotar, também, um valor efetivo de espaçamento s_{ef} de maneira que:

$$s_{ef} = 0,75s_{min} + 0,25s_{max} \quad (A1.1)$$

As flexões para a seção transversal constituída de dois materiais na forma T, são calculadas usando a rigidez à flexão efetiva $(EI)_{ef}$ determinada pela seguinte equação:

$$(EI)_{ef} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2) \quad (A1.2)$$

$$A_1 = b_1 h_1 \quad (A1.3)$$

$$A_2 = b_2 h_2 \quad (A1.4)$$

$$I_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} \quad (A1.5)$$

$$I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12} \quad (A1.6)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (A1.7)$$

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 s_1}{k_1 L^2} \right)^{-1} \quad (A1.8)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2(\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2)} \quad (A1.9)$$

sendo,

h_1 e h_2 , as alturas do flange e da alma, respectivamente;

b_1 e b_2 , as larguras do flange e da alma, respectivamente;

E_1 e E_2 , os valores médios dos módulos de elasticidade dos elementos 1 e 2, respectivamente;

A_1 e A_2 , as áreas das seções transversais;

I_1 e I_2 , os momentos de inércia das seções transversais;

γ_1 e γ_2 , coeficientes de redução para o cálculo da rigidez efetiva $(EI)_{ef}$ da seção transversal mista;

k_1 , o módulo de deslizamento do elemento de ligação adotado;

s_1 , o espaçamento dos elementos de ligação;

L , o vão da viga mista;

a_1 e a_2 correspondem às distâncias dos eixos centroidais do flange e da alma até a linha neutra, providenciando que $0 \leq a_2 \leq \frac{h_2}{2}$;

Para o cálculo das tensões normais são adotadas as equações seguintes, sendo que, a tensão no centróide do material de número 1, σ_1 , vale:

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{ef}} \quad (A1.10)$$

e a tensão no centróide do material 2, σ_2 , pode ser calculada através de:

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 E_2 a_2 M}{(EI)_{ef}} \quad (A1.11)$$

A tensão no bordo superior do material 1 corresponde a $\sigma_1 + \sigma_{m,1}$. Desta maneira têm-se a equação seguinte:

$$\sigma_{m,1} = \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI)_{ef}} \quad (A1.12)$$

A tensão no bordo inferior do material 2 corresponde a $\sigma_2 + \sigma_{m,2}$, podendo ser calculada da seguinte maneira:

$$\sigma_{m,2} = \frac{0,5 E_2 h_2 M}{(EI)_{ef}} \quad (A1.13)$$

sendo, M = o momento de flexão.

A máxima tensão de cisalhamento ocorre onde a tensão normal é nula. Em uma ligação semi-rígida, existem dois pontos de tensão normal nula. Será considerada a tensão de cisalhamento que ocorre na seção 2. Desta maneira, a máxima tensão deve ser considerada como:

$$\tau_{2,\max} = \frac{E_2 h^2 V}{2(EI)_{ef}} \quad (\text{A1.14})$$

A carga no elemento de ligação precisa ser tomada como:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i V}{(EI)_{ef}} \quad (\text{A1.15})$$

sendo,

$s_i = s_i(x)$, é o espaçamento dos elementos de ligação;

V = máxima força cortante

Para $i = 1$, têm-se:

$$F_1 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s_1 V}{(EI)_{ef}} \quad (\text{A1.16})$$

APÊNDICE 1

Apresenta-se a seguir as figuras que ilustram as situações tratadas no corpo da dissertação. Na FIG. AP1, a representação de viga mista em flexão simples sem interação entre viga e laje de concreto e seu diagrama de deformação correspondente, no qual aparece duas linhas neutras independentes.

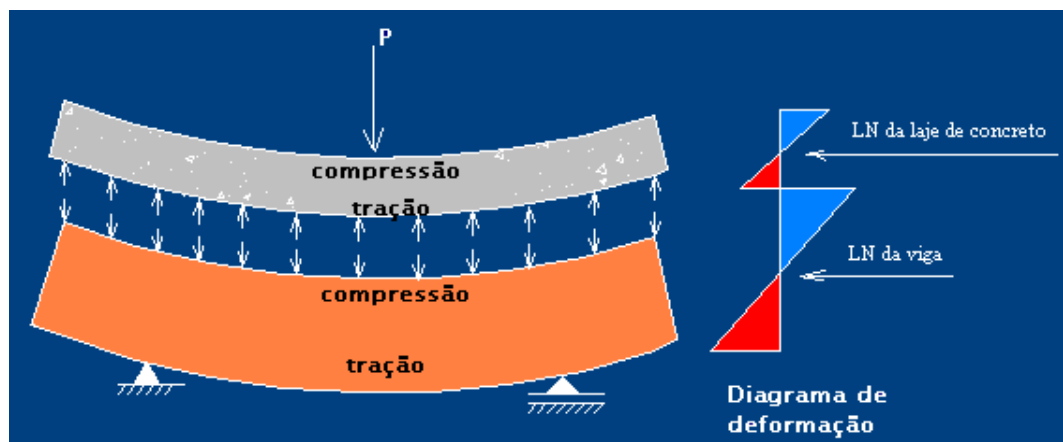


FIG. AP1 – Viga mista sem interação e diagrama de deformação

Na FIG.AP2, viga mista com interação total entre viga e laje de concreto, na qual utiliza-se uma ligação rígida. O diagrama esquemático de deformação apresenta uma única linha neutra.

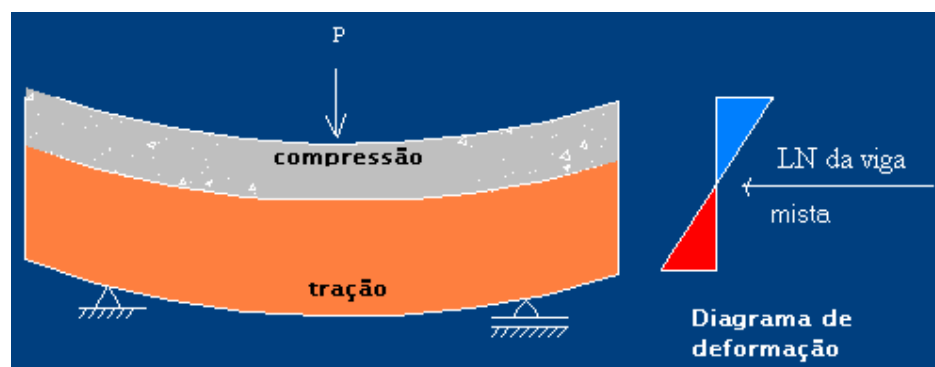


FIG.AP2 – Viga mista com interação total e diagrama de deformação.

A seguir apresenta-se a FIG.AP3 representando uma viga mista com interação parcial na qual foi utilizada elementos de ligação flexíveis.

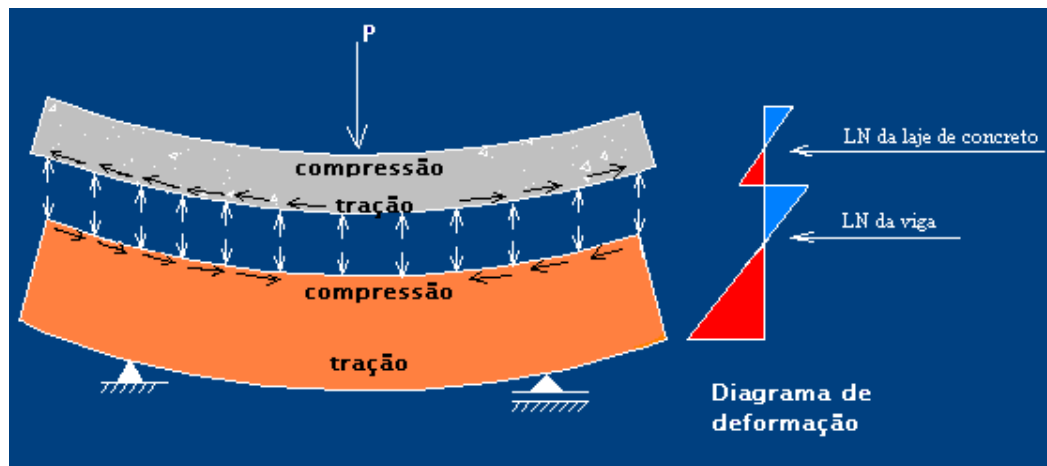


FIG.AP3 – Viga mista com interação parcial e diagrama de deformação

O diagrama de deformação correspondente apresenta duas linhas neutras porém, devido à interação parcial, as mesmas encontram-se mais aproximadas comparando-se com a situação de ausência de ligação mecânica.