

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

CÁTIA DA COSTA E SILVA

**Análise teórica e experimental de vigas
de madeira de seção transversal “I” para
uso em fôrmas.**

São Carlos – São Paulo

2010

Cátia da Costa e Silva

**Análise teórica e experimental de vigas
de madeira de seção transversal “I” para
uso em fôrmas para concreto.**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia de estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

**São Carlos – São Paulo
2010**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S586e Silva, Cátia da Costa e
Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal I para uso em fôrmas para concreto / Cátia da Costa e Silva ; orientador Carlito Calil Junior. -- São Carlos, 2010.

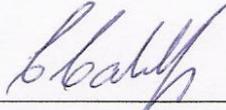
Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Fôrmas para concreto. 2. Vigas H20. 3. Vigas de seção transversal. 4. Adesivo para madeira. 5. Emenda dentada. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

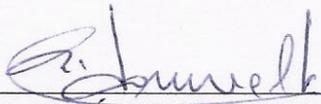
Candidato(a): Engenheiro **CÁTIA DA COSTA E SILVA.**

Dissertação defendida e julgada em 17/05/2010 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **CARLITO CALIL JUNIOR – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA



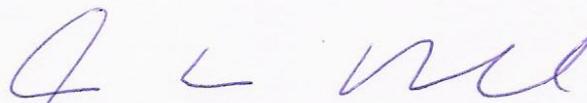
Prof. Dr. **JOSÉ SAMUEL GIONGO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

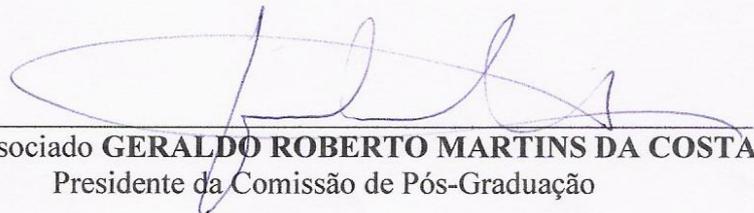


Prof. Associado **EVERALDO PLETZ**
(Universidade Estadual de Londrina/UEL)

APROVADA



Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Carlito Calil Junior pela inestimável ajuda e paciência, pelas preciosas informações e atenção que dispensou a mim durante a execução da pesquisa, enfim, por ter estado presente ao meu lado.

Agradeço também a Battistella Holding por ter doado os painéis de compensado sarrafeado.

À CG Materiais de Construção por ter doado os painéis do compensado laminado para os ensaios.

À Agrotec Empreendimentos Agropecuários Ltda., pela doação do Pinus Oocarpa utilizado na montagem das vigas.

Aos funcionários do Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM), pela ajuda incondicional, sem a qual esse trabalho não seria possível.

À FAPESP pela concessão da bolsa de mestrado.

À Escola de Engenharia de São Carlos pelo serviços de apoio a pesquisa e a pós graduação.

Agradeço meus pais Irma Pereira da Silva e Otamar da Costa e Silva que me deram amor, apoio e exemplo de vida.

Ao companheiro e melhor amigo Marcio Luis Nishida Leitão que teve paciência durante os momentos difíceis, e que esteve ao meu lado durante toda minha formação acadêmica.

Agradeço a todos que me amam e que de alguma forma, perto ou não, me ajudaram de forma decisiva para que eu pudesse chegar até aqui.

Resumo

SILVA, Cátia da Costa e. **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal “I” para uso em fôrmas para concreto**. 2010. (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Devido à importância da madeira na construção civil e a preocupação com o impacto ambiental, a engenharia passou a se preocupar com a racionalização de seu uso por meio da apresentação de produtos engenheirados, buscando melhorar as propriedades técnicas das construções em madeira. Novos modos de manufatura foram introduzidos, principalmente no campo da engenharia estrutural, fazendo com que se desenvolvessem elementos comprovadamente superiores em suas propriedades físico-químicas e econômicas a outros normalmente usados. Neste trabalho foram avaliadas as propriedades de resistência e elasticidade de vigas de madeira de seção transversal “I”, utilizadas na sustentação de painéis de fôrmas para concreto armado e em obras civis estruturais, incluindo as emendas de mesas e alma-mesa utilizadas em sua fabricação, por meio de ensaios de flexão e cisalhamento na linha de cola. Essas vigas são comercialmente chamadas de H20 devido a sua altura de 20 centímetros, sendo compostas de mesa em madeira serrada, almas em compensado sarrafeado, compensado laminado ou madeira serrada, e dois tipos de adesivos o de poliuretano e o de resorcinol-formol. As análises visaram comprovar a eficiência e viabilidade técnica da fabricação e utilização destes materiais nestas vigas. A configuração de viga H20 que apresentou os melhores resultados comparativamente com o mínimo exigido nos ensaios especificados pela norma europeia EN 13377:2002 foi a composta por alma de compensado, emenda dentada e colada com o adesivo de Resorcinol-Formol.

Palavras chave: 1. Vigas H20. 2. Emenda dentada 3. Vigas de Seção transversal “I”. 4. Adesivo para madeira.

Abstract

SILVA, Cátia da Costa e. **Theoretical and experimental analysis of Wood I-Beams for formwork purpose**. 2010. (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Due to the importance of wood in construction and the concern about the environmental impact, engineers have worried about the rationalization of its use through the development of engineered products, seeking the improvement of the technical properties. In this study, the I-beams built with reforestation wood were used for concrete formwork purpose. Their mechanical properties and the connections between flanges and web used in its manufacture were evaluated by means of bending tests and shear in the glue line. These beams are commercially called H20. The flanges were made from *Pinus Oocarpa*, the webs were made from laminated plywood, block plywood, and *Pinus Oocarpa*, and two types of adhesives were used: polyurethane and resorcinol-formaldehyde. The H20 beam configuration that showed the best results compared to the minimum required by European standard EN 13377: 2002 was with the flange made from lumber, glued with resorcinol-formaldehyde and the web of laminated plywood.

Keywords: 1. H20 Beams. 2.Finger Joint 3. I-Joist. 4. Adhesives for wood.

Notações e Siglas

$F_{\text{máx}}$ – força máxima aplicada na viga

$T_{\text{máx}}$ – tensão máxima de cisalhamento do corpo-de-prova

C.P. – corpo-de-prova

MOE – módulo de elasticidade à flexão

MOR – módulo de ruptura à flexão

C.V. – coeficiente de variação

$E_{c,0}$ – módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras

$f_{c,0}$ – resistência à compressão paralela às fibras

$f_{v,0}$ – resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

$f_{v,m}$ – resistência ao cisalhamento médio

$f_{t,0}$ – resistência a tração paralela as fibras

$f_{t,90}$ – resistência a tração normal as fibras

n – número de repetições do ensaio

k – indicação de valor característico

Lista de figuras

Figura 1 – Comportamento de vigas compostas com e sem ligação colada.....	29
Figura 2 – Tipos de Emendas	31
Figura 3 – Fingadeira	32
Figura 4 – Dentes para formar a emenda dentada.....	33
Figura 5 – Emenda dentada pronta.....	33
Figura 6 – Corpo-de-prova Para o ensaio de Cisalhamento do adesivo	38
Figura 7 – Parâmetros geométricos da emenda dentada	40
Figura 8 – Perfis das emendas dentadas.....	40
Figura 9 – Ensaio para definir o MOR com influência da cortante.	41
Figura 10 – Ensaio para definir o MOR sem influência da cortante.	41
Figura 11 – Anel dinamométrico.....	42
Figura 12 – Prensa feita para aplicar a pressão de colagem das vigas.	43
Figura 13 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.	46
Figura 14 – Ruptura na linha de cola com emenda em cunha	47
Figura 15 – Ruptura ao cisalhamento com emenda dentada.....	47
Figura 16 – Ruptura do corpo-de-prova com emenda dentada.....	47
Figura 17 – Modo de ruína de uma viga H20 no ensaio para momento fletor.....	48
Figura 18 – Emenda da mesa com a alma de OSB	49
Figura 19 – <i>Pinus Oocarpa</i> logo que foi recebido do fornecedor	52
Figura 20 – Início da classificação visual do <i>Pinus</i>	52
Figura 21 – <i>Pinus</i> escolhido para a realização da classificação mecânica.	52
Figura 22 – Compressão paralela no corpo-de-prova retirado da madeira da mesa.....	54
Figura 23 – Corpo-de-prova de cisalhamento	54
Figura 24 – Cisalhamento da madeira serrada.	55
Figura 25 – $f_{c,0}$ das mesas das vigas usadas para os ensaios de cortante	57
Figura 26 – MOE das mesas das vigas dos ensaios de cortante.....	58
Figura 27 – $f_{v,0}$ das mesas das vigas dos ensaios de cortante.	59
Figura 28 – f_{c0} das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.	61
Figura 29 – MOE das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.....	62
Figura 30 – $f_{v,0}$ das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.	63
Figura 31 – Corpo-de-prova de cisalhamento da alma.	64
Figura 32 – Distribuição de tensões de uma viga com cargas distribuídas.....	64

Figura 33 – Defeitos que impedem a fabricação de dentes	65
Figura 34 – Tentativa de fabricar os dentes no compensado sarrafeado.....	65
Figura 35 – Classificação do Tipo de Ruptura da Emenda na Tração	70
Figura 36 – Metriguard	71
Figura 37 – Ruína da viga com alma de compensado sarrafeado.	76
Figura 38 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de resorcinol-formol.....	76
Figura 39 – Ruína de uma viga com alma de compensado sarrafeado colada com adesivo a base de poliuretano.....	77
Figura 40 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano	77
Figura 41 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo de poliuretano	77
Figura 42 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano.....	78
Figura 43 – Ruína de uma viga com alma de madeira serrada colada com adesivo a base de resorcinol-formol.....	78
Figura 44 – Ruína de uma viga com alma de alma de madeira serrada colada com adesivo a base de poliuretano.....	78
Figura 45 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de resorcinol-formol.....	79
Figura 46 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano.....	79
Figura 47 – Ruína de uma viça com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano.....	79
Figura 48 – Deslocamentos de uma viga processada no ANSYS.....	88
Figura 49 – Comparativo Experimental x Numérico.	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades geométricas dos perfis usados nas emendas dentadas....	39
Tabela 2 – Coeficiente de minoração da resistência.....	43
Tabela 3 – Vigas de seção transversal I com vão de 2,50 m.	44
Tabela 4 – Vigas de seção transversal I com vão de 2,00 m.	45
Tabela 5 – Cisalhamento na linha de cola (emenda em cunha).....	46
Tabela 6 – Cisalhamento na linha de cola (emenda dentada).	46
Tabela 7 – Vigas de seção transversal I com vão de 320 cm.	48
Tabela 8 – Valores de referência para o <i>Pinus Oocarpa</i>	56
Tabela 9 – Mesas de 1,5 metros de comprimento.	56
Tabela 10 – Quantidade e amplitude de classes das resistências à compressão. ...	56
Tabela 11 – Quantidade e amplitude de classes dos MOEs.....	57
Tabela 12 – Quantidade e amplitude de classes das resistências ao cisalhamento.	58
Tabela 13 – Mesas de 3 metros de comprimento.	60
Tabela 14 – Quantidade e amplitude de classes de f_{c0}	60
Tabela 15 – Quantidade e amplitude de classes dos MOEs.....	61
Tabela 16 – Quantidade e amplitude de classes de f_{v0}	62
Tabela 17 – Resistência a compressão das almas das vigas.	66
Tabela 18 – Resistência ao cisalhamento das almas das vigas.....	66
Tabela 19 – Médias de resistências ao cisalhamento.	67
Tabela 20 – Cisalhamento na linha de cola das vigas com vão de 2,88 m	67
Tabela 21 – Cisalhamento na linha de cola das vigas com vão de 1,20 m	68
Tabela 22 – Tração das emendas dentadas das mesas coladas com resorcinol- formol	72
Tabela 23 – Resistência à tração das emendas dentadas das mesas coladas com resorcinol-formol.....	73
Tabela 24 – Tração das emendas dentadas das mesas coladas com adesivo de poliuretano.....	74
Tabela 25 – Resistência à tração das emendas coladas com adesivo a base de poliuretano.....	75
Tabela 26 – Viga H20 (alma de compensado sarrafeado, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano).....	80

Tabela 27 – Viga H20 (alma de compensado laminado, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano).....	81
Tabela 28 – Viga H20 (alma de madeira serrada, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano)	81
Tabela 29 – Viga H20 (alma de compensado sarrafeado, vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol).....	82
Tabela 30 – Viga H20 (alma de compensado laminado vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol).....	83
Tabela 31 – Viga H20 (alma de madeira serrada vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol)	83
Tabela 32 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de painel compensado sarrafeado e adesivo a base de poliuretano)	84
Tabela 33 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado laminado e adesivo a base de poliuretano).....	85
Tabela 34 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de madeira serrada e adesivo a base de poliuretano).....	85
Tabela 35 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado sarrafeado e adesivo a base de resorcinol-formol)	86
Tabela 36 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado laminado e adesivo a base de resorcinol-formol).....	87
Tabela 37 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de madeira serrada e adesivo a base de resorcinol-formol).....	87

Sumário

1. Introdução	15
2. Justificativa e Objetivo	17
2.1. Justificativa.....	17
2.2. Objetivo.....	18
2.2.1. Objetivo Geral	18
2.2.2. Objetivos Específicos.....	18
3. Revisão Bibliográfica.....	19
3.1. Madeiras	19
3.2. Produtos “Engenheirados”	20
3.3. Fôrmas.....	21
3.4. A Viga de Seção transversal “I”	23
3.5. A Viga H20	25
3.6. A Madeira Serrada (Pinus Oocarpa)	25
3.7. O OSB.....	26
3.8. O Compensado laminado.	27
3.9. O Compensado sarrafeado.....	28
3.10. O adesivo.....	28
3.10.1. Adesivo a base de Resorcinol-Formol	29
3.10.2. Adesivo a base de Poliuretano	30
3.11. A emenda mesa/mesa	31
3.12. A emenda mesa/alma	33
4. Materiais e Métodos.....	35
4.1. Método de cálculo	35
4.1.1. Análise teórica	35
4.1.2. Análise numérica	36
4.1.3. Análise estatística das mesas.....	36
4.2. Materiais Utilizados	36
4.3. Método de Ensaio	37
4.3.1. Ensaio das vigas H20	37
4.3.2. Propriedades da madeira.....	37
4.3.3. Propriedades da alma	37
4.3.4. Propriedades do Adesivo	38
4.3.5. Ensaio das emendas das mesas	39

4.3.6. Ensaio a flexão	40
4.4. Montagem das vigas	41
4.5. Ensaio Preliminares	43
4.5.1. Coeficiente de minoração da resistência	43
4.5.2. Emenda Dentada x Emenda em Cunha	45
4.5.3. Ensaio preliminar de flexão	47
4.6. Conclusão Preliminar	49
4.7. Planejamento experimental.....	49
4.8. Classificação e caracterização da madeira	50
5. Resultados e discussões	53
5.1. Propriedades da mesa	53
5.2. Propriedades da alma	63
5.3. Cisalhamento na Linha de Cola	67
5.4. Ensaio das emendas das mesas.....	70
5.4.1. Com resorcinol-formol.....	71
5.4.2. Com adesivo de poliuretano	73
5.5. Ensaio à flexão das vigas	75
5.5.1. Viga de 1,20 m colada com adesivo de poliuretano.....	80
5.5.1.1. Com alma de painel compensado sarrafeado.....	80
5.5.1.2. Com alma de compensado laminado.....	80
5.5.1.3. Com alma de madeira serrada.....	81
5.5.2. Viga de 1,20 m colada com adesivo de resorcinol-formol.....	82
5.5.2.1. Com alma de painel compensado sarrafeado.....	82
5.5.2.2. Com alma de compensado laminado.....	82
5.5.2.3. Com alma de madeira serrada.....	83
5.5.3. Viga de 2,88 m colada com adesivo a base de poliuretano	84
5.5.3.1. Com alma de compensado sarrafeado	84
5.5.3.2. Com alma de compensado laminado.....	84
5.5.3.3. Com alma de madeira serrada.....	85
5.5.4. Viga de 2,88 m colada com adesivo de resorcinol-formol.....	86
5.5.4.1. Com alma de compensado sarrafeado	86
5.5.4.2. Com alma de compensado laminado.....	86
5.5.4.3. Com alma de madeira serrada.....	87
5.6. Análise numérica x experimental	88

5.7. Discussão.....	90
6. Conclusão	93
Referências Bibliográficas.....	94
Bibliografia	97

1. Introdução

A madeira possui grandes vantagens em relação a outros materiais usados em construções por ser confortável, isolante térmico e acústico, esteticamente agradável, de fácil manuseio, proveniente de reservas naturais renováveis, de fácil ligação e emenda, o que, por si só, justifica o fato de ser amplamente utilizada.

A madeira, assim como todos os outros materiais utilizados na construção civil, é sujeita a defeitos e degradações. Por se tratar de um material orgânico, sua qualidade e resistência dependem de fatores especiais, tais como, seu ritmo de crescimento, espécie, idade e padrão de exposição a fatores climáticos, enfim, de variáveis dificilmente controláveis.

Os aspectos desfavoráveis do seu uso descritos acima são solucionados ou evitados empregando tratamentos químicos ou com a utilização de produtos industrializados / “engenheirados”. Desta forma, podem-se obter produtos altamente duráveis, com excelente potencial de isolamento térmico e acústico, capazes de compor um ambiente confortável e agradável no produto final da construção civil. Esta aplicação também soluciona a preocupação da sociedade em relação ao impacto ambiental produzido, pois racionaliza o seu uso.

Uma das vantagens da madeira é o fato de ser proveniente de uma fonte renovável que, por meio de uma política sustentável e eficiente de manutenção e preservação, pode tornar-se uma fonte inesgotável de matéria prima. Nos produtos “engenheirados”, a madeira é utilizada de um modo racional, oriunda preferencialmente de reflorestamento, com índices de crescimento superiores aos das madeiras de lei.

A viga com seção transversal “I” estudada neste trabalho, composta de mesa em madeira serrada Pinus Oocarpa e a alma de placa de OSB (Oriented Strand Board) / compensado sarrafeado/ compensado laminado /madeira serrada, destaca-se por sua geometria resultar em perfis mais leves e com relação de resistência por peso maior do que a viga de seção retangular, otimizando assim o uso do material. Essa relação também é maior quando utilizada a madeira serrada que, segundo Wood Hand Book, já apresenta esta razão (resistência/peso) mais alta em relação a outros materiais.

As emendas mesa-mesa, mesa-alma e alma-alma também foram consideradas, pois, embora necessárias para se alcançar comprimentos maiores, provocam descontinuidades que dependendo da sua localização e do tipo de solicitação aplicada na viga, podem criar regiões consideradas frágeis ou de menor resistência em comparação com a madeira integra. Pretendeu-se avaliar o desempenho das vigas e, portanto, das emendas que comprometem a sua estrutura como um todo. Além das emendas entre as mesas, foram enfatizadas ainda as emendas entre a alma e as mesas, pois ao sofrerem um deslocamento diferencial entre si por flexão, provocam tensões de cisalhamento nessa região. Esta viga tem o nome comercial H20.

Neste trabalho foram verificadas suas propriedades, considerando sua principal utilização que é o escoramento do sistema de fôrmas. Devido a sua seção transversal "I", as vigas possuem grandes inércias e conseqüentemente pequenos deslocamentos, propriedade importante para fôrmas, que devem suportar o concreto fresco sem perda das dimensões consideradas nos projetos.

2. Justificativa e Objetivo

2.1. Justificativa

O sistema de fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto representa uma parcela considerável do custo da construção e as de madeira são as tradicionalmente mais utilizadas para moldagem de elementos estruturais de concreto. São responsáveis também pela rigidez e sustentação de toda a estrutura, principalmente por ocasião da concretagem, quando sua resistência é mais exigida. Qualquer falha de projeto ou de execução das fôrmas ou escoramentos pode ocasionar acidentes graves. São compostas por peças de madeira usualmente encontradas no mercado tais como: chapas de madeira compensada, sarrafos, pontaletes e vigas, tábuas, além de acessórios como pregos, grampos. A industrialização do seu sistema construtivo certamente aumentará a segurança, melhorará o controle de qualidade dos materiais utilizados reduzindo, conseqüentemente, as imperfeições nas estruturas de concreto, os resíduos dos sistemas usuais, o uso de pregos nas uniões das peças pela utilização de sistemas específicos e racionalizados de fixação, seu custo e acidentes decorrentes. “Esse tema sempre foi tratado sem a técnica necessária de cálculos e procedimentos e, como conseqüência, uma das maiores causas de acidentes em obras”, diz Fernando Rodrigues (2007) comentando sobre as fôrmas.

Portanto, para que as fôrmas desempenhem bem seu papel, suportando a nova estrutura, garantindo a segurança de funcionários e qualquer pessoa que esteja transitando na obra, devem ser projetadas e planejadas sempre em busca da melhor solução. Para isso as vigas H20 foram estudadas desde as resistências das emendas, bem como com a aplicação de novos materiais na sua composição. Em fôrmas, as vigas normalmente têm que vencer pequenos vãos, fazendo com que o principal esforço solicitante seja força cortante, o que depende da área da seção transversal. Mas a justificativa do uso de vigas de seção transversal “I” baseia-se na garantia da forma da estrutura de acordo com o projeto, minimizando os deslocamentos, necessitando para isso apresentar maior rigidez possível. Esta é constituída a partir de madeira de reflorestamento, apresentando maior eficiência

devido a sua seção com maior relação de resistência por peso, considerando que as tensões de maiores intensidades provocadas pela flexão se dão nas suas extremidades.

2.2. Objetivo

2.2.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi o estudo teórico, numérico e experimental de vigas “I” de madeira para sustentação das fôrmas de concreto armado, verificando as vantagens da sua implantação com o efeito de novos materiais adesivos e sistemas construtivos de industrialização.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Análise teórica de vigas “I”
- Análise numérica das vigas H20
- Estudo de materiais para a alma e mesa
- Estudos de ligações mesa-alma, mesa-mesa e alma-alma, referente a dois tipos de adesivos e dois tipos de entalhes
- Comparação de resultados teóricos versus experimentais
- Otimização do sistema construtivo para determinar uma maior resistência específica da viga de seção transversal “I” de madeira.

3. Revisão Bibliográfica.

3.1. Madeiras

É necessário saber que as propriedades mecânicas e físicas da madeira variam a cada espécie e também na própria tora, longitudinalmente e radialmente.

À medida que a madeira cresce, surgem diferenças de propriedades de resistência, módulo de elasticidade, densidade em suas três direções, longitudinal, radial e tangencial, caracterizando-se como um material anisotrópico.

No Brasil existe um descrédito em relação aos produtos de madeira devido principalmente a falta de informações. Embora usada em grande escala mas de modo pouco racional, seus usuários, em sua maioria, desconhecem os modos de aperfeiçoar sua durabilidade e propriedades naturais. Outros materiais são mais utilizados nas construções em virtude da maior divulgação e estudos, mas conforme se observa nos últimos anos, a constatação da ocorrência de pesquisas acadêmicas crescentes está propiciando a mudança desta realidade, pois a madeira proporciona propriedades únicas que dificilmente são encontradas em outros materiais.

Foram realizadas intensas pesquisas tecnológicas para aprimorar métodos construtivos e aperfeiçoar o uso dos recursos naturais. Surgiram então os produtos “engenheirados” para se obter o máximo de aproveitamento das propriedades da madeira.

A umidade exerce grande influência na resistência, dureza e dimensão da peça. Deve-se usar a madeira quando ela já está seca ao ar, ou seja, em equilíbrio com o ambiente.

Geralmente as madeiras não são mantidas em estoque, por causa de uma situação de capital escasso em que se encontram as empresas fornecedoras.

Em pesquisas tecnológicas deve-se verificar se a madeira está seca ao ar efetivamente.

Não é possível trabalhar com a madeira verde ou semi-seca, pois qualquer produto engenheirado pode apresentar defeitos pelo processo de secagem. Por

exemplo, se a madeira for colada quando verde o adesivo se soltará quando a mesma sofrer retração das fibras ao secar, ou se for pregada verde ela empenará. Já quando seca, mesmo não estando em equilíbrio com o ambiente, é possível se trabalhar utilizando-se de alguns coeficientes de segurança.

3.2. Produtos “Engenheirados”

São produtos com propriedades estruturais melhoradas para ter seu uso mais eficiente. Visam à economia de material, o desenvolvimento sustentável e o desempenho estrutural.

A utilização desses produtos tem como objetivo a melhoria da madeira que naturalmente apresenta defeitos, como nós, fendas, fibra torcida, inclinação excessiva das fibras. Essas dificuldades naturais que impediam uma utilização mais abrangente e eficiente da madeira fizeram com que fossem manufaturados novos materiais para a solução deste problema.

Na sua produção podem-se utilizar peças de pequenas dimensões oriundas de árvores de diâmetro reduzido, tecnicamente não comerciais. A madeira, mesmo com defeito, também pode ser utilizada.

Como exemplo, na madeira laminada colada, as lâminas com nós são dispostas em camadas de modo que eles estejam em diferentes locais na seção transversal da peça, a fim de não os ter no mesmo plano de corte. Todo este processo mantém a resistência mecânica da peça como um todo, comparada com as peças de madeira serrada. Nos painéis de OSB, face às suas propriedades construtivas de utilização de partículas, pode-se aproveitar a maior parte das madeiras, eliminando os defeitos, e ao mesmo tempo utilizar uma maior porcentagem da tora em relação à madeira serrada.

A WIJMA (*Wood I-Joist Manufacturers Association*) (2001) diz que a fabricação desses produtos de madeira, quando comparada com outros materiais de construção como o aço e o concreto, consome menos energia e produz menos carbono.

Os produtos industrializados mais comuns encontrados no mercado são:

- Madeira laminada colada, formada por lâminas de madeira unidas longitudinalmente.
- Composto estrutural de madeira serrada, isto é, qualquer produto que a partir da madeira serrada se transforma em um produto “engenheirado” para a melhoria das propriedades.
- Chapa de OSB: é um painel de madeira com liga de resina sintética, composto por 3 a 5 camadas (dependendo do fabricante) cruzadas de tiras de madeira orientadas, alinhados em escamas. Segue o princípio do compensado em que as lâminas são dispostas perpendicularmente umas as outras. É feito predominantemente com madeira reflorestada e, quando selecionados, podem ser utilizados nas mais variadas aplicações.
- Madeira compensada laminada que se diferencia do OSB por ser feita de lâminas, igualmente depositadas perpendicularmente entre uma camada e outra.
- Painel de compensado sarrafeado: formada por sarrafos de madeira serrada em seu núcleo e coberta por madeira laminada perpendicular as fibras da madeira serrada.
- Viga de seção transversal “I” em madeira é parte de um composto estrutural manufaturado de madeira serrada ou de um composto de madeira como a madeira laminada colada e painel estrutural, que são ligados com adesivos para desenvolver a forma de um “I”.

Conforme a APA WOOD (Engineered Wood Association) (2007) a escolha por estes produtos é perspicaz, consistente, confiável e ambientalmente responsável, desde a construção até o manuseio e a aplicação dos materiais.

A tendência do mercado é progredir por meio de sistemas construtivos cada vez mais industrializados que, por sua vez, necessitam de alto nível para o controle dos processos, dos custos, tempo de execução e das propriedades mecânicas.

3.3. Fôrmas

Segundo Calil Jr. 1999 fôrmas são estruturas provisórias, geralmente de madeira, destinadas a dar forma e suporte aos elementos de concreto até a sua solidificação. Além da madeira, que pode ser reutilizada várias vezes, são utilizadas as fôrmas metálicas e mistas, combinando elementos de madeira com peças

metálicas, plásticas e papelão. Para um bom desempenho das fôrmas é necessário que elas possuam uma boa resistência mecânica, rigidez à deformação, estanqueidade, evitando o vazamento de nata, devem apresentar uma geometria regularizada de modo que a estrutura fique de acordo com o projeto. A fôrma não pode influenciar nas propriedades do concreto e deve possuir pequena aderência, além de uma boa textura superficial.

As fôrmas são um conjunto de elementos cuja função é moldar as estruturas de concreto garantindo a obtenção das dimensões desejadas. Em essência, fôrmas são estruturas temporárias destinadas a sustentar o concreto fresco até que o mesmo atinja resistência suficiente para ser autoportante, Calil Jr (1999).

A maioria dos acidentes que ocorrem durante as construções tem como causas falhas das fôrmas ou dos escoramentos, decorrentes de erros do projeto ou da execução dos serviços, e surgem usualmente na ocasião da concretagem, pois é nessa hora que a estrutura provisória começa a ser solicitada. Nessa circunstância, ao peso próprio do concreto fresco adicionam-se os pesos dos equipamentos, dos trabalhadores, e outros.

“No plano econômico, o custo das fôrmas participa com cerca de 40% a 60% do custo total da estrutura de concreto armado. Por outro lado, esta representa cerca de 20% do custo de uma edificação.” Maranhão, 2000.

Nakamura (2003) indica a necessidade de maior controle tecnológico dos materiais e a busca pela redução de perdas e prazos fez com que a construção civil prestasse mais atenção às fôrmas e escoramentos.

Junto ao projeto de produção de obra, o sistema de fôrmas é o único determinante da geometria da construção, podendo afetar a produtividade e os custos ou mesmo comprometer o desempenho da estrutura. O desempenho da estrutura está diretamente ligado ao sistema de fôrmas. Este apenas viabiliza o processo de produção estrutural e deve, portanto, facilitar e induzir a execução no menor tempo, com a melhor qualidade e, evidentemente, com o menor custo (Loturco, 2005).

Maranhão (2000) diz que as fôrmas podem ocasionar defeitos indesejáveis nos elementos da estrutura de concreto, afetando inclusive sua própria estrutura. Podem provocar: cavidades devidas às saliências ou ondulações das fôrmas; grupos

de cavidades em forma de ninhos de pedras, por causa da segregação, má compactação ou fugas de nata de cimento por meio das juntas da fôrma; ondulações devidas à cavidade na superfície da fôrma; destacamentos por aderência do concreto à fôrma; ataques por desmoldantes não adequados e oxidação de armaduras que podem degenerar em destacamentos; deformações por deficiência no alinhamento da fôrma; falta de retilinidade ou desaprumo das fôrmas dos pilares, paredes. Também podem ter variações de cor nas superfícies do concreto por: contaminação das impurezas das fôrmas; má qualidade dos desmoldantes (óleos e graxas, por exemplo); diferença de absorção das superfícies das fôrmas; perdas de argamassa por meio das juntas da fôrma.

Portanto, além de um bom planejamento, devem-se tomar os devidos cuidados durante a execução do projeto para que as fôrmas não apresentem detritos que possam provocar patologias, utilizar desmoldantes de modo correto para não provocar defeitos na desfôrma e a fôrma deve ser impermeável para que não absorva água que o concreto usaria para se hidratar deixando vazios.

3.4. A Viga de Seção transversal “I”

Falk, Leichti e Sharp (1990) dizem que o conceito geral da viga de seção transversal “I” é um composto estrutural constituído de mesas de madeiras serradas ou madeiras engenheiradas e alma de painéis estruturais.

A revista REMADE informa que, na década de 60 no segmento da construção civil, empresários norte-americanos colocaram no mercado vigas compostas de madeira do tipo viga “I”. Estas vigas representavam um produto que podia suportar mais carga em relação ao seu próprio peso do que qualquer outro material existente até então. As vendas do produto logo aumentaram, o sucesso foi em virtude do baixo peso, alta resistência e a habilidade em vencer grandes vãos que o produto oferecia, representando um substituto ideal para as vigas de madeira maciça.

Os primeiros estudos sobre este tipo de viga surgiram pela necessidade das construções militares na indústria da aviação na América do Norte. Para que fosse possível a sua realização, foram conduzidos estudos pela Forest Products

Laboratory, da USDA Forest Service, por Falk, Leichti e Sharp (1990), na procura das suas propriedades básicas, tornando possível seu uso em outras áreas.

Standart Structures, Inc. SSI, fabricante e produtor de marketing de produtos engenheirados estruturais destinados à indústria da construção indicam que as vantagens da viga de seção transversal “I” são: larguras das mesas que promovem maior estabilidade e facilidade de conexões, mais leve do que a madeira maciça ou outras vigas compostas de produtos engenheirados, sistema de bom custo-benefício, pode ser cortada no comprimento necessário para o uso e também fornece rapidez ao sistema de montagem.

As vigas de madeira em seção transversal “I” são utilizadas em grande escala na América do Norte e nos países da Europa. Elas são componentes importantes nos sistemas estruturais, principalmente em telhados e pisos. Por trabalharem basicamente à flexão, a concentração de maior intensidade de tensão normal localiza-se nas extremidades da seção transversal da viga. A forma “I” faz com que se aperfeiçoe o uso do material tornando-o leve e, aproximadamente, tão resistente quanto à viga maciça, deixando-o mais eficiente.

Finnforest (2002) diz que o sistema de vigas em seção transversal “I” de madeira foi desenvolvido e fabricado para propiciar condições uniformes de resistência, rigidez, dimensionamento e peso.

Muitas são as vantagens tais como: peso reduzido; rapidez de montagem; solução econômica; utilização de peças de dimensões reduzidas; maior aproveitamento da tora; boa eficiência; fácil manuseio e instalação; ausência de meios pesados de transporte vertical; podem ser feitas aberturas nas almas para a passagem de tubulação e condutos de acordo com as especificações do fornecedor; é desmontável e reduz o tempo de construção.

Numa comparação entre a viga de seção transversal “I” e uma viga de seção retangular de mesma dimensão, a diminuição de inércia é menor do que a perda de volume de material, portanto comprova-se a afirmação de que a viga em seção transversal “I” é mais leve e eficiente por ter sua relação resistência/peso maior.

Pedrosa (2003) avaliou a contribuição das mesas de Painel de Lâminas Paralelas (PLP) de *Pinus Taeda* L. e de *Eucalyptus dunnii* Maiden, e das almas de Painel de Partículas Orientadas (OSB) de *Pinus* Spp. e dos Compensados de *Pinus*

Taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden, nas propriedades estruturais de Vigas de seção transversal “I” produzidas pela colagem destes materiais com Resorsinol-formaldeído os melhores resultados foram na viga composta com mesas de Eucalipto e alma de OSB.

3.5. A Viga H20

A viga de seção transversal “I” utilizada em fôrmas para concreto armado comercialmente tem o nome de H20 em virtude da sua altura de 20 centímetros. A utilização desta viga se justifica por proporcionar pequenos deslocamentos.

As vigas H20 são muito leves e facilitam bastante o trabalho da montagem. O sistema modular e padronizado Dokaflex, apresentado anteriormente, é composto de vigas H20 constituindo-se de uma excelente solução para compor as fôrmas de lajes, sendo um sistema leve e de fácil manejo. As vigas H20 além de leves suportam elevados esforços solicitantes.

A empresa Ramos e Varela S.A. indica que as vigas H20 permitem um projeto adequado para todos os tipos de laje e propiciam flexibilidade na malha permitindo, assim, efetuar todos os tipos de lajes e espessuras, estando praticamente limitadas apenas ao seu escoramento.

3.6. A Madeira Serrada (Pinus Oocarpa)

Neste estudo foi utilizada a madeira serrada de Pinus Oocarpa nas mesas, considerando sua resistência/peso.

No norte do Brasil a madeira de lei é a mais utilizada como matéria prima, já no sul e no sudeste, a utilização é voltada basicamente para espécies de reflorestamento (Pinus e Eucalyptus) [ABIMCI (2004)].

Espécies de Pinus vêm sendo plantadas em escala comercial no Brasil, há mais de 30 anos. Inicialmente, os plantios mais extensos foram estabelecidos nas Regiões Sul e Sudeste, com as espécies P. Taeda para produção de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel e P. Elliottii para madeira serrada e extração de resina. Atualmente, com a introdução de diversas novas espécies,

principalmente das regiões tropicais, o plantio de Pinus tornou-se viável em todo o Brasil, constituindo uma importante fonte de madeira para uso geral. Englobam a fabricação de celulose e papel, lâminas e chapas de diversos tipos, madeira serrada para fins estruturais, confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral, conforme Medrado (2005).

A Ambiente Brasil S/S Ltda. (2010) afirma que o Pinus Oocarpa está entre as espécies de Pinus tropicais mais difundidas. Essa espécie é originária do México e América Central, com distribuição mais extensa no sentido noroeste-sudeste entre os Pinus da região. O melhor desempenho desta espécie é obtido no planalto, especialmente no Cerrado, dada a sua tolerância à seca. A sua madeira é moderadamente dura e resistente, de alta qualidade para produção de peças serradas para construções e confecção de chapas.

3.7. O OSB

OSB (Oriented Strand Board) é um painel de madeira com liga de resina sintética, composto por 3 a 5 camadas (dependendo do fabricante) cruzadas de tiras de madeira orientadas, alinhados em escamas. É feito como o compensado em que as lâminas são dispostas perpendicularmente umas as outras. Produzido predominantemente a partir de madeira de reflorestamento, quando selecionados, podem ser utilizados nas mais variadas aplicações.

São utilizadas micro lâminas de madeira, obtidas diretamente das toras e formadas sempre a partir da direção longitudinal da fibra, somando-se em camadas cruzadas.

Além da economia de material pertinente à viga de seção “I” em relação à de seção cheia, o OSB também contribui para essa racionalização. Na madeira serrada aproveita-se apenas 50% da tora, o compensado utiliza 56% e no caso do OSB, por ser fabricado a partir de partículas, pode-se aproveitar 96% da tora. Possibilita a utilização de toras mais finas (6 anos para o OSB contra 14 anos para o compensado) e de menor valor comercial. Até a casca da árvore, depois de retirada, pode ser utilizada (dependendo da tecnologia disponível) para combustível no

suprimento de energia. Tem uma boa produtividade em virtude do processo de fabricação praticamente automatizado e de grande escala.

Segundo Cichinelli (2005), a fábrica de OSB existente no Brasil utiliza 24 pessoas em 3 turnos para operar uma linha de produção de 350.000 m³/ano. Uma fábrica de compensado necessita de mais de 200 pessoas para produzir em torno de 80.000 m³/ano.

A Structural Board Association (2007) diz que o painel OSB evoluiu do aglomerado na década de 70. Isto ocorreu com a substituição das tiras menores e aplicadas em todas as direções para a aplicação de tiras maiores e orientadas. Desde sua apresentação em 1978 o painel de OSB foi rapidamente aceito, primeiramente na América do Norte onde substituiu praticamente os outros painéis estruturais. Na década de 90, a aceitação passou a ser mundial, embora não tenha havido nenhuma grande evolução na aparência ou nas tecnologias empregadas para a sua fabricação. Esta aceitação deve-se ao desenvolvimento constante do mercado pelas empresas fabricantes e a maior aceitação do produto pelos usuários.

Com propriedades estéticas bastante similares, o OSB e o aglomerado diferenciam-se, portanto, no processo produtivo. O OSB tem uma desvantagem em relação a absorção de umidade, sofre um inchamento das partículas quando aumenta a umidade do ambiente e com isso essas podem se descolar, provocando defeitos no OSB e conseqüentemente diminuição de resistência.

3.8. O Compensado laminado.

O compensado laminado é elaborado por meio da colagem de várias camadas de lâminas de madeira prensadas. Cada camada, normalmente em número ímpar, é colada com adesivo de modo que a direção da grã esteja em ângulos retos em relação à camada adjacente, o que se denomina laminação cruzada. Com esta configuração, o produto final, além de garantir uma formação simétrica, tem resistência uniforme nos dois eixos principais, sendo essas propriedades otimizadas em relação à sua matéria prima. O compensado é o preferido pela leveza, facilidade de trabalhar e fixar, boa resistência e aparência agradável. Não tem limites para a quantidade de laminas que podem ser utilizadas

em sua confecção. Quando confeccionando o compensado, o produtor, sempre que possível, procura selecionar combinações de espessuras das laminas e espécies para que o produto final apresente resistências iguais nas direções longitudinal e tansversal.

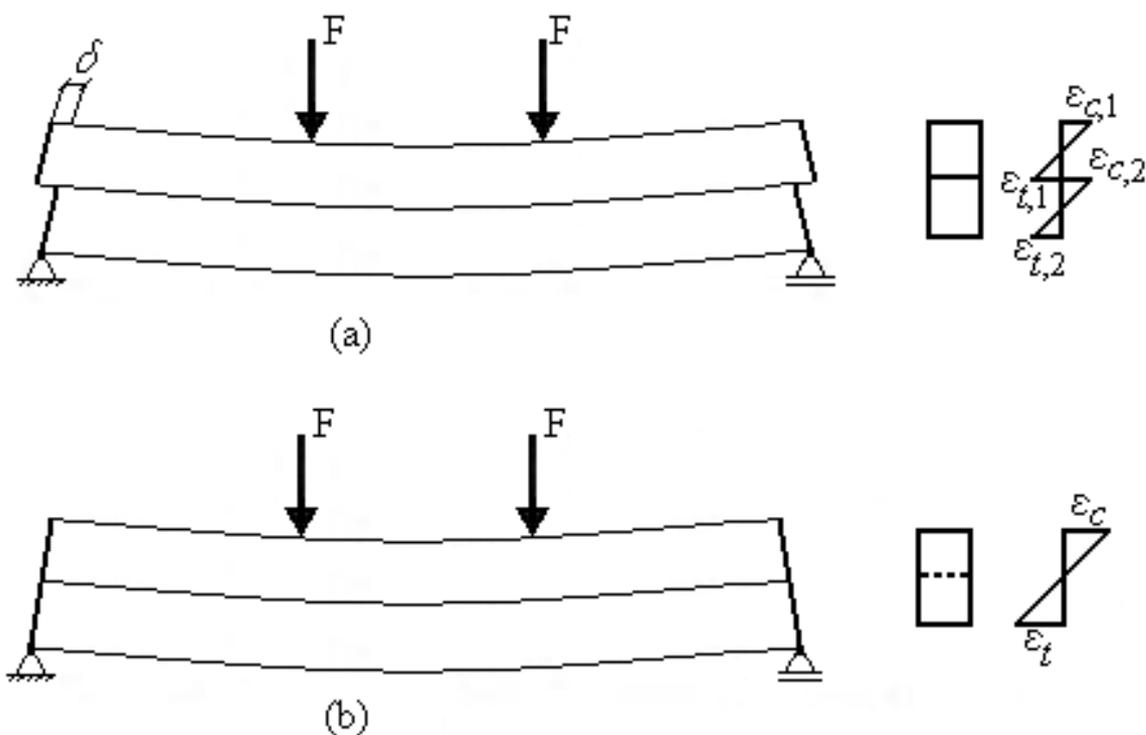
3.9. O Compensado sarrafeado

A associação TRADA (2003) diz que o compensado sarrafeado é formado por madeira serrada em seu núcleo, que é montado com diversos sarrafos de madeira dispostos um ao lado do outro, e por uma ou duas laminas coladas em cada lado dos sarrafos. O conceito original era que o compensado sarrafeado seria um substituto mais barato ao compensado laminado, por ser mais econômico e mais fácil de manufaturar e, ainda assim, mantendo as propriedades de aparência e desempenho similar as do compensado laminado e barateando o custo de sua produção. No compensado sarrafeado a lamina é colada completamente aos sarrafos, mas raramente os sarrafos são colados completamente uns aos outros.

3.10. O adesivo

A ligação entre as peças da viga composta foi efetuada por meio de colagem. Esta ligação deve ser rígida, ou seja, não sofrer deslocamentos entre as peças em face aos esforços solicitantes, para que se possa presumir que não haverá diminuição de qualidade da peça.

A figura 1b apresenta que a ligação colada de uma peça composta não apresenta deslocamentos relativos que ocorrem na peça composta sem ligação colada (fig. 1a).



Fonte: PFEIL, W; PFEIL, M, 2003, pg.114.

Figura 1 – Comportamento de vigas compostas com e sem ligação colada

- a- Comportamento de vigas compostas sem ligação
- b- Comportamento de vigas compostas com ligação colada

3.10.1. Adesivo a base de Resorcinol-Formol

Um dos adesivos utilizados na confecção das vigas foi o CASCOPHEN® RS 216-M. Este adesivo faz parte da marca CASCO® que pertence à Hexion Química Indústria e Comércio Ltda. Trata-se de uma resina sintética, à base de Resorcinol-Formol, em solução álcool/água, especialmente recomendada para colagens exteriores, resistentes à água fria ou fervente, muitos solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco ou úmido, etc. É de secagem a temperatura ambiente e indicada para colagem à prova d'água. Cola perfeitamente todos os tipos de madeira, chapas duras e outros materiais semelhantes, proporcionando uma liga perfeitamente durável.

A empresa Hexion Química Indústria e Comércio Ltda. diz que o adesivo CASCOPHEN® RS 216-M é obrigatoriamente usada em conjunto com o preparado

endurecedor FM-60-M na seguinte proporção por peso: 100 partes de CASCOPHEN® 20 partes do preparado endurecedor em pó.

A preparação deve ser feita misturando-se o pó do endurecedor na resina, na proporção indicada acima, agitando-se até que a sua dispersão fique perfeitamente homogênea. O adesivo assim preparado, numa temperatura de 20°C, terá uma vida útil de aproximadamente 2 horas e a 30°C a sua vida útil será de aproximadamente 1 hora.

Na colagem das peças estruturais são recomendadas gramaturas de 300 g/m² de mistura por linha de cola.

Após receber o adesivo, as superfícies da madeira devem ser unidas tão logo seja possível, para prevenir sua excessiva exposição ao ar, causando a sua secagem precoce.

Com as superfícies unidas, a linha de colagem estará protegida contra a perda de umidade por evaporação, permitindo tempos maiores de montagem. Alguns minutos de contato entre as peças sem a aplicação de pressão favorecerão a penetração do adesivo na madeira.

É muito importante que ao aplicar a pressão total nas peças, a primeira linha de cola não esteja seca ao tato. Em condições adequadas, haverá um pequeno escorrimento de adesivo ao longo de toda a linha de colagem da peça prensada.

O tempo mínimo de prensagem numa temperatura de 20°C é de 10 horas e de 24° C é de 8 horas, então as vigas foram prensadas durante 10 horas. As mesmas foram utilizadas para os ensaios depois de 10 dias para a cura completa do adesivo.

3.10.2. Adesivo a base de Poliuretano

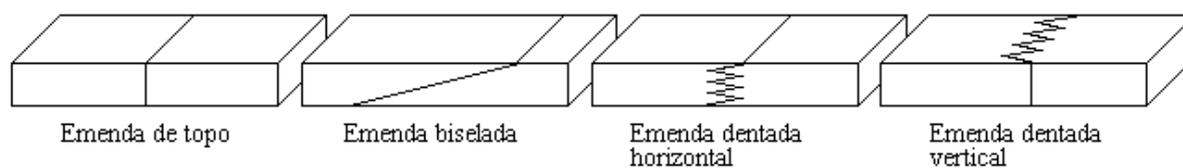
Outro adesivo feito a base de poliuretano utilizado foi o comercialmente chamado de PURBOND® HB S049, fabricado por PURBOND AG. Esse consiste de uma pequena molécula linear do grupo isocianato. O grupo de moléculas é quimicamente muito reativo e, em contato com a água, libera o dióxido de carbono e se transforma em uma amina, que espontaneamente reage com o grupo adicional do isocianato. Desta maneira, as cadeias individuais se combinam para formar uma

longa cadeia, curando o adesivo. A madeira contém umidade suficiente para iniciar a cadeia de reação. É também porosa, o que torna possível a liberação do dióxido de carbono e permite a expansão, principal característica deste adesivo. Além disso, a madeira contém outras moléculas que reagem com o isocianato e criam uma ligação muito forte com o adesivo. (Gabriel, 2007).

Trata-se de um adesivo mono-componente a base de isocianato, cujo componente mais importante e de maior quantidade é o ligante: chamado pré-polímero. Segundo o fabricante, a umidade da madeira não deve ser menor que 8% e nem maior que 15% com uma aplicação mínima de 180g/m² por linha de cola.

3.11. A emenda mesa/mesa

Existem vários tipos de emenda para vigas de madeira. A Figura 2 apresenta os tipos utilizados entre as mesas e entre as almas.



Fonte: MACEDO e CALIL Jr. (1999).

Figura 2 – Tipos de Emendas

Segundo Macedo e Calil Jr. (1999) as emendas biseladas surgiram como uma boa alternativa para suprir as limitações de resistência das emendas de topo, sendo consideradas as mais resistentes entre as emendas longitudinais. Contudo, do ponto de vista de produção, este tipo de emenda é muito dispendioso, uma vez que, para atingir uma boa proporção da resistência da madeira maciça, é necessário que o corte do bisel apresente uma pequena inclinação, da ordem de 1:10. Isto faz com que este processo gere um consumo excessivo de madeira e adesivo, além das dificuldades inerentes ao corte do bisel e a montagem das lâminas, como alinhamento e prensagem, prejudicando a velocidade de produção. O ônus imposto ao processo produtivo pela utilização das emendas biseladas levaram os pesquisadores a buscarem uma nova modalidade de emenda longitudinal. As

emendas dentadas surgiram como uma alternativa promissora para substituir as emendas biseladas.

Macedo e Calil Jr. (1999) afirmam, ainda, que o sucesso da emenda dentada se deve ao fato de que mesmo necessitando de equipamentos específicos para sua produção, facilita a retirada de defeitos da madeira, a aplicação de adesivo e a pressão de colagem, melhorando, deste modo, a produção dos elementos estruturais. Outro ponto positivo das emendas dentadas é que apresentam resultados de resistência mais uniformes que as emendas biseladas.

A emenda dentada é feita com máquina apropriada “fingadeira”, constituída por lâminas giratórias que retiram parte da madeira, formando os dentes da emenda, conforme apresentada na figura 3 e a emenda nas figuras 4 e 5.



Figura 3 – Fingadeira



Figura 4 – Dentes para formar a emenda dentada.

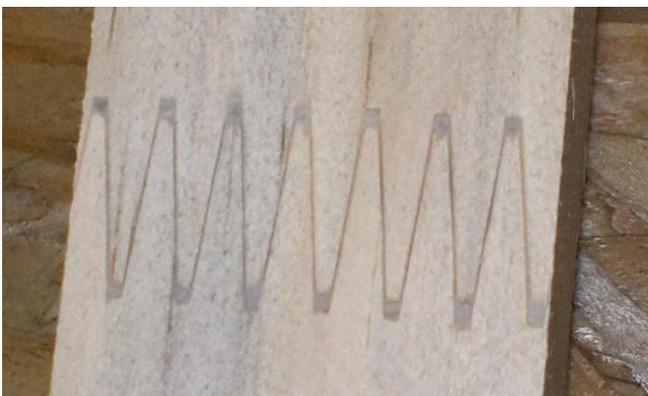


Figura 5 – Emenda dentada pronta.

3.12. A emenda mesa/alma

Para as vigas “I” a emenda entre a mesa e a alma influi na resistência final da viga. SILVA (2007) que analisou esta ligação afirma que a ruína das vigas foi verificada principalmente pela ruptura da superfície de colagem entre a mesa e o painel OSB, ocasionado pelo deslocamento entre mesa e alma, decorrente de flexão na viga. Quando a ligação não é colada, as partes se comportam de modo independente ocorrendo escorregamento entre elas, conforme figura 1a. A tentativa de escorregamento em peças submetidas à flexão provoca tensões de cisalhamento na linha de cola entre alma e mesa. A deformação quando a emenda ainda resiste às tensões de cisalhamento ocorre como na figura 1b.

APA WOOD (2009) afirma que por não haver norma designada para confecção destas emendas, cada fabricante as faz da forma que melhor lhe convém devendo, apenas, garantir a resistência final da peça.

Silva (2007) sugere que para uma melhor análise dos resultados, seriam necessários estudos mais aprimorados sobre as propriedades físico-químicas dos adesivos bem como dos processos de colagem.

Esta revisão mostra que as fôrmas são de grande importância na construção da estrutura, sendo pelo custo e pela segurança. Com isso a tentativa de utilização das vigas I se mostra válida por causa da racionalização do uso da madeira que se tem devido sua geometria e também a diminuição do uso das escoras em obras.

A viga de seção transversal I também possui baixos deslocamentos e boa relação resistência/peso. Desse modo são avaliados alguns materiais para compor as vigas em busca da melhor solução.

4. Materiais e Métodos

Foram estudadas vigas H20 compostas de mesa de madeira serrada Pinus Oocarpa com almas de painel de compensado sarrafeado, compensado laminado e a madeira serrada de Pinus Oocarpa. As emendas mesa/mesa foram feitas com dentes de 28 mm e as emendas mesa/alma foram feitas com dentes de 21 mm.

4.1. Método de cálculo

4.1.1. Análise teórica

As vigas em seção transversal “I” de madeira com os vários tipos de materiais de alma foram calculadas de acordo com a ABNT NBR 7190:1997:

- À flexão considerando somente a contribuição das mesas;
- Ao cisalhamento, considerando-se um corpo de seção retangular de área igual à soma de todas as áreas das seções das peças;
- Instabilidade da alma.

As exigências impostas ao dimensionamento dependem da esbeltez da peça, definida pelo seu índice de esbeltez:

$$\lambda = L_0/i_{\min}.$$

Sendo que L_0 é um comprimento teórico de referência e i_{\min} é o raio de giração mínimo da seção transversal

A alma foi considerada engastada em suas extremidades e o comprimento para o cálculo de λ é de 12 cm, resultando num λ igual a 23. Com esse valor a alma é considerada peça curta, dispensando a verificação de instabilidade.

O cálculo do módulo de elasticidade para as vigas de 2,88 m de vão foi feito de forma aproximada, conforme a equação 1, considerado para tanto a distribuição de oito cargas concentradas ao longo da viga, simulando uma carga distribuída.

$$MOE = \frac{5ql^4}{384fl} \quad (1)$$

4.1.2. Análise numérica

Foi feita ainda uma análise numérica das vigas usando o programa ANSYS para complementar a comparação dos resultados com a experimentação, considerando o elemento finito de casca “SHELL 181”, mais adequado para estruturas finas, com uma dimensão muito inferior às duas demais.

A discretização da viga na modelagem foi em 80 elementos ao longo da mesma, na base das mesas foi em 20 e na altura da alma foi em 10, totalizando 4000 elementos. O referido elemento é considerado satisfatório para analisar estruturas de casca finas ou moderadamente-grossas. Trata-se de um elemento de 4 nós com seis graus de liberdade a cada nó: translações nas direções x, y, e z, e rotações nos eixos x, y, e z.

4.1.3. Análise estatística das mesas

Para a construção do histograma, as peças das mesas com os dois comprimentos foram divididas em 10 classes de resistência à compressão paralela, resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade. A escolha do número de classes foi de acordo com Sturges (1926) que propôs a fórmula $K = 1 + \log_2^n$ sendo, K o número de classes e n a quantidade de amostras.

O valor do número de classes é igual a 9, mas como existe também a regra da raiz representada por $k = \sqrt{n}$, que resultaria em 15 para a amostra com 236 vigas e 14 para a amostra com 200 vigas. Decidiu-se usar o número de classes igual a 10, pois, além de seguir as distribuições estatísticas, faz com que a amplitude de classes seja próxima a da ABNT NBR 7190:1997. Para a amplitude de classes, foi utilizada a diferença entre o valor máximo e o mínimo das resistências e módulo e dividido pelo número total de classes.

4.2. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados para a produção das vigas foram:

- Para a mesa, a madeira serrada de Pinus Oocarpa.

- Para a alma quatro tipos de materiais: a madeira serrada de Pinus Oocarpa, madeira compensada laminada, painel de compensado sarrafeado e painel OSB.

As madeiras serradas foram qualificadas pela sua classe de resistência de acordo com a ABNT NBR7190:1997 e classificadas, visualmente e mecanicamente, considerando a proposta de revisão da mesma referente ao seu anexo “Classificação Visual e Mecânica da Madeira de Pinus”.

Foram utilizados dois tipos de adesivos, um a base de poliuretano e outro a base de resorcinol-formol.

4.3. Método de Ensaio

4.3.1. Ensaio das vigas H20

Para a definição dos parâmetros estruturais da viga, os ensaios foram feitos de acordo com a norma europeia EN 13377: 2002 e para as propriedades da madeira serrada a ABNT NBR7190:1997.

4.3.2. Propriedades da madeira

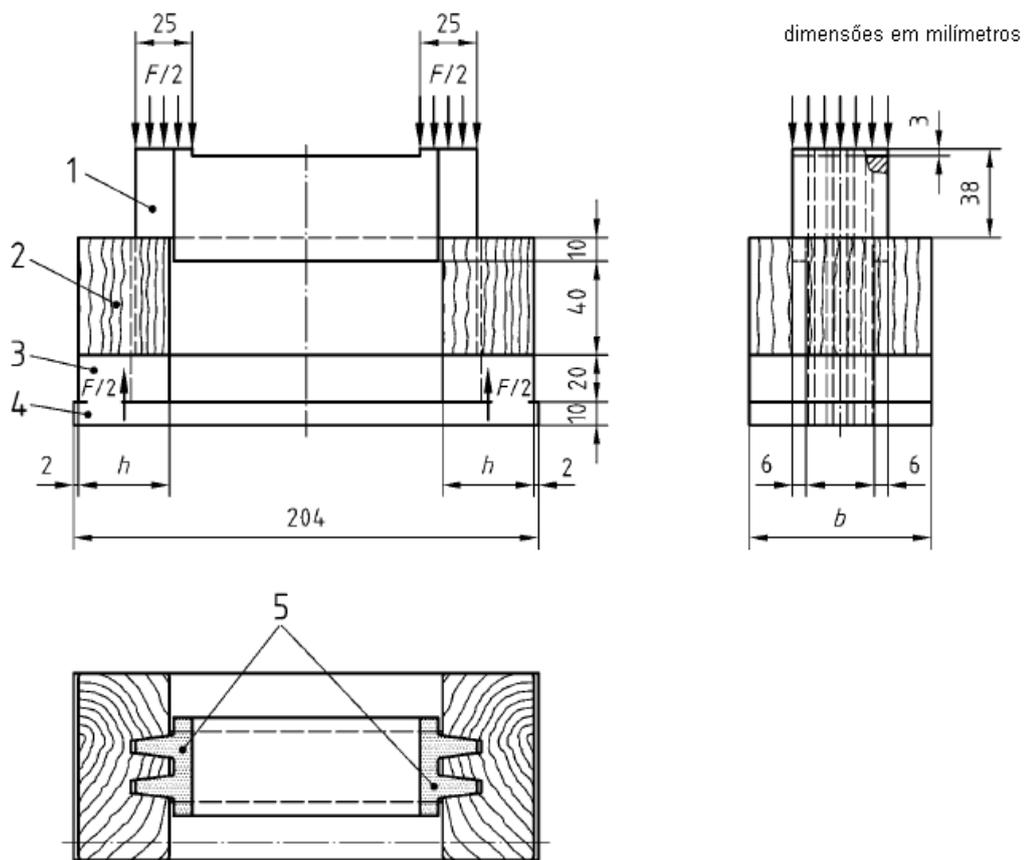
Inicialmente foram verificadas as características das mesas, com a determinação das propriedades de resistência à compressão paralela, ao cisalhamento e módulo de elasticidade de acordo com a ABNT NBR7190:1997.

4.3.3. Propriedades da alma

Considerando que na alma da viga H20 o principal esforço solicitante é o cortante, foram realizados ensaios para a determinação desta resistência nos corpos-de-prova dos materiais utilizados.

4.3.4. Propriedades do Adesivo

Devido ao efeito cisalhante que ocorre na junção da mesa com a alma quando uma viga H20 é submetida à flexão, foram também realizados ensaios de cisalhamento na linha de cola entre a alma e a mesa. Foram feitos copos de provas para os ensaios preliminares com o objetivo de definir o tipo da emenda utilizada e foram retirados corpos-de-prova das próprias vigas após o ensaio de flexão para definir a resistência ao cisalhamento na linha de cola das vigas. A configuração do ensaio está na figura 6.



Legenda:

- 1 Dispositivo de carga
- 2 Mesa
- 3 Placa de suporte
- 4 Placa de base
- 5 Zona de carga

Figura 6 – Corpo-de-prova Para o ensaio de Cisalhamento do adesivo

Pressão na linha de cola

Para coníferas deve-se adotar uma pressão de colagem de 0,7 MPa. Uma vez aplicada a pressão de colagem, deve-se aguardar o período de cura do adesivo recomendado pelo fabricante. A desmontagem deve ser feita de forma gradual em toda a extensão do elemento estrutural, ou seja, não deve ser brusca nem localizada.

4.3.5. Ensaio das emendas das mesas

Para a avaliação da eficiência das emendas dentadas, foram realizados ensaios de tração segundo a norma Européia EN408:2004, que padroniza a velocidade de aplicação de carga. Os corpos-de-prova foram utilizados com dimensões estruturais.

As emendas numa viga diminuem a resistência da peça como um todo, por isso é necessário verificar a influência que a mesma exerce na resistência final da peça.

Dimensões das emendas dentadas

Quanto às dimensões das emendas dentadas das mesas utilizam-se comprimentos de 26 mm ou 28 mm para os dentes. A tabela 1 e a figura 7 apresentam a geometria destes perfis. No caso deste trabalho o dente foi de 28 mm.

Para as emendas dentadas, mesa/mesa, podem ser adotadas duas configurações: vertical e horizontal (figura 8).

Tabela 1 – Propriedades geométricas dos perfis usados nas emendas dentadas

Parâmetro	Perfil 1	Perfil 2
L - comprimento (mm)	28	26
t - largura do dente (mm)	6,98	6,73
b - largura da ponta do dente (mm)	0,81	0,76
α - inclinação	1:10,6	1:10,9

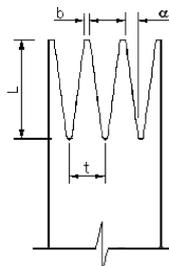


Figura 7 – Parâmetros geométricos da emenda dentada



Figura 8 – Perfis das emendas dentadas.

Na confecção de emendas recomenda-se utilizar peças de madeiras de mesma densidade e não se devem fazer emendas com aquelas que apresentem medula.

Pressão nas emendas

Para a montagem das emendas dentadas em coníferas, recomenda-se uma pressão de colagem superior a 8 MPa. O período de prensagem não deve ser inferior a 2 segundos segundo a Proposta para Norma Brasileira – Madeira Laminada Colada (em fase de elaboração)¹.

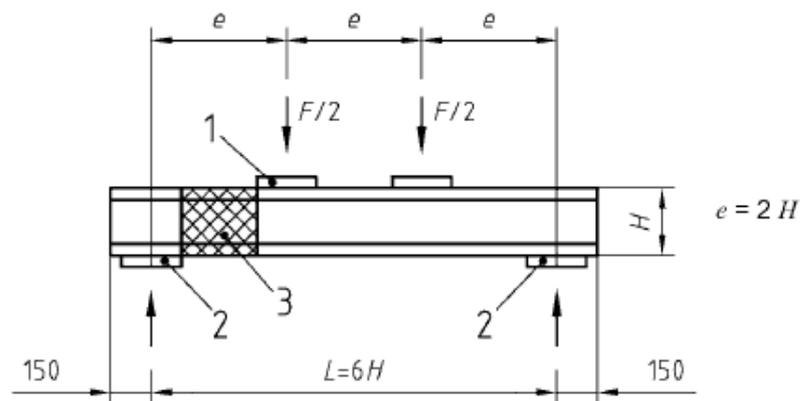
Espaçamento entre emendas

O espaçamento entre emendas no sentido longitudinal nas peças das mesas deve ser no mínimo de 1,80 m segundo a Proposta para Norma Brasileira – Madeira Laminada Colada (em fase de elaboração)¹.

4.3.6. Ensaio a flexão

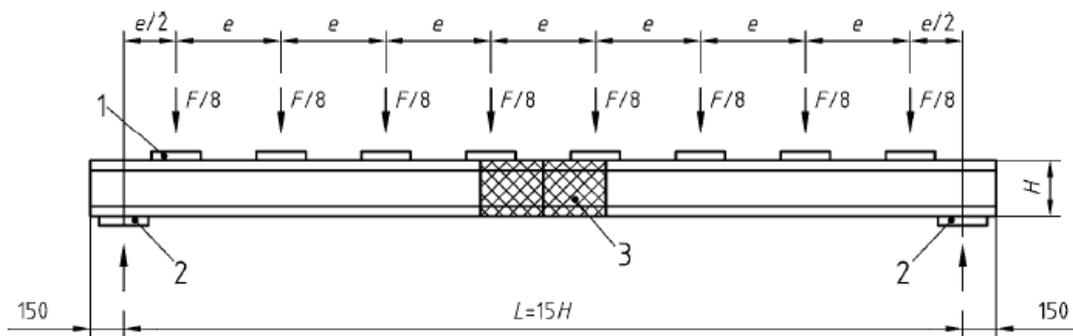
A determinação do módulo de ruptura à flexão (MOR) foi feita pelos métodos propostos pela norma europeia EN 408: 2004 (EN 13377: 2002). Esta norma determina a velocidade de aplicação das cargas e tipos de equipamentos. Os esquemas de ensaio são como indicados nas figuras 9 e 10.

¹ Proposta para Norma Brasileira – Madeira Laminada Colada a ser editada pela ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS)



Fonte: EN13377:2002

Figura 9 – Ensaio para definir o MOR com influência da cortante.



Fonte: EN13377:2002

Figura 10 – Ensaio para definir o MOR sem influência da cortante.

1. Dispositivo de aplicação da carga;
2. Dispositivo de Apoio;
3. Área de emenda.

4.4. Montagem das vigas

A emenda entre a mesa e a alma foi estudada visando definir a de melhor resistência na questão de cisalhamento entre a dentada e a tipo cunha. Quando são feitos dentes na madeira, há uma diminuição da área resistente desta e conseqüente aumento de tensões perto dos dentes. Já com emenda em cunha, o problema é a redução da área de colagem. Devido a estas particularidades foram realizados ensaios de cisalhamento com ambas para que pudessem ser comparadas, visando escolher a melhor opção para a confecção das vigas.

Classificadas as peças que compõem as vigas, as mesas foram preparadas para a emenda dentada mesa/mesa, com a fingadeira, e limpas para a aplicação manual do adesivo (por pincéis). Após a sua aplicação, as peças foram submetidas à pressão de 8 MPa, pressão esta recomendada para o tipo de emenda e para

madeiras coníferas. O tempo de prensagem foi de 30s, superior ao mínimo recomendado. A leitura da pressão de colagem foi efetuada com o anel dinamométrico apresentado na figura 11.

O adesivo à base de poliuretano foi retirado de seu tambor para utilização em 30 minutos, procurando não exceder seu tempo em aberto e, portanto, não dificultar a sua aplicação nem comprometer a eficiência das emendas.

O adesivo a base de resorcinol-formol foi preparado com seu endurecedor para utilização em 1 hora, pelo mesmo motivo explicado para o a base de poliuretano.



Figura 11 – Anel dinamométrico.

As almas de madeira serrada e de compensado laminado foram preparadas com emendas dentadas para a junção com as mesas. As almas de compensado sarrafeado foram preparadas com emendas de cunhas. Para emendas alma/alma os três tipos foram preparados em cunha, o processo de preparação foi o mesmo que das mesas. A prensagem foi realizada com a utilização prensa de MLC do LaMEM, sendo que a medida da pressão utilizada foi realizada com torquímetro.

As mesas coladas e curadas por 10 dias passaram pela plaina e desengrosso para que ficassem com suas dimensões finais.

Posteriormente foram preparadas as emendas para a colagem da alma com a mesa, sendo que 160 mesas tiveram emendas dentadas e 64 em cunha. A pressão aplicada na montagem das vigas foi de 0,7 MPa, valor recomendado pelo fabricante para esse tipo de emendas. O controle da pressão também foi feito pelo torquímetro.

A prensa usada nessa montagem está ilustrada na figura 12.



Figura 12 – Prensa feita para aplicar a pressão de colagem das vigas.

4.5. Ensaios Preliminares

4.5.1. Coeficiente de minoração da resistência

A norma europeia EN13377:2002 recomenda um número de 10 repetições para os ensaios. O número de repetições pode ser menor, mas com aumento no coeficiente de minoração, acarretando uma redução significativa na resistência característica. Quanto maior o número de peças ensaiadas maior é a confiabilidade do ensaio.

A tabela 2 ilustra a relação entre o número de repetições com o coeficiente de minoração da resistência de ensaio, usado para determinar a resistência característica, segundo a norma europeia EN13377:2002.

Tabela 2 – Coeficiente de minoração da resistência.

<i>n</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>k_s</i>	5,12	3,15	2,68	2,46	2,33	2,25	2,19	2,14	2,10	2,07	2,05	2,03
<i>n</i>	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
<i>k_s</i>	2,00	1,99	1,98	1,96	1,95	1,94	1,93	1,92	1,92	1,91	1,90	1,90
<i>n</i>	26	27	28	29	34	39	44	49	54	55	–	
<i>k_s</i>	1,89	1,88	1,88	1,87	1,87	1,85	1,83	1,82	1,81	1,80	1,64	

Fonte: Norma Europeia EN13377:2002

$$y_i = \log_e R_{u,i} \quad y = 1/n (\sum y_i) \quad s_y = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum (y_i - y)^2$$

$$y_5 = y - k_s \cdot s_y \quad R_{u,5} = \exp y_5$$

n – número de repetições de ensaios;
 k_s – coeficiente de minoração com relação a n;
 $R_{u,i}$ – resistência de cada repetição.

Para ilustrar a diminuição da resistência característica em comparação a resistência média da viga, foram calculadas, com a utilização da tabela 2, as resistências características de algumas amostras de vigas H20 já ensaiadas anteriormente por flexão à quatro pontos, no LaMEM. Os resultados estão nas tabelas 3 e 4.

Foram utilizados os resultados dos ensaios de 20 vigas compostas de mesa de madeira serrada de Pinus e com ligações alma/mesa com dentes de 15 mm de comprimento, recebidas de um fabricante, sendo que em 10 vigas foram utilizadas alma em chapas de OSB (tabela 3) e nas outras 10 foram utilizadas almas de madeira serrada de Pinus (tabela 4).

Pela tabela 3 vê-se que as vigas em que foram utilizadas as chapas de OSB não atingiram o momento fletor mínimo exigido pela norma que é de 11kNm. Tendo em vista esses resultados, a composição de materiais desta viga não é recomendada para uso em H20.

Tabela 3 – Vigas de seção transversal I com vão de 2,50 m.

VIGAS H20 - vão: 2,50 m			
CP	MOR (MPa)	Yi	(Yi-Y) ²
1	14,80	2,69	0,03
2	8,97	2,19	0,12
3	15,93	2,77	0,05
4	16,39	2,80	0,07
5	13,68	2,62	0,01
6	10,98	2,40	0,02
7	15,47	2,74	0,04
8	12,30	2,51	0,00
9	8,38	2,13	0,17
10	12,30	2,51	0,00
Média	12,92	2,53	
MOR _k	11,22		

Já nas vigas da tabela 4, os momentos fletores atingidos ficaram acima do mínimo exigido, evidenciando, portanto, ser, a princípio, madeira serrada de Pinus na alma uma boa composição de materiais para as vigas.

Tabela 4 – Vigas de seção transversal I com vão de 2,00 m.

VIGAS H20- vão: 2,00 m			
CP	MOR (MPa)	Yi	(Yi-Y) ²
1	22,60	3,12	0,07
2	33,89	3,52	0,02
3	34,86	3,55	0,03
4	28,08	3,34	0,00
5	36,07	3,59	0,04
6	27,09	3,30	0,01
7	24,37	3,19	0,03
8	30,15	3,41	0,00
9	26,79	3,29	0,01
10	32,92	3,49	0,01
Média	29,68	3,38	
MOR _k	27,99		

4.5.2. Emenda Dentada x Emenda em Cunha

Utilizando parte do material recebido para a construção das vigas, foram realizados ensaios de cisalhamento visando escolher a emenda entre mesa e alma de melhor desempenho. Os corpos-de-prova foram preparados com o adesivo de poliuretano, único adesivo utilizado nos ensaios preliminares, pois o objetivo era apenas a verificação da emenda de melhor desempenho estrutural. Os ensaios foram executados conforme a figura 13 e os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 5 e 6, Nestes ensaios as rupturas na emenda dentada ocorreram próximas do dente, como nas figuras 15 e 16, e não foi constatado descolamento na linha de cola. Já a emenda em cunha, com exceção de um dos corpos-de-prova, as rupturas deram-se na linha de cola como na figura 14. A emenda dentada apresentou desempenho significativamente superior ao da em cunha, apesar da diminuição da seção de madeira resistente e da concentração de tensão nos dentes. Estes ensaios apresentaram que a melhor emenda no caso da ligação entre a alma e a mesa de uma viga de seção transversal “I”, é a emenda dentada.

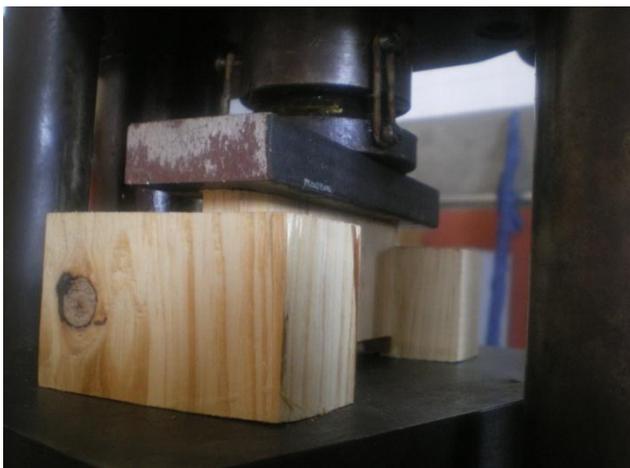


Figura 13 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.

Tabela 5 – Cisalhamento na linha de cola (emenda em cunha).

$F_{\text{máx.}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)
2,90	0,91
3,45	1,08
2,40	0,78
2,30	0,73
Média	0,87
Desvio Padrão	0,16
C.V	17,8%

Tabela 6 – Cisalhamento na linha de cola (emenda dentada).

$F_{\text{máx}}$ (kN)	$T_{\text{máx}}$ (MPa)
15,25	4,49
17,55	4,84
13,75	4,13
14,00	4,24
Média	4,43
Desvio Padrão	0,31
C.V	7,1%

Observa-se pela figura 14, que existe um descolamento causado pelo cisalhamento na linha de cola da emenda em cunha. Já na dentada, como observado nas figuras 15 e 16, a ruptura ocorreu na região da emenda sem apresentar descolamento significativo na linha de cola, a ruptura da madeira predominante, evidenciando a eficiência da emenda dentada quando comparada com a de cunha.



Figura 14 – Ruptura na linha de cola com emenda em cunha



Figura 15 – Ruptura ao cisalhamento com emenda dentada.



Figura 16 – Ruptura do corpo-de-prova com emenda dentada.

4.5.3. Ensaio preliminar de flexão

Para a determinação da resistência e rigidez à flexão de vigas do tipo H20 utilizadas em fôrmas para concreto com base na EN 13377:2002. Foram ensaiadas 6 unidades compostas de mesa de madeira serrada de *Pinus Oocarpa* e alma em chapas de compensado, com ligações alma/mesa do tipo emendas dentadas com 18 mm de dente, coladas com o adesivo de poliuretano PURBOND S049 recebidas

pelo LaMEM. Os resultados alcançados são apresentados na tabela 7. Foram aplicadas oito cargas pontuais, distanciadas 40 cm entre si para o vão de 3,20 m. No cálculo dos módulos de elasticidade foi utilizada a fórmula do MOE de uma carga distribuída. O módulo de ruptura foi calculado pela teoria da elasticidade $MOR = \frac{My}{I}$. O adesivo utilizado é de secagem mais rápida do que a utilizada no presente trabalho e o processo de montagem da viga foi mecânico.

A figura 17 apresenta uma viga H20 composta por mesa de madeira serrada e alma de compensado de 27 mm, com emenda entre a alma e a mesa dentada de 18 mm de comprimento de dente sendo ensaiada. O modo de ruptura foi o esperado para esse tipo de carregamento e vão, a viga rompeu no meio do vão por flexão. Todas as vigas tiveram o mesmo modo de ruptura.



Figura 17 – Modo de ruína de uma viga H20 no ensaio para momento fletor.

Tabela 7 – Vigas de seção transversal I com vão de 320 cm.

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	63,00	25,20	54,45
Viga2	44,06	17,62	38,08
Viga3	32,48	12,99	28,07
Viga4	34,32	13,73	29,66
Viga5	37,02	14,81	32,00
Viga6	28,91	11,56	24,99
Média	40,0	16,0	34,5
Desvio Padrão	12,38	4,95	10,70
C.V	31%	31%	31%

Os resultados de momento fletor obtidos foram bem superiores ao requerido pela norma EN13377:2002, então essa configuração apresentou um bom resultado.

4.6. Conclusão Preliminar

A emenda em cunha utilizada na junção entre a alma e a mesa não apresentou os resultados de resistências esperados. Quando confeccionados, os dentes da emenda dentada aumentam a superfície de contato com o adesivo e apresentam um desempenho melhor sendo, portanto, a escolhida para este trabalho.

O uso de emendas dentadas em painéis de OSB mostrou-se inviável, pois durante a confecção dos dentes, as camadas de laminas de madeira se descolam provocando uma emenda de encaixe imperfeito, como apresentada na figura 18. Além disso, o OSB é pouco resistente à água, o que contra indica seu uso na construção de vigas utilizadas em fôrmas, salvo se o mesmo apresentar revestimento, tratamento especial de proteção à umidade ou quando usadas resinas a prova de água, o que lhes confere boa resistência à água, porém com aumento de custo. Pelos motivos citados não foram utilizadas chapas de OSB.



Figura 18 – Emenda da mesa com a alma de OSB

Para a melhora do desempenho da emenda em cunha foram feitos entalhes ao longo das almas para melhor penetração dos adesivos

4.7. Planejamento experimental

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma EN13377:2002, para os ensaios de viga ao cisalhamento e à flexão.

Desta forma, o planejamento estatístico correspondeu à utilização de 10 vigas para cada condição de ensaio. Considerando que foram utilizados três tipos de materiais distintos para comporem a alma (madeira serrada de Pinus Oocarpa, painel de compensado laminado e painel de compensado sarrafeado), dois tipos de

adesivos (a base de poliuretano e de resorcinol-formol), e um tipo de ligação da alma-mesa, tem-se 180 ensaios. Estes foram distribuídos em 120 ensaios de flexão, sendo 60 para verificação de Momento Fletor, 60 para verificação de força cortante, e 60 ensaios de cisalhamento no adesivo.

Entretanto, devido à falta de material e dificuldade de adquirir novos, foram montadas apenas 8 vigas com alma de compensado sarrafeado com cada adesivo e para cada tipo de ensaio. Desta forma, foram executados 112 ensaios de flexão com as vigas prontas.

Já com referência aos ensaios de cisalhamento no adesivo, os mesmos não foram realizados na quantidade prevista no planejamento experimental devido ao modo de ruína de algumas das vigas fletidas. Esta ruína representou o completo cisalhamento na alma, no sentido do comprimento da viga, impossibilitando a retirada dos corpos-de-prova para a execução dos ensaios.

4.8. Classificação e caracterização da madeira

A classificação visual foi embasada na suposição de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem dos corpos-de-prova isentos de defeitos, devido às características naturais de crescimento, sendo que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, essas características são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

Nesta classificação, são consideradas cada peça e limitado o tipo, localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural. Suas características visíveis, como os nós e a densidade da madeira são os estimadores usados para avaliar a resistência.

CARREIRA (2003) aplicou os critérios descritos nas regras de classificação visual do SPIB, utilizadas na classificação das espécies *Pinus Taeda* e *Pinus Elliottii* plantadas no Brasil e concluiu que além de ser um método barato e eficiente, também se mostrou adequado para a classificação da madeira de *Pinus* produzida no Brasil.

Foram recebidas 600 peças de madeira serrada *Pinus Oocarpa* com dimensões nominais de 5 cm por 9 cm de seção transversal e 350 cm de comprimento para compor as mesas das vigas para o ensaio a momento fletor. E mais 500 com a mesma seção nominal e 150 cm de comprimento para compor as mesas das vigas para os ensaios ao esforço cortante. A figura 19 apresenta as madeiras armazenadas como recebidas. As figuras 20 e 21 apresentam as peças selecionadas para a caracterização mecânica. Foram escolhidas pela classificação visual apenas a classe SS e N^o1, melhores classes consideradas por CARREIRA (2003).

Para testar o uso das emendas, elas foram posicionadas de modo a causar o maior comprometimento para a viga em sua condição de utilização. No caso do ensaio ao momento fletor no meio do vão e no caso do ensaio a força cortante, próximas ao apoio, onde os esforços são maiores, considerando uma viga bi-apoiada.

Das vigas de 350 cm de comprimento foram escolhidas 200 após a classificação visual de acordo com a proposta de revisão da ABNT NBR 7190:1997. Posteriormente, efetuou-se a classificação mecânica, considerando-se as resistências à compressão paralela as fibras e ao cisalhamento paralelo as fibras, bem como do módulo de elasticidade. Das vigas de 1 metro de comprimento foram escolhidas 236 pela classificação visual.

Foram recebidas também 160 tábuas com dimensões nominais de 2,1 cm por 20 cm por 350 cm de comprimento para compor a alma das vigas, nas quais se aplicou a mesma classificação visual e foram escolhidas 40.

Os ensaios de classificação da madeira serrada tiveram como principal objetivo a melhoria do desempenho da viga de seção transversal “I” e diminuir a variabilidade dos materiais utilizados.



Figura 19 – *Pinus Oocarpa* logo que foi recebido do fornecedor



Figura 20 – Início da classificação visual do *Pinus*



Figura 21 – *Pinus* escolhido para a realização da classificação mecânica.

5. Resultados e discussões

5.1. Propriedades da mesa

A classificação e caracterização mecânica das peças de madeira serrada destinadas a compor as mesas, foram efetuadas com o objetivo de que as vigas H20 montadas apresentassem propriedades mais homogêneas possíveis, ou seja, com menor coeficiente de variação de resistências e módulo. Esta classificação e caracterização foram realizadas em 236 peças de madeira serrada de 1,50 m de comprimento que compuseram as vigas utilizadas para o ensaio de força cortante, e 200 peças de madeira serrada de 3,00m de comprimento para as vigas utilizadas no ensaio de momento fletor, ambas com dimensões nominais de seção transversal de 5 cm por 9 cm.

As mesas de Pinus Oocarpa foram classificadas mecanicamente por meio de ensaios não destrutivos de flexão estática, nos quais as mesas são simplesmente apoiadas em um vão de 90 cm, visando a determinação dos módulos de elasticidade das mesmas. Para a medição da força aplicada e da flecha no meio do vão, foi utilizado um anel dinamométrico e um relógio comparador, com resolução de centésimos de milímetro. O ensaio foi conduzido até um valor máximo de força correspondente ao limite de flecha aproximadamente de $L/200$.

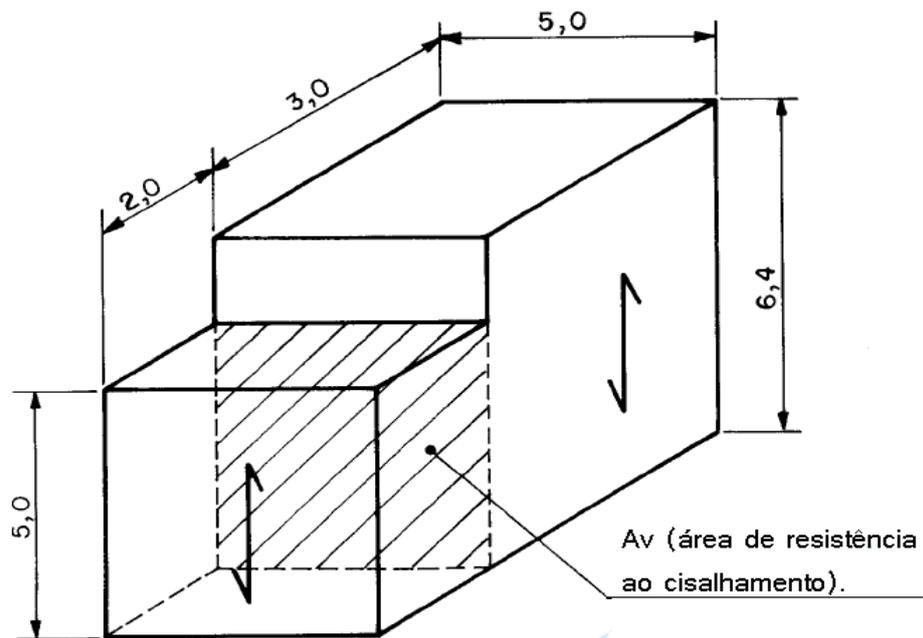
Foram aparelhados 2 corpos-de-prova de dimensões nominais de 5 cm por 5 cm, de seção transversal e 15 cm de altura, de cada umas das mesas para a realização do ensaio de resistência à compressão paralela.

A figura 22 apresenta como o ensaio foi realizado, sendo que o mesmo foi levado até a ruína do corpo-de-prova.

Foram retirados mais 2 corpos-de-prova, com dimensões nominais conforme apresentadas na figura 23, para a realização do ensaio destrutivo de cisalhamento paralelo. A figura 24 apresenta este ensaio sendo realizado.



Figura 22 – Compressão paralela no corpo-de-prova retirado da madeira da mesa.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (medidas em centímetros)

Figura 23 – Corpo-de-prova de cisalhamento



Figura 24 – Cisalhamento da madeira serrada.

A distribuição de probabilidade foi considerada normal para efeitos de cálculo e foram escolhidas as peças com maiores resistências e módulos de elasticidade, visando diminuir o desvio padrão.

A tabela 9 apresenta os valores médios de resistência à compressão e ao cisalhamento e o módulo de elasticidade das mesas das vigas de 1,5 m de comprimento, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação.

A comparação dos valores normalizados com os valores encontrados nos ensaios foi realizada com base na tabela 8.

Os resultados médios apresentados na tabela 9 são maiores do que os da tabela 8, indicando que o *Pinus Oocarpa* avaliado está com as resistências e MOE dentro do esperado para sua utilização, conforme ABNT NBR 7190:1997.

Os coeficientes de variação estão dentro do esperado para esses ensaios, na tabela 9 foi feita uma comparação entre os valores característicos nas normas ABNT NBR7190:1997 e EN13377:2002, os valores da NBR citada são mais conservadores do que os da norma européia.

A distribuição de probabilidade dessas mesas está apresentada nas figuras 25, 26 e 27. As tabelas 10, 11 e 12 apresentam a quantidade de mesas em cada classe e as amplitudes de classe. Dessas mesas foram escolhidas 90 para serem

emendadas e coladas com o adesivo a base de resorcinol-formol e 90 com o adesivo de poliuretano.

Tabela 8 – Valores de referência para o *Pinus Oocarpa*.

Nome Comum	E_{c0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_v (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	n
<i>Pinus Oocarpa</i>	10904	43,6	8,0	60,9	2,5	71

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 9 – Mesas de 1,5 metros de comprimento.

	MOE (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)
Média	12247,00	48,32	13,17
Desvio Padrão	2717,82	9,82	2,57
C.V.	22%	20%	19%
k^1	9073,72	37,73	10,39
k^2	8572,90	33,83	9,22
k^3	10983,78	44,24	12,10

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Pode-se observar pela tabela 10 e figura 25 que a distribuição de probabilidade é mais próxima de uma lognormal.

Tabela 10 – Quantidade e amplitude de classes das resistências à compressão.

Classes	Intervalo das Resistências à Compressão (MPa)		Quantidade de Mesas
Classe 1	26,47	31,77	5
Classe 2	31,77	37,07	21
Classe 3	37,07	42,37	46
Classe 4	42,37	47,67	53
Classe 5	47,67	52,96	37
Classe 6	52,96	58,26	35
Classe 7	58,26	63,56	25
Classe 8	63,56	68,86	8
Classe 9	68,86	74,16	2
Classe 10	74,16	79,45	4

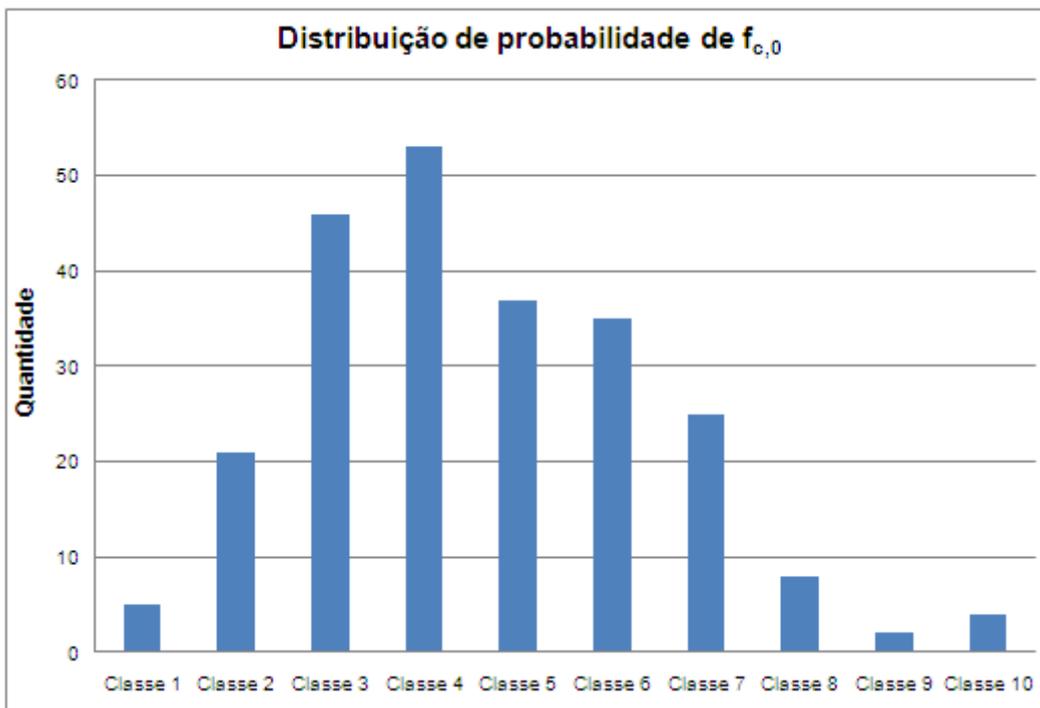


Figura 25 – $f_{c,0}$ das mesas das vigas usadas para os ensaios de cortante

Tabela 11 – Quantidade e amplitude de classes dos MOEs.

Classes	Intervalo dos Módulos de Elasticidade (MPa)		Quantidade de Mesas
Classe 1	6480,95	7978,50	10
Classe 2	7978,50	9476,04	26
Classe 3	9476,04	10973,59	43
Classe 4	10973,59	12471,13	50
Classe 5	12471,13	13968,67	44
Classe 6	13968,67	15466,22	32
Classe 7	15466,22	16963,76	22
Classe 8	16963,76	18461,31	6
Classe 9	18461,31	19958,85	1
Classe 10	19958,85	21456,39	2

A distribuição de probabilidade da figura 26 também se aproxima de uma lognormal, porém é mais próxima da normal do que a figura 25.

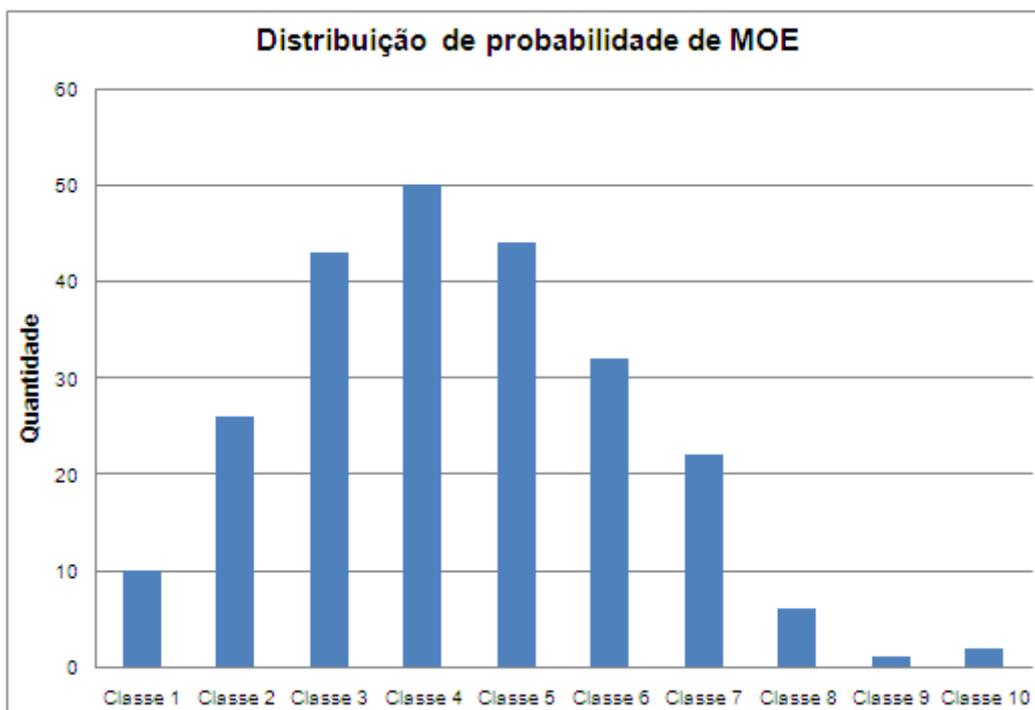


Figura 26 – MOE das mesas das vigas dos ensaios de cortante.

Tabela 12 – Quantidade e amplitude de classes das resistências ao cisalhamento.

Classes	Intervalo das Resistências ao Cisalhamento (MPa)		Quantidade de Mesas
Classe 1	6,45	7,89	2
Classe 2	7,89	9,33	11
Classe 3	9,33	10,77	27
Classe 4	10,77	12,21	49
Classe 5	12,21	13,65	51
Classe 6	13,65	15,09	44
Classe 7	15,09	16,53	30
Classe 8	16,53	17,96	12
Classe 9	17,96	19,40	8
Classe 10	19,40	20,84	2

Já a distribuição de probabilidade da figura 27 apresenta um comportamento mais próximo de uma distribuição normal de probabilidade.

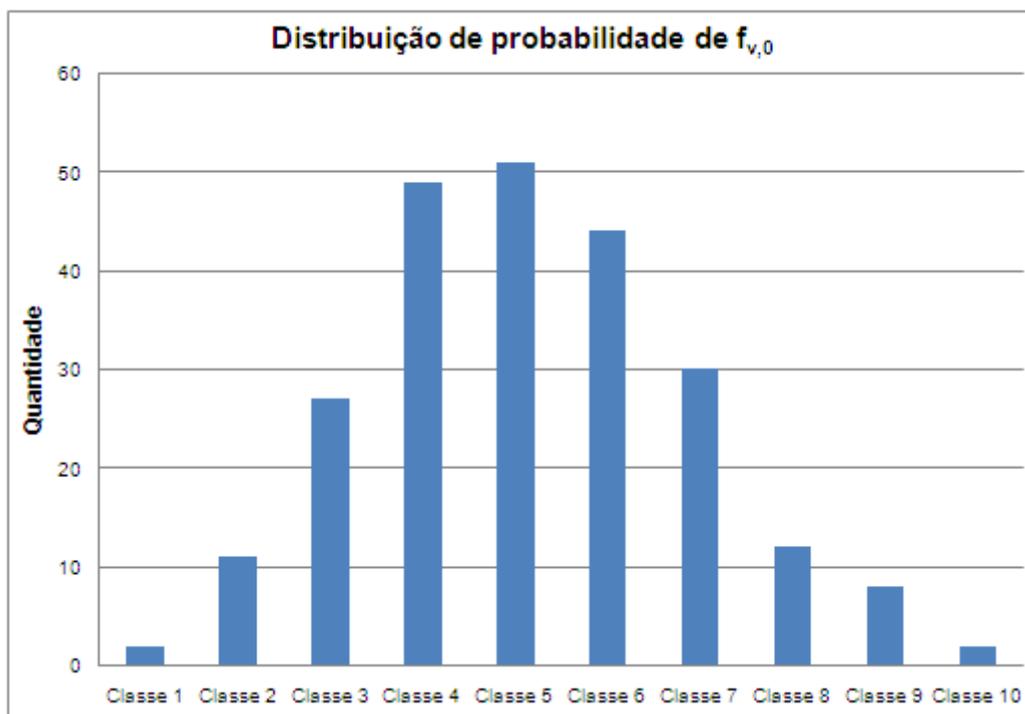


Figura 27 – $f_{v,0}$ das mesas das vigas dos ensaios de cortante.

A tabela 13 apresenta os valores médios de resistência à compressão, ao cisalhamento e o módulo de elasticidade das mesas de 3 m de comprimento, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os resultados médios apresentados na tabela 13 são maiores do que os da tabela 8, indicando que as peças de Pinus Oocarpa avaliadas para comporem as vigas de 2,88m de vão estão com as resistências e MOE dentro do esperado para sua utilização, conforme ABNT NBR 7190:1997.

Para o cisalhamento e compressão, o coeficiente de variação foi melhor que o esperado, já pra o MOE o coeficiente foi mais alto, Mas da mesma forma que nas vigas de vão menor, o coeficiente de variação maior não influenciou nos cálculos dos valores característicos.

A distribuição de probabilidade dessas mesas está apresentada nas figuras 28, 29 e 30. As tabelas 14, 15 e 16 apresentam a quantidade de mesas em cada classe e as amplitudes de classe. Dessas 200 mesas foram escolhidas 60 para serem coladas com o adesivo de resorcinol-formol e 60 com o adesivo de poliuretano, para a confecção das vigas utilizadas nos ensaios de momento fletor.

Tabela 13 – Mesas de 3 metros de comprimento.

	MOE (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)
Média	11370,32	43,14	12,37
Desvio Padrão	2326,88	6,68	2,23
C.V.	20%	15%	18%
k^1	8779,92	37,34	10,30
k^2	7959,22	30,20	8,66
k^3	10334,38	40,98	11,47

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Tabela 14 – Quantidade e amplitude de classes de f_{c0}

Classes	Intervalo das Resistências à Compressão (MPa)		Quantidade
Classe 1	29,34	32,69	7
Classe 2	32,69	36,03	20
Classe 3	36,03	39,37	32
Classe 4	39,37	42,72	43
Classe 5	42,72	46,06	39
Classe 6	46,06	49,41	23
Classe 7	49,41	52,75	17
Classe 8	52,75	56,09	10
Classe 9	56,09	59,44	8
Classe 10	59,44	62,78	1

A melhor distribuição de probabilidade para a resistência à compressão, das mesas da H20 de 2,88 m de vão, é a lognormal (figura 28).

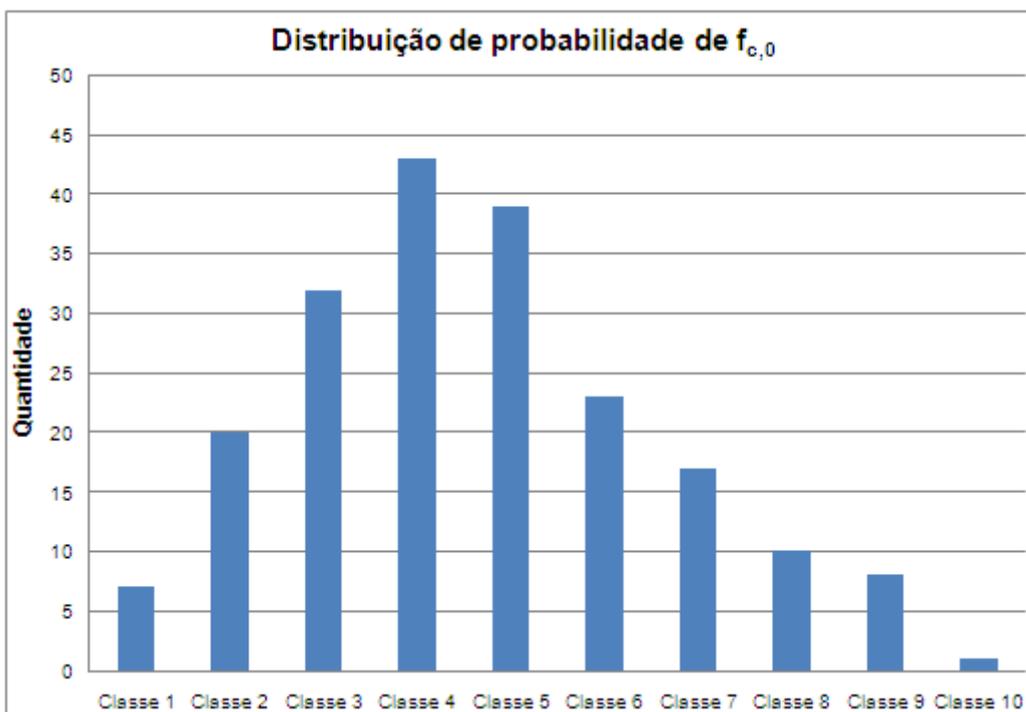


Figura 28 – f_{c0} das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.

Tabela 15 – Quantidade e amplitude de classes dos MOEs.

Classes	Intervalo dos Módulos de Elasticidade (MPa)		Quantidade
Classe 1	6299,84	7430,40	7
Classe 2	7430,40	8560,95	17
Classe 3	8560,95	9691,51	26
Classe 4	9691,51	10822,06	30
Classe 5	10822,06	11952,61	42
Classe 6	11952,61	13083,17	31
Classe 7	13083,17	14213,72	27
Classe 8	14213,72	15344,28	10
Classe 9	15344,28	16474,83	6
Classe 10	16474,83	17605,39	4

O melhor tipo de distribuição de probabilidade, que se aplica no caso do módulo de elasticidade (figura 29), é a distribuição de probabilidade normal.

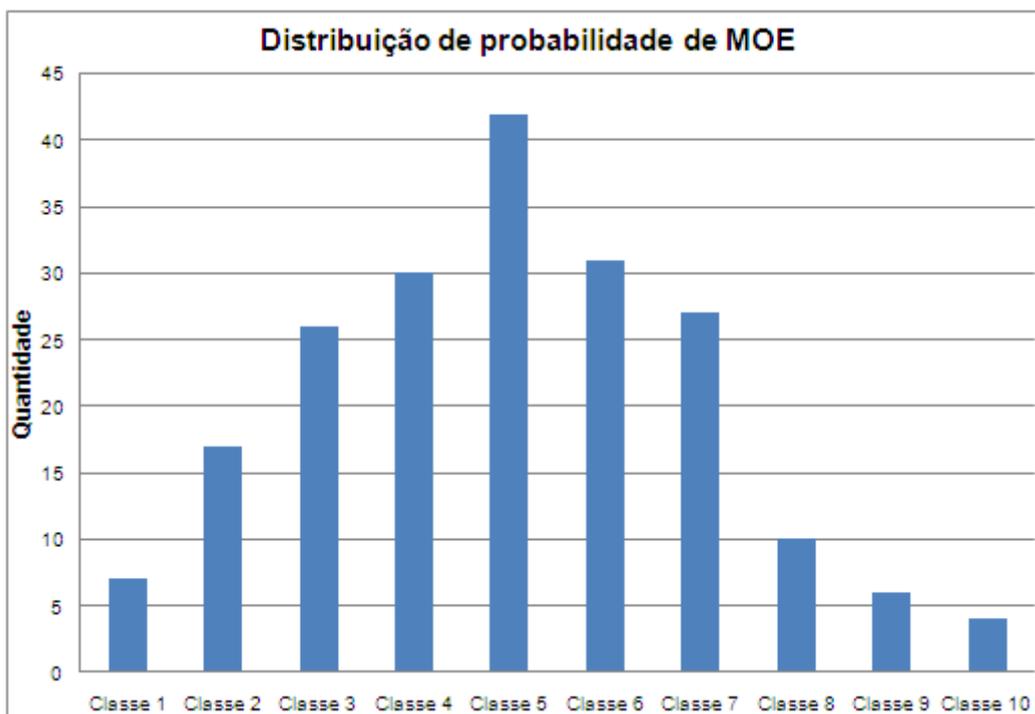


Figura 29 – MOE das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.

Tabela 16 – Quantidade e amplitude de classes de f_{v0} .

Classes	Intervalo das Resistências ao Cisalhamento (MPa)		Quantidade
Classe 1	4,17	5,76	1
Classe 2	5,76	7,34	1
Classe 3	7,34	8,93	5
Classe 4	8,93	10,52	35
Classe 5	10,52	12,10	51
Classe 6	12,10	13,69	59
Classe 7	13,69	15,28	28
Classe 8	15,28	16,87	15
Classe 9	16,87	18,45	4
Classe 10	18,45	20,04	1

A melhor distribuição de probabilidade para a resistência ao cisalhamento, das mesas da H20 de 2,88 m de vão, é a lognormal (figura 30).

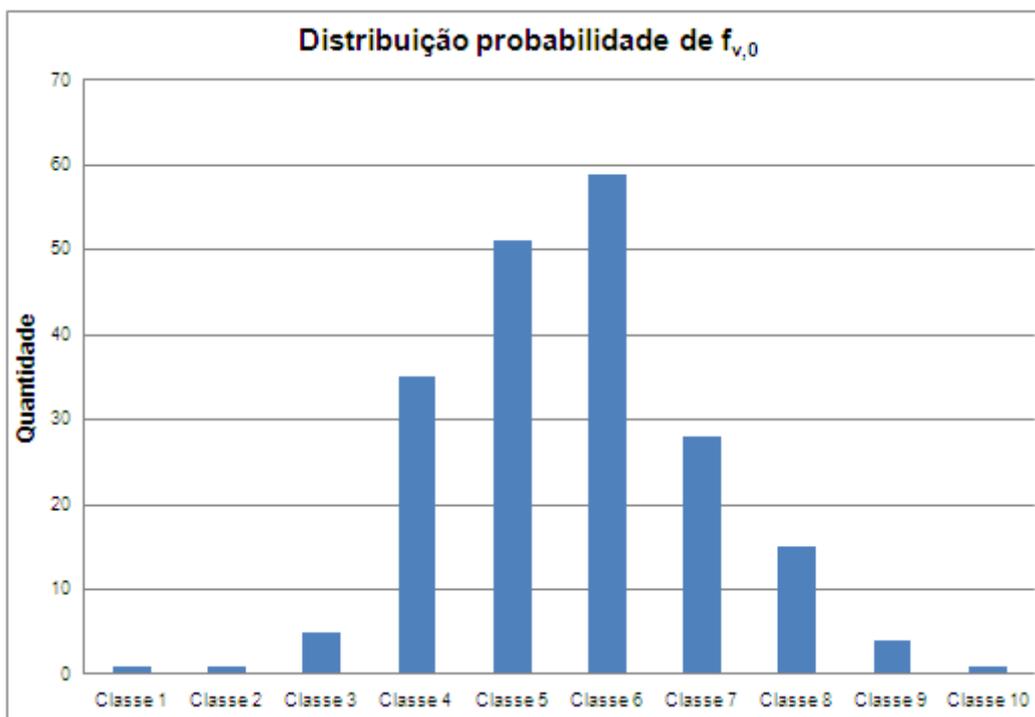


Figura 30 – $f_{v,0}$ das mesas das vigas dos ensaios ao momento fletor.

5.2. Propriedades da alma

Os corpos-de-prova para o ensaio de cisalhamento de cada uma das chapas foram adaptados para as condições de ensaio. Foram aparelhados nas dimensões nominais de 5 cm por 5 cm com a espessura de cada painel e com estes foram realizados os ensaios de compressão e cisalhamento. A figura 31 apresenta o corpo-de-prova de madeira serrada sendo ensaiado.



Figura 31 – Corpo-de-prova de cisalhamento da alma.

De cada tipo de painel foram feitos 11 ensaios de cisalhamento paralelo e compressão paralela. Os resultados são apresentados nas tabelas 17 e 18.

Os esforços solicitantes na alma das vigas H20 são, principalmente, a força cortante, sendo a tensão cisalhante máxima na linha neutra. Já a tensão normal é pequena na alma, é máxima nas mesas e se reduz à medida que se aproxima da linha neutra, onde é zero. A 32 apresenta a distribuição de tensões normais numa viga fletida.

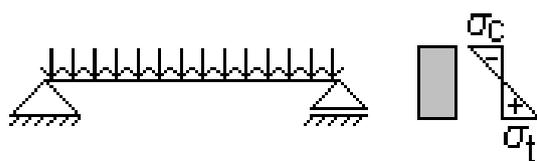


Figura 32 – Distribuição de tensões de uma viga com cargas distribuídas.

O compensado laminado apresenta resistência à compressão inferior à da madeira serrada, mas como visto anteriormente, como a compressão não é o principal esforço na alma, o valor encontrado foi suficiente para o seu uso como alma em vigas H20.

Já quanto à resistência ao cisalhamento, o compensado laminado apresentou ótimos resultados em relação à madeira serrada, fazendo do mesmo um bom material para a fabricação da viga H20.

A única dificuldade que o compensado laminado apresentou durante a realização do trabalho foi na sua preparação para a fabricação da viga. Como o compensado é composto por camadas sobrepostas de modo que a direção das fibras de cada uma delas é disposta perpendicularmente umas às outras, resulta um material de alta resistência ao cisalhamento.

O compensado sarrafeado apresentou defeitos de fabricação, principalmente em suas extremidades, como pode ser visto nas figuras 33 e 34.

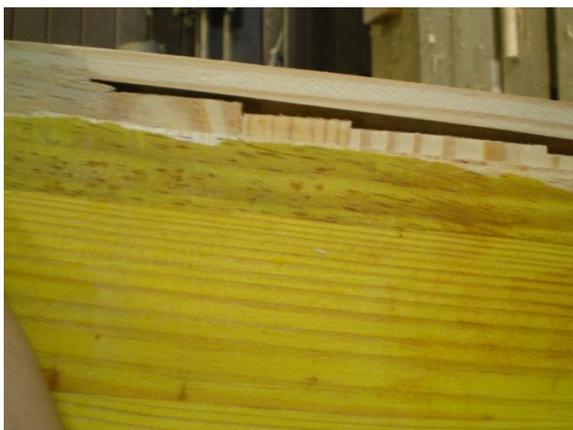


Figura 33 – Defeitos que impedem a fabricação de dentes



Figura 34 – Tentativa de fabricar os dentes no compensado sarrafeado.

Devido a estes defeitos, não foi possível fazer a emenda dentada, fato que levou à adoção da emenda em cunha para a sua utilização como alma na montagem das vigas.

Os corpos-de-prova de compensado sarrafeado apresentaram um bom desempenho quando submetido ao ensaio de compressão paralela as fibras dos sarrafos. Pelo fato de sua base ser composta por sarrafos de madeira serrada, a

expectativa era de que nos ensaios de resistência à compressão fossem obtidos resultados próximos aos da própria madeira serrada usadas nas mesas. Os resultados encontrados não foram tão próximos aos da mesa, mas representaram valores que na ABNT NBR7190 são considerados parte da melhor classe de resistência de um Pinus.

Quanto ao cisalhamento o compensado sarrafeado teve um desempenho ruim, principalmente por causa dos erros na fabricação do painel. Os sarrafos muitas vezes são colados apenas a lamina externa e não entre si, além de algumas vezes apresentar um espaço vazio entre um sarrafo e outro. Nestes locais a área resistente do compensado sarrafeado é apenas a área da lamina, diminuindo consideravelmente a sua resistência, o que contra-indica o uso desse material para a produção da viga H20.

A madeira serrada utilizada na alma apresentou resultados de resistências à compressão superiores aos da mesa, que absorve a maior parte da força normal. Estes resultados superaram os previstos para o *Pinus Oocarpa*. Os resultados de resistência ao cisalhamento foram mais favoráveis que os constantes da ABNT NBR 7190:1997 (tabela 8). A sua utilização nas vigas H20 é, a principio, adequada.

Tabela 17 – Resistência a compressão das almas das vigas.

Tipo de alma	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V.	f_{cok}^1 (MPa)	f_{cok}^2 (MPa)	f_{cok}^3 (MPa)
Alma de madeira serrada	50,77	6,91	13,6%	45,54	35,54	48,49
Alma de compensado laminado	21,89	1,37	6,3%	21,61	15,32	21,85
Alma de compensado sarrafeado	34,74	3,98	11,5%	30,82	24,32	34,53

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Tabela 18 – Resistência ao cisalhamento das almas das vigas.

Cisalhamento das almas						
Tipo de alma	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V.	f_{vok}^1 (MPa)	f_{vok}^2 (MPa)	f_{vok}^3 (MPa)
Alma de madeira serrada	9,85	1,00	0,10	9,57	6,89	9,62
Alma de compensado laminado	11,07	1,52	0,14	8,70	7,75	10,53
Alma de compensado sarrafeado	5,25	1,27	0,24	2,79	3,67	4,16

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.

2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

5.3. Cisalhamento na Linha de Cola

A resistência ao cisalhamento na linha de cola das vigas foi comparada com as resistências das madeiras serradas e as dos painéis para cada um dos tipos de vigas H20 fabricadas no decorrer desse trabalho.

A tabela 19 apresenta as médias, desvios padrões e coeficientes de variação das resistências ao cisalhamento dos tipos de alma e das mesas de cada um dos vãos utilizados.

Tabela 19 – Médias de resistências ao cisalhamento.

	f_{vm} (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V.
Mesa com vão de 1,50 m	13,17	2,57	19%
Mesa com vão de 2,88 m	12,37	2,23	18%
Alma de madeira serrada	9,85	1,00	10%
Alma de compensado laminado	11,07	1,52	14%
Alma de compensado sarrafeado	5,25	1,27	24%

As tabelas 20 e 21 apresentam os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola de corpos-de-prova aparelhados a partir de vigas ensaiadas à flexão, identificadas por material da alma, tipo de adesivo utilizado e vão das vigas.

Tabela 20 – Cisalhamento na linha de cola das vigas com vão de 2,88 m

Alma/Cola	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V.	f_{vk}^1 (MPa)	f_{vk}^2 (MPa)	f_{vk}^3 (MPa)
Compensado sarrafeado/Resorcinol - Formol	5,71	1,17	21%	4,99	3,99	5,11
Compensado/ Resorcinol - Formol	6,30	0,99	16%	4,55	4,41	5,75
Serrada/ Resorcinol - Formol	9,45	1,57	17%	6,93	6,62	8,57
Compensado sarrafeado /Poliuretano	3,47	1,19	34%	2,33	2,43	2,54
Compensado/ Poliuretano	8,43	1,19	14%	7,06	5,90	7,60
Serrada/ Poliuretano	9,03	1,40	16%	7,30	6,32	8,19

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.

3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Tabela 21 – Cisalhamento na linha de cola das vigas com vão de 1,20 m

Alma/Cola	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V.	f_{vk}^1 (MPa)	f_{vk}^2 (MPa)	f_{vk}^3 (MPa)
Compensado sarrafeado /Resorcinol-Formol	6,71	0,95	14%	6,06	4,70	6,37
Compensado/Resorcinol-Formol	10,41	1,77	17%	8,64	7,29	9,74
Serrada/Resorcinol-Formol	14,65	1,41	10%	13,34	10,26	14,27
Compensado sarrafeado /Poliuretano	6,83	3,17	46%	2,17	4,78	3,31
Compensado/Poliuretano	10,48	2,10	20%	9,33	7,33	9,59
Serrada/Poliuretano	14,12	1,41	10%	13,58	9,88	13,65

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

A resistência ao cisalhamento, na linha de cola das vigas, foi comparada às resistências das madeiras serradas e dos painéis, para cada um dos tipos de vigas H20 fabricadas no decorrer deste trabalho.

O Compensado sarrafeado foi emendado com emenda em cunha e as outras almas foram emendadas com dentes. Os piores resultados observados foram os das vigas compostas de alma de compensado sarrafeado e emendadas com cunha. Os corpos-de-prova ensaiados nessa seção foram extraídos das vigas ensaiadas à flexão, o que faz com que elas já tenham sofrido alguma solicitação além de não ter o mesmo controle de pressão de prensagem e tempo do adesivo quando montada, como num corpo-de-prova feito especificamente para o ensaio. Por esse motivo as resistências dos adesivos não alcançaram o valor esperado. E por isso as vigas de vãos menores apresentaram melhores resultados, ou seja, quanto menor o vão mais fácil a aplicação do adesivo e controle tecnológico de montagem.

A resistência ao cisalhamento da emenda em cunha é pequena devido a pouca área de contato com adesivo. O próprio material Compensado sarrafeado já se mostrou contra-indicado para o uso em vigas H20, devido à sua baixa resistência ao cisalhamento e defeitos presentes no material.

A resistência média ao cisalhamento dos corpos-de-prova retirados das vigas montadas com compensado laminado, emenda dentada, adesivo de resorcinol-formol e vão de 2,88m foi de 6,30 MPa, valor alto em comparação com a emenda em cunha e alma de painel compensado sarrafeado. Porém, quando comparados às resistências dos próprios materiais que compõe as vigas, verifica-se que os resultados são inferiores os esperados.

No item 5.5, onde estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de flexão das vigas prontas, vê-se que a maioria das rupturas não ocorreu por descolamento entre a alma e a mesa então, pode-se concluir que apesar de uma pequena resistência comparada aos materiais da viga, o adesivo de resorcinol-formol desempenhou seu papel.

A resistência média ao cisalhamento dos corpos-de-prova retirados das vigas montadas com compensado laminado, emenda dentada, colada com adesivo de poliuretano e vão de 2,88m foi de 8,43 MPa.

A resistência média ao cisalhamento, medida nos ensaios efetuados com corpos-de-prova extraídos das vigas montadas com alma de madeira serrada, emenda dentada e colada com resorcinol-formol foi de 8,78 MPa, resultado considerado satisfatório. A maioria das rupturas não ocorreu pelo descolamento entre a alma e a mesa então, o adesivo de resorcinol-formol, nessas configurações, atingiu os objetivos esperados.

A resistência média ao cisalhamento da viga montada com alma de madeira serrada e colada com adesivo de poliuretano e vão de 2,88m foi de 9,03 MPa.

Os corpos-de-prova ensaiados nesse item foram retirados das vigas ensaiadas a flexão, o que faz com que elas já tenham sofrido alguma solicitação e possivelmente algum dano, além de não terem o mesmo controle na prensagem e no tempo de cura do adesivo quando da sua montagem, como seguramente ocorre na preparação de corpos-de-prova feito especificamente para o ensaio.

Por esse motivo, as resistências dos adesivos não alcançaram os valores esperados, principalmente naqueles oriundos das vigas de vão maior. Os corpos-de-prova das vigas de vãos menores apresentaram melhores resultados, o que nos levou a concluir que quanto menor o vão mais fácil o controle técnico das condições de montagem, principalmente da aplicação do adesivo.

5.4. Ensaio das emendas das mesas

A figura 35 apresenta uma classificação dos modos de rupturas da viga submetida a forças de tração.



Fonte: ASMT D 4688 – 99.

Figura 35 – Classificação do Tipo de Ruptura da Emenda na Tração

Na realização dos ensaios da madeira serrada com a emenda dentada, foi utilizada a máquina de ensaio de tração horizontal (Metriguard modelo 422, figura

36) com capacidade de carga de 880kN, para peças estruturais com até 3,30 m de comprimento. As peças ensaiadas tinham o comprimento de 2,50 m.



Figura 36 – Metriguard

5.4.1. Com resorcinol-formol

As melhores peças de madeira foram utilizadas para a confecção das mesas das vigas então, já era esperado que os resultados dos ensaios fossem um pouco menor do que os valores de resistência da madeira utilizada, e foi o que aconteceu. O que é importante observar é que o modo de ruptura da emenda colada com o adesivo de resorcinol-formol com exceção de um corpo-de-prova não teve nenhuma influência da emenda e mesmo o corpo-de-prova que teve não chegou a descolamento. A ruptura começou na emenda e se afastou tendo 100% de ruptura da madeira conforme se pode observar nas tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Tração das emendas dentadas das mesas coladas com resorcinol-formol

	Ruptura kN	$f_{t,0}$ MPa	Modo Rup.	
5	59,8	18,65	f	
43	69,7	21,27	f	
14	58,4	18,15	f	
35	53,9	17,90	f	
10	78,5	24,55	f	
41	47,4	15,21	f	
19	57,2	17,90	f	
178	53,9	16,90	f	
120	84,8	26,70	e	
54	71,1	22,41	f	

Tabela 23 – Resistência à tração das emendas dentadas das mesas coladas com resorcinol-formol.

	f_{t0} (MPa)
Média	19,96
Desvio Padrão	3,65
C.V.	18%
f_{t0k}^1	17,40
f_{t0k}^2	13,97
f_{t0k}^3	17,08

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Considerando que 100% dos modos de rupturas ocorreram na madeira, o adesivo de resorcinol-formol mostrou-se indicado para a colagem de mesas de madeira com emendas dentadas.

5.4.2. Com adesivo de poliuretano

Os modos de ruptura das emendas coladas com o adesivo de poliuretano apresentaram, comparativamente com as coladas com resorcinol-formol, um coeficiente de variação muito grande. Dos corpos-de-prova ensaiados, 30% romperam pelo modo “a” e 80% dos rompimentos se enquadram nos modos que apresentam algum tipo de descolamento, conforme pode ser comprovado pelas tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – Tração das emendas dentadas das mesas coladas com adesivo de poliuretano.

C.P.	Ruptura kN	$f_{t,0}$ MPa	Modo Rup.	
31	26,7	8,10	b	
18	32,4	10,30	f	
50	62,09	19,70	b	
62	20,9	6,66	a	
39	23,4	7,52	f	
49	14,5	4,57	a	
177	57,8	18,03	a	
16	57,2	18,08	d	
6	35,7	11,24	d	
15	70	21,92	c	

Tabela 25 – Resistência à tração das emendas coladas com adesivo a base de poliuretano.

	f_{t0} (MPa)
Média	12,61
Desvio Padrão	6,24
C.V.	49%
$f_{t0,k}^1$	3,44
$f_{t0,k}^2$	8,83
$f_{t0,k}^3$	4,96

1. Valores característicos calculados a partir da Investigação direta da resistência, item 6.4.8 da ABNT NBR 7190:1997.
2. Valores característicos calculados como $k=0,7m$, sendo m o valor médio.
3. Valor de resistência característica calculado pela norma europeia EN 13377:2002.

Conclui-se, pela análise dos resultados, que o adesivo de poliuretano não se mostrou o mais indicado, comparativamente ao adesivo de resorcinol-formol, no uso para a colagem das mesas de madeira serrada com união por meio de emendas dentadas.

5.5. Ensaio à flexão das vigas

A determinação da resistência à flexão para as vigas montadas foi realizada utilizando os ensaios de acordo com a norma europeia EN408: 2004 (EN13377:2002). Esta norma determina a velocidade de aplicação da carga e tipo de equipamentos.

Foram feitos ensaios destrutivos nas vigas H20 finais, nos quais as vigas foram apoiadas em um vão livre de 1,20 m, visando a determinação dos seus módulos de elasticidade sob a influência da força cortante, e em um vão de 2,88 m, para determinação dos módulos de elasticidade das mesmas, sem influência da força cortante.

Para medir da força aplicada foi utilizado um anel dinamométrico e para a determinação dos deslocamentos no meio do vão, um relógio comparador com resolução de centésimos de milímetro. O esquema de aplicação de forças foi como apresentado anteriormente no item 4.3.6 Ensaio à flexão.

Para ilustrar alguns modos de ruína das vigas as figuras 37 à 47 foram fotografadas depois de realizados os ensaios.

A figura 37 apresenta a ruptura da alma de compensado sarrafeado com vão de 1,2 m por força cortante no sentido transversal da alma.



Figura 37 – Ruína da viga com alma de compensado sarrafeado.

A figura 38 apresenta a ruína da viga com compensado sarrafeado colada com adesivo à base de resorcinol-formol com vão de 1,2 m. A ruína começou pela ruptura da mesa inferior alinhada com a força aplicada.



Figura 38 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de resorcinol-formol

A figura 39 apresenta a ruína da viga por cisalhamento entre a alma e a mesa da viga com alma de compensado sarrafeado colada com adesivo à base de poliuretano com vão de 1,20 m. Pode-se notar o descolamento entre a mesa e a alma o que não poderia ocorrer, demonstrando a ineficiência do adesivo utilizado.



Figura 39 – Ruína de uma viga com alma de compensado sarrafeado colada com adesivo a base de poliuretano

A figura 40 apresenta a ruína da viga com alma de compensado laminado, colada com adesivo à base poliuretano e com vão de 1,2 m.

Pode-se notar pela ruptura na emenda tanto da figura 40 como da 41 que houve o descolamento da emenda dentada, o que não deve ocorrer.



Figura 40 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano



Figura 41 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo de poliuretano



Figura 42 – Ruína da viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano

As figuras 43 e 44 apresentam vigas com alma de madeira serrada e vão de 2,88 m a ruína ocorreu por causa do cisalhamento longitudinal da alma. Por causa desse tipo de ruína concluí-se que a madeira serrada não deve ser utilizada em vigas H20 porque em fôrmas os vãos são pequenos, então o esforço solicitante predominante é o cortante, e a alma de madeira serrada tem pouca resistência ao cisalhamento.



Figura 43 – Ruína de uma viga com alma de madeira serrada colada com adesivo a base de resorcinol-formol



Figura 44 – Ruína de uma viga com alma de madeira serrada colada com adesivo a base de poliuretano

Pela figura 44 pode-se notar que a viga iniciou sua ruptura na emenda, mas não houve descolamento o que indica que o adesivo a base de resorcinol-formol

teve um desempenho melhor em comparação ao adesivo à base de poliuretano como visto nas figuras 40, 41, 44 e 46.



Figura 45 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de resorcinol-formol



Figura 46 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano

A figura 47 mostra uma ruptura da mesa superior por tração normal às fibras, isso pode ter ocorrido devido a defeitos de fabricação da vigas por causa de imperfeições geométricas.



Figura 47 – Ruína de uma viga com alma de compensado laminado colada com adesivo a base de poliuretano

5.5.1. Viga de 1,20 m colada com adesivo de poliuretano

5.5.1.1. Com alma de painel compensado sarrafeado.

A tabela 26 apresenta os resultados das vigas montadas com alma de compensado sarrafeado, emenda em cunha entre a mesa e a alma, emenda dentada para mesa/mesa, com 28 mm de comprimento de dente e colada com a utilização do adesivo de poliuretano. Essa configuração de viga com vão de 1,2m apresentou o momento fletor muito abaixo do mínimo requerido pela norma europeia EN 13377:2002 que é de 11kNm.

Tabela 26 – Viga H20 (alma de compensado sarrafeado, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	22,4	4,5	9,98
Viga2	22,9	4,6	10,29
Viga3	28,9	5,8	12,96
Viga4	35,9	7,2	16,01
Viga5	21,8	4,4	9,82
Viga6	38,1	7,6	17,16
Viga7	25,6	5,1	11,54
Viga8	30,5	6,1	13,75
Média	28,2	5,6	12,7
Desvio Padrão	6,2	1,2	2,8
C.V	22,0%	22,0%	22,1%

5.5.1.2. Com alma de compensado laminado

Já nas vigas cujos resultados estão na tabela 27, os valores foram acima do requerido pela norma EN 13377:2002 e com pequenos coeficientes de variação, o que indica uma maior confiabilidade nos resultados. Então, para vãos de até 6 vezes a altura da viga, as vigas com alma de compensado laminado com emenda mesa/alma dentada com 28 mm de comprimento de dente, emenda mesa/mesa também dentada com comprimento de 28 mm de dente e colada com adesivo de poliuretano é uma boa alternativa.

Tabela 27 – Viga H20 (alma de compensado laminado, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	57,0	11,4	24,18
Viga2	60,8	12,2	26,42
Viga3	62,4	12,5	27,05
Viga4	68,4	13,7	29,45
Viga5	60,2	12,0	25,17
Viga6	54,8	11,0	24,14
Viga7	60,2	12,0	26,54
Viga8	66,2	13,2	29,81
Viga9	56,4	11,3	23,22
Viga10	55,4	11,1	23,90
Média	60,2	12,0	26,0
Desvio Padrão	4,52	0,90	2,30
C.V	7,5%	7,5%	8,8%

5.5.1.3. Com alma de madeira serrada

As vigas cujos resultados estão na tabela 28, obtiveram valores menores do requerido pela norma, então para pequenos vãos as vigas com alma de madeira serrada com emenda mesa/alma dentada com 28 mm de comprimento de dente, emenda mesa/mesa também dentada com comprimento de 28 mm de dente e colada com adesivo de poliuretano não é recomendada.

Tabela 28 – Viga H20 (alma de madeira serrada, vão de 1,20m e adesivo a base de poliuretano)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	54,3	10,9	23,22
Viga2	46,7	9,3	21,01
Viga3	45,6	9,1	20,46
Viga4	50,5	10,1	21,35
Viga5	41,3	8,3	18,41
Viga6	58,1	11,6	24,68
Viga7	48,7	9,7	20,95
Viga8	45,6	9,1	20,07
Viga9	36,4	7,3	15,72
Viga10	54,8	11,0	23,71
Média	48,2	9,6	21,0
Desvio Padrão	6,55	1,31	2,62
C.V	13,6%	13,6%	12,5%

5.5.2. Viga de 1,20 m colada com adesivo de resorcinol-formol

5.5.2.1. Com alma de painel compensado sarrafeado

Esta viga, com a mesma configuração à da tabela 26, exceto quanto ao adesivo utilizado que foi o de resorcinol-formol, também apresentou resultados menores que os mínimos exigidos pela norma, conforme apresentado na tabela 29.

Tabela 29 – Viga H20 (alma de compensado sarrafeado, vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	45,6	9,1	18,3722
Viga2	48,9	9,8	19,7887
Viga3	37,0	7,4	14,8953
Viga4	26,1	5,2	10,5432
Viga5	27,2	5,4	10,7353
Viga6	21,8	4,4	8,6246
Viga7	27,2	5,4	10,9327
Viga8	29,4	5,9	11,7597
Média	32,9	6,6	13,2
Desvio Padrão	9,8	2,0	4,0
C.V	29,9%	29,9%	30,6%

Conclui-se que, independente do adesivo utilizado, o painel de compensado sarrafeado não deve ser utilizado para a montagem de vigas H20.

5.5.2.2. Com alma de compensado laminado

Assim como as vigas da tabela 27, as da tabela 30 obtiveram resultados acima do requerido pela norma e com baixos coeficientes de variação.

Tabela 30 – Viga H20 (alma de compensado laminado vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	74,9	15,0	30,47
Viga2	68,4	13,7	28,21
Viga3	66,2	13,2	27,01
Viga4	66,2	13,2	27,26
Viga5	65,7	13,1	26,41
Viga6	55,9	11,2	22,67
Viga7	60,8	12,2	25,57
Viga8	54,8	11,0	23,31
Viga9	63,3	12,7	26,01
Viga10	57,5	11,5	23,48
Média	63,4	12,7	26,0
Desvio Padrão	6,21	1,24	2,41
C.V	9,8%	9,8%	9,3%

Então, para pequenos vãos, as vigas com alma de compensado laminado, emendas mesa/alma e mesa/mesa dentadas, coladas tanto com resorcinol-formol quanto com adesivo de poliuretano são de boa alternativa para a fabricação da H20.

5.5.2.3. Com alma de madeira serrada

Diferentemente da viga com alma de madeira serrada colada com adesivo de poliuretano, a viga da tabela 31 colada com resorcinol-formol, obteve resultados acima do esperado e pequenos coeficientes de variação.

Tabela 31 – Viga H20 (alma de madeira serrada vão de 1,20m e adesivo a base de resorcinol-formol)

	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	55,9	11,2	24,00
Viga2	55,4	11,1	24,28
Viga3	60,2	12,0	25,84
Viga4	57,0	11,4	25,34
Viga5	65,1	13,0	28,92
Viga6	73,7	14,7	32,10
Viga7	54,8	11,0	24,26
Viga8	59,2	11,8	27,39
Viga9	64,9	13,0	28,43
Viga10	61,6	12,3	26,99
Média	60,8	12,2	26,8
Desvio Padrão	5,87	1,17	2,57
C.V	9,7%	9,7%	9,6%

5.5.3. Viga de 2,88 m colada com adesivo a base de poliuretano

5.5.3.1. Com alma de compensado sarrafeado

A viga H20 com vão de 2,88 metros com alma de painel compensado sarrafeado e colada com adesivo a base de poliuretano (tabela 32) não apresentou os resultados mínimos exigidos pela norma EN 13377:2002.

Tabela 32 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de painel compensado sarrafeado e adesivo a base de poliuretano)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	7959,3	18,6	6,7	14,4
Viga2	8928,4	18,7	6,7	14,3
Viga3	8510,9	19,0	6,9	14,5
Viga4	8711,9	18,6	6,7	14,2
Viga5	7666,3	19,0	6,9	14,5
Viga6	8776,0	21,7	7,8	16,6
Viga7	10963,1	30,2	10,9	23,1
Viga8	8645,6	19,0	6,9	14,8
Média	8770,2	20,6	7,4	15,8
Desvio Padrão	985,4	4,0	1,4	3,1
C.V	11,2%	19,4%	19,4%	19,3%

5.5.3.2. Com alma de compensado laminado

A viga com vão de 2,88 metros, alma de compensado laminado e colada com adesivo de poliuretano (tabela 33) também não teve o resultado mínimo exigido, então apesar dessa configuração ter bom desempenho para pequenos vãos, não teve o mesmo desempenho quando o momento fletor era o esforço solicitante preponderante.

Tabela 33 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado laminado e adesivo a base de poliuretano)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	8737,1	21,7	7,8	16,98
Viga2	8048,8	18,7	6,7	14,37
Viga3	11015,7	21,2	7,6	16,41
Viga4	9277,9	19,4	7,0	14,56
Viga5	7209,6	22,8	8,2	17,56
Viga6	10347,1	36,3	13,1	27,92
Viga7	10469,4	26,9	9,7	21,20
Viga8	11134,2	22,8	8,2	17,92
Viga9	10756,3	35,3	12,7	27,17
Viga10	11068,6	25,0	9,0	19,59
Média	9806,5	25,0	9,0	19,4
Desvio Padrão	1402,69	6,18	2,23	4,78
C.V	14,3%	24,7%	24,7%	24,7%

5.5.3.3. Com alma de madeira serrada

A tabela 34 apresenta a viga com alma de madeira serrada e colada com adesivo de poliuretano e os resultados não foram os esperados.

Para vãos de 2,88m, nenhuma das vigas coladas com adesivo a base de poliuretano obteve os resultados mínimos, então se recomenda a utilização de outra cola ensaiada.

Tabela 34 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de madeira serrada e adesivo a base de poliuretano)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	12182,4	20,1	7,2	17,06
Viga2	10998,5	30,4	10,9	24,00
Viga3	11398,7	25,0	9,0	20,07
Viga4	10691,7	18,6	6,7	14,75
Viga5	10457,9	19,0	6,9	15,15
Viga6	11430,2	19,9	7,2	16,13
Viga7	8506,7	29,9	10,7	23,75
Viga8	13111,3	26,1	9,4	20,81
Viga9	11056,3	20,7	7,4	16,25
Viga10	11751,9	29,9	10,7	23,57
Média	11158,6	23,9	8,6	19,2
Desvio Padrão	1207,49	4,85	1,75	3,73
C.V	10,8%	20,3%	20,3%	19,5%

5.5.4. Viga de 2,88 m colada com adesivo de resorcinol-formol

5.5.4.1. Com alma de compensado sarrafeado

Já as vigas de vão de 2,88 metros com alma de painel compensado sarrafeado e colada com resorcinol-formol atingiram os resultados esperados. O compensado sarrafeado só obteve os valores médios esperados nesse caso. O vão grande faz com que a influência da força cortante seja desprezível.

Tabela 35 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado sarrafeado e adesivo a base de resorcinol-formol)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	8405,1	28,8	10,4	21,6
Viga2	11353,9	33,1	11,9	24,8
Viga3	8918,4	34,2	12,3	25,3
Viga4	9252,6	32,6	11,7	24,5
Viga5	8427,8	33,6	12,1	24,9
Viga6	10045,4	36,9	13,3	26,6
Viga7	11688,3	43,9	15,8	34,6
Viga8	10685,2	49,3	17,8	38,6
Média	9847,1	36,5	13,2	27,6
Desvio Padrão	1293,5	6,8	2,4	5,8
C.V.	13,1%	18,5%	18,5%	21,1%

5.5.4.2. Com alma de compensado laminado

A viga de vão de 2,88 metros com alma de compensado laminado e colada com resorcinol-formol (tabela 36) teve um bom desempenho também. Essa configuração de viga apresentou os valores mínimos exigidos tanto para o vão de 2,88 metros como para o vão de 1,2 metros, e foi a configuração de materiais e emendas com melhores resultados.

Tabela 36 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de compensado laminado e adesivo a base de resorcinol-formol)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	9962,4	44,5	16,0	33,28
Viga2	10156,3	30,9	11,1	23,48
Viga3	9321,7	30,6	11,0	23,10
Viga4	10161,5	31,0	11,2	23,54
Viga5	9076,8	39,1	14,1	29,40
Viga6	9724,2	34,2	12,3	25,63
Viga7	10034,7	36,7	13,2	27,46
Viga8	10301,2	35,8	12,9	26,36
Viga9	10139,1	38,0	13,7	27,73
Viga10	10226,1	34,7	12,5	26,31
Média	9910,4	35,5	12,8	26,6
Desvio Padrão	411,30	4,31	1,55	3,11
C.V	4,2%	12,1%	12,1%	11,7%

5.5.4.3. Com alma de madeira serrada

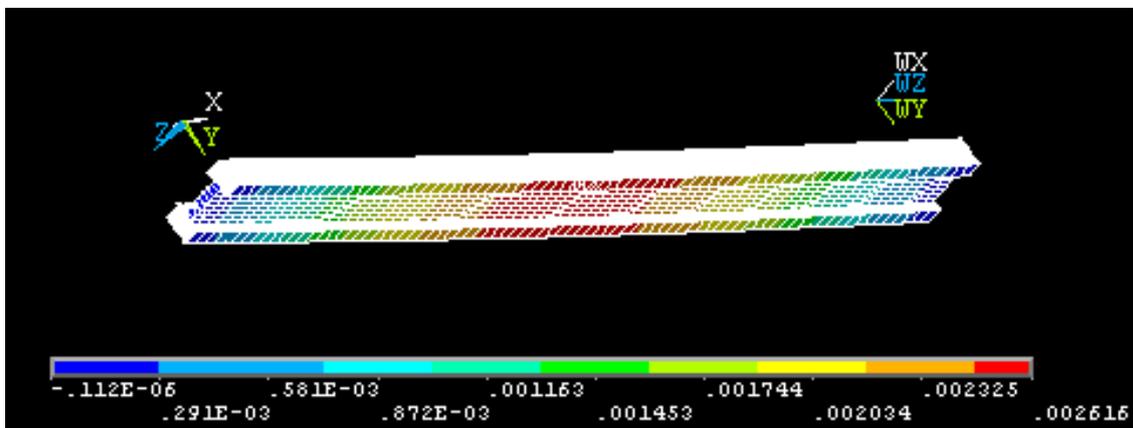
As vigas de vão de 2,88 metros com alma de madeira serrada e colada com adesivo a base de resorcinol-formol (tabela 37), também obtiveram bons resultados. Esse adesivo geral teve melhores resultados e se mostrou o mais recomendado para a construção de vigas H20 com finalidade estrutural.

Tabela 37 – Viga H20 (vão de 2,88m, com alma de madeira serrada e adesivo a base de resorcinol-formol)

	MOE (MPa)	F _{máx.} (kN)	M _{máx.} (kN.m)	MOR (MPa)
Viga1	11010,5	51,0	18,3	39,28
Viga2	9507,3	33,6	12,1	25,29
Viga3	10043,6	32,8	11,8	25,70
Viga4	10205,2	34,2	12,3	25,60
Viga5	8904,5	31,6	11,4	24,20
Viga6	12028,0	44,5	16,0	35,60
Viga7	9264,0	36,9	13,3	27,77
Viga8	11834,3	35,8	12,9	26,38
Viga9	12155,7	47,2	17,0	34,57
Viga10	11301,0	35,9	12,9	27,25
Média	10625,4	38,3	13,8	29,2
Desvio Padrão	1199,78	6,71	2,42	5,28
C.V.	11,3%	17,5%	17,5%	18,1%

5.6. Análise numérica x experimental

Para a análise numérica, foi escolhida uma viga H20 de vão de 2,88 m para demonstrar que os resultados numéricos foram próximos aos experimentais. Foi feita a comparação dos deslocamentos encontrados no laboratório com os deslocamentos encontrados pelo programa ANSYS. A figura 37 apresenta uma viga H20 processada pelo ANSYS, onde as cores representam os deslocamentos sendo os menores em azul, até a cor vermelha representando o maior, que ocorre no centro do vão.



Medidas em metros.

Figura 48 – Deslocamentos de uma viga processada no ANSYS.

A figura 38 apresenta os diagramas de força x deformação experimentais e os obtidos pela análise numérica.

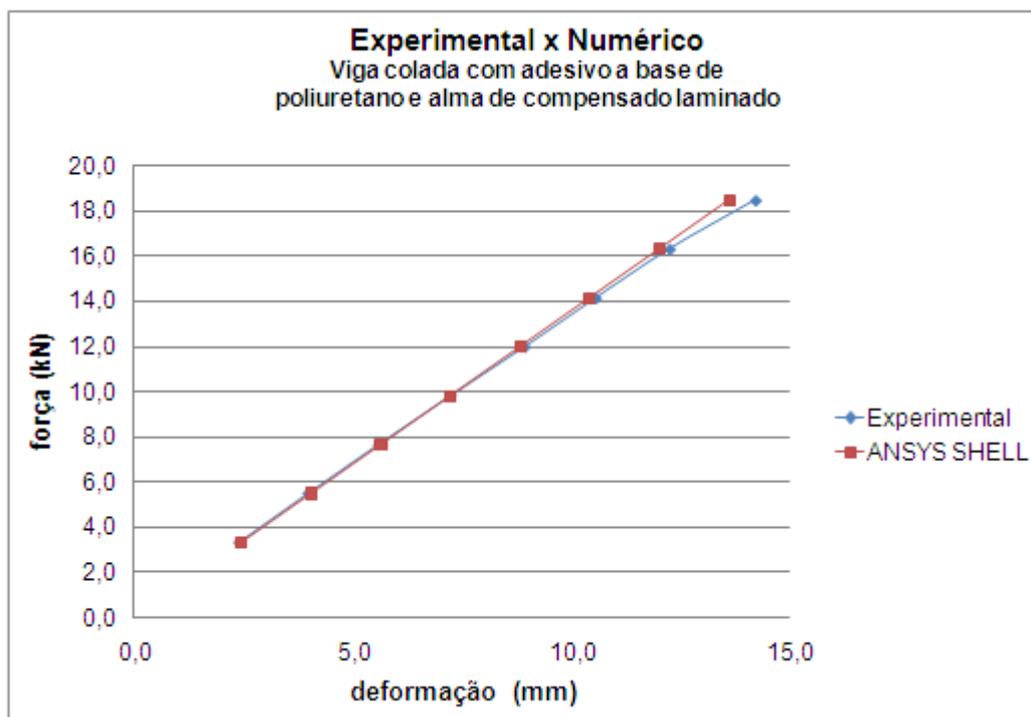


Figura 49 – Comparativo Experimental x Numérico.

A viga com a alma de compensado laminado apresentou os menores erros em relação aos outros materiais de alma, o que mais uma vez comprova o melhor comportamento deste material.

Os resultados experimentais foram próximos dos resultados numéricos, com exceção dos resultados para algumas das forças iniciais, pois nessa fase pode ter ocorrido a acomodação das fibras da madeira e das emendas fazendo os resultados se diferirem do numérico, e também os resultados começaram a se distanciar quando a carga atingiu 16 kN porque o programa leva em consideração apenas a fase em que o material está até a ruptura no regime elástico, o que não ocorre, provavelmente onde começou a diferir o experimental do numérico foi onde o material passou do regime elástico para o regime plástico.

5.7. Discussão

Para a viga de perfil “I” foram feitos os ensaios de caracterização do *Pinus Oocarpa*, na sua forma maciça, para o conhecimento da viga como um todo. Esta caracterização foi utilizada na escolha das mesas, descartando as com resistência menor e homogeneizando as vigas.

As mesas apresentaram boa resistência em comparação com a resistência média da espécie *Pinus Oocarpa*. Como a resistência à compressão encontrada nos ensaios foi alta, significa a existência de uma relação de peso/resistência menor, o que caracteriza vigas mais eficientes já pela mesa, e ainda mais pela forma da seção transversal considerada.

As resistências à compressão das mesas de 1,5 metro de comprimento foram em média, de 48,32 MPa com um desvio padrão de 9,82 MPa, e das vigas com 3 metros de comprimento foi de 43,14 MPa com desvio padrão de 6,68 MPa.

No cálculo da viga de perfil “I”, a alma não é considerada, segundo a norma NBR 7190:1997, mas como essa absorve uma parte do momento fletor e com isso, parte da tensão de compressão e tração que age na mesma, deveria também ser considerada. Esta consideração deve ser feita com a ponderação das diferenças de módulo de elasticidade dos materiais que compõe a seção transversal da viga, sendo que para isso é utilizado um coeficiente que relaciona os módulos de elasticidade dos materiais envolvidos, as áreas e os momentos de inércia.

As resistências à compressão das almas foram as seguintes: para o compensado laminado de 21,89 MPa com desvio padrão de 1,37 MPa, para o compensado sarrafeado de 34,7 com desvio padrão de 3,98 MPa e para a madeira serrada de 50,77 MPa e desvio padrão de 6,91 MPa e, como apenas uma pequena parte do momento fletor é absorvida, a resistência à compressão foi satisfatória. A alma sofre tensões de cisalhamento quando aplicadas forças sobre elas e também quando aplicados momentos fletores. As resistências ao cisalhamento dos painéis foram: para o compensado laminado de 11,07 MPa com desvio padrão de 1,52 MPa, para o compensado sarrafeado de 5,25 MPa com desvio padrão de 1,27 MPa e para a madeira serrada de 9,89 MPa e desvio padrão de 1,00 MPa.

Para a montagem da viga de perfil “I”, foram utilizados dois tipos de adesivo, o de resorcinol-formol e o de poliuretano.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com resorcinol-formol e com alma de compensado laminado e de 1,20 metro de vão foi em média de 10,41 MPa com um desvio padrão de 1,77 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 6,3 MPa com desvio padrão de 0,99 MPa.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com resorcinol-formol e com alma de compensado sarrafeado e de 1,20 metro de vão foi em média de 6,71 MPa com um desvio padrão de 0,95 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 8,43 MPa com desvio padrão de 1,17 MPa.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com resorcinol-formol e com alma de madeira serrada e de 1,20 metro de vão foi em média de 14,65 MPa com um desvio padrão de 1,41 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 9,45 MPa com desvio padrão de 1,57 MPa.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com poliuretano e com alma de compensado laminado e de 1,20 metro de vão foi em média de 10,48 MPa com um desvio padrão de 2,10 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 8,43 MPa com desvio padrão de 1,19 MPa.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com poliuretano e com alma de compensado sarrafeado e de 1,20 metro de vão foi em média de 6,83 MPa com um desvio padrão de 3,17 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 3,47 MPa com desvio padrão de 1,19 MPa.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola das vigas H20, coladas com poliuretano e com alma de madeira serrada e de 1,20 metro de vão foi em média de 14,12 MPa com um desvio padrão de 1,41 MPa, e das vigas com 2,88 metro de vão foi em média de 9,03 MPa com desvio padrão de 1,40 MPa.

Apesar da configuração de ensaio com alma de compensado laminado e colada com adesivo resorcinol-formol não ter os melhores resultados no ensaio de cisalhamento o conjunto obteve o melhor desempenho geral.

Nos ensaios de tração da emenda dentada nos corpos-de-prova das mesas, obteve-se resistência média de 19,46 MPa com o uso do adesivo resorcinol-formol,

resistências menores foram detectadas quando existiam defeitos na madeira, como nós. Com o uso do adesivo poliuretano obteve-se resistência média de 12,61 MPa, valores inferiores também ocorreram quando havia defeitos na madeira. Obtiveram-se valores, de resistência à tração, não muito elevados quando comparados aos da madeira sem emendas, porém este fator não foi determinante no uso das vigas de perfil “I”.

6. Conclusão

O adesivo à base de resorcinol-formol mostrou-se mais adequado para a utilização na montagem das vigas H20, pois transmite melhor as tensões entre as partes que o adesivo a base de poliuretano.

A melhor combinação de materiais encontrada neste trabalho para a fabricação das vigas H20, independente do vão e do adesivo utilizado, foi alma de painel de compensado laminado e a emenda entre a mesa e a alma foi a dentada. Todas as mesas utilizadas foram com madeira serrada de *Pinus Oocarpa*.

As outras combinações não tiveram o mesmo desempenho e os valores exigidos para a viga H20, em alguns dos ensaios. As vigas compostas de alma de compensado sarrafeado ruíram devido à ruptura da alma, principalmente naquelas com vão menor. A ruptura ocorre devido à defeitos existentes no painel, o que justifica a recomendação que este tipo não deve ser utilizado para a montagem de vigas de perfil “I” para o sistema de fôrmas, levando-se ainda em consideração que nesse sistema as vigas H20 são muito utilizadas para pequenos vãos, em que o esforço solicitante predominante é o cortante. Este tipo de painel é composto por sarrafos internamente e os sarrafos deveriam ser colados entre si, portanto, os painéis apresentam uma seção resistente ao cisalhamento diminuída entre um sarrafo e outro.

A alma de madeira serrada não deve ser utilizada devido ao fato de que, a sua resistência ao cisalhamento paralelo as fibras é pequena e o modo de ruptura ocorrer justamente por tensões tangenciais.

Recomendações para pesquisas futuras

- Estudar modos de melhorar a emenda em cunha, como, mudar a sua geometria.
- E estudar o efeito de se fazer um friso ao longo da peça antes da colagem.

Referências Bibliográficas

AMBIENTE BRASIL S/S LTDA. **Pinus na silvicultura brasileira**. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 03 de abril de 2010.

APA WOOD. ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Engineered Wood Systems. APA Performance Rated I-Joists**. Disponível em: <<http://www.apawood.org/pdfs/managed/Z725A.pdf>> Acesso em 29 de março 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **ABNT NBR 7190 – Projeto de estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro. BR. 1997.

BATTISTELLA. 2007. Disponível em: <http://www.bicmadeiras.com.br/prod/06_MadEmend/06_InMadEme.html> . Acesso em: 20 junho 2007

CALDEIRA, Rita de Cássia Spironelli Ramos. **Apostila de Materiais de Construção I A – Engenharia Civil**. UEL. 2004.

CALIL JR., Calil. **Fôrmas de madeira para concreto armado**. São Carlos. SP: Editora da EESC-USP. 1999. (Notas de Aula).

CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação de peças estruturais de Pinus Spp**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. SP.

CICHINELLI, Gisele. **Evolução do OSB**. Disponível em: <http://www.portalosb.com/interna.asp?sec=3&sub=visao_geral&link=evolucao_osb> . Acesso em 28 março 2007.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Determination of some physical and mechanical properties of structural timber and glued laminated timber. CEN: prEN-408**. 2004.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **Prefabricated timber formwork beams. Requirements, classification and assessment. EN 13377**. 2002.

DOKA. **Dokaflex 1-2-4**. Disponível em: <http://www.doka.com/doka/pt/products/floor/flex_124/index.php> Acesso: 29 de janeiro de 2010.

FINNFOREST. Jular Madeiras. **Finnframe LVL I-JOIST na vanguarda da construção em madeira.** Disponível em: <<http://www.jular.pt>>. Acesso em: 02 de novembro 2009.

GABRIEL, Joseph. **1C PUR a tecnologia de hoje e amanhã.** Switzerland: PURBOND. [2000?].

HEXION QUÍMICA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

LEICHTI, Robert J.; FALK, Robert H.; LAUFENBERG, Theodore L. **Prefabricated wood I-joist: an industry overview.** Forest Products Journal. Vol.40. n°3. Madison: Forest Products Research society. 1990.

LOTURCO. Bruno. **Fôrmas. Madeira ou Metal?** Técnica. São Paulo. v79. Outubro 2003.

MACEDO, Alcebíades Negrão; CALIL JR., Cartilo. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997.** Cadernos de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos. n°7. 1999.

MARANHÃO, George Magalhães. **Fôrmas para Concreto: Subsídios para a Otimização do Projeto Segundo a NBR 7190/97.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. SP. 2000.

MEDRADO, Moacir J. S. **Cultivo do Pinus.** disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/apresentacao.htm>>. Acesso em: 15 out. 2008.

NAKAMURA, Juliana. **Fôrmas.** Técnica. São Paulo. v79. Outubro 2003.

PEDROSA, Alexandre de Luna. **Performance de Vigas “i” Constituída por Flanges de FLP e almas de compensado de Pinus Taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden e Alma de OSB de Pinus Spp.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal Do Paraná. Paraná. 2003.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de Madeira.** 6. ed.. Rio de Janeiro: LTC. 2003.

RAMOS E VARELA, S.A. **Sistema Multiflex para Lajes Vigas H20/ Vt20**. RV-41-V1.2. [S.l.:s.n.]. [200-?].

REMADE. **LVL**. Edição N°71. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=329&subject=LVL&title=Pain%C3%A9is%20Laminados%20Estruturais.%20LVL%27s> Acesso: 10 de julho de 2009.

RODRIGUES, Fernando. **Fôrmas e escoramentos ganham confiabilidade**. 2009. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/formas-e-escoramentos-ganham-confiabilidade/>> acesso: 25 de fevereiro de 2010.

SILVA, Cátia da Costa e – **Emendas em vigas de seção transversal “I” em madeira**. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina.

STANDART STRUCTURES. INC. SSI. **SSI I-Joist and SSI I-Purlin**. Disponível em: <<http://www.standardstructures.com/products/ljc/ssij.html>>. Acesso em: 22 de abril de 2009.

STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION. **History of Oriented Strand Board**. Disponível em: <<http://www.osbguide.com/osbhistory.html>>. Acesso em: 09 junho 2007.

STURGES, H. – **The choice of a class-interval**. 1926. J. Amer. Statist. Assoc.

TRADA. **Introduction to wood-based panel products**. TRADA Technology. WIS 2/3-23. 2003.

WIJMA (**Wood I-Joist Manufacturers Association**) (2001). Disponível em: <<http://www.i-joist.org/benefits.asp>>. Acesso em: 16 maio 2007

WOOD HAND BOOK. **Wood as an Engineering Material**. General Technical Report FPL-GTR-113. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 1999.

Bibliografia

ABIMCI (Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente). **Fluxograma de produção de madeira serrada**. Artigo técnico nº. 18. Maio 2004. Disponível em: <http://www.abimci.com.br/produtos/produtos_madeira_serrada_pinus.html>. Acesso em: 03 de maio de 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Committee D7 on Wood. Subcommittee D07.02 on Lumber and Engineered Wood Products. **D198 – Standard methods of static tests of lumber in structural sizes**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. USA. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Committee D7 on Wood. Subcommittee D07.02 on Lumber and Engineered Wood Products. **D905 – Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. USA 1981.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Committee D7 on Wood. Subcommittee D07.02 on Lumber and Engineered Wood Products. **D4688 – Standard test method for evaluating structural adhesives for finger joint lumber**. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. USA 1999.

CALIL JR., Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. 1.ed. São Paulo. Editora Manole Ltda.. 2003.

CANADIAN WOOD COUNCIL. **Introduction to wood design: A learning guide to complement the wood Design Manual**. Ottawa: CWC. 1999

CANADIAN WOOD COUNCIL. **Wood Design Manual: The complete reference for wood design in Canada**. Ottawa: CWC. 2001

DOKA. **Vigas de cofragem**. Disponível em: <<http://www.doka.com/doka/br/products/components/beams/index.php>> Acesso: em 22 de março de 2008.

DOKA. **Novidades Doka**. Folheto nº1. Disponível em: <<http://www.doka.com>> Acesso: 05 de junho de 2009.

GALLIGAN, W.L. et al. **Wood Joist Floors: Probabilistic Analysis of Joist Stiffness Measured at Retail**. Research Paper FPL 402. Madison: United States Department of Agriculture. 1982

GOES, Jorge Luís Nunes de. **Análise de Vigas de Madeira Pregadas com Seção Composta I**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – EESC-USP. São Paulo. 2002.

LEICHTI, Robert J.; FALK, Robert H.; LAUFENBERG, Theodore L, **Prefabricated wood composite I-beams: a literature overview**. Wood and Fiber Science. 1990.

LEICHTI, Robert J.; FALK, Robert H.; SHARP, D.J. **Wood I-joists: a look at research and production in North America**. Forest Products Journal. Vol.2. Tokyo: Steering Committee of the International Timber Engineering Conference. 1990.

LUITZ, Susan. **Fôrmas**. Trabalho Para a Disciplina Construção Civil II – Engenharia Civil. UEL. 2007.

NASCIMENTO, Alexandre Miguel do. LUCIA, Ricardo Marius Della. VITAL, Benedito Rocha. **Colagem de emenda biseladas em madeira de *Pinus Spp.* E *Eucalyptus citridora***. Floresta e Ambiente Vol. 8. n.1. p44 – 51. 2001.

NATTERER, Julius. **Carbon Emissions**. IBOIS 22 janeiro 1992.

OZELTON, E.C.; BAIRD, J.A. **Timber Designers Manual**. London: Granada Publishing Limited. 1976

SILVA, Cátia da Costa e; PLETZ, Everaldo; MOURA, Jorge Daniel de Melo - **Emendas em vigas de seção transversal “I” em madeira**. EBRAMEM – Encontro Brasileiro de Madeira e Estrutura de Madeira. 2008.

VABDERBILT, M.D.; CRISWELL, M.E.; BODING, J.; GROMALA, D.S. **Stiffness and Strength of Uniformly Loaded Floors with In-grade Lumber**. Research Paper FPL 440. Madison: United States Department of Agriculture. 1983.

WILEY, John. **Timber Construction Manual**. Canada: American Institute of Timber Construction. 1974