



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

APLICAÇÃO DE CONECTORES METÁLICOS PARA
TABULEIROS MISTOS DE PONTES DE MADEIRA E
CONCRETO PARA ESTRADAS VICINAIS

Marcia Almeida de Amaral Arcos da Silva

Manaus
2012

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Silva, Marcia Almeida de Amaral Arcos da

A586a Aplicação de conectores metálicos para tabuleiros mistos de pontes de madeira e concreto para estradas vicinais / Marcia Almeida de Amaral Arcos da Silva. - Manaus: UFAM, 2012.

110 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

Co-orientador: Dr. Julio Cesar Molina

1. Vigas mistas 2. Madeira - Propriedades 3. Conectores de cisalhamento I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de (Orient.) II. Molina, Julio Cesar (Co-orient.) III. Universidade Federal do Amazonas IV. Título

CDU 624.072.2(043.3)



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 02/2012

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 29/06/2012

ALUNO (A): MARCIA ALMEIDA DE AMARAL ARCOS DA SILVA

ORIENTADOR: RAIMUNDO PEREIRA DE VASCONCELOS

CO-ORIENTADOR: JÚLIO CÉSAR MOLINA

BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Presidente)

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo Molina (Membro)

Prof. Dr. Júlio César Molina (Membro Externo)

Prof. Dr. Francisco dos Santos Rocha (Suplente)

TÍTULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: "APLICAÇÃO DE CONECTORES METÁLICOS EM PONTES DE CONCRETO E MADEIRA PARA ESTRADAS VICINAIS NO ESTADO DO AMAZONAS"

LOCAL: Sala de Aula Pós-Graduação do Bloco Prof. Vilar Fiuza da Câmara da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. HORA DE INÍCIO: 09h.

De acordo com o Regimento Interno do Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 50 minutos argüido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

() Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações NECESSÁRIAS CORREÇÕES REALIZADAS PELO BANCA

Manaus, 29 de junho de 2012.

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Presidente)

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo (Membro)

Prof. Dr. Júlio César Molina (Membro Externo)

Discente: Marcia Almeida de Amaral Arcos da Silva



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Marcia Almeida de Amaral Arcos da Silva

**APLICAÇÃO DE CONECTORES METÁLICOS PARA
TABULEIROS MISTOS DE PONTES DE MADEIRA E
CONCRETO PARA ESTRADAS VICINAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos
Co-orientador: Dr. Julio Cesar Molina

Manaus
2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar comigo em todos os momentos.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas (PPGEC/UFAM) pelos serviços de apoio a pesquisa e a pós-graduação.

À, instituição de fomentos CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos pela oportunidade, valiosas orientações e atenção durante a execução da pesquisa.

Ao Dr. Julio Cesar Molina pela orientação, amizade, sugestões durante o desenvolvimento dos ensaios no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

Ao Prof. Dr. Nilton Campelo pelas excelentes aulas e sua dedicação aos alunos.

A todos os professores do PPGEC pelos ensinamentos técnicos.

Ao Prof. Francisco Tarcísio Moraes Mady pela identificação das amostras de madeira retiradas das pontes e por sua atenção.

Ao Prof. Dr. Calito Calil Junior pela atenção especial dedicada.

Ao Dr. Decio Gonçalves pela amizade e sugestões.

A equipe de funcionários da Ufam, Vera Pinto, Nilson, Sr. Nelson, Reinaldo pelo apoio técnico e amizade.

Aos colegas de mestrado Mesaque, Magnólia, Daniele, Severino e Charles pela amizade.

A equipe de funcionários do LaMEM - EESC/ USP: Arnaldo, Manuel, Silvio, Jairo, Roberto, Bragatto e Tânia pelo apoio técnico e amizade.

E como sempre, um agradecimento especial aos meus pais pelo apoio em todos os momentos, exemplo de vida e amor Alberto Lopes do Amaral e Maria José Pereira de Amaral.

Ao meu marido Raimundo Arcos da Silva.

Aos meus irmãos José Adolfo, Vanderlan e Bonfília.

Minha eterna gratidão.

O temor do Senhor é o princípio da sabedoria.
Provérbios 9: 10

RESUMO

Estudos têm mostrado que a utilização conjunta do concreto e da madeira para a obtenção de estruturas mistas é uma solução viável para pontes de vias rurais, apresentando um desempenho satisfatório com uma boa durabilidade, podendo, tornar-se viável também para estradas vicinais no estado do Amazonas. De fato a necessidade da utilização de pontes de médios e pequenos vãos é tanta que muitas vezes a não existência destas pode comprometer o desenvolvimento de um município. Além disso, quando existem, em alguns casos, sua má conservação pode trazer desconforto e risco aos seus usuários. O sistema misto apresenta ótimo desempenho estrutural, é um sistema econômico quando comparado com outras alternativas de construção como o aço e o concreto e apresenta boa durabilidade. Porém, a efetivação desse sistema estrutural deve ser assegurada por meio de uma ligação na interface dos materiais. Por outro lado, as pontes são expostas a condições severas de intemperismo e carregamento, necessitando, desse modo, de estudos cuidadosos para que se possa avaliar com maior precisão os mecanismos da ligação, bem como o comportamento da estrutura mista em toda sua vida útil. No presente trabalho de pesquisa foi realizado um levantamento sobre os sistemas de pontes utilizados na cidade de Manaus-AM assim como do tipo de madeira utilizado na construção destas, a partir dos quais se constatou que ainda existe má utilização da madeira em pontes. Na sequência foram realizados ensaios de cisalhamento em corpos de prova mistos de madeira e concreto com sistema de conexão em “X” composto por parafusos do tipo CS100900, além de ensaios de flexão em vigas mistas com seção T utilizando-se do mesmo sistema de conexão em “X”. Os resultados experimentais de flexão das vigas foram comparados com os resultados analíticos obtidos pelo Modelo de Mohler, que está apresentada no Eurocode 5/1993 e estes apresentaram uma boa concordância para carregamentos de serviço. Portanto, como uma alternativa para solução da má utilização da madeira, neste caso, o sistema de conexão misto madeira e concreto proposto consiste numa excelente alternativa para a utilização em pontes da zona rural de todos os municípios brasileiros, principalmente, em Manaus onde existe uma carência declarada pela utilização desse sistema.

Palavras-chave: vigas mistas, conectores de cisalhamento, resistência, rigidez, pontes.

ABSTRACT

Some studies have shown that the joint use of concrete and wood for composite structures is a viable solution for rural roads, showing a satisfactory performance with good durability, may become viable for roads in the Amazonas State. In fact the need of utilization of bridges with small and medium spans is very large and many times the nonexistence of this kind of bridge can affect the development of a municipality. In addition, the poor conservation of these bridges can bring discomfort and risk to the users. The composite system presents a good structural performance, is an economic system when compared with others alternatives of construction as steel and concrete, and offers good durability. However, the efficiency of this structural system should be ensured by means of a link on the interface of the materials. On the other hand, the bridges are exposed to severe conditions of weather and load requiring careful studies to evaluate with more accuracy the mechanisms of connections between the concrete and wood, as well as the behavior of the composite structure during its useful life. In this work a survey about the constructive systems of the bridges used in the city of Manaus-AM was conducted. It was also evaluated the type of wood used in the construction of these bridges, and it was verified that there is poor utilization of the timber in bridges yet. After that, shear tests in composite specimens of wood and concrete with connection system of the type "X", formed by screws of type CS100900, were carried out. Bending tests on composite beams with cross section T with the same connection system also were carried out. The experimental results from the bending tests were compared with the results obtained by analytical model of Mohler, which is presented in Eurocode 5/1993 standard and these showed a good agreement to service loads. Therefore, the composite system of wood and concrete with metallic connection is an alternative for the bridges of wood used in rural areas of Brazil and mainly in Manaus city where there is a huge need by use of this composite system.

Keywords: composite beams, shear connectors, strength, stiffness, bridges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ponte Km 32 da rodovia AM 010 – localizada no ramal do Breu.	1
Figura 2: Ponte de madeira no Rio Aruanã Piquiá Autazes - AM, 2010.	2
Figura 3: Ponte de madeira serrada Ponte do ramal Km 25 Autazes-AM , 2010.	3
Figura 4: Corte transversal de tronco de árvore..	8
Figura 5: Árvore da espécie Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>).	18
Figura 6: Árvore da Espécie Pequiarana (<i>Caryocar glabrum</i>).	20
Figura 7: Árvore da Espécie Cupiúba (<i>Goupia Glabra</i>).	21
Figura 8: Maçaranduba (<i>Manilkara Longifolia</i>)	22
Figura 9: Muirapiranga (<i>Brosimum rubescens</i>)	23
Figura 10: Mandioqueira (<i>Qualea brevipedicellata</i>).	24
Figura 11: Matamatá (<i>Eschweilera sp</i>).	25
Figura 12: Anani (<i>Symphonia globulifera</i>).	26
Figura 13: Tauari (<i>Cariniana micrantha</i>).	27
Figura 14: Macucu (<i>Licania oblongifolia</i>).	28
Figura 15: Angelim Pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>).	29
Figura 16: Módulos de deslizamento para conectores verticais.	35
Figura 17: Seção transversal da viga equivalente e respectivas tensões internas na seção mista.	35
Figura 18: Tipos de conectores de cisalhamento.	40
Figura 19: Tipos de ligações.	40
Figura 20: Tipos de ligações.	41
Figura 21: Curvas de cargas versus deslocamento para diversos tipos de conectores obtidos através de resultados experimentais. Fonte: PIGOZZO (2004).	41
Figura 22: Corpos de prova.	42
Figura 23: Detalhes dos corpos de prova.	44
Figura 24: Confecção das vigas mistas	46
Figura 25: Modelo reduzido da ponte madeira e concreto.	47
Figura 26: Corpo de prova mistos para ensaios preliminares.	48
Figura 27: Detalhe da flexão no corpo de prova – CP1.	50
Figura 28: Detalhe da ruptura de aço após os ciclos de carga.	50
Figura 29: Detalhe das fissuras no corpo de prova – CP2.	50
Figura 30: Corpo de prova com conectores em “X”.	51
Figura 31: Detalhes das vigas mistas.	53
Figura 32: Detalhes de confecção das vigas mistas.	54
Figura 33: Detalhe da viga de madeira e concreto.	55

Figura 34: Localização da área de algumas pontes na Rodovia 174 e AM 010.....	56
Figura 35: Localização da área de algumas pontes na Rodovia 319 no Município de Careiro da Várzea.	57
Figura 36: Corpos de prova para determinação da umidade.	58
Figura 37: Corpo de prova para determinação da densidade.	59
Figura 38: Corpo de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.....	60
Figura 39: Ensaio de resistência à tração paralela às fibras e dimensão das amostras.....	61
Figura 40: Ensaio e dimensões das amostras para ensaios de cisalhamento paralelo às fibras.....	62
Figura 41: Ensaio de flexão na viga de madeira.	64
Figura 42: Detalhes do ensaio de caracterização do concreto.....	65
Figuras 43: Conectores CS100900 do tipo parafuso.	65
Figura 44: Execução dos corpos de prova.....	66
Figura 45: Corpos de prova de cisalhamento.	67
Figura 46: Configuração do corpo de prova CPI.	67
Figura 47: Barras de ferros usados nas armaduras dos corpos de prova.	68
Figuras 48: Preparação dos corpos de prova mistos.....	68
Figura 49: Configuração para CPII.	69
Figura 50: Ensaio nos corpos de prova mistos.	71
Figura 51: Configuração para a viga mista.	72
Figura 52: Execução das vigas mistas.....	73
Figura 53: Posicionamento das vigas para a concretagem.	73
Figura 54: Concretagem das vigas mistas.	74
Figura 55: Pórtico de reação com cilindro hidráulico.	75
Figura 56: Ensaio de flexão da Viga Mista.	76
Figuras 57: Ponte Ramal do Pau Rosa - Manaus – AM.....	77
Figura 58: Torquato Tapajós Pontes próximo a BR 174 posto da polícia federal saída de Manaus-AM.	78
Figura 59: Ponte do ramal 32 lado direito sentido Autazes.....	78
Figura 60: Curva tensão-deformação para um corpo de prova de concreto.....	82
Figura 61: Curvas forças x deformação para CPI com dois pares de conectores.....	83
Figura 62: Curva força x deslocamento - CPI.....	83
Figura 63: Curvas forças x deformação para CPII com quatro pares de conectores.....	84
Figura 64: Força x deslocamento - CPII.	84
Figura 65: Embutimento do conector na madeira.	85
Figura 66: Resultados dos ensaios de flexão das vigas mistas.....	86
Figura 67: Comportamento dos conectores das vigas mistas.....	88

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Classificação estrutural da madeira.....	11
Tabela 2: Classe de Risco da Madeira.	13
Tabela 3: Preservativos de madeiras.	14
Tabela 4: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 1 e 2).	15
Tabela 5: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 3 e 4).	15
Tabela 6: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 5).	15
Tabela 7: Produtos preservativos em função das classes de risco (classe de risco 6).	16
Tabela 8: Propriedades de Algumas Espécies de Madeiras.	30
Tabela 9: Classe de umidade da madeira Fonte: NBR 7190/1997.	33
Tabela 10: Resultados Obtidos dos Ensaios dos Corpos de Prova M90.	43
Tabela 11: Resultados Obtidos dos Ensaios dos Corpos de Prova M90C.	44
Tabela 12: Resistência e rigidez dos corpos de prova com conectores em “K”.....	52
Tabela 13: Localização das pontes visitadas.	79
Tabela 14: Valores de resistência à compressão em corpos de prova secos.	80
Tabela 15: Valores de resistência à tração em corpos de prova secos.	81
Tabela 16: Valores de resistência ao cisalhamento em corpos de prova secos.	82
Tabela 17: Valores dos ensaios dos corpos de prova mistos.....	86
Tabela 18: Valores dos ensaios de flexão das vigas mistas.....	86

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	Erro! Indicador não definido.
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELA	v
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos:	5
1.3 Problematização	5
1.4 Justificativa.....	6
1.5 Estruturação do trabalho.....	6
CAPÍTULO 2 – A MADEIRAS COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	8
2.1 Considerações gerais.....	8
2.2 Propriedades físicas das madeiras	9
2.3 Propriedades mecânicas das madeiras	10
2.4 Escolha da espécie de madeira	10
2.5 Classificação estrutural da madeira	10
2.6 Degradação da madeira	11
2.6.1 Preservação da madeira	13
2.6.2 Secagem da madeira.....	17
2.7 Espécies tropicais de madeira utilizadas em elementos estruturais.....	18
2.7.1 Cumaru	18
2.7.2 Pequiarana	19
2.7.3 Cupiúba	20
2.7.4 Maçaranduba	22
2.7.5 Muirapiranga	23
2.7.6 Mandioqueira	24
2.7.7 Matamatá.....	25
2.7.8 Anani	26
2.7.9 Tauari	26
2.7.10 Macucu.....	28
2.7.11 Angelim pedra.....	29
2.7.12 Cumarurana- (<i>Dipteryx polyphylla</i>)	30
CAPÍTULO 3 – ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO.....	31
3.1 Generalidades	31

3.2 Critérios de dimensionamento de estruturas mistas	34
3.2.1 Módulo de deslizamento (K).....	34
3.2.2 Modelo de Mohler.....	35
3.3 Conectores de cisalhamento	38
3.4 Estudos de sistemas mistos de conexões para madeira e concreto realizados no Brasil e no exterior.	42
3.5 Estudos realizados no Estado do Amazonas	53
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	56
4.1 Levantamento de algumas pontes na zona rural de Manaus	56
4.2 Caracterização da madeira	57
4.2.1 Umidade	58
4.2.2 Densidade.....	59
4.2.2.1 Densidade Aparente	59
4.2.3 Compressão paralela às fibras	60
4.2.4 Resistência à tração paralela às fibras	61
4.2.5 Resistência ao cisalhamento.....	62
4.2.6 Ensaio de flexão nas vigas de madeira.....	63
4.3 Caracterização do concreto	64
4.4 Conectores metálicos.....	65
4.4.1 Armaduras de aço para o concreto dos corpos de prova e vigas mistas.....	65
4.5 Corpos de prova mistos	66
4.5.1 Confecção dos corpos de prova mistos	66
4.5.2 Objetivos do ensaio no CPI e CPII.....	70
4.5.3 Execução dos ensaios nos CPI e CPII.....	70
4.6 Confecção das vigas mistas.....	71
4.6.1 Objetivos dos ensaios nas vigas mistas	74
4.6.2 Execução dos ensaios nas vigas mistas	74
Capítulo 5 – RESULTADOS	77
5.1 Tipos de pontes identificadas na região de Manaus	77
5.2 Espécies de madeira encontradas nas pontes pesquisadas	79
5.3 Resultados quanto a caracterização da madeira	80
5.3.1 Umidade	80
5.3.2 Densidade.....	80
5.3.3 Resultados dos ensaios de compressão paralelo às fibras	80
5.3.4 Resultado dos ensaios de tração paralelo às fibras	81
5.3.5 Resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento	82

5.4 Resultado de caracterização do concreto.....	82
5.5 Resultados dos ensaios nos corpos de prova mistos.....	83
5.6 Resultados dos ensaios de flexão nas vigas mistas	86
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES FINAIS	90
6.1 Identificação das pontes	90
6.2 Identificação das madeiras usadas nas pontes identificadas.....	90
6.3 Ensaios dos conectores e do modelo de Mohler.....	91
6.4 Recomendações para futuros trabalhos	91
APÊNDICE A – ESTIMATIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA AS VIGAS MISTAS COM CONECTORES EM “X”	93
REFERÊNCIAS	98

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

Apesar da busca constante por melhorias no sistema de pequenas pontes para vias rurais, com a utilização de novas técnicas, ainda hoje este setor necessita do aprimoramento das técnicas existentes e do avanço da tecnologia. Um exemplo disso é a aplicação relatada por KLAUS (2002) onde a madeira está sendo utilizada juntamente com concreto reforçado com fibras de aço para restaurar antigas construções nas principais cidades alemãs, como Leipzig.

Por outro lado, as pontes das vias rurais são construídas para atender a uma necessidade das comunidades, que em muitos casos não tem outra opção de ligação com as zonas urbanas mais desenvolvidas. Porém, o problema é que, em geral, o tempo de vida útil destas pontes, que na maioria das vezes são construídas de madeira, está muito abaixo do desejável. Isto porque, após a entrega da ponte para a comunidade, esta assume a responsabilidade de fazer a manutenção da mesma. Ocorre, porém, que várias comunidades possuem poucos recursos e pouca capacidade de fazer uma manutenção adequada. Conseqüentemente, o tempo de vida útil cai drasticamente e logo a ponte fica em condições pouco adequadas ao uso.



Figura 1: Ponte Km 32 da rodovia AM 010 – localizada no ramal do Breu, 2012.

A ponte da rodovia AM 010, localizada no Km 32, Ramal do Breu, é um exemplo de ponte que foi construída para atender a uma necessidade urgente da comunidade. Porém, apesar de construída com madeira da espécie cumaru de excelente qualidade, observa-se que esta apresenta acentuado desgaste, ocasionando insegurança aos seus usuários. Isto se deve a ponte estar exposta a fatores ambientais, e sem utilização de tratamento preservativo permitindo assim o ataque biológico, e conseqüentemente redução da vida útil da estrutura conforme mostrado na Figura 1. Os tabuleiros de pranchas serradas e pregadas apresentam soltura das pranchas pela passagem dos veículos.

A ponte sobre o Rio Aruanã Piquiá localizada no ramal do Km 25, margem esquerda sentido Autazes da Rodovia AM – 319, é um outro exemplo dessa situação conforme mostra Figura 2. Esta ponte de madeira foi entregue a comunidade há doze anos e hoje se encontra em condições mínimas de uso, apresentando soltura das pranchas, presença de umidade, partes danificadas etc. Uma solução para este sistema seria a utilização de parafusos auto atarrachantes para fixação das pranchas do tabuleiro nas vigas principais roliças dispostas ao longo do vão da ponte. Vale mencionar que como o sistema de tabuleiros de pranchas apresentam grandes deslocamentos não é possível a utilização de revestimento asfáltico para diminuir o desgaste por abrasão. Porém, uma alternativa muito utilizada, neste caso, e que não apresenta bons resultados, é a utilização de areia como revestimento do tabuleiro que permite a passagem de umidade que atinge as conexões provocando corrosão caso as mesmas não sejam galvanizadas.



Figura 2: Ponte de madeira no Rio Aruanã Piquiá Autazes - AM, 2010.

Outro exemplo é o da ponte localizada no ramal do Km 25, margem direita, sentido Autazes da Rodovia AM – 319, conforme Figura 3. Esta ponte com 8 anos de uso está completamente deteriorada.

O estado atual de degradação destas pontes reflete o uso inadequado da madeira como material estrutural. À medida que o tempo passa as pontes apresentam um processo rápido de deterioração, reduzindo sua vida útil de modo significativo. Assim, devido a esta baixa durabilidade, gradativamente as pontes de madeira estão sendo substituídas por pontes de concreto e de aço para vias rurais.

Porém, as pontes de concreto e as metálicas possuem um custo elevado e devido ao ambiente úmido da floresta nem sempre apresentam a vida útil esperada.

Constata-se assim a urgente necessidade de se implantar nas estradas vicinais os avanços tecnológicos atuais para a construção e recuperação das pontes de madeira. Além disso, a madeira quando bem utilizada é muito competitiva em relação a outras alternativas de construção, tais como o concreto e o aço.

De acordo com CALIL JUNIOR (2006), a maioria das pontes de madeira no Brasil não são projetadas ou construídas por técnicos especializados em madeira. “Isso resulta em estruturas caras, inseguras e de baixa durabilidade“. O contato direto da madeira com o meio ambiente permite a proliferação de micro organismos danosos, ataques de insetos, que juntamente com os fatores climáticos têm contribuído para pequena vida útil das pontes. Existe também o problema de dimensionamento que muitas vezes é ignorado.



Figura 3: Ponte de madeira serrada Ponte do ramal Km 25 Autazes-AM , 2010.

Dentro deste contexto o sistema misto madeira e concreto surge como uma alternativa para melhorar o desempenho e a qualidade das pontes de madeira.

Segundo ALVIM e ALMEIDA (2003), a associação da madeira e do concreto resulta em elementos com excelentes características arquitetônicas e estruturais, além de uma maior automação do sistema construtivo.

Ainda segundo o autor, este tipo de arranjos em pontes e passarelas, que são estruturas expostas ao ar livre, combina-se perfeitamente a leveza da madeira com uma maior resistência do concreto as intempéries, ajudando assim a proteger a madeira da ação da umidade e da radiação solar, e, sobretudo da abrasão provocada pela passagem dos veículos.

No tabuleiro misto de madeira e concreto o sistema trabalha em conjunto, ou seja, enquanto a madeira trabalha na tração, o concreto trabalha na compressão sendo que os conectores de cisalhamento atuam na distribuição de tensões de cisalhamento fazendo com que os materiais trabalhem em conjunto sendo que estes conectores podem ser pregos, parafusos, barras de aço, conector contínuo etc. No entanto, para que os materiais trabalhem em conjunto é necessária a utilização de um sistema de conexão entre os materiais que pode ser do tipo: prego, parafusos, barras de aço, conector contínuo, dentre outros.

De acordo com BRANCO e CRUZ (2003), o conhecimento do comportamento da ligação entre os materiais presentes nas soluções mistas é importante, pois se deve assegurar a eficiência da ligação, cuja função principal é garantir que os dois materiais trabalhem conjuntamente garantindo a eficácia do sistema misto. E ainda segundo o autor, quando a ligação deixa de ser rígida, passando a ter um comportamento semi-rígido, a seção deixa de ser plana fazendo com que apareçam pequenos deslizamentos entre os dois materiais tornando necessário a quantificação do escorregamento relativo entre os dois materiais madeira e concreto.

Segundo MUNGWA (1999) o objetivo de uma estrutura composta é, portanto, estabelecer a harmonia entre os diferentes materiais para que juntos eles consigam satisfatoriamente resistir às forças que estão sujeitos. Isto pode ser alcançado através da combinação racional do conjunto, bem como das propriedades físicas de materiais diferentes, a fim de produzir um elemento estrutural misto cuja resposta é inerentemente superior à dos seus constituintes.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma proposta para os problemas das pontes em madeira utilizadas nas estradas vicinais da zona rural de Manaus. A proposta desta pesquisa foi avaliar o comportamento de vigas mistas compostas de madeira tropical e

concreto de resistência média com sistema de conexão em "X" formado por parafusos do tipo CS100900 para pontes mistas de madeira e concreto. A seguir são apresentados os objetivos, problematização, a justificativa e a estruturação do presente trabalho.

1.2 Objetivos:

Geral

Estudar o comportamento do sistema misto madeira e concreto com conectores metálicos dispostos em "X". Esse comportamento foi avaliado experimentalmente através de ensaios de cisalhamento de corpos de prova e de flexão de vigas para a determinação da resistência e rigidez do conector "X" e conseqüentemente do sistema admitido como um todo.

Específico

- Identificar e cadastrar as pontes localizadas nas principais estradas vicinais da zona rural de Manaus;
- Identificar as espécies de madeira empregadas na confecção das pontes construídas nas estradas vicinais de Manaus e no seu entorno;
- Caracterizar física e mecanicamente o concreto e a madeira para aplicação em tabuleiros de ponte;
- Analisar o comportamento estrutural de corpos de prova mistos e vigas mistas de concreto e madeira com conectores metálicos;
- Analisar o comportamento de conectores de cisalhamento em corpos de prova mistos e em vigas mistas para posterior utilização em pontes de madeira e concreto.

1.3 Problematização

O péssimo estado em que se encontram as estradas e pontes vicinais desestimula a permanência das pessoas nas comunidades rurais, pois dificulta o trânsito, causa desconforto e insegurança às mesmas, além de aumentar os custos dos transportes para os produtores como também os custos de manutenção, onerando os gastos das administrações locais.

Conforme já mencionado, a maioria das pontes de madeira no Brasil não são projetadas nem construídas por técnicos e construtores especializados em madeiras e, por causa disto, as estruturas são quase sempre caras, inseguras e de baixa durabilidade. O estado atual de degradação destas pontes reflete um quadro negativo a respeito das estruturas de

madeira, o qual revela a necessidade de ampliar os estudos de modo a se gerar subsídios para a otimização do projeto, garantindo maior durabilidade e melhor desempenho para tais estruturas.

1.4 Justificativa

As pontes de madeira destinam-se a interligar regiões cuja importância é muito grande para as comunidades que vivem nelas, não podendo ficar sem comunicação. Hoje em dia, ao conceber-se um projeto de engenharia, procura-se ao máximo, aproveitar as propriedades favoráveis dos materiais e minimizar o desperdício. Com isto, no aspecto estrutural, pode-se aumentar a resistência e a rigidez da estrutura; no aspecto ambiental, utilizar de maneira mais racional os materiais.

Uma alternativa está na composição de diferentes materiais de construção como, por exemplo, conceber uma estrutura mista em concreto armado e madeira. Deste modo, busca-se associar a capacidade resistente do concreto à compressão, e a da madeira, à tração. Além disso, a utilização de concreto em conjunto com a madeira proporciona para a madeira proteção contra o desgaste por abrasão, além, de diminuir a vibração da ponte em função da passagem dos veículos. A construção dessas pontes, além de acelerar a evolução econômica pretendida na região, tende a conduzir os seus habitantes ao aperfeiçoamento humano, pois, através da maior facilidade de acesso, além da troca de mercadoria, ocorre maior difusão de aproveitamento dos recursos educacionais, culturais e artísticos, políticos e religiosos, dando às pontes mais simples, valor inestimável, além do ponto de vista meramente financeiro.

1.5 Estruturação do trabalho

Para melhor apresentação da presente pesquisa, esta dissertação foi dividida em seis capítulos, os quais estão estruturados do seguinte modo:

Capítulo 1: Apresenta a introdução, os objetivos gerais e específicos, além da problematização e justificativa do trabalho.

Capítulo 2: Neste capítulo é feita uma descrição das principais características de algumas espécies tropicais de madeira encontradas no Estado do Amazonas e recomendações para melhor utilização da madeira segundo a norma brasileira ABNT NBR 7190/1997.

Capítulo 3: Apresenta uma revisão das principais pesquisas realizadas sobre o tema de estrutura mista de madeira e concreto.

Capítulo 4: Apresenta se neste capítulo a metodologia de ensaio utilizada no presente trabalho.

Capítulo 5: São apresentados as principais discussões sobre os métodos utilizados e são apresentados os principais resultados obtidos.

Capítulo 6: As conclusões e recomendações para futuros trabalhos são apresentadas neste capítulo.

CAPÍTULO 2 – A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

2.1 Considerações gerais

Um corte transversal num tronco de árvore permite observar sua estrutura interna conforme mostrado na Figura 4.

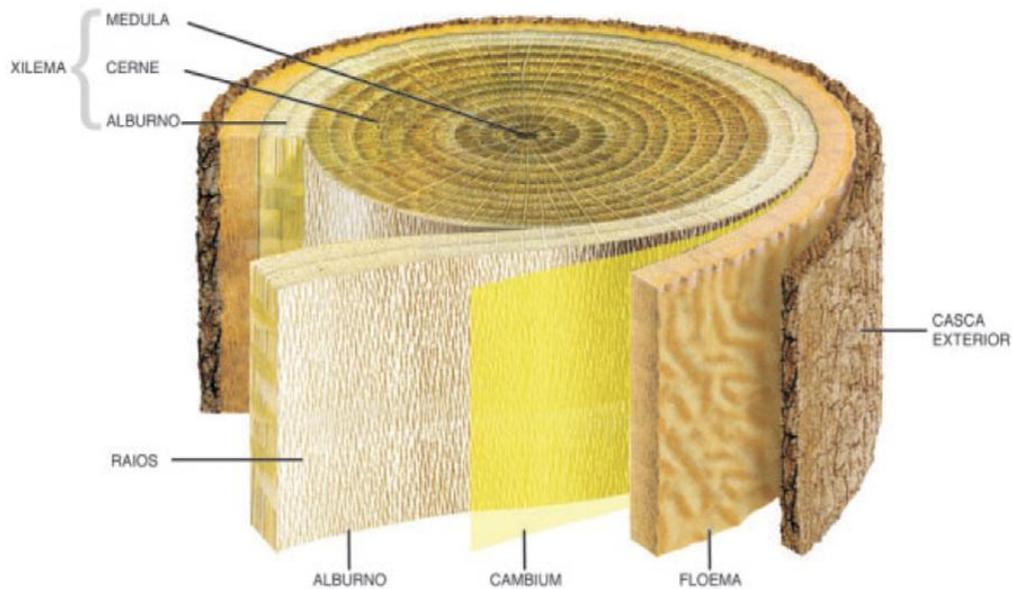


Figura 4: Corte transversal de tronco de árvore..
Fonte:Gonzaga (Madeira: uso e conservação) (2006).

De acordo com GONZAGA (2006) com relação a estrutura interna da madeira, tem-se:

- A casca exterior é totalmente inerte tendo função apenas de proteção do tronco;
- O floema ou casca interior tem como função principal o transporte de seiva elaborada a ser distribuída ao câmbio e ao alburno;
- Cambium, película de espessura microscópica, é o tecido que produz o crescimento diametral do tronco, gerando um anel exterior para o floema, e um interior para o xilema;
- Xilema é a madeira propriamente dita, dividida em alburno, brancal ou borne, a camada mais externa, adjacente ao câmbio, de tecido mais brando e mais claro, por onde sobe a seiva vinda das raízes;

- O cerne representa a madeira com suas cores características e desempenho conhecidos. O brancal é mais claro, mais fraco e menos resistente a fungos e insetos, exceto em algumas madeiras das folhosas e nas coníferas em geral.

2.2 Propriedades físicas das madeiras

A seguir são descritas as principais propriedades relacionadas as madeiras.

- Umidade – É a quantidade de água que a madeira apresenta. Ao cortar o tronco de uma árvore o mesmo encontra-se saturado. Muitos fatores irão influenciar o teor de umidade. As propriedades de resistência, capacidade de receber adesivos e secagem, entre outras vão depender diretamente da umidade. A água na madeira pode estar presente preenchendo os espaços vazios dentro das células ou entre elas (água livre ou água de capilaridade), pode estar aderida à parede das células (água de adesão) ou pode estar compondo a estrutura química do próprio tecido (água de constituição). Esta última somente pode ser eliminada através da combustão do material.
- Retratibilidade – É a variação nas dimensões e do volume em função da perda ou ganho de umidade que provoca contração em uma peça de madeira. A retratibilidade está relacionada aos defeitos da secagem da madeira. A contração da madeira pode ocorrer em três aspectos:
 - Contração tangencial - variação das dimensões da madeira no sentido perpendicular aos raios;
 - Contração radial - variação das dimensões da madeira no sentido dos raios;
 - Contração volumétrica - variação das dimensões da madeira considerando-se como parâmetro o seu volume total.
- Peso específico – Algumas espécies são naturalmente mais pesadas que outras mesmo apresentando dimensões iguais. Geralmente, espécies mais pesadas, apresentam características mais duradouras. Os índices de massa específicas variam de espécie para espécie e dependem de uma série de fatores estruturais bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho. A medida que o peso específico aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e a durabilidade e, em sentido contrário, diminuem a permeabilidade às soluções preservantes e a trabalhabilidade.

- Condutividade térmica – Quando a madeira impede a transmissão de ondas de calor ou frio devido a organização estrutural do tecido. Isto torna a madeira mau condutor térmico.

2.3 Propriedades mecânicas das madeiras

As repostas as solicitações definem o comportamento da madeira quando submetida a solicitações de natureza mecânica. Existe no Brasil a norma padronizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, que regulamentam os testes em amostras de madeira, realizados em laboratórios com máquinas especialmente destinadas a esta finalidade e que possibilitam aferir o grau de resistência a uma solicitação. A referida norma é a ABNT NBR 7190/1997 e atualmente encontra-se em processo de revisão.

2.4 Escolha da espécie de madeira

O tipo de madeira escolhido é um processo muito importante. Para que haja um bom desempenho do material é necessário definir os requisitos de qualidade da madeira, necessários ao uso pretendido (propriedades físicas e mecânicas, durabilidade natural, tratabilidade com produtos preservativos, fixação mecânica, etc.). De uma maneira geral na construção civil são utilizadas espécies de reflorestamento: pinus e eucaliptos.

2.5 Classificação estrutural da madeira

A verificação da estrutura da madeira é realizada pela escolha de algumas características da madeira, como mostrada na Tabela 1, que são razoavelmente bem correlacionadas com todas as propriedades estruturais. Devido à natural variabilidade das propriedades da madeira, há uma grande faixa de resistência e rigidez em cada classe ou grupo, (CALIL JUNIOR, 2006).

A classificação estrutural da madeira divide-se:

- Classificação visual: identificam na madeira os elementos que diminuem sua resistência mecânica (defeitos próprios e defeitos de secagem);
- Classificação mecânica: determinação do modulo de elasticidade (rigidez e flexão, vibração transversal, flexão estática, ultra som e ondas de tensão).

Tabela 1: Classificação estrutural da madeira.

Fonte: CALIL JUNIOR (2006)

Classificação visual	Todas as peças de madeira são examinadas por um classificador treinado no conhecimento de elementos que diminuem a resistência e rigidez da madeira, como por exemplo: nós, inclinação das fibras, fissuras e rachaduras.
Máquina de classificação de tensões. Rigidez a flexão.	O indicador da classe é a rigidez medida no eixo menor de flexão. As máquinas modernas são computadorizadas e marcam, nas peças, as diferentes classes através de pinturas de diferentes cores.
Classificação de carga Flexão estática.	O indicador da classe é o limite inferior da rigidez medido com relação ao eixo de maior resistência à flexão. As peças passam por uma máquina que aplica uma carga acima da esperada de projeto. Se ela resiste pode ser classificada no nível de carga correspondente.
Vibração transversal	O indicador da classe é a rigidez obtida por vibração transversal. Todas as peças são classificadas pela imposição de um impacto e pela medida da frequência, relacionando-a com a rigidez do material.
Ondas de tensão	O indicador da classe é a velocidade de propagação da onda. Todas as peças são classificadas pela imposição de um impacto padronizado e pela medida da propagação longitudinal da onda, relacionando-a com a rigidez do material.

2.6 Degradação da madeira

A degradação da madeira é um processo que altera as suas propriedades. A madeira por ser um material de origem biológica, está sujeita à ação de microorganismos, fungos e xilófagos, mas também por outros fatores não biológicos de acordo com GONZAGA (2006).

Os agentes biológicos são principalmente os fungos e os insetos ver Tabela 2. Estes organismos necessitam de algumas condições para sua sobrevivência, entre elas: temperatura, oxigênio, umidade e fonte adequada de alimento, geralmente a madeira. Embora o grau de dependência destes parâmetros seja variável, cada um precisa estar presente para ocorrer a deterioração. As principais características desta deterioração segundo CALIL JUNIOR (2006) são:

- Apodrecimento (fungos): O problema mais comum. A madeira é um material higroscópico; uma alta umidade cria um ambiente ideal para o desenvolvimento de fungos. Os sintomas incluem a perda de resistência, amolecimento, desintegração e descoloração. Onde a média de umidade é abaixo de 20 %, existe baixa deterioração da madeira.

- Ataque de insetos: Várias espécies de insetos, como cupins e larvas, usam a madeira como abrigo e fonte de alimentação. Alguns tipos de ataques de insetos indicam a necessidade do conhecimento de sua extensão, enquanto outros podem ser menos prejudiciais. Entretanto, a correta identificação é essencial. Os agentes abióticos (não vivos) incluem os condicionantes físicos, mecânicos, químicos e climáticos. Embora destrutivos, os agentes abióticos podem também danificar o tratamento preservativo, expondo a madeira não tratada ao ataque de agentes bióticos.
- Abrasão mecânica: é provavelmente o agente físico mais significativo de deterioração de pontes de madeira. É causado por vários fatores e varia consideravelmente nos seus efeitos na estrutura. O mais comum é a abrasão do veículo que produz desgaste na superfície de rolamento, reduzindo a seção efetiva de madeira. Obviamente exemplos deste dano ocorrem no tabuleiro, onde a abrasão produz degradação da superfície da madeira.
- Luz ultravioleta: a ação da luz ultravioleta do sol quimicamente degrada a lignina da superfície da madeira. A degradação ultravioleta causa escurecimento em madeiras claras e clareamento em madeiras escuras, mas este dano penetra somente em uma pequena espessura da superfície. Esta madeira danificada é levemente enfraquecida, mas a profundidade do dano tem pouca influência na resistência exceto onde esta camada é removida de forma contínua reduzindo as dimensões da peça.
- Degradação química: em casos isolados, a presença de ácidos ou bases pode causar dano à madeira. Bases fortes atacam a hemicelulose e lignina, deixando a madeira esbranquiçada. Ácidos fortes atacam a celulose e hemicelulose, causando perda de peso e resistência. O dano da madeira por ácido é de cor escura e sua aparência é similar a da madeira danificada por fogo.
- Fraturas incipientes: Podem ocorrer por acidentes ou ignorância como por exemplo sobrecargas. Felizmente são bastante raras. Entretanto, podem não ser fáceis de detectar e, em caso de suspeita, deve ser solicitada a presença de um especialista.

Tabela 2: Classe de Risco da Madeira.
Fonte: SERGIO BRAZOLIN (2007).

Classe de Risco	Condições de Uso	Organismos Xilófagos
1	Interior de construções; Fora de contato com o solo; Fundações ou alvenaria; Protegidas das intempéries, ou fontes internas de umidade; Locais livres do acesso de cupins-subterrâneos ou arborícolas e ou subterrâneos.	Cupins de madeira seca Brocas -de- madeira
2	Interior de construções; Em contato com a alvenaria; Sem contato com o solo ou fundações; Protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade.	Cupins-de-madeira seca Brocas-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola
3	Interior de construções; Sem contato com o chão; Protegidos das intempéries; Ocasionalmente, podem ser expostos à fonte interna de umidade.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola Fungos-emboloradores/manchadores Fungo-apodrecedores
4	Uso exterior; Fora de contato com o solo; Sujeitos a intempéries.	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola Fungos-emboloradores/manchadores Fungo-apodrecedores
5	Contato com o solo, água doce; Engaste no solo, concreto ou alvenaria (sujeito a deterioração).	Cupins-de-madeira-seca Brocas-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola Fungos-emboloradores/manchadores Fungo-apodrecedores
6	Exposição a água salgada ou salobra.	Perfuradores marinhos Fungos-emboloradores/manchadores Fungos-apodrecedores

2.6.1 Preservação da madeira

De acordo com GONZAGA (2006), as árvores existem na terra há mais de 200 milhões de anos e não se sabe desde quando o homem começou a usar madeira, mas, ao longo do tempo, a história registra algumas técnicas de preservação da madeira. Os produtos preservativos são definidos como sendo substâncias ou formulações químicas, de composição e características definidas, que devem apresentar as seguintes propriedades:

- Eficiência na prevenção ou controle de organismos xilófagos;
- Segurança em relação ao homem e ao meio ambiente;
- Permanência na madeira (não deve perder-se na madeira por decomposição, evaporação, lixiviação, exsudação ou outros);
- Não corrosivo;
- De custo acessível (competitivo);

- Disponível no mercado;
- Não deve alterar as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

A seleção adequada de um produto preservativo é a primeira condição para conferir proteção a uma madeira de baixa durabilidade natural. Os preservativos de madeira podem ser agrupados segundo sua natureza na Tabela 3:

Tabela 3: Preservativos de madeiras.
Fonte CALIL JUNIOR (2006).

Tipos de Preservativos da Madeira	
Oleosos	Produtos essencialmente representados pelos derivados do alcatrão de hulha.
Oleossolúveis	Produtos contendo misturas complexas de agentes fungicidas e/ou inseticidas, a base de compostos de natureza orgânica e/ou organometálica: creosoto e o pentaclorofenol.
Hidrossolúveis	Produtos contendo misturas mais ou menos complexas de sais metálicos: Sulfato de cobre, bicromato de potássio ou sódio, sulfato de zinco, ácido crômico, ácido arsênico, ácido bórico e outros compostos.

Dependendo da classe de risco à qual o componente de madeira estará sujeito, a aplicação dos produtos preservativos poderá ser efetuada com base nos seguintes processos: sem pressão, isto é, impregnação superficial da madeira, ou com pressão, isto é, impregnação profunda da madeira, por aplicação do preservativo em autoclave (é um cilindro que suporta pressão, onde a madeira é introduzida e em seguida os produtos químicos preservantes são injetados). As pressões utilizadas são superiores a atmosférica e as etapas de tratamento são: colocação da madeira; início do vácuo; injeção da solução preservante; tratamento com o vácuo; término do vácuo e retirado da solução excedente.

No caso de componentes estruturais e construtivos de madeira utilizados em pontes (Classes de Risco 4, 5 e 6), os processos de impregnação sob pressão são os mais eficazes e recomendados. Eles promovem a distribuição e penetração mais uniforme do produto preservativo em toda parte permeáveis da madeira com teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (30%), além de favorecer o controle da quantidade de preservativo absorvido (nível de retenção) para uma proteção ampla da madeira, mesmo em condições de alto risco de deterioração biológica. Estes processos são realizados em instalações industriais, denominadas usinas de preservação de madeiras.

Para as madeiras utilizadas em pontes, é recomendado o tratamento sob pressão com produtos preservativos de natureza hidrossolúvel e/ou oleosa. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam

as combinações entre os produtos preservativos em função das classes de risco de deterioração biológica.

Tabela 4: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 1 e 2).
Fonte: SERGIO BRAZOLIN (2007).

Sem Pressão		
Inseticida	Penetração Mínima	Penetração
Cipermetrina Clorpirifós Deltametrina Diazinon Endosulfan	Não disponível: (consulta ao fabricante)	Superficial
Sob Pressão		
Inseticida	Penetração Mínima	Penetração
CCA - C ou CCB	4,0 kg/m ³ ou 6,5 kg/m ³ (a)	100 % do alburno e porção permeável do cerne
Óleo creosoto	96 kg/m ³	

(a) Componentes estruturais de difícil manutenção, reparo ou substituição.

Tabela 5: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 3 e 4).
Fonte: SERGIO BRAZOLIN (2007).

Sem Pressão			
Inseticida	Fungicida	Penetração Mínima	Penetração
Cipermetrina Clorpirifós Deltametrina Diazinon Endosulfan	Tribromofenol IPBC	Não disponível: (consulta ao fabricante)	Superficial
Sob Pressão			
Inseticida/Fungicida		Penetração Mínima	Penetração
CCA - C ou CCB		4,0 kg/m ³ ou 6,5 kg/m ³ (a)	100 % do alburno e porção permeável do cerne
Óleo creosoto		96 kg/m ³	

(a) Componentes estruturais de difícil manutenção, reparo ou substituição.

Tabela 6: Produtos Preservativos em função das classes de risco (classe de risco 5).
Fonte: SERGIO BRAZOLIN (2007).

Sob Pressão		
Inseticida/Fungicida	Penetração Mínima	Penetração
CCA - C ou CCB	6,5 kg/m ³ ou 9,6 kg/m ³ (a) ou 13,6 kg/m ³ (b)	100 % do alburno e porção permeável do cerne
Óleo creosoto	6,5 kg/m ³ ou 9,6 kg/m ³ (a) ou 13,6 kg/m ³ (b)	

- (a) Componentes estruturais de difícil manutenção, reparo ou substituição e críticos para o desempenho e segurança do sistema construtivo. Ex. cruzetas, postes, colunas entre outros.
- (b) Componentes estruturais críticos como estacas de fundações totalmente ou parcialmente enterrados no solo ou em contato com água doce, utilizados em locais de clima severo e ambiente com alto potencial de biodeterioração por fungos e insetos xilófagos.

Tabela 7: Produtos preservativos em função das classes de risco (classe de risco 6).

Fonte: SERGIO BRAZOLIN (2007).

Sob Pressão		
Inseticida/Fungicida	Penetração Mínima	Penetração
CCA – C ou CCB	40 kg/m	100 % do alburno e porção permeável do cerne
Óleo creosoto	400 kg/m ³	
Sob Pressão Duplo Tratamento (a)		
Inseticida/Fungicida	Penetração Mínima	Penetração
CCA-C e óleo creosoto	24 kg/m ³	100 % do alburno e porção permeável do cerne
	320 kg/m ³	

(a) Duplo Tratamento utilizado em locais de ocorrência de *Sphaeroma terebrans* e *Limnoria tripunctata* ou na ausência de informações sobre estes organismos no local de uso da madeira.

Com relação aos tratamentos em madeira, CALIL JUNIOR (2006) faz as seguintes observações:

- No caso de espécies de folhosas, o cerne é normalmente não tratável, mesmo sob pressão, portanto uma maior vida útil do componente depende da alta durabilidade natural desta porção da madeira. No caso de madeiras permeáveis, como o pinus, ou o alburno da maioria das espécies de folhosas é possível a total impregnação com o produto preservativo;
- Devido à sua natureza oleosa e propriedades químicas, a peça de madeira tratada com óleo creosoto pode apresentar problemas de exsudação do produto (migração para a superfície), além de não permitir acabamento com tintas e vernizes. Portanto, recomenda-se seu uso nos componentes que não entram em contato direto com as pessoas e/ou animais;
- Carecem informações sobre o uso da madeira tratada com o produto preservativo CCB (borato de cobre cromatado) solução aquosa excelente para banhar a madeira recém cortada. O tratamento evita os fungos manchadores e reduz a ação das bactérias e cupins e brocas. É recomendado no caso de madeiras que terão contato com o solo e umidade.) em contato direto com a água doce, salobra ou salgada;
- O método de duplo-tratamento com os produtos preservativos CCA (arceniato cobre cromatado, ideal para autoclavagem de peças de madeira sujeitas ao intemperismo, inclusive para as que serão cravadas no solo (postes e mourões). O CCA tem alta fixação e auto poder fungicida e inseticida. Hoje seu emprego está restrito à aplicação em UPM – usinas de proteção de madeira.) e óleo creosoto deve ser adotado em regiões de ocorrência de *Sphaeroma terebrans* e *Limnoria tripunctata* e na ausência de informações sobre estes organismos xilófagos no local de uso da madeira.

2.6.2 Secagem da madeira

A secagem da madeira é uma técnica que visa à redução do seu teor de umidade, que varia conforme o uso final do produto. Para tanto deve valer-se de uma técnica que seja economicamente viável, tendo-se em mente o fim para o qual a peça se destina. Os objetivos da secagem são:

- Reduzir a movimentação dimensional;
- Inibir os ataques de fungos;
- Melhorar a trabalhabilidade;
- Aumentar a resistência física da madeira.

Segundo GONZAGA (2006), existem duas formas de conseguir madeira seca:

- Secagem natural;
- Secagem artificial (secadores e estufas).

Na secagem natural, após serrar a madeira ela é gradeada, isto é empilhada com sarrafo que mantém uma distância entre cada peça. Deve se manter uma distância do solo, não se deve deixar as peças expostas ao sol e a chuva, estas devem secar embaixo de uma cobertura.

A secagem ao ar deve ser realizada em locais abertos, empilhando as tábuas espaçadas entre si de modo a permitir que o ar circule entre as peças e diminua sua umidade. A secagem ao ar é comumente utilizada em empresas para realização da pré-secagem de modo a aperfeiçoar o tempo de secagem em estufa. O ponto mais importante da secagem ao ar está na montagem da pilha de madeira que deve ser realizada com seguintes cuidados: isolamento do solo, alinhamento das peças e cobertura adequada.

No caso da secagem na estufa exige um programa específico para cada espécie de madeira. As estufas são instalações que tornam possíveis o controle de umidade e da temperatura do ar, permitindo a aplicação do programa de secagem adequada a cada tipo de madeira. Em pouco tempo a madeira terá o teor de umidade desejado, com perdas mínimas de defeitos por secagem.

Para a realização da secagem da madeira devem-se considerar os diversos fatores que influenciam no processo:

- Fatores ligados as características da madeira: a espécie, o tipo de corte, a espessura da peça, o teor de umidade inicial, a relação cerne e alburno;
- Fatores do processo de secagem: a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade de circulação do ar.

2.7 Espécies tropicais de madeira utilizadas em elementos estruturais

A diversidade de madeira tropical no Estado Amazonas é muito grande. Dependendo de suas características, uma determinada espécie poderá ter a sua aplicação mais indicada para um determinado produto madeireiro.

Como o espectro de aplicação e as espécies tropicais de madeira são muito amplas, serão abordadas neste tópico somente aquelas dentro do escopo do presente trabalho, ou seja, madeiras usadas como elementos estruturais.

2.7.1 Cumaru

A espécie Cumaru (*Dipteryx odorata*), (Figura 5), é nativa do Brasil, Colômbia, Guiana Francesa, Guiana, Peru, Ilhas Seychelles e Suriname. No Brasil esta espécie é encontrada nos estados do Acre, Amazonas, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará e Rondônia. Madeira pesada, cerne marrom-amarelado e cheiro imperceptível.



Figura 5: Árvore da espécie Cumaru (*Dipteryx odorata*).
Fonte: Paulo Ernani Ramalho Carvalho (2010).

Denominações vulgares: baru, Cambaru, Cambaru-ferro, Catinga-de-boi, Champagne, Champanha, Combari, Coração-de-negro, Cumari, Cumaru, Cumaru-amarelo, Cumaru-da-folha-grande, Cumaru-de-cheiro, Cumaru-do-Amazonas, Cumaru-escuro,

Cumaru-ferro, Cumarurana, Cumaru-rosa, Cumaru-roxo, Cumaru-verdadeiro, Cumaruzeiro, Cumaruzinho, Cumbari, Cumbaru, Cumbaru-ferro, Cumbaru-roxo, Emburama-brava, Favatonca, Faveiratonca, Ipê-cumaru, Kumbaru, Muimapajé, Muirapapé, Muirapayé, Paru, Sacupembinha, Sapucaia, Sucupira, Sucupiramirim.

Características gerais: cerne marrom-amarelado, distinto de alburno marrom muito pálido. Anéis de crescimento distintos, grã revessa, textura média a fina, brilho ausente e cheiro imperceptível.

Densidade: madeira pesada, com densidade a 12% de umidade de 1.800 kg/m³.

Secagem: secagem ao ar livre relativamente lenta, mas a secagem na estufa é rápida, apresentando tendência a torcimento médio.

Trabalhabilidade: difícil processamento mecânico, porém permite excelente acabamento no torneamento.

Durabilidade: resistente a fungos, insetos e brocas marinhas.

Preservação: o cerne não é tratável com creosoto nem com CCA-A, mesmo em tratamento sob pressão.

Principais Usos: construções externas e internas, construção pesada, construção leve.

2.7.2 Pequiarana

A espécie Pequiarana (*Caryocar glabrum*), Figura 6, é comum na Amazônia, principalmente no Amazonas e Pará em matas de terra firme ou várzea alta. Madeira pesada; cerne branco levemente amarelado, com cheiro e gosto imperceptíveis e de resistência mecânica média.

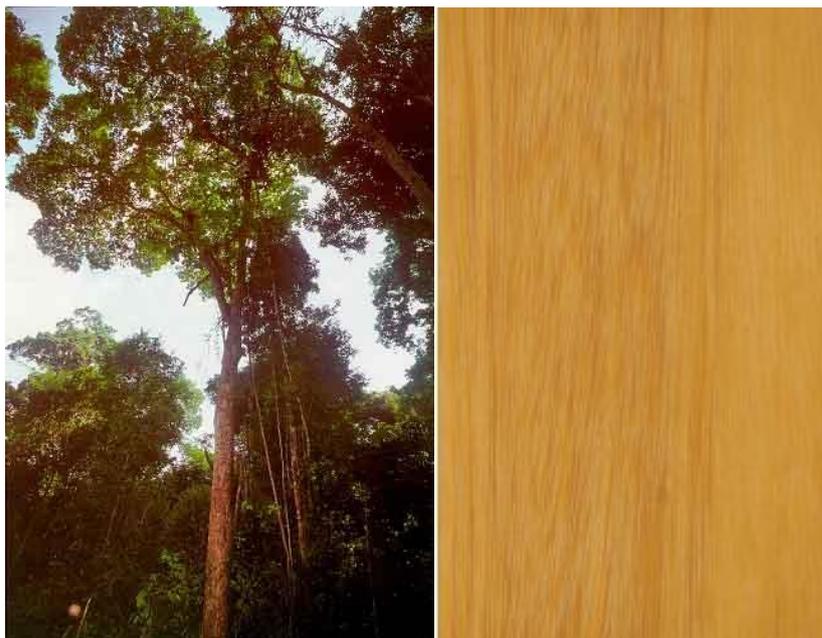


Figura 6: Árvore da Espécie Pequiarana (*Caryocar glabrum*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Piquiarana, Cabeleira, Jiqui, Pequi, Piquiarana-da-Terra-Firme, Piquiarana-Vermelha, Pequiá.

Características gerais: cerne branco, levemente amarelado, pouco distinto do alburno levemente mais claro. Grã reversa, textura grossa, superfície irregularmente lustrosa e áspera ao tato, cheiro imperceptível e gosto indistinto.

Densidade: madeira de densidade média, com densidade a 12% de umidade de 800 kg/m^3 .

Trabalhabilidade: excelente para se aplainar; boa para se tornear e furar; ruim para lixar.

Durabilidade: muito resistente ao ataque de organismos xilófagos.

Preservação: baixa permeabilidade as soluções preservativas, mesmo em tratamento sob pressão.

Principais usos: dormentes, armações de cavernas de embarcações, marcenaria, estacas, vigas, caibros, ripas, tábuas, tacos para assoalhos, marcos de portas e janelas, postes, esteios, mourões.

2.7.3 Cupiúba

Ocorre nas matas de terra firme e em capoeiras velhas por toda a Amazônia, incluindo Estados do Pará, Maranhão, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia e ainda nas Guianas, Colômbia e Venezuela, Figura 7.

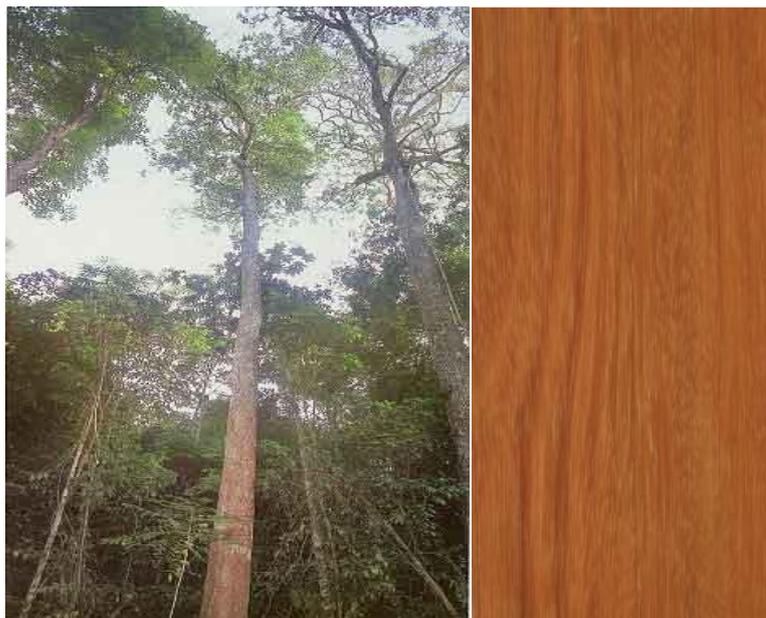


Figura 7: Árvore da Espécie Cupiúba (*Goupia Glabra*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Cupiúba, Cupiúva, Couepi, Goupil, Cupiúba-Rosa, Peniqueiro, Peroba-Fedida, Kopei, Cabukalli, Cachaceiro e comercialmente aparece também com o nome de Peroba do Norte (MT), por assemelhar-se com a Peroba da região Sudeste.

Características gerais: cerne e alburno pouco distintos, marrom-avermelhado-claro. Anéis de crescimento pouco distintos, grã reversa, textura média, brilho ausente e cheiro desagradável.

Densidade: madeira de densidade média, com densidade a 12% de umidade de 840 kg/m^3 e densidade verde de 1.130 kg/m^3 .

Secagem: lenta em estufa, apresentando tendência moderada a encanoamento médio e a torcimento forte.

Trabalhabilidade: fácil de serrar, aplinar, lixar, torneiar e parafusar. Aceita bem a colagem, mas não é adequada para fabricação de compensado, por apresentar rachaduras na tora. Boa aceitação de tinta, verniz, polimento. Recomenda furação prévia à colocação de pregos na madeira seca.

Durabilidade: testes em laboratório indicaram boa resistência ao apodrecimento. Resistente a brocas marinhas.

Preservação: moderada fácil de preservar com creosoto e CCA-A, quando tratado sob pressão.

Principais usos: Obras gerais de carpintaria, marcenaria e acabamento, construção civil, assoalho, ripas, marcos de portas e janelas, rodapés, dormentes, embalagens pesadas, para construções externas, móveis de baixa renda, paletes, cabos e objetos torneados, postes,

pilares, carroçaria de caminhão. A madeira apresenta odor acentuado quando úmida, o que pode comprometer alguns usos.

2.7.4 Maçaranduba

Distribuem-se nos Estados da Região Norte, mais frequente no Pará, Roraima, Amazonas, Rondônia e nordeste do Maranhão. Ocorre ainda em Mato Grosso e também no Suriname e Guianas, Figura 8.



Figura 8: Maçaranduba (*Manilkara Longifolia*)
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Batinga, Jaboticaba-de-Macaco, Leiteiro-Preto, Maçaranduba, Maçaranduba-de-Igreja, Parajumirimá, Maçarandubinha, Maparajuba, Paraju, Parajuba, Aparaiú, Maparajuba-da-Várzea, Maçaranduba-de-Leite.

Características gerais: cerne vermelho claro, quando recém cortado, tornando-se vermelho a marrom avermelhado-escuro, distinto do alburno rosado a marrom pálido, anéis de crescimento distintos, grã direita, textura fina, brilho ausente e cheiro imperceptível.

Densidade: madeira pesada, com densidade a 12% de umidade em torno de 1.000kg/m^3 e densidade verde em torno de 1.260 kg/m^3 .

Secagem: rápida em estufa, com tendência moderada a rachaduras, a torcimento forte e a encanoamento médio.

Trabalhabilidade: fácil de serrar, laminar, tornear, colar, parafusar. O acabamento no torno e na broca é excelente. O uso de pregos pode causar rachaduras. A presença de resina prejudica o fio de corte da ferramenta.

Durabilidade: resistente ao ataque de fungos apodrecedores e cupins subterrâneos. Moderadamente resistente a cupins de madeira seca. Não é resistente a brocas marinhas. Resiste bem a umidade.

Preservação: cerne não tratável com CCA-A, mesmo quando preservado sob pressão.

Principais usos: Móveis especiais, implementos agrícolas, instrumentos musicais, tacos para assoalhos, peças torneadas, dormentes, vigamentos, esteios, postes, cabos de ferramentas, estacas.

2.7.5 Muirapiranga

Distribuem-se por toda a Amazônia brasileira, nas matas de terra firme dos Estados de Mato Grosso, Amazonas, Pará, Amapá, Bahia e Ceará. Ocorrem ainda no Peru, Colômbia, Guianas, Peru, Venezuela e Norte do Panamá, Figura 9.



Figura 9: Muirapiranga (*Brosimum rubescens*)
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Amapá-amargoso, Amapá-doce, Amaparana, Amargo-de-conduru, Conduru, Conduru-de-sangue, Conduru-vermelho, Falso-pau-brasil, Gonduru, Gunduru, Madeira-vermelha, Moirapiranga, Muirapiranga, Pau-rainha, Pau-vermelho, Uanta.

Características gerais: cerne vermelho-escuro-vivo, distinto do alburno marron-claro. Grã direita ou reversa, textura média a fina, brilho moderado, cheiro imperceptível e gosto indistinto.

Densidade: madeira pesada.

Secagem: seca bem ao ar, sem problemas de rachaduras e empenamentos. Em estufa é lenta, apresentando tendência a rachaduras de topo, encanoamento e torcimento. A secagem é fácil e sem defeitos.

Trabalhabilidade: Moderadamente boa de trabalhar tanto com ferramentas manuais como mecânicas. Ótimo acabamento e cola bem. Aceita prego. Resultando em lâminas lisas, compactas e de fácil secagem.

Durabilidade: altamente resistente a fungos e cupins. Cerne e alburno suscetíveis ao ataque de besouros quando deixados por um mês na floresta.

Preservação: alburno de fácil preservação e cerne moderadamente difícil de tratar com preservativos aplicados sob pressão.

Principais usos: móveis de luxo, objetos de adorno, construções internas, construções externas, dormentes, torneados, laminados decorativos e outros.

2.7.6 Mandioqueira



Figura 10: Mandioqueira (*Qualea brevipedicellata*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Mandioqueira-áspera, Quarubatinga, Canela-mandioca, Mandioqueira-lisa, Figura 10.

Características gerais: cerne e alburno pouco distintos, cinza-claro. Anéis de crescimento distintos, grã reversa, textura média, brilho moderado e cheiro imperceptível.

Secagem: seca bem ao ar livre, sem apresentar defeitos.

Trabalhabilidade: moderadamente dura ao corte. Fácil para torneiar, proporcionando acabamento regular, com tendência a apresentar superfície felpuda e arrancada. Boa colagem.

Durabilidade: moderadamente resistente a cupins de madeira seca.

Principais usos: construção civil e naval, armação de móveis, compensados, embalagens e outros.

2.7.7 Matamatá



Figura 11: Matamatá (*Eschweilera sp.*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Burangica, Cuia-de-macaco, Embiribaçu, jateru, Macaco-de-cuia, Mannue, Quiriba, Tiriba. Figura 11.

Características gerais: cerne e alburno poucos distintos, ausência de brilho, cheiro imperceptível.

Secagem: com leve tendência a rachaduras fortes, moderada tendência ao encanoamento, ao torcimento e ao arqueamento fortes.

Trabalhabilidade: madeira resistente ao corte manual.

Preservação: Facilidade: o alburno é moderadamente fácil e o cerne não é tratável.

Principais usos: Construção pesada, construção leve, móveis e artigos domésticos decorativos, torneados, brinquedos e artigos domésticos e utilitários.

2.7.8 Anani



Figura 12: Anani (*Symphonia globulifera*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2010).

Denominações vulgares: Anani-da-mata, anani-da-terra-firme, Bacuri, Bacuri-bravo, Bacuri-d'anta, bacuri-de-anta, Bulandi, Bulandi-amarelo, Bulandi-de-leite, Bulandi-piruma, Canadi, Canani, Guarandi, Guananim-vermelho, Mani, Marupá, Oauaul, Olandi, Pau-breu, Pitiá-de-lagoa, Pitomba-de-guariba, Uanandi, Uanani, Vanandi, Vanani, Figura 12.

Características gerais: cerne e alburno distintos, brilho moderado, cheiro indistinto.

Secagem: secagem em estufa muito rápida, com tendência moderada ao encanoamento médio e a torcimento forte.

Trabalhabilidade: madeira resistência ao corte transversal, moderadamente dura.

Preservação: O alburno da madeira é fácil de preservar com CCA (hidrossolúvel). Cerne é moderadamente fácil de preservar com creosoto (oleossolúvel), e difícil de preservar com CCA.

Principais usos: construção pesada, construção leve, embarcações, armação de móveis.

2.7.9 Tauari

Ocorrem nas matas de terra firme nos Estados do Amazonas, Pará, Roraima e Amapá. Também nas Guianas e Suriname.

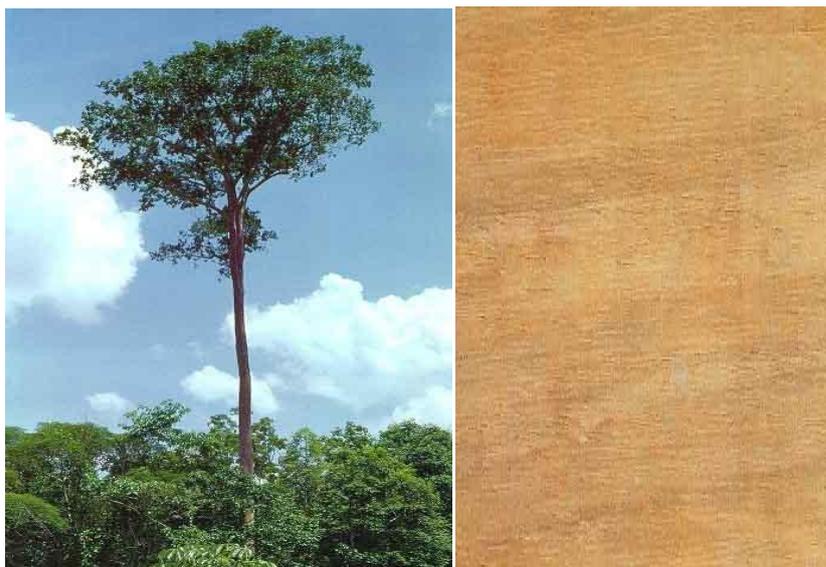


Figura 13: Tauari (*Cariniana micrantha*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2012).

Denominações vulgares: Embirema, Imbirema, Tauari-amarelo, Tauari-branco, Tauari-morrão.

Características gerais: cerne e alburno poucos distintos, brilho moderado, cheiro imperceptível, Figura 13.

Densidade: densidade média.

Secagem: secagem rápida em estufa, apresenta pequena tendência as rachaduras superficiais, encanoamento, torcimento e encurvamento médios.

Trabalhabilidade: madeira resistente ao corte, aceita prego (pode se trabalhar com pré-furação para não rachar).

Durabilidade: Algumas espécies têm uma tendência a manchar (mancha azul), devendo ser utilizadas secas e protegidas da umidade e de insetos.

Preservação: Muito fácil de preservar com creosoto e CCA-A aplicados sob pressão.

Principais usos: Construção civil e naval, móveis, artigos decorativos, utensílios domésticos, brinquedos, instrumentos musicais, caixas, engradados, embalagens, peças encurvadas, marcenaria, lâminas, compensados e outros.

2.7.10 Macucu



Figura 14: Macucu (*Licania oblongifolia*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2012).

Denominações vulgares: Macucu-chiador, Macucu-branco, Figura 14.

Características gerais: cerne e alburno pouco distintos a indistintos, brilho ausente, cheiro imperceptível.

Densidade: Madeira pesada.

Secagem na estufa: secagem rápida apresenta pequena tendência a rachaduras, grande tendência a encaçamento e arqueamento médio.

Trabalhabilidade: madeira pesada não aceita prego.

Durabilidade: A madeira é resistente ao ataque de fungos e de cupins.

Principais usos: Construção civil, dormentes, implementos agrícolas, postes, pilares, móveis pesados, carpintaria, marcenaria e acabamento.

2.7.11 Angelim pedra

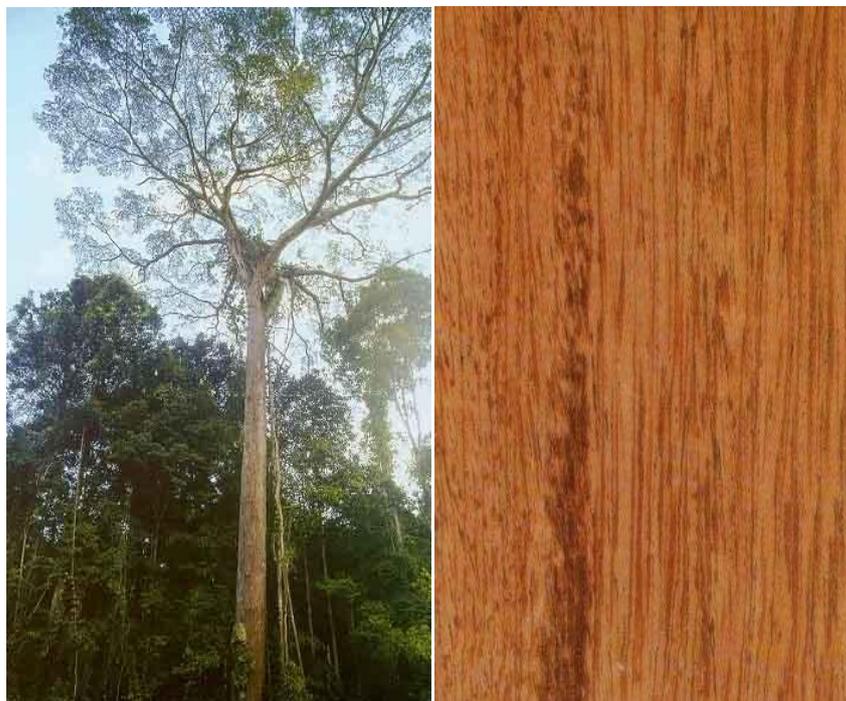


Figura 15: Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*).
Fonte: www.ibama.gov.br (2012).

Denominações vulgares: Angelim, Angelim-amarelo, Angelim-aroeira, Angelim-branco-pedra, Angelim-comum, Angelim-da-mata, Angelim-do Pará, Angelim-grande, Angelim-rosa, Mirarema, Murarema, Sucupira-amarela, Figura 15.

Características gerais: cerne marrom-amarelado-claro, distinto do alburno marrom-pálido. Grã revessa, textura grossa, brilho ausente e cheiro imperceptível.

Secagem: seca rápido em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento médio.

Trabalhabilidade: fácil de trabalhar, acabamento de regular a bom na plaina, torno e broca.

Durabilidade: cerne muito durável a durável, quando exposto a fungos da podridão-branca e parda, e moderadamente resistente a brocas marinhas. Resistente a cupins de madeira seca.

Preservação: alburno muito fácil e cerne difícil de preservar com creosoto e com CCA-A, em tratamento sob pressão.

Principais usos: construção civil e naval, marcenaria, dormentes, estacas, tacos de assoalhos, vigamentos, esteios.

2.7.12 Cumarurana- (*Dipteryx polyphylla*)

Ocorre em matas primárias de terra firme, ao longo de riachos principalmente no Amazonas e Colômbia.

Denominações vulgares: cumaru roxo.

Características gerais: alburno bege amarelado diferenciado do cerne marrom avermelhado ou vinho; aspecto fibroso; grã irregular; textura média; cheiro adocicado quando verde e gosto indistinto.

Densidade: Madeira de alta densidade

Trabalhabilidade: moderadamente fácil de serrar e difícil de aplainar, pregar e aparafusar; recomendando-se pré-furação. Recebe acabamento de boa qualidade.

Durabilidade: Altamente resistente ao ataque de fungos apodrecedores e insetos.

Principais usos: Construção pesada, dormentes, cabos de implementos agrícolas, objetos torneados, postes e pilares, móveis especiais, construção naval, cabos de ferramentas, carroçarias, tacos para assoalhos.

Estas espécies de madeira são encontradas em florestas tropicais, onde existe uma variedade muito grande de espécies as quais são utilizadas na construção de estruturas pesadas. A tabela 8 apresenta algumas espécies tropicais de madeira cujas características são apresentadas pela ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 8: Propriedades de Algumas Espécies de Madeiras.
Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

Propriedades de Algumas Espécies de Madeira						
Nome Comum	Nome Científico	$f_{c0,m}$ (MPa)	$f_{t0,m}$ (MPa)	$f_{t90,m}$ (MPa)	$f_{v,m}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)
Maçaranduba	<i>Manilkara spp</i>	82,9	138,5	5,4	14,9	22733
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	54,4	62,1	3,3	10,4	13627
Cumaru	<i>Dipterys odorata</i>	93,32	133,5	2,9	10,7	23002

Valores retirados da NBR 7190/1997

$f_{c0,m}$ = Resistência á compressão paralela as fibras.

$f_{t0,m}$ = Resistência a tração paralela as fibras.

$f_{t90,m}$ = Resistência a tração normal as fibras.

$f_{v,m}$ = Resistência ao cisalhamento.

$E_{c0,m}$ = Modulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralelo as fibras.

CAPÍTULO 3 – ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

3.1 Generalidades

As estruturas mistas de madeira e concreto vêm ganhando novos espaços na engenharia civil no Brasil, principalmente devido aos estudos de aplicação de novas tecnologias, e o aperfeiçoamento das atuais.

No Brasil, a investigação de sistemas mistos madeira e concreto assume grande relevância, em especial devido ao grande campo de aplicação que se abre para essa tecnologia, seja pelo custo ou pela melhor utilização da madeira na construção ALVIM (2003). A seguir são descritas as principais características desse tipo de sistema.

As estruturas mistas de madeira e concreto, segundo CECCOTTI (1995), são estruturas quatro vezes mais rígidas que estruturas construídas somente de madeiras. Ele verificou, que este tipo de estrutura possui uma maior rapidez na execução do projeto, devido ao menor número de formas onde as vigas de madeiras contribuem para o cimbramento desse tipo de estrutura. Do ponto de vista econômico a madeira é mais competitiva em relação a outros materiais, com base em custos iniciais e apresenta vantagens quando se faz uma análise a longo prazo.

A utilização desse tipo de estrutura mista tem como objetivo aproveitar as melhores propriedades de cada material. Enquanto a madeira é responsável por absorver os esforços de tração, o concreto é responsável por absolver os esforços de compressão, sendo de fundamental importância a utilização de conectores de metal capazes de transmitir os esforços entre as conexões MORAIS (2007).

Segundo CECCOTTI (1995), nos tabuleiros mistos, o concreto além de proteger a madeira contra as intempéries e dos desgastes superficiais por abrasão, diminui as vibrações provocadas pelas ações dinâmicas, e com a diminuição do peso próprio aumenta a rigidez e proteção contra o fogo.

Segundo a ABNT NBR 7190/1997 as propriedades da madeira a serem consideradas no dimensionamento de estrutura são:

Densidade – Está relacionada ao peso próprio da madeira, podendo ser adotado o valor da densidade aparente.

Resistência – Os valores limites são fornecidos pela norma brasileira de estruturas de madeira ou por ensaios de caracterização de espécie realizados em laboratório.

Rigidez – A rigidez da madeira é medida pelo valor médio do módulo de elasticidade determinado na fase elástico linear. Devem ser conhecidos os módulos nas direções paralelas (E_0) e normal (E_{90}) às fibras. Na falta determinação experimental do módulo de elasticidade na direção normal das fibras pode ser empregado a seguinte relação:

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0} \quad (1)$$

Onde:

E_{w0} = módulo de elasticidade da madeira paralelo as fibras;

E_{w90} = módulo de elasticidade da madeira normal as fibras.

Flexão – Para determinar a rigidez da madeira pela flexão considerando uma carga F centrada no meio do vão, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão onde é empregado a seguinte relação:

$$E_{M0} = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%})L^3}{4(V_{50\%} - V_{10\%})bh^3} \quad (2)$$

Onde:

$F_{10\%}$ e $F_{M,50\%}$ = são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo de prova, em Newtons;

$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada F_{est} , em metros.

Para determinar a resistência da madeira à flexão simples é empregado a seguinte relação:

$$f_w = \frac{M_{m\acute{a}x}}{w_e} \quad (3)$$

Onde:

$M_{m\acute{a}x}$ = é o máximo momento aplicado a viga.

w_e = é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova.

Umidade – A umidade da madeira é importante porque tem influência nas propriedades de resistência e rigidez do material ver Tabela 9.

Tabela 9: Classe de umidade da madeira Fonte: NBR 7190/1997.

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$65 \leq \%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

$U\%$ = umidade em porcentagem.

Os valores das propriedades de resistência e rigidez da madeira apresentados neste trabalho são referente a umidade padrão de referencia a 12%. Para os valores de umidade diferentes de 12% a resistência e rigidez podem ser corrigidas.

A resistência pode ser corrigida pela expressão:

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

Onde:

$U\%$ = umidade em porcentagem;

$f_{U\%}$ = Resistência da madeira referente a umidade;

f_{12} = Resistência da madeira referente a umidade a 12 %.

A rigidez pode ser corrigida pela expressão:

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (5)$$

Onde:

$E_{U\%}$ = Rigidez da madeira referente a umidade;

E_{12} = Rigidez da madeira referente a umidade a 12 %.

3.2 Critérios de dimensionamento de estruturas mistas

3.2.1 Módulo de deslizamento (K)

O módulo de deslizamento é definido como o coeficiente angular da força versus o deslocamento.

Conforme descreve GÓES (2004) o módulo de deslizamento, para os estados de limites utilização (K_{SER}), é assumido como sendo o módulo tangente da curva força pelo deslocamento, ao nível de carga de aproximadamente 40% da força máxima prevista para a ligação.

O módulo de deslizamento é determinado em função da densidade da madeira e do tipo de conector utilizado. Como o próprio nome diz, o coeficiente de deslizamento quantifica o deslizamento relativo entre a madeira e o concreto. No caso de conectores perpendiculares ao plano de cisalhamento da pré- furação de conectores perpendiculares ao plano cisalhante os valores de K são dados segundo o EUROCODE 5(1993) por:

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1.5} \cdot d}{20} \quad (6)$$

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (7)$$

Onde:

K_{ser} = módulo de deslizamento usado para os estados limites de utilização;

K_u = módulo de deslizamento usado para os estados limites últimos;

ρ_k = densidade da madeira em kg/m^3 ;

d = diâmetro do conector em mm.

O módulo de deslizamento para os estados de limites últimos (K_u) é assumido como o módulo secante da curva força pelo deslocamento, a um nível de carga de aproximadamente 60% a 70% da força máxima prevista para a ligação.

O módulo de deslizamento para conectores em “X” e para outros tipos de conectores é obtido por ensaios experimentais em corpos de prova de cisalhamento.

Segundo MIOTTO (2009) o comportamento da maioria dos conectores é caracterizado por um diagrama força-deslocamento não linear e, assim, é muito frequente a determinação do módulo de deslizamento secante representado no gráfico como mostra a Figura 16.

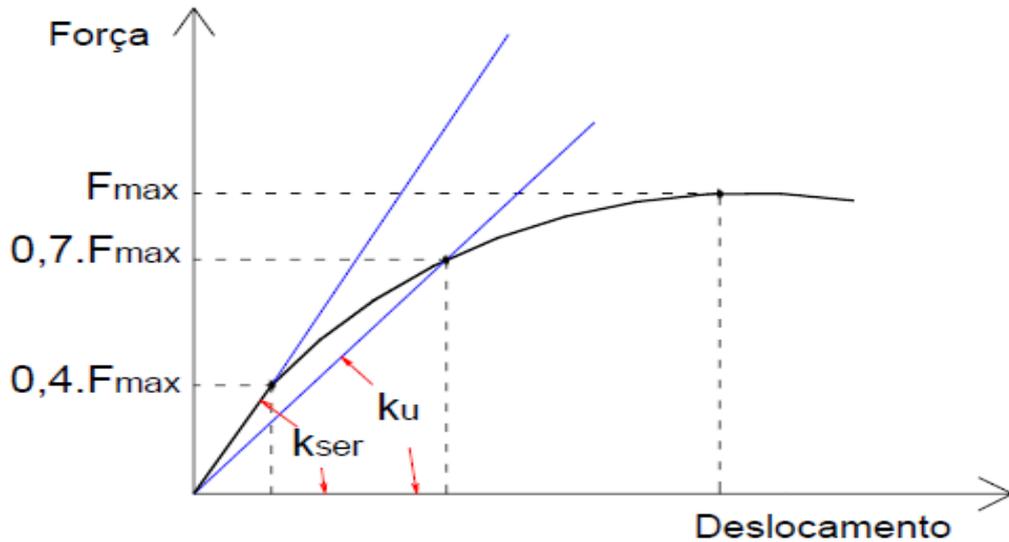


Figura 16: Módulos de deslizamento para conectores verticais.
Fonte: Miotto (2009).

3.2.2 Modelo de Mohler

O modelo de Mohler é muito utilizado no dimensionamento de tabuleiros mistos, e está apresentado na norma europeia EUROCODE 5(1993). Foi adaptado para estruturas mistas de madeira e concreto e admite uma viga de madeira unida a uma mesa de concreto com sistema de conexão metálica entre os dois elementos como mostra a Figura 17.

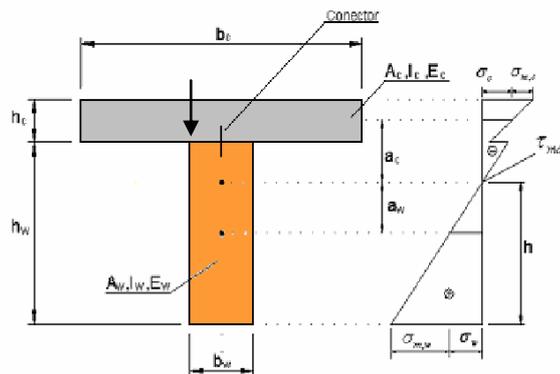


Figura 17: Seção transversal da viga equivalente e respectivas tensões internas na seção mista.
Fonte: Adaptado de MOLINA (2008)

A partir do módulo de deslizamento é definido o fator de redução de inércia do conjunto, levando em consideração além do tipo de união, a disposição e espaçamento dos elementos de ligação, do tipo de madeira, a forma de montagem, a proporção das peças

individuais e o vão entre apoios da viga composta, sendo que a redução é feita para o material que apresenta o maior módulo de elasticidade tem-se, portanto:

$$\gamma_w = 1 \text{ (fator de redução de inércia para a madeira)}$$

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{K_u \cdot L^2} \right]^{-1} \text{ (fator de redução de inércia para o concreto)} \quad (8)$$

Onde:

E_c = módulo de elasticidade médio do concreto na compressão;

A_c = área da seção da mesa de concreto;

s = espaçamento entre os conectores utilizados na viga mista;

L = vão da viga mista (distancia entre apoios).

A distância entre os centros de gravidade da seção até a linha neutra da peça é dado por:

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c (h_c + h_w)}{2(\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w)} \quad (9)$$

$$a_c = \left[\frac{h_c + h_w}{2} \right] - a_w \quad (10)$$

Onde:

a_c = distância do centróide da área de concreto ate a linha neutra da viga mista;

a_w = distância do centróide da área da madeira ate a linha neutra da viga mista;

h_c = altura da mesa de concreto;

h_w = altura da viga de madeira.

A rigidez efetiva do conjunto é obtida por:

$$(EI_{ef}) = E_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + E_w \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w^2 \quad (11)$$

Onde:

I_c = momento de inércia da seção de concreto;

I_w = momento de inércia da seção de madeira.

Sendo que as inércias são obtidas pelas expressões:

$$I_c = \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} = (\text{momento de inércia da mesa de concreto}) \quad (12)$$

$$I_w = \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} = (\text{momento de inércia viga de madeira}) \quad (13)$$

A tensão normal de compressão na mesa de concreto é verificada por:

$$\sigma_c + \sigma_{m,c} \leq f_{c,c} \quad (\text{verificação na extremidade na mesa de concreto}) \quad (14)$$

$$\sigma_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{tensão de compressão no concreto devido a força normal}) \quad (15)$$

$$\sigma_{m,c} = 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{tensão no concreto devido ao momento fletor}) \quad (16)$$

M = momento fletor considerado para carga concentrada $M = PL/4$.

$$\gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \frac{M}{(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \frac{M}{(EI)_{ef}} \leq f_{c,c} \quad (17)$$

Na madeira (parte inferior do conjunto), verifica-se a tensão normal de tração por meios das seguintes relações:

$$\sigma_w + \sigma_{m,w} \leq f_{w,t} \quad (\text{verificação na extremidade inferior}) \quad (18)$$

$$\sigma_w = \gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{tensão na madeira devido a força normal}) \quad (19)$$

$$\sigma_{m,w} = 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (\text{tensão na madeira devido ao momento fletor}) \quad (20)$$

$$\gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \leq f_{w,t} \quad (21)$$

Onde:

$f_{w,t}$ = resistência da madeira a tração na direção paralela as fibras.

A tensão máxima de cisalhamento na linha neutra da viga mista deve ser satisfeita por:

$$\tau_{w,max} = 0,5 \cdot E_w \cdot h^2 \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq f_{v,0} \quad (\text{verificação na LN da seção}) \quad (22)$$

Onde:

$V = \frac{P}{2}$ (força máxima de cisalhamento na seção considerada e é referente a uma carga concentrada no meio do vão) (23)

De acordo com a ABNT NBR 6118/2003, o deslocamento vertical para o concreto devido a carga acidental P é de:

$$\mu_{lim\ c} = \frac{L}{500} \quad (\text{valor limite de flecha para o concreto}) \quad (24)$$

Além disso, a ABNT NBR 7190/1997, estabelece que o deslocamento vertical limite para a madeira, devido a carga acidental P deverá ser:

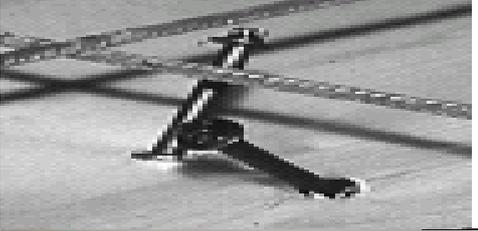
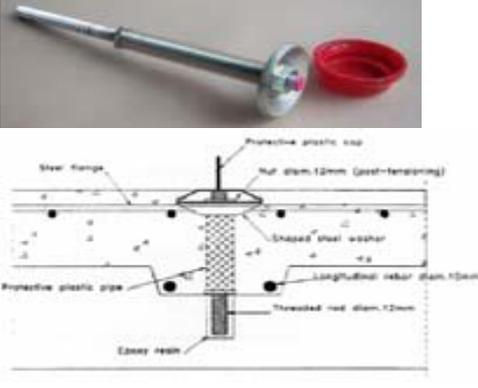
$$\mu_{lim\ m} = \frac{L}{200} \quad (\text{valor limite de flecha para a madeira}) \quad (25)$$

O limite de deformação é com relação ao L/500 (concreto)

3.3 Conectores de cisalhamento

Existem no mercado diversos tipos de conectores metálicos de cisalhamento utilizados na ligação de vigas mistas com mesa de concreto e alma de madeira. Para o uso destes conectores, deve-se observar a melhoria no desempenho da estrutura, os aspectos econômicos

e a facilidade de aplicação do conector. A Figura 18 mostra alguns tipos de conectores usados em estruturas mistas, onde as características apresentadas servem somente como referência, pois devem ser levados em consideração os ensaios, as características do tipo de madeira e as características do concreto de acordo com JORGE (2005).

1		<p>Conector contínuo, conseguido através de uma malha de aço colada à viga de madeira. Solução muito resistente e rígida conduzindo a um comportamento perfeitamente rígido.</p>
2		<p>Conector Tecnaria®, em que o elemento que fica embutido no concreto possui grande rigidez e é também cravado na madeira através dos seus dentes visíveis. Os parafusos poderão ser especificados de acordo com as necessidades particulares.</p>
3		<p>Conector de parafusos SFS®, fabricados com aço de alta resistência, possuem uma cabeça com dimensões suficientes para ancorar a força de arrancamento a que ficam sujeitos, podendo no entanto trabalhar também ao corte.</p>
4		<p>Entalhe com cavilha pré-esforçada por pós-tensão. A força é transmitida por contacto direto entre as superfícies de madeira e betão e por tração nas cavilhas. A pós-tensão beneficia esta solução ao contrabalançar os efeitos negativos da retração do concreto e ao mobilizar também alguma força de atrito.</p>
5		<p>Pregos a 90° são uma solução de baixa resistência e rigidez, porém são baratos e fáceis de instalar. A sua colocação a 45° constituirá um erro de projeto.</p>

6		Barras de aço nervurado ancorados no elemento de madeira a 90° (ligação tipo cavilha). Ligação simples de executar. Existência de modelos de previsão do comportamento.
7		Entalhe no elemento de madeira e barras de aço nervurada colados ao elemento de madeira a 45°.
8		Taco de madeira densa colado à viga de madeira. A transmissão dos esforços de escorregamento é efetuada por contato entre os materiais, determinando uma ligação com bastante rigidez.

Figura 18: Tipos de conectores de cisalhamento.
Fonte: JORGE (2005).

Vale mencionar que existem ligações do tipo rígida (que não permitem deslizamentos entre os materiais unidos) exemplificadas por malha de aço colada na madeira e também do tipo semi-rígidas (que permitem pequenos deslizamentos entre os materiais), representadas por ligações por pinos.

Estudos desenvolvidos por STOJIC e CVETKOVIĆ (2001) da Universidade de Nis, Serbia e Montenegro, em estruturas de madeira e concreto demonstram alguns tipos de ligações. A Figura 19 mostra anéis de divisão e buchas dentadas em conjunto com os parafusos ou barras reforçadas.

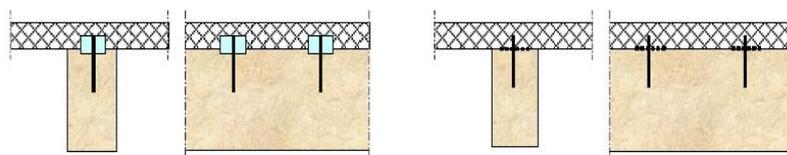


Figura 19: Tipos de ligações.
Fonte: STOJIC e CVETKOVIĆ (2001).

Foram também utilizadas malha de aço onde foi colada na madeira e concreto conforme mostrado na Figura 20.

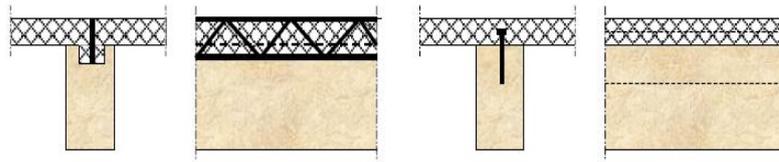


Figura 20: Tipos de ligações.
Fonte: STOJIC & CVETKOVIÉ (2001)

A rigidez da ligação para as condições de serviço, como descrito por PIGOZZO (2004), através de testes em corpos de prova de acordo com a Figura 21, ainda é a melhor forma para se conhecer o comportamento mecânico dos conectores, sendo, estes testes os mais utilizados, por permitirem conhecer as forças cisalhantes com precisão e os deslocamentos correspondentes. Entretanto, as condições de apoio e as pequenas excentricidades das forças atuantes nos conectores, produzem interferências indesejáveis entre as partes conectadas.

Sendo: (a) ligação colada de $12,5 \times 103 \text{ mm}^2$; (b) Anel paralelo de 100 mm de diâmetro; (c) Conector de anel de macho e fêmea com pega dentada; (d) Cavilha de 14 mm de diâmetro; (e) parafuso de porca; (f) Chapa estampada; (g) pregos de 4,4mm de diâmetros.

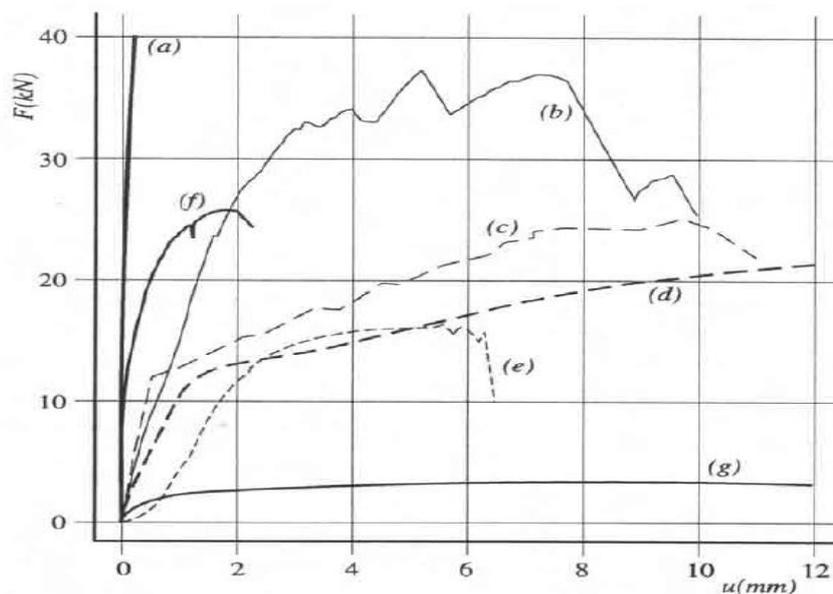


Figura 21: Curvas de cargas versus deslocamento para diversos tipos de conectores obtidos através de resultados experimentais. Fonte: PIGOZZO (2004).

3.4 Estudos de sistemas mistos de conexões para madeira e concreto realizados no Brasil e no exterior.

Estudos realizados em outros países mostram um crescimento no estudo do dimensionamento de estruturas mistas de madeira e concreto com conectores metálicos e em muitos casos utilizam madeira laminada colada.

MAKIPURO (1996) *apud* MOLINA (2008) estudou corpos de prova misto de madeira laminada colada e concreto usando conectores de aço.

Os ensaios foram realizados para verificação do comportamento dinâmicos de corpos de prova mistos com sistema de conexão metálico. O primeiro corpo de prova denominado de 6D foi feito sem entalhe na interface dos materiais e o segundo denominado de 7C foi feito com um entalhe na interface dos materiais, (Figura 22). Para os conectores foram utilizadas barras de aço comum, pintadas com primer, com diâmetro de 10 mm e foram coladas com resina epóxi em furos com diâmetro de 14 mm a 16 mm. O comprimento de ancoragem para as barras de aço utilizadas nas peças de madeira foi de 250 mm.

Nos corpos de prova foram instalados DTs (transdutores de deslocamentos) para verificação das medidas de deslizamentos entre os materiais madeira e concreto, e foram usados sensores de temperatura próximos a região da conexão. A frequência de excitação nos corpos de prova foi de 60 Hz.

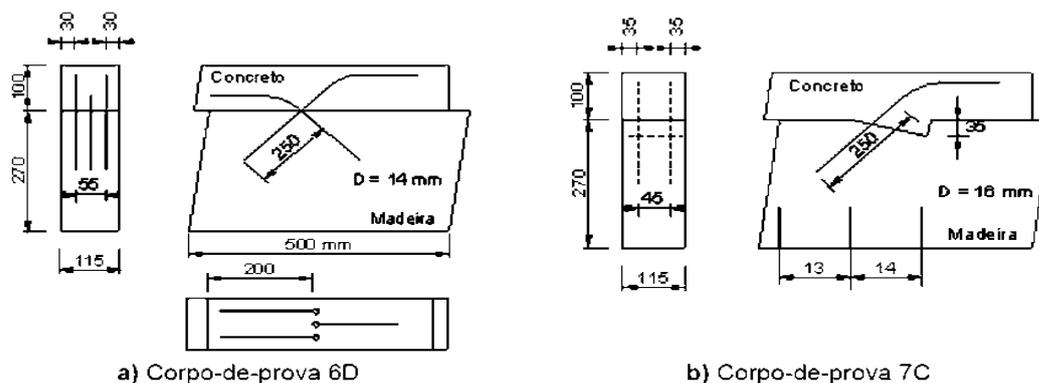


Figura 22: Corpos de prova
Fonte: Molina (2008).

O corpo de prova 6D foi submetido inicialmente a nível máximo de carga de 65% da resistência última estática da conexão. Sendo verificado que para este material a carga mostrou-se muito elevada. Para o corpo de prova 7C a carga aplicada foi reduzida a 58% da resistência última da ligação.

No corpo de prova 6D foi verificado que após a aplicação de 159.720 ciclos de carga a conexão começou a perder rigidez rapidamente. Para 500 ciclos aplicados registrou-se um

deslizamento residual relativamente elevado e igual a 2,5 mm, sendo que a maior temperatura registrada na linha de cola foi de 54⁰C. As barras de aço tracionadas foram sendo arrancadas da peça de madeira à flexão enquanto as barra comprimidas sofreram flexão.

No corpo de prova 7C a utilização do entalhe diminuiu o deslizamento entre os materiais para 0,41 mm. A medida dos deslizamentos foi efetuada com a aplicação de 506.070 ciclos de carregamento. Na região do entalhe foi observado a ocorrência de fissuração no concreto com esmagamento na direção das fibras da madeira, seguida de separação das mesmas.

Segundo os autores a base primer não é recomendada para a conexão onde as barras de aço são tracionadas por apresentar tendência de solda na presença da resina epóxi.

BRANCO e CRUZ (2003) desenvolveram estudos de ligações mistas madeira e concreto em corpos de prova, sendo obtidos seis corpos de provas (M90) e 5 corpos de prova (M90C). Foi usado concreto leve, o qual permitiu uma redução da massa do concreto em cerca de 30%. Sendo utilizado o pinho bravo (pinus pinaster) e como ligações foram usados pregos como conectores na vertical com diâmetro de 3,4 mm e comprimento de 70 mm. O concreto usado apresentou uma resistência de 31,18 MPa aos 28 dias. Antes da concretagem foi usado nos corpos de prova (M90C) um compensado com espessura de 2 mm entre a madeira e o concreto sendo que os corpos de prova (M90) ficaram sem o compensado. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Resultados Obtidos dos Ensaios dos Corpos de Prova M90.
Fonte: BRANCO E CRUZ (2003).

Referência do Ensaio	Força	Força	Deslocamento	Módulo de Deslizamento	
	Estimada	máxima	máximo	K_{ser} (kN/mm)	Regressão ^{a)}
	F_{est} (kN)	F_{max} (kN)	D_{max} (kN)	EN 26891(1991)	
M90-1 ^{b)}	4,69	5,33	15,00	7,03	5,78
M90-2	6,46	5,08	15,00	2,77	3,06
M90-3	5,42	5,22	15,00	3,46	3,71
M90-4	5,42	6,06	15,00	6,51	5,95
M90-5	5,58	6,61	15,00	^{c)} 167,15	7,83
M90-6	5,73	6,19	15,00	12,26	7,39
Média		5,73	15,00	6,41	5,62
Desvio. Padrão		0,62	0,00	3,76	1,92
Coefficiente de variação (%)		0,11	0,00	0,59	0,34

- a) Valores obtidos a partir de ajustes de retas ao comportamento força-deslocamento ($r^2 > 0.95$);
b) Ensaio utilizado para a obtenção de uma estimativa da força máxima;
c) Valor considerado anormal.

Tabela 11: Resultados Obtidos dos Ensaios dos Corpos de Prova M90C.
Fonte: BRANCO E CRUZ (2003).

Referência do Ensaio	Força Estimada	Força máxima	Deslocamento máximo	Módulo de Deslizamento	
	F_{est} (kN)	F_{max} (kN)	D_{max} (kN)	K_{ser} (kN/mm) EN 26891(1991)	Regressão ^{a)}
M90C-1 ^{b)}	6,57	7,80	10,49	-	-
M90C-2	8,23	7,61	7,81	6,85	6,43
M90C-3	8,14	8,41	8,41	7,63	6,33
M90C-4	8,14	15,00	15,00	^{c)} 30,51	7,78
M90C-5	8,79	9,34	9,34	6,25	6,41
Média		10,21	10,21	6,81	6,74
Desvio. Padrão		2,86	2,86	0,60	0,70
Coefficiente de variação (%)		0,28	0,28	0,09	0,10

- a) Valores obtidos a partir de ajustes de rectas ao comportamento força-deslocamento ($r^2 > 0.95$);
b) Ensaio utilizado para a obtenção de uma estimativa da força máxima;
c) Valor considerado anormal.

Segundo PIGOZZO (2004) a Europa usa com muita frequência barras de aço coladas como conexão e estas barras são usadas coladas paralelamente as fibras da madeira, sendo que são usadas em ligações de topo entre peças estruturais ou fixações de colunas em base de concreto e são relatados como sistemas de excelentes comportamentos.

TURKOWSYJ (1991) *apud* PIGOZZO (2004) desenvolveu no instituto Tsniisk, em Moscou, um estudo envolvendo barras de aço coladas inclinadas em relação às fibras da madeira, conseguindo assim excelentes resultados, por meio da transmissão de esforços para uma maior região da peça de madeira, permitindo assim melhor distribuição de tensões tornando menos vulneráveis a rachaduras a madeira da área de ligação, aumentando a sua resistência ao cisalhamento, com excelente comportamento de grupo, uma vez que todas as barras trabalham simultaneamente permitindo uma ligação de grande resistência rigidez.

WEAVER e DAVIDS (2004) realizaram estudos em corpos de prova mistos e vigas mistas de madeira laminada colada e concreto usando conectores de cisalhamento. Ao todo foram confeccionados sete corpos de prova (S1–S7) e 2 vigas mistas (G1–G2).

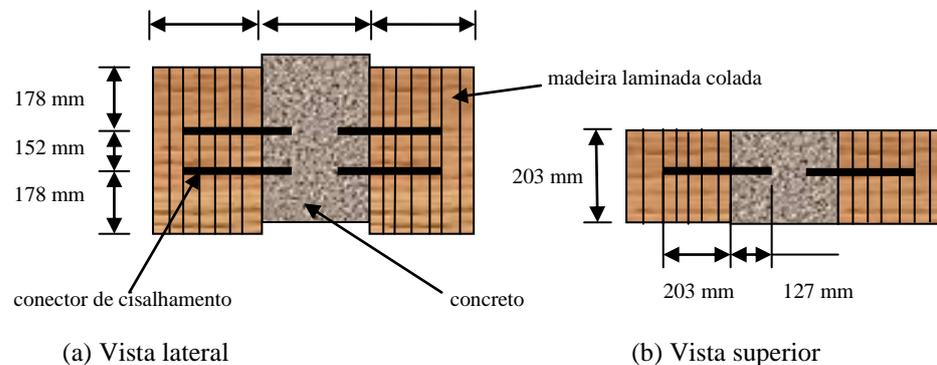


Figura 23: Detalhes dos corpos de prova.

Fonte: Modificado de WEAVER e DAVIDS (2004).

Foi utilizado para os corpos de prova, madeira laminada colada, concreto com resistência a compressão de 33,9 MPa e conectores de cisalhamento, sendo que os conectores usados foram posicionados em sentido vertical. Os detalhes dos corpos de prova estão apresentados na Figura 23.

O corpo de prova S6 foi o primeiro a ser ensaiado, e ao romper ele apresentou fissuras no concreto isto ocorreu devido a falta de armadura. Para prevenir a fissura nos demais corpos de prova foram usadas duas placas de aço cada uma com 25 mm de espessura e onde foram fixadas por quatro barras rosqueadas de aço com 25 mm de diâmetro. Além disso, foi utilizada uma placa de neoprene com espessura de 19 mm, entre a placa de aço e o concreto, com a finalidade de distribuir a pressão de confinamento.

Foram posicionados nas extremidades dos corpos de prova transdutores de deslocamento entre a madeira e o concreto de modo a medir o deslizamento relativo entre os dois materiais.

Para aplicação do carregamento foi utilizada nos ensaios uma máquina com mecanismo servo hidráulico marca Instron com capacidade de 490 kN.

Os corpos de prova S4, S5 e S7 foram ensaiados com carga estática até a ruptura e apresentou uma resistência média para cada conector de 97,1kN.

Os corpos de prova S1, S2 e S3 foram ensaiados com cargas cíclicas de 2×10^6 ciclos com amplitude constante, com uma frequência de 3Hz. Para estes ensaios dinâmicos, os corpos de prova apresentaram uma resistência de 41.8 kN para cada conector com valor de carga $F_{m\acute{a}x} = 167,24\text{kN}$.

WEAVER e DAVIDS (2004) observaram que apesar dos corpos de prova S1 e S2 não terem perdido ductilidade, ocorreu um deslizamento de 1,0 a 1,3 mm, atribuído à acumulação de danos por fadiga sob a forma de esmagamento da madeira em torno dos conectores.

Foram também confeccionadas duas vigas (G1-G2) as quais foram confeccionadas com madeira laminada colada e concreto com 34,5 MPa, sendo utilizada com o concreto uma camada de polímeros com espessura 10mm com fibra de vidro (FRP). Este material é usado para reforçar vigas em estudos desenvolvidos pelo Laboratório da Universidade de Maine de acordo com a Figura 24.

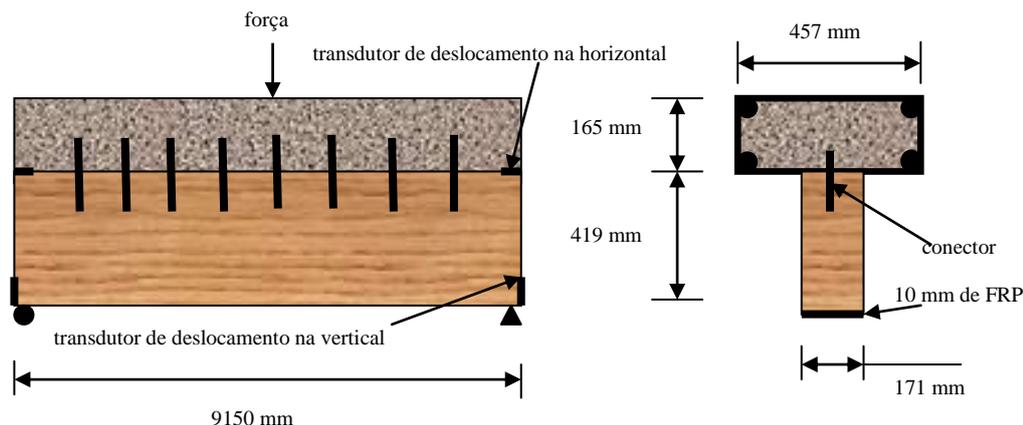


Figura 24: Confecção das vigas mistas
 Fonte: Modificado de WEAVER e DAVIDS (2004)

Os conectores da viga G1 foram colocados com espaçamento de 303 mm e a viga G2 com espaçamento de 152 mm. Além disso, foram utilizados quatro transdutores de deslocamento, sendo que dois foram usados nas extremidades das vigas, sendo que foram posicionados no sentido vertical e os outros dois foram usados na parte superior entre o concreto e a madeira.

Para aumentar os danos nos conectores, as vigas foram carregadas em três pontos através de um atuador hidráulico com capacidade de 490 kN. Os valores das cargas foram $F_{\text{máx}} = 98$ kN para a viga G1 e $F_{\text{máx}} = 39$ kN para a viga G2, sendo que as vigas foram ensaiadas a 2×10^6 ciclos de carga com intensidade constante, e frequência de 1Hz.

As cargas últimas nas vigas G1 e G2 foram 222 kN e 313 kN respectivamente, sendo que a capacidade da viga G2 foi 41% maior do que G1 porque contém o dobro de conectores de cisalhamento.

No Brasil a falta de normalização para os ensaios de cisalhamento em estrutura mistas de madeira e concreto tem permitido aos pesquisadores adotarem diferentes metodologias e formatos para os ensaios de corpos-de-prova PIGOZZO (2004).

MATTHIESEN (2000) *apud* PIGOZZO (2004) ensaiou corpos de prova com conectores de aço formados por parafuso auto-atarrachantes dispostos em "x", com inclinação de 50° em relação às fibras da madeira. Os tipos de madeiras utilizadas foram:

- *Pinus oocarpa shied* – com $f_{w0,c} = 26,6$ MPa e $E_{w,0} = 11009$ MPa
- *Eucalyptus grandis* - com $f_{w0,c} = 51,6$ MPa e $E_{w,0} = 20249$ MPa
- *Goupia glaba* - com $f_{w0,c} = 26,6$ MPa e $E_{w,0} = 11009$ MPa

SEGUNDINHO (2004) analisou um modelo experimental reduzido de uma ponte mista madeira e concreto utilizando vigas de madeira roliça. Foram usadas quatro vigas de madeira bruta de reflorestamento, *Eucalyptus urophylla*, com comprimento médio de 500 cm e

diâmetro de 16 cm, conectores metálicos (barras de aço CA 50B) com diâmetro de 12,5 mm e comprimento de 15 cm. A laje de concreto armado apresentou as dimensões 7 x 170 x 410 cm, sendo que o concreto utilizado apresentou um resistência à compressão ($f_{c,m}$) de 26 MPa e módulo de elasticidade longitudinal de 38000 MPa.

A Figura 25 apresenta uma representação de um modelo reduzido da ponte de madeira e concreto analisado por SEGUNDINHO (2004).

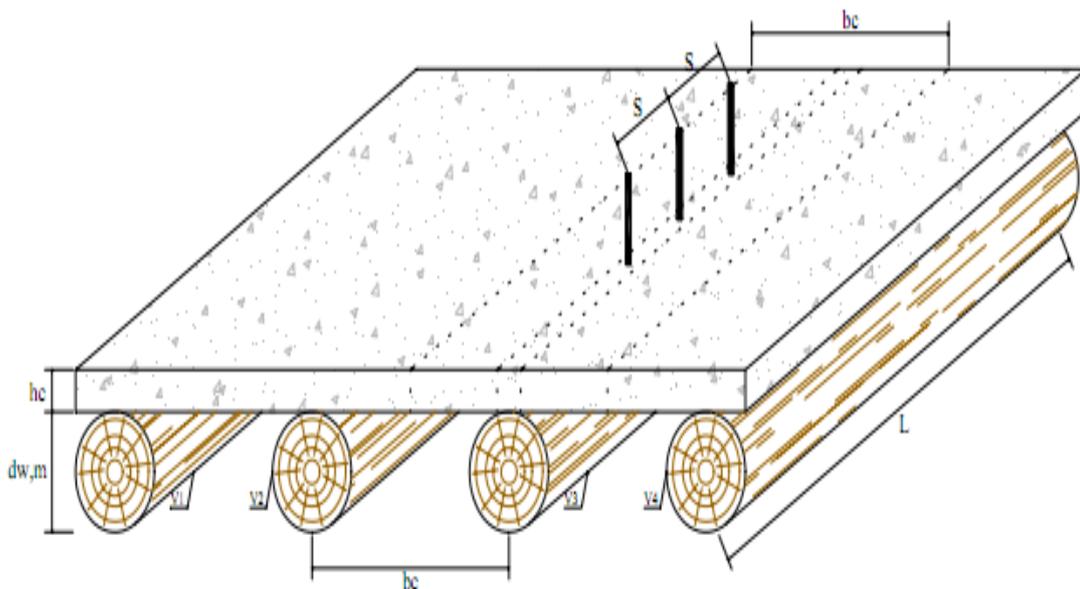


Figura 25: Modelo reduzido da ponte madeira e concreto.
Fonte: SEGUNDINHO (2004).

O estudo mostrou que as cargas se distribuíram nas vigas de madeira. Quando esse modelo foi carregado com o trem-tipo ou com a viga de distribuição foi verificado que cada viga contribuiu de forma igual para suportar os carregamentos.

Comprovou-se experimentalmente que a ligação utilizando esses modelos de pinos metálicos trouxe uma eficiência de mais de 80% para o conjunto e que o modelo teórico (Eurocode 5) utilizado nesse trabalho mostrou-se muito conservador.

Segundo o autor a construção deste tipo de tabuleiro é bastante econômico, durável e o concreto confere uma resistência à abrasão maior do que a madeira. Esse material composto utilizando esse modelo de pino metálico na ligação proporcionou um comportamento estrutural confiável quando comparado com o modelo teórico.

MOLINA (2008) analisou o comportamento estrutural estático e dinâmico do sistema misto madeira e concreto para tabuleiro de pontes e como conexão entre os materiais usou conectores de cisalhamento, sendo usados conectores em “X” e verticais.

Para os ensaios nos corpos de prova realizado por MOLINA (2008), foram confeccionados 3 corpos de prova primeiramente, usados como ensaios preliminares estes ensaios tiveram como objetivos:

- Teste de calibração dos equipamentos a serem utilizados na realização dos ensaios;
- Determinação da amplitude de carga cíclica e da frequência de excitação a serem consideradas nos ensaios dinâmicos de cisalhamento;
- Verificação dos modos de ruptura do sistema misto de ligação;
- Verificação da rigidez da ligação a partir da manutenção do número de ciclos de carga.

Para confecção dos corpos de prova mistos, para os ensaios preliminares, foram usados conectores na vertical sendo utilizadas barras de aço CA-50, com diâmetro de 12,5 mm, as quais não foram galvanizadas. As barras foram fixadas na madeira a partir da pré-furação sem a utilização de resina.

A configuração dos corpos de prova estão representadas na Figura 26.

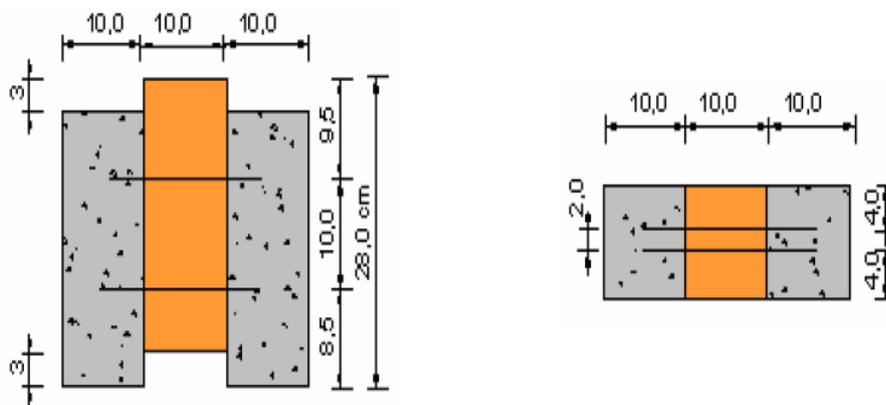


Figura 26: Corpo de prova mistos para ensaios preliminares.
Fonte: MOLINA (2008).

Para os ensaios preliminares foram preparados três corpos de prova: CP1, CP2 e CP3, sendo que o CP1 foi utilizado na realização do ensaio estático, o CP2 e o CP3 foram utilizados nos ensaios cíclicos mudar para.

Para a realização dos ensaios estáticos, foi utilizado um pórtico de reação, com cilindro hidráulico com capacidade de 480 kN, acionado por um atuador de controle manual e sistema de aquisição de dados externo. Para os ensaios cíclicos de cisalhamento foi usado a máquina universal DARTEC M1000/RC, com atuador servo hidráulico, com capacidade de 100 kN, e sistema de aquisição de dados externo.

Para os ensaios estáticos preliminares no corpo de prova CP1, foram usados três ciclos de carga, sendo que os dois primeiros ciclos com carga aplicada até 50% da resistência estática da ligação, e o terceiro ciclo com carregamento até a ruptura. A velocidade de aplicação foi de 0,10 kN/mm.

O deslocamento entre os materiais foram medidos por meio de dois transdutores de deslocamento com sensibilidade de 0,001mm e curso máximo de 5 mm, posicionados em faces opostas do corpo de prova.

Para os ensaios cíclicos preliminares no corpo de prova CP2, este foi submetido inicialmente a ciclos de carregamento com frequência de excitação constante de 5 Hz e aplicação de ambos os níveis de carga, máximos e mínimos de compressão, sendo, senoidal a forma das ondas de tensão.

O nível máximo considerado inicialmente para o carregamento cíclico foi de 50% da resistência estática da ligação, ou seja, $F_{\text{mín}} = 5,52 \text{ kN}$ e $F_{\text{máx}} = 55,22 \text{ kN}$.

Para o terceiro corpo de prova CP3, foi reduzido a amplitude de carregamento e também a frequência de excitação para 3 Hz.. O ensaio foi conduzido com carregamento cíclico variando entre $F_{\text{mín}} = 4,75 \text{ kN}$ e $F_{\text{máx}} = 47,50 \text{ kN}$.

A rigidez da ligação foi verificado para o corpo de prova CP3, a cada 200.000 ciclos de carga, isto através de ensaios estáticos de cisalhamento, para força de $F_{\text{máx}} = 47,50 \text{ kN}$, sendo a velocidade de aplicação de carga de 0,10 kN/mm.

Os resultados dos ensaios preliminares no corpo de prova CP1 mostrou que a força última obtida foi de 119,04 kN, e a ruptura convencionada da ligação (considerando 4 conectores na vertical) correspondente a deformação 2%₀ (nomeada por 2%₀₀₂), foi de 110,45 kN, sendo que esses valores foram obtidos a partir de ensaios estáticos de cisalhamento.

Portanto, a resistência última para cada o conector vertical foi de 27,61 kN e o módulo de deslizamento para cada conector obtidos com base nos valores de 10% e 40% da resistência última da ligação, foi de 16,95 kN/mm.

Foi observado que a deformação do corpo de prova foi consequência principalmente do efeito combinado da flexão do conector com o embutimento na madeira na direção do fluxo de cisalhamento, conforme mostra Figura 27.



Figura 27: Detalhe da flexão no corpo de prova – CP1.
Fonte: MOLINA (2008).

Para os resultados nos ensaios preliminares no corpo de prova CP2, os níveis de carga cíclica e a frequência de excitação, considerados inicialmente, provocaram a ruptura precoce da barra de aço com aplicação de apenas 198.789 ciclos de carga, como mostra a Figura 28.



Figura 28: Detalhe da ruptura de aço após os ciclos de carga.
Fonte: MOLINA (2008).

Ocorreram também fissuras no concreto nas regiões da conexão, como mostra a Figura 29. Neste caso, a amplitude da força que provocou a falha na ligação foi a 49,70 kN sendo, portanto, 12,42 kN/mm para cada conector.



Figura 29: Detalhe das fissuras no corpo de prova – CP2.
Fonte: MOLINA (2008).

Com relação aos resultados dos ensaios no corpo de prova CP3, ocorreu também ruptura na barra de aço, porém com aplicação de 1.012.786 ciclos de carregamento, sendo que o deslocamento máximo entre os materiais foi de 1,90mm. Foi observado também, a partir dos ensaios cíclicos realizados, que os ciclos repetidos de carregamento flexionam o conector podendo provocar, nas regiões críticas, a plastificação da barra de aço, levando ao enfraquecimento do sistema de conexão.

Foram também confeccionados corpos de prova usando conectores em “X” com inclinação de 45° , sendo utilizadas barras de aço comum, galvanizadas do tipo CA-50, com diâmetro de 8 mm posicionadas de cada lado da peça de madeira do corpo de prova misto.

Para a colagem das barras de aço foi utilizada a resina bi-componente do tipo epóxi: Sikadur 32.

Para os ensaios estáticos de corpos de prova foram confeccionados três corpos de prova, a madeira utilizada foi de espécies de reflorestamento *Eucalypto citriodora* tratada com CCA. Foram usadas peças roliças de madeira no corpo de prova mistos nos tamanhos de 47,0cm com diâmetro médio aproximado das peças de 18,0cm, como mostra a Figura 30.

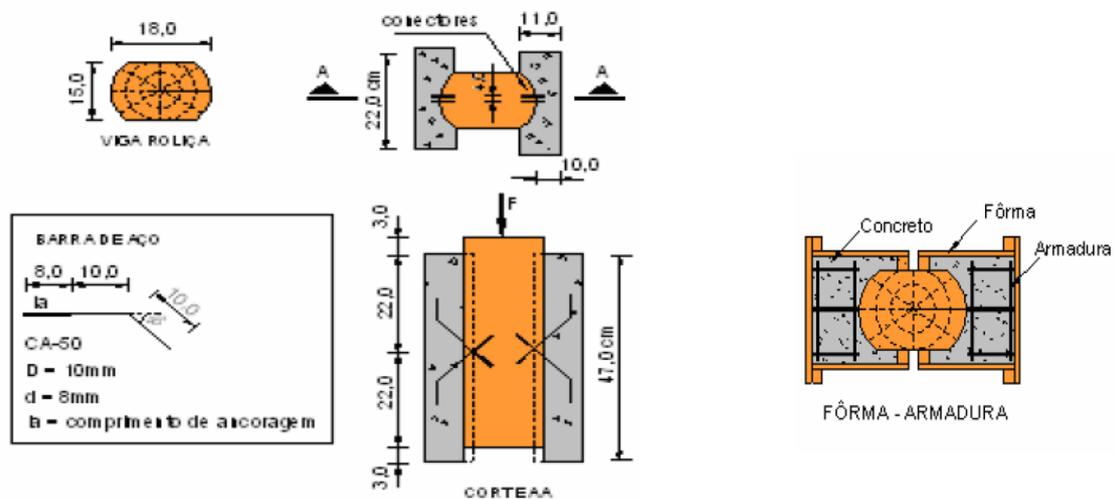


Figura 30: Corpo de prova com conectores em “X”.
Fonte: MOLINA (2008).

O concreto usado foi preparado com traço 1: 2,67: 3,03 em peso, com relação água-cimento ($a/c = 0,42$). A resistência média do concreto foi de 28 MPa aos 28 dias e o módulo de elasticidade médio do concreto foi de 26323,44 MPa.

Os ensaios estáticos foram realizados em três ciclos de carga, sendo que nos dois primeiros ciclos com carga aplicada até 50% da resistência última da ligação, e o terceiro ciclo com carregamento até a ruptura.

Os carregamentos estáticos foram controlados por meio de uma célula de carga com capacidade de 250 kN, sendo que o sistema de solicitação do corpo de prova foi desenvolvido por meio do pórtico de reação.

Foram usados transdutores de deslocamento para medir o deslocamento entre os materiais, com sensibilidade de 0,001mm e curso máximo de 5 mm, posicionados em faces opostas dos corpos de prova.

Após os ensaios MOLINA (2008) observou que nenhum dos corpos de prova mistos analisados, o concreto armado apresentou fissuras visíveis.

Os resultados obtidos para os corpos de prova mistos foram apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resistência e rigidez dos corpos de prova com conectores em “X”.
Fonte: MOLINA (2008).

CP ¹ – Vig ²	F _u /conector “X” (kN)	Rigidez/conector “X” (kN/mm)
02-VR1	29,61	38,62
05-VR1	27,48	35,84
09-VR2	30,23	39,43

1) Numeração do corpo de prova misto.

2) Viga roliça de Eucalipto citriodora de onde foram retirados os corpos de prova roliços.

A partir da análise dos resultados estáticos, obtidos para os corpos de prova mistos, o módulo de deslizamento (K) médio e a resistência média última de cada conector “X”, formado por duas barras de aço com diâmetro de 8mm, colados com a resina epóxi Sikadur 32, em madeira saturada de *Eucalipto citriodora* (U = 30%), corresponderam a: K = 37,96kN/mm e F_u = 29,11kN.

Foram também confeccionadas vigas mistas (V01, V02 e V03) com seção transversal em “T”. Na confecção das vigas mistas utilizou espécies de reflorestamento *Eucalipto citriodora* tratada com CCA. Para a colagem das barras de aço foi utilizada a resina bi-componente do tipo epóxi: Sikadur 32.

Foi usado concreto com resistência média foi de 29,45 MPa com módulo de elasticidade médio de 27355,43MPa.

Para os conectores de cisalhamento foi usada barras de aço comum, galvanizadas do tipo CA-50 com diâmetro de 8 mm, sendo que foram usados um total de quatro conectores em “X” espaçados de 32,5 cm, conforme Figura 31.

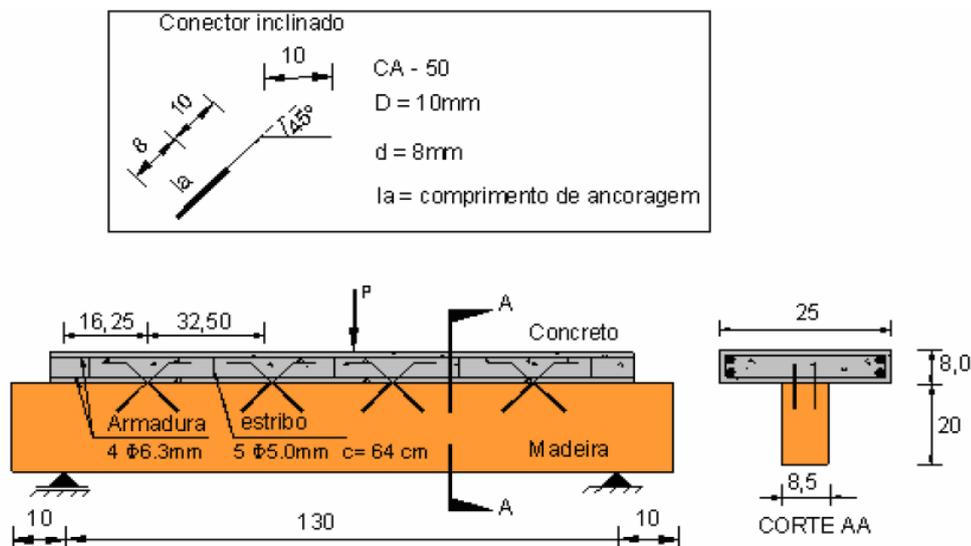


Figura 31: Detalhes das vigas mistas.
Fonte: MOLINA (2008).

Para os ensaios estáticos foram ensaiadas três vigas mistas, sendo utilizado um pórtico de reação, com cilindro hidráulico com capacidade de 480 kN, acionados por um atuador de controle manual, sendo que os ensaios foram conduzidos até a ruptura.

As vigas mistas após a ruptura apresentaram dois modos de falha basicamente, que foram rupturas na alma da viga mista por cisalhamento na linha neutra e esmagamento da parte superior da mesa de concreto da viga.

Os valores das cargas últimas de ruptura, obtidos para cada uma das vigas mistas submetidas aos ensaios estáticos de flexão foram respectivamente, $P_{rup} = 218,39$ kN para V01, $P_{rup} = 119,12$ kN para V02 e $P_{rup} = 198,53$ kN para V03, sendo que o valor médio das cargas de ruptura (P_{rup}) = 178,68 kN.

Para as vigas V01, V02 e V03, a força média limite de cisalhamento nos conectores “X” correspondeu aproximadamente a 73,89% do valor médio da força última de Ruptura, ou seja, 132,03 kN.

3.5 Estudos realizados no Estado do Amazonas

Estudos no Amazonas desenvolvidos pelo pesquisador SÁ RIBEIRO (2006) avaliou um sistema de conexão de madeira e concreto, com o objetivo de demonstrar que o concreto fissurado e a armadura de alto custo poderiam ser substituídos por um *deck* de madeira sólida da Amazônia.

O sistema utilizou madeira de refugo de média a alta densidade proveniente da região Amazônica com sobras de aço de construção. SÁ RIBEIRO (2006) demonstrou ser um sistema construtivo alternativo, estruturalmente eficaz e de baixo custo.

Foram utilizadas vigas de madeira laminadas pregadas (MLP's) compostas por cinco peças de madeira com 3050 mm de comprimento, intercaladas verticalmente e pregadas com pregos de 80 mm de comprimentos. As madeiras usadas foram a Mandioqueira lisa (*Qualea acuminata*), e o Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*). Como conectores, foram utilizados segmentos de barra de 10 mm de diâmetro, adquiridos como resíduos de uma construção em andamento. Os conectores usados foram posicionados horizontalmente, como mostrado na Figura 32.



Figura 32: Detalhes de confecção das vigas mistas.
Fonte: SÁ RIBEIRO (2006).

A resistência de compressão do concreto usado foi de 18 MPa, aos 28 dias, com módulo de elasticidade de 22804 MPa.

Três vigas compostas de madeira e concreto foram ensaiadas, em uma máquina de teste universal com célula de carga com capacidade de 500 kN, numa velocidade de 10 mm/minutos até a sua ruptura.

Deflexões foram medidas no meio do vão através de potenciômetros, ver detalhes na Figura 33. Também foram medidas as deformações relativas entre as camadas de madeira e o concreto.

Segundo SÁ RIBEIRO (2006) serão necessários mais estudos para que este tipo de estrutura, feita com resíduos de materiais de construção e madeira de baixa qualidade, venha a ser utilizadas em pontes e lajes para habitação popular.



Figura 33: Detalhe da viga de madeira e concreto.
Fonte: SÁ RIBEIRO (2006).

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados inicialmente os detalhes da inspeção dos principais sistemas construtivos de pontes utilizados na região de Manaus. São também apresentados os detalhes dos ensaios de cisalhamento de corpos de prova mistos e de flexão de vigas mistas realizados no LaMEM/EESC/USP, assim como, os detalhes da caracterização dos materiais utilizados nos sistemas analisados.

4.1 Levantamento de algumas pontes na zona rural de Manaus

Na primeira etapa, foram identificadas e retiradas algumas amostras para identificação das madeiras empregadas em pontes na zona rural de Manaus. Os locais de levantamento destas pontes foram indicados pela Secretaria de Produção Rural (SEPROR) do Estado do Amazonas.

O levantamento destas pontes foi realizado no município de Manaus e de Careiro da Várzea, sendo os locais visitados, aqueles apresentados nas Figuras 34 e 35.

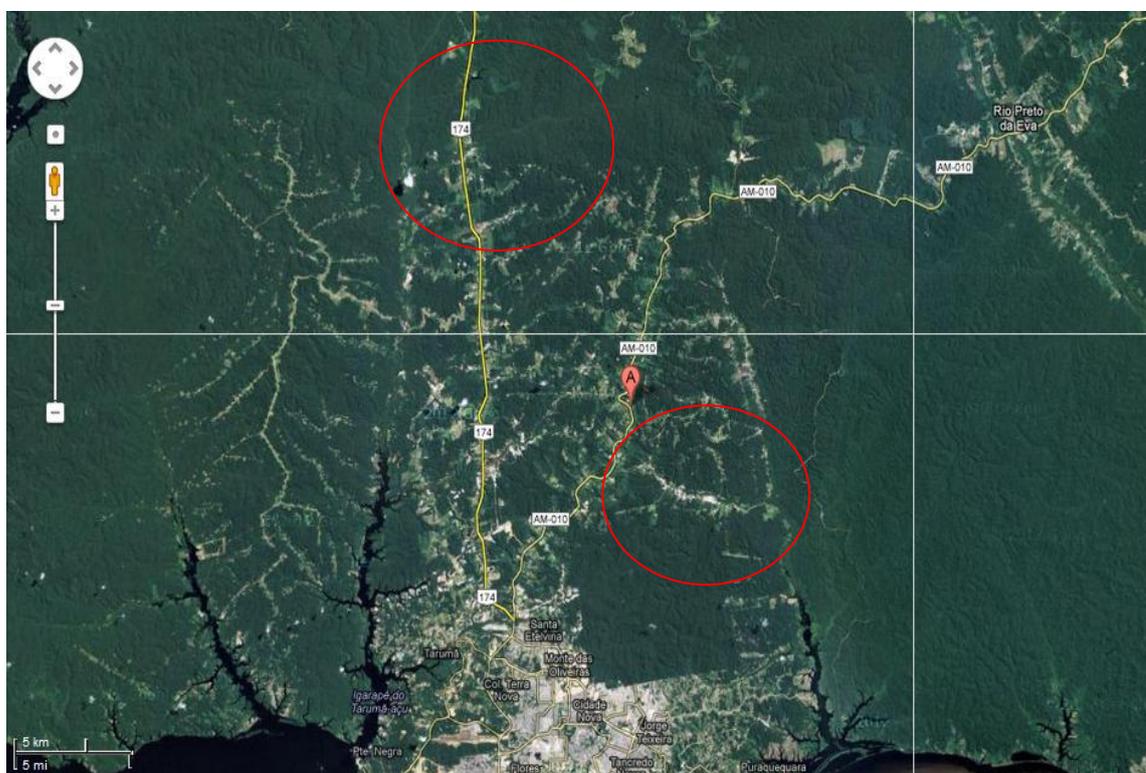


Figura 34: Localização da área de algumas pontes na Rodovia 174 e AM 010.



Figura 35: Localização da área de algumas pontes na Rodovia 319 no Município de Careiro da Várzea.

Foram retiradas amostras de madeira de partes e elementos que não viessem a danificar a estrutura das pontes, de modo a possibilitar a identificação da espécie de madeira utilizada na estrutura de cada ponte de madeira visitada. O reconhecimento da espécie de madeira foi realizado no Laboratório de Física da Madeira - Faculdade de Ciências agrárias na Universidade Federal do Amazonas (UFAM) - Manaus-AM.

4.2 Caracterização da madeira

Com base na ABNT NBR 7190/1997 foram realizados os ensaios de caracterização da madeira no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da EESC/USP, em São Carlos/SP.

Os ensaios foram realizados para que pudessem ser determinados os valores das propriedades mais importantes da madeira para o presente estudo, as quais foram posteriormente utilizados no modelo de Mohler para determinação da configuração das vigas mistas.

Foram considerados em media três corpos de prova para obtenção dos resultados de caracterização dos materiais para cada caso.

A madeira utilizada foi o Cumaru (*Dipteryx odorata*), pertencente a classe C-60, a qual é comum a sua utilização em pontes na região norte do Brasil, especialmente no estado do Amazonas. Devido a dificuldade muito grande de transporte da madeira de Manaus -

Amazonas até São Carlos – São Paulo, foi mais prático comprar a madeira no mercado local de São Carlos, onde havia esta madeira tropical disponível para compra.

Os valores médios de caracterização determinados, neste caso, foram:

- Umidade;
- Densidade;
- Compressão paralelo às fibras;
- Resistência à tração paralelo às fibras;
- Resistência à tração.

4.2.1 Umidade



Figura 36: Corpos de prova para determinação da umidade.

O teor da umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, sendo dada por:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (26)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

O teor da umidade serve para ajuste das propriedades mecânicas de resistência e de rigidez, além de orientar a escolha de métodos preventivos a preservação da madeira.

Para o ensaio de caracterização do teor de umidade foram utilizados os corpos de prova com seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 x 3,0cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0cm, como apresentado na Figura 36.

4.2.2 Densidade

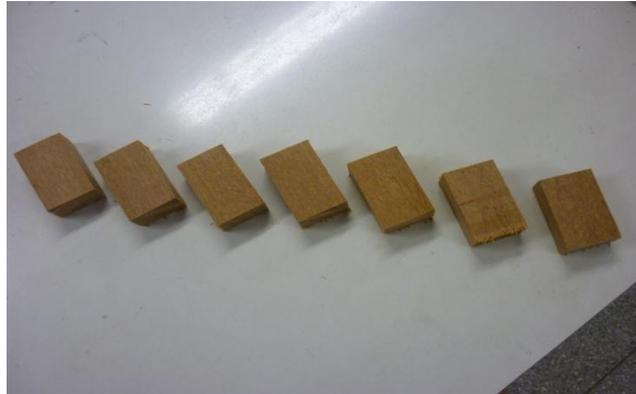


Figura 37: Corpo de prova para determinação da densidade.

A densidade básica é a massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, a qual é expressa pela relação:

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (27)$$

Onde:

m_s é a massa seca da madeira, em quilogramas;

V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

4.2.2.1 Densidade Aparente

A densidade aparente é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade de 12%, sendo dada por:

$$\rho_{\text{ap}} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (28)$$

Onde:

m_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas;

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos.

Os corpos de prova para o ensaio de densidade aparente foram confeccionados com seção transversal retangular, em dimensões nominais de 2,0 x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm, conforme Figura 37.

4.2.3 Compressão paralela às fibras



Figura 38: Corpo de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.

A resistência à compressão paralela às fibras ($f_{wc,0}$ ou f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento. Foram ensaiados seis corpos de prova, sendo que três corpos de prova feitos com a madeira ainda verde e três corpos de prova foram usados madeira seca, Figura 38. A tensão de compressão paralela às fibras é calculada por meio da expressão:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x.}}{A} \quad (29)$$

Onde:

$f_{c0,Max}$ = é a máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newtons;

A = é a área da seção transversal do corpo de prova, em metros quadrados;

f_{c0} = é a resistência à compressão paralela às fibras, em MPa.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, sendo esta expressa em MPa.

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\epsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, medida no ensaio, sendo este dado por:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (30)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão normal correspondentes a 10% e 50% da tensão de ruptura do corpo de prova.

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medidas na direção das fibras da madeira correspondentes às tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

4.2.4 Resistência à tração paralela às fibras

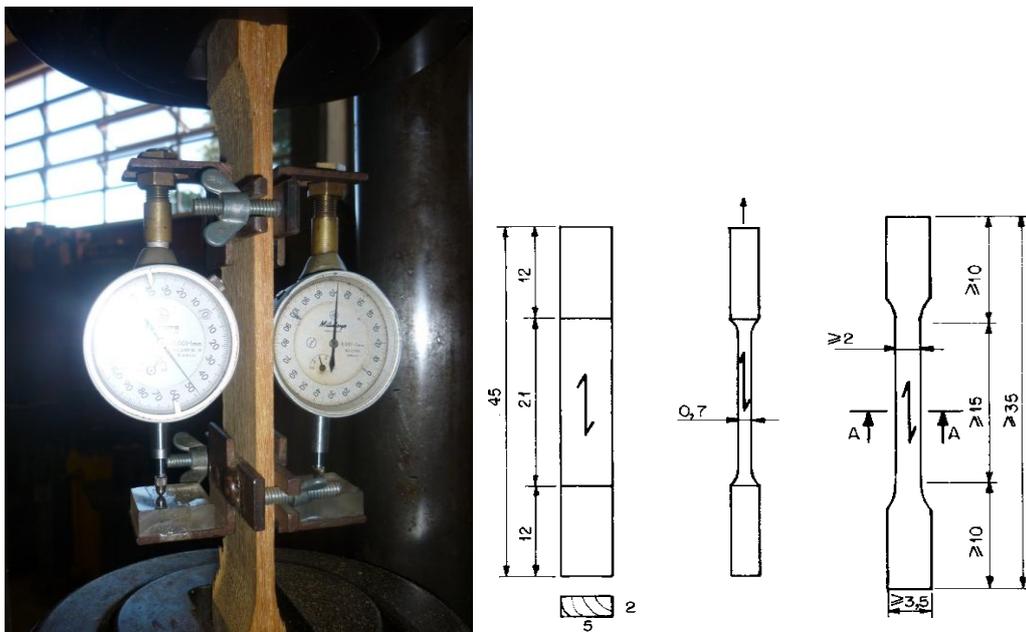


Figura 39: Ensaio de resistência à tração paralela às fibras e dimensão das amostras.

A resistência à tração paralela às fibras ($f_{wt,0}$ ou f_{t0}) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $\sqrt{8}$; a Figura 39 apresenta a montagem do ensaio com as dimensões do corpo de prova, sendo este, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que garantam a ruptura da madeira no trecho central. O valor da resistência à tração paralela às fibras é dada por:

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,m\acute{a}x.}}{A} \quad (31)$$

Onde:

$f_{t0,m\acute{a}x.}$ é a máxima força de tração aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newtons;

A é a área inicial da seção transversal do trecho central do corpo de prova, em metros quadrados;

f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras, em MPa.

4.2.5 Resistência ao cisalhamento

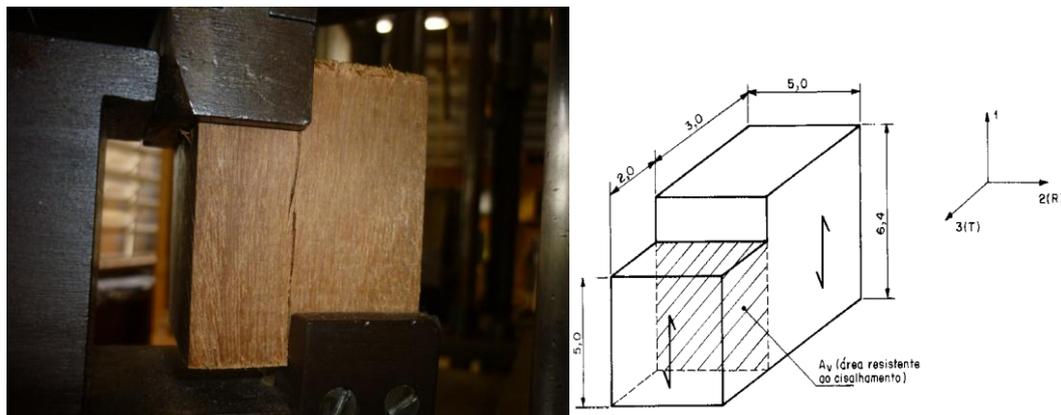


Figura 40: Ensaio e dimensões das amostras para ensaios de cisalhamento paralelo às fibras.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira ($f_{wv,0}$ ou f_{v0}), é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático com as dimensões mostradas na Figura 40. O valor da tensão de cisalhamento paralelo às fibras é definida por:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x.}}{A_{v0}} \quad (32)$$

Onde:

$f_{v0, m\acute{a}x.}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova, em newtons;

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras, em metros quadrados.

4.2.6 Ensaio de flexão nas vigas de madeira

Os ensaios de flexão nas vigas de madeira foram realizados no Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira (LaMEM) – USP, em São Carlos SP, segundo a ABNT NBR 7190/1997.

Foram usadas duas vigas de madeira retangulares com dimensões de 8,6 x 12 x 350 cm como mostrado na Figura 41. Estas foram apoiadas sobre duas peças metálicas sendo usado para aplicação da carga um anel dinamométrico de capacidade de 50 kN, posicionado no centro da viga na parte superior. Na parte inferior foi posicionado um transdutor mecânico de deslocamento, sendo aplicado no centro de cada viga um carregamento concentrado com velocidade de aplicação 0,10 kN/seg.

Nos ensaios de flexão foi determinado o módulo E na flexão, sendo que o ensaio não foi destrutivo.



Figura 41: Ensaio de flexão na viga de madeira.

4.3 Caracterização do concreto

Foi realizada a caracterização do concreto conforme ABNT NBR 5738/2003 e ABNT NBR 8522/2003, para determinação do módulo e resistência a compressão.

O traço utilizado foi 1 : 2,45 : 2,35 : 0,6 em peso, o cimento usado foi o CP II – Z – 32. Como agregados utilizou brita e areia fina, os quais foram misturados para produzir o concreto utilizado na pesquisa. Para tanto, foi usado uma betoneira com capacidade de 200 litros. Depois de preparado o concreto, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 x 20 cm conforme mostrado na Figura 42, para os ensaios de caracterização do concreto.



Figura 42: Detalhes do ensaio de caracterização do concreto.

4.4 Conectores metálicos

Os conectores em aço melhoram o desempenho do sistema misto concreto - madeira, pois fazem com que os dois materiais trabalhem em conjunto.

Os conectores do tipo parafusos CS100900 utilizados na pesquisa possuem dimensões de 55 x 100 mm com diâmetro de 7,5 mm. Para fixação dos conectores foi utilizada um acessório metálico especial para facilitar a operação de fixação dos conectores junto com a furadeira (Figura 43 (b)).



(a)

(b)

Figuras 43: Conectores CS100900 do tipo parafuso.

(a)- Detalhes dos conectores.

(b) – Chave para fixação dos conectores na madeira.

4.4.1 Armaduras de aço para o concreto dos corpos de prova e vigas mistas

Sabe-se que o concreto é um material pouco resistente a tração, quando submetido a flexão positiva ele fissa na região abaixo da superfície neutra assim, as armaduras devem

em ser colocadas na região tracionada do concreto para resistir a todo o esforço interno de tração, sendo que o esforço interno de compressão é resistido pela porção de concreto que fica acima da superfície neutra.

Desse modo, foi empregada uma armadura mínima no concreto, com a finalidade de reduzir a fissuração no mesmo. As barras de ferros empregadas, neste caso, foram CA-50 com diâmetro de 6,3mm e aço CA-60 com diâmetro de 5 mm para confecção de estribos conforme mostra a Figura 47 (a) e (b).

4.5 Corpos de prova mistos

4.5.1 Confecção dos corpos de prova mistos

Foram confeccionados dois corpos de prova, os quais foram retirados das duas vigas de madeira da espécie cumaru, estas amostras foram retiradas de acordo com a ABNT NBR 7190/1997.

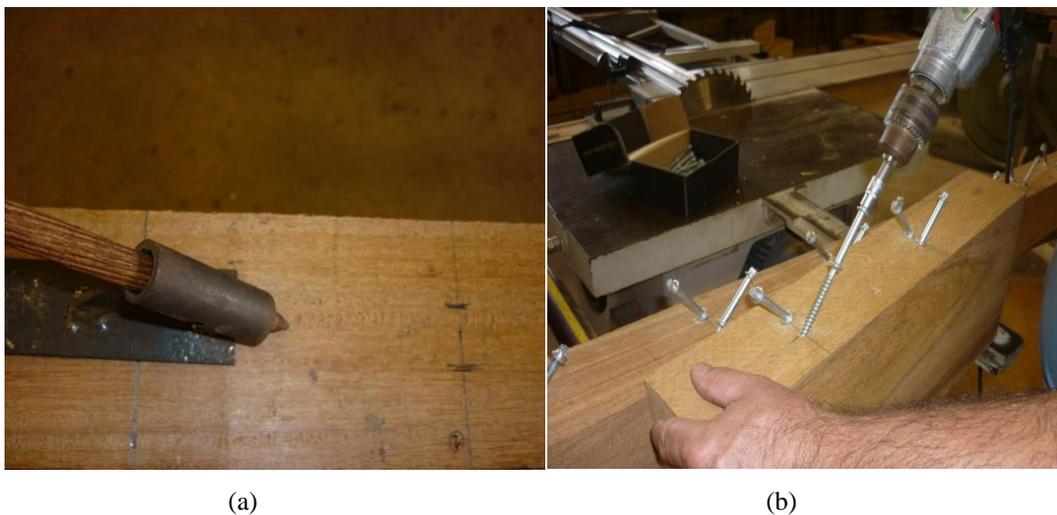


Figura 44: Execução dos corpos de prova.

(a)– Gabarito Metálico usado para furar com precisão no ângulo de 45°.

(b) – Colocação dos parafusos na madeira usando uma furadeira e a chave para acoplar o parafuso na madeira



(c)

(d)

Figura 45: Corpos de prova de cisalhamento.

(c) – CP II com quatro pares de conectores.

(d) – Armadura dos corpos de prova.

CP I - Primeiro corpo de prova

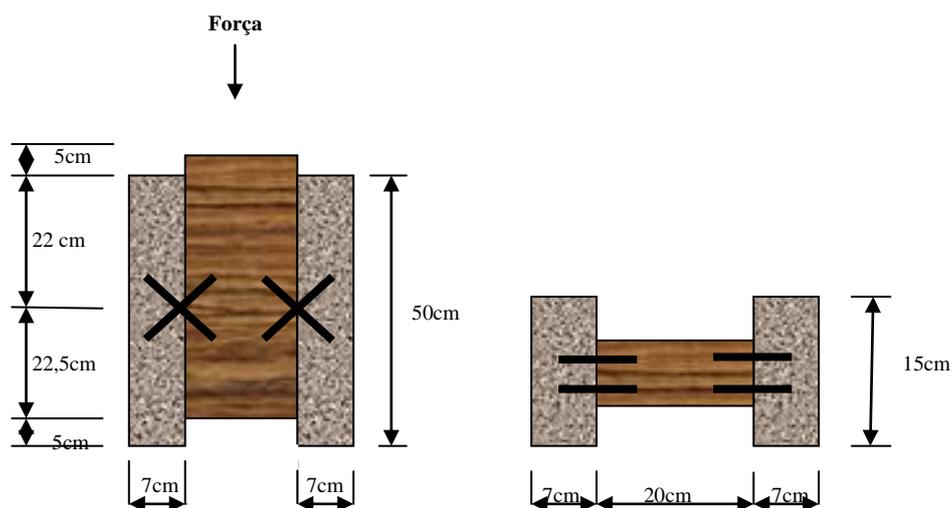


Figura 46: Configuração do corpo de prova CPI.

Foi retirado da viga de madeira, o corpo de prova de madeira CPI, sendo este serrado com dimensões de 50 x 8,5 x 20 cm. Logo depois de marcado o centro, foi localizado com auxílio de uma régua o local onde seriam perfurados e inseridos os parafusos, sendo que a distância entre eles foram de 2 cm (distância de um parafuso para o outro).

Usando o gabarito metálico (ferramenta utilizada para fazer o furo no ângulo de 45°) como mostra a Figura 44 (a), foi feito o furo na madeira com uma inclinação de 45° em relação às fibras e com uma profundidade de 8 cm. Depois da madeira furada, foram fixados com auxílio de uma furadeira dois conectores em parafuso de aço de cada lado em “X”, sendo

o espaçamento entre eles de 2 cm (Figura 44 (a)). Ao todo foram usados quatro conectores em parafuso no CPI.

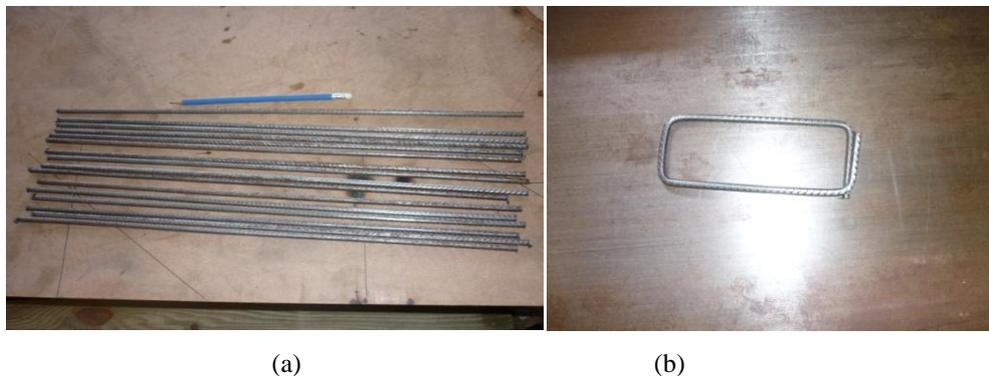
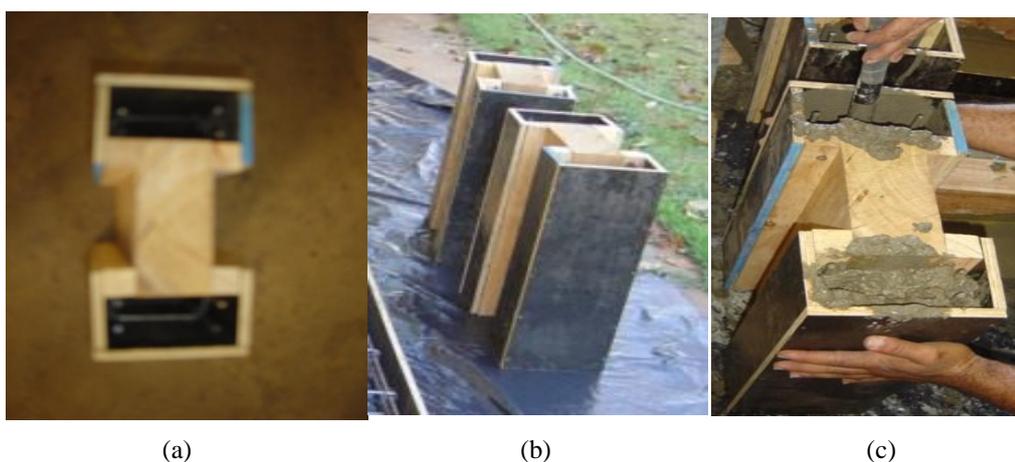


Figura 47: Barras de ferros usados nas armaduras dos corpos de prova.
(a) – barras de ferro CA- 50 usadas na armadura do corpo de prova.
(b) – Estribo para os corpos de prova.

Para compor a armadura foram usados oito barras de aço CA-50, Figura 47 (a), com diâmetro de 6,3 mm e comprimento de 47 cm em cada barra. Para amarração da estrutura foram utilizados seis estribos feitos com barra de ferro CA-60, Figura 47 (b), com diâmetro de 5 mm, sendo usado arame recozido para fixação dos estribos nas barras de aço. A armadura foi fixada na madeira usando-se pregos. Em seguida, foram confeccionados de cada lado da madeira duas formas de compensado para receber o concreto. Finalmente, o conjunto foi concretado, ver Figura 48 (c).



Figuras 48: Preparação dos corpos de prova mistos.
(a) – Vista superior do corpo de prova. (b) – vista geral dos corpos de prova.
(c) – Concretagem dos corpos de prova.

CPII - Segundo corpo de prova

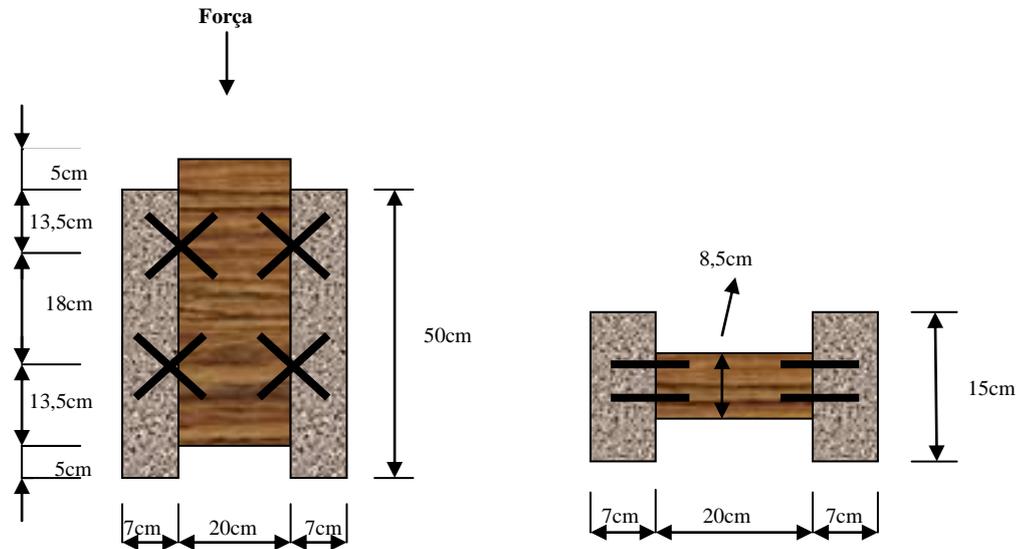


Figura 49: Configuração para CPII.

Do mesmo modo que o CPI, o CPII também foi retirado de uma das vigas, segundo NBR7190/1997, sendo este serrado da madeira com dimensões de 50 x 8,5 x 20 cm. A distância entre os conectores em parafuso no CPII foram diferentes do CPI, ver Figura 48. Foram usados de cada lado da madeira quatro conectores em parafuso.

Com auxílio da régua foram localizados os pontos onde seriam perfurados e onde foram inseridos os parafusos, sendo que a distância entre eles foram de 2 cm (distância de um parafuso para o outro).

Novamente, utilizou-se o gabarito metálico, foi feito o furo na madeira com uma inclinação de 45° e com uma profundidade de 8 cm. Em seguida foram fixados com auxílio de uma furadeira dois conectores em parafuso de aço de cada lado em “X” com um espaçamento de 2 cm entre os dois conectores Figura 44 (a), usados ao todo oito conectores em parafuso no CPII.

A armadura, as formas e a concretagem seguiram os mesmos procedimentos adotados no caso do CPI.

Obs.: O número de corpos de prova neste caso foi devido a indisponibilidade de conectores no momento dos ensaios.

4.5.2 Objetivos do ensaio no CPI e CPII.

O principal objetivo da realização dos ensaios nos CPI e CPII foi a verificação do comportamento estático em corpos de prova mistos em madeira e concreto. Com estes ensaios foi possível:

- Obter o módulo de deslizamento (K) e da força última de ruptura do sistema misto de conexão através de ensaios estáticos de cisalhamento;
- Obter os valores médios de resistência ($R_{v,1}$) de cada conector;
- Comparar os resultados entre os corpos de prova ensaiados com 02 e 04 conectores.

4.5.3 Execução dos ensaios nos CPI e CPII

Para a realização dos ensaios estáticos de cisalhamento dos corpos de prova foi usado um pórtico de reação, com atuador hidráulico, com capacidade de 480 kN (48.000 kgf), acionado por controle manual, e um sistema de aquisição de dados externo (SISTEM 5000), com 20 canais, onde três deles foram usados para a recepção dos sinais, sendo um para a célula de carga (50 kN), e os outros dois para os transdutores de deslocamentos.

Foram usados dois transdutores de deslocamentos com sensibilidade de 0,001mm posicionados em faces opostas do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 50 (a), sendo gravados os valores pelo sistema de aquisição de dados externos. De acordo com a programação os valores foram coletados a cada segundo. A base de medidas dos deslocamentos, considerada para o corpo de prova, neste caso, foi igual a $L_o = 50$ cm.

Em seguida foram usadas chapas de aço de modo a se obter uma melhor das tensões no topo da peça de madeira. Foi utilizado uma célula de carga com capacidade de 50 kN, para aplicação do carregamento no corpo de prova. Um anel acoplado ao pórtico de carga foi também utilizado para controle de carregamento durante o ensaio como mostrado na Figura 50 (b).



(a)

(b)

Figura 50: Ensaios nos corpos de prova mistos.
(a) Realizações dos ensaios nos corpos de prova mistos.
(b) Célula de carga com capacidade de 50 kN.

Foram aplicados dois ciclos de carga; o primeiro, com carga aplicada até 50% do valor provável para a carga de ruptura, de modo a se ter acomodação melhor do corpo de prova, e o segundo ciclo de carga foi aplicado até a ruptura do corpo de prova.

4.6 Confecção das vigas mistas

As dimensões das vigas mistas foram definidas levando em consideração os seguintes aspectos:

- O tamanho da mesa de concreto foi definido considerando o efeito “*shear lag*”, relacionado com a distribuição das tensões axiais de compressão ao longo da mesa de concreto onde não são uniformes, sendo maiores nas regiões centrais da alma e menores a medida que se afasta da alma. Neste caso, quando a largura da mesa é muito grande, a partir de uma certa distância do eixo da alma da viga, trechos da alma não trabalham inteiramente ao momento fletor. Pela teoria elementar de flexão de vigas supõem-se que as tensões axiais não variam ao longo da viga mista e, na verdade, isso não ocorre na prática. Por simplificação busca-se substituir a largura real da mesa de concreto por uma largura reduzida, de modo que a teoria elementar de flexão para viga mista forneça um valor aproximado para a máxima tensão de flexão. Esta largura reduzida da mesa é denominado largura efetiva;
- Procurou-se usar o espaçamento entre conectores recomendados pelo fabricante;
- Foi admitido um espaçamento Constante de 18 cm entre conectores;

- Com relação a madeira, procurou-se usar uma madeira na qual fosse eliminada a parcela de deformação por cisalhamento do valor da flexão final obtido no meio do vão;
- Considerou-se a relação entre o comprimento da viga (L) e sua altura (h) maior do que 20 ($L / H > 20$), desprezando-se, assim, o valor da fecho por cisalhamento no meio do vão.

Para a confecção das vigas mistas foram usadas duas vigas de madeira da espécie Cumaru. As vigas de madeira foram serradas com seção retangular, com dimensões de 8,5 x 12 x 350 cm sendo que a mesa de concreto suas dimensões foram 7 x 35 cm. Sendo perfuradas com ângulo de 45°, com auxílio do gabarito metálico a uma profundidade de 10 cm. Foram utilizados 19 pares de conectores em parafuso, com espaçamento de 2 cm, conforme recomendação do fabricante. O espaçamento entre os pares de conectores ao longo da viga foram considerados constante, como mostrado na Figura 51.

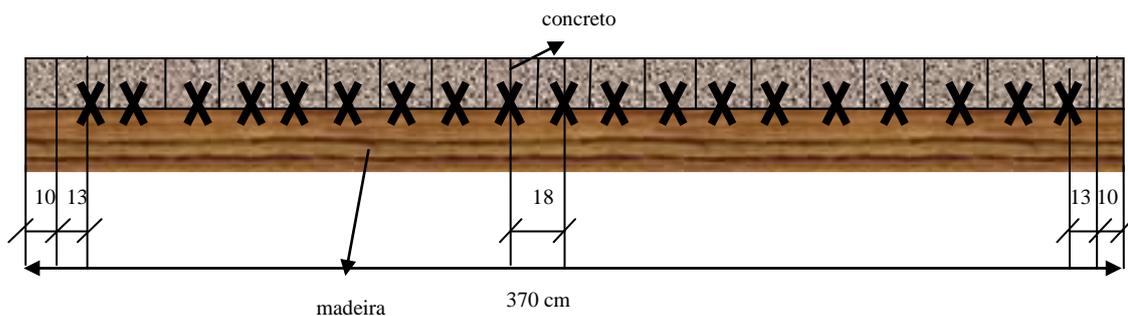


Figura 51: Configuração para a viga mista.

Com o auxílio da furadeira foram fixados os conectores em “X” na madeira, como mostra Figura 52 (a). Para compor a armadura de aço, utilizou-se quatro barras de aço CA- 50 com diâmetro de 6,3 mm em cada viga e 20 estribos de aço CA-50 com diâmetro de 5,0mm, como mostrado na Figura 52(c).

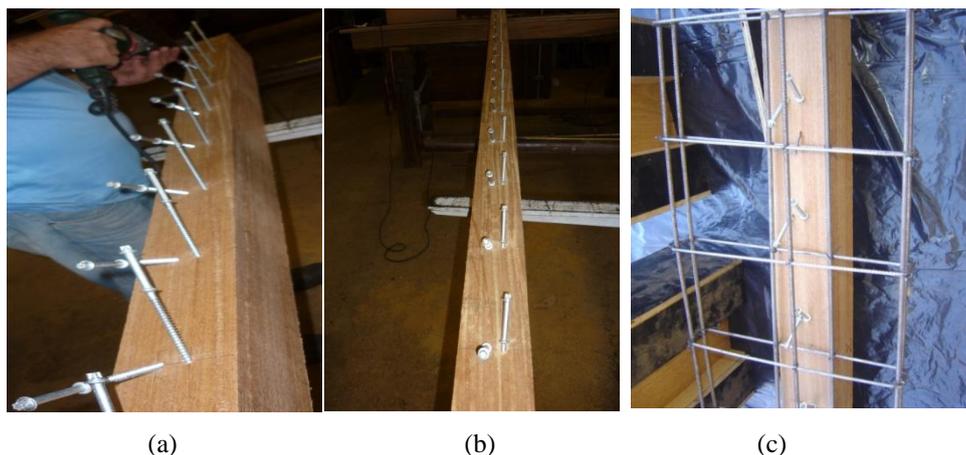


Figura 52: Execução das vigas mistas.
(a) Furação para fixação dos conectores. (b) Conectores posicionados na madeira. (c) Armadura de aço.

As armaduras utilizadas nas mesas mistas representaram armaduras mínimas com relação ao volume de concreto utilizado e foram empregadas com o objetivo de reduzir as fissurações no concreto durante as realizações dos ensaios.

Após a armadura de aço ser fixada à madeira, foram preparadas formas de compensado em volta para receber o concreto, como mostrado na Figura 53.



Figura 53: Posicionamento das vigas para a concretagem.

Após a preparação da forma, as vigas foram concretadas, como mostrado na Figura 54 (b). Para melhor adensamento do concreto foi usado um vibrador ver Figura 54 (a).



(a)

(b)

Figura 54: Concretagem das vigas mistas.
(a) Vibrador de imersão para um melhor adensamento.
(b) Viga concretada.

4.6.1 Objetivos dos ensaios nas vigas mistas

O principal objetivo dos ensaios foi a verificação do comportamento estático das vigas mistas em madeira e concreto. Nestes ensaios procurou-se:

- Obter os valores da resistência última (P_{rup}) das vigas mistas, através de ensaios estáticos de flexão.
- Verificar a rigidez (EI) das vigas mistas.
- Verificar o modo de falha na seção mista.
- Comparar os resultados experimentais com os resultados analíticos do modelo de Mohler.

4.6.2 Execução dos ensaios nas vigas mistas

Os ensaios foram realizados no Laboratório de madeira e estrutura de Madeira (LaMEM) da USP - São Carlos –SP.

Para a realização dos ensaios, foi usado um pórtico de reação hidráulico com capacidade de 480 kN (48.000 kgf), Figura 55, onde este é acionado por um atuador de

controle manual . Sendo os valores coletados por um sistema de aquisição de dados externo SISTEM 5000, com 20 canais.

Quatro canais foram utilizados para a recepção dos sinais, sendo um para a célula de carga, e os outros três para os transdutores mecânicos de deslocamentos (relógio comparador), os quais fizeram a leitura da medida das flechas das vigas, com sensibilidade de 0,01 mm e percurso máximo de 50 mm.

Os carregamentos nas vigas foram controlados por anel dinamométrico com capacidade de 250 kN. Sendo que a velocidade de aplicação de carregamento nas vigas foi de 0,10 kN/seg.



Figura 55: Pórtico de reação com cilindro hidráulico.

As vigas mistas foram posicionada sobre sobre dois suporte de madeira e ensaiadas aos 28 dias de cura do concreto.

Um transdutor de deslocamento foi posicionado em cada uma das extremidades da viga mista e o terceiro centralizado abaixo da viga mista.

A célula de carga foi centralizada sobre a viga mista, como mostrado na Figura 56.



Figura 56: Ensaio de flexão da Viga Mista.

Capítulo 5 – RESULTADOS

5.1 Tipos de pontes identificadas na região de Manaus

No desenvolvimento da presente pesquisa foram identificadas e cadastradas diversas pontes encontradas nos ramais e estradas vicinais nas proximidades de Manaus. A seguir são apresentados alguns tipos de pontes encontradas na pesquisa.

A Figura 57 mostra uma ponte mista de aço e concreto numa estrada vicinal no município de Manaus, Ramal do Pau Rosa, no Km 32 da BR 174, lado esquerdo, sentido Presidente Figueiredo.

Verificou-se que esta ponte foi projetada com um vão de 25 m de comprimento e largura de 5 m. Sendo muito estreita, esta ponte não permite a passagem de dois veículos ao mesmo tempo, observou-se ainda que a ponte se encontra em péssimo estado de conservação, precisando assim de manutenção, algumas peças estão desgastadas.



Figuras 57: Ponte Ramal do Pau Rosa - Manaus – AM.

As duas pontes mostradas na Figura 58, localizadas na Avenida Torquato Tapajós próximo a BR 174, são estruturas distintas, sendo uma delas em estrutura de concreto, enquanto a outra é uma estrutura mista de aço e concreto. São pontes de vão médio medindo aproximadamente 22 m de comprimento e 8 m de largura.



Figura 58: Torquato Tapajós Pontes próximo a BR 174 posto da polícia federal saída de Manaus-AM.

Outra ponte, mostrada na Figura 59 no Ramal 32, lado direito no sentido de Autazes na BR 319, foi construída em madeira com aproximadamente 15 m de comprimento e 5 m de largura, tendo idade aproximada de 8 anos. A ponte não apresenta condições de passar dois carros ao mesmo tempo, possuindo pouca estabilidade para veículos de grandes portes como carretas e caminhões sendo que algumas peças da estrutura apresentam deteriorização por parte da madeira, verificou também que algumas peças estão soltas pelo desgaste das peças metálicas e passagem dos veículos.



Figura 59: Ponte do ramal 32 lado direito sentido Autazes.

A seguir é mostrada na Tabela 13, a relação de todos os locais de visitas das pontes, com os seus respectivos tipos.

Tabela 13: Localização das pontes visitadas.

Localização		Tipo
Rodovia	Ramal	Material
BR 174	Ramal do Pau Rosa – Manaus	aço
BR 174	Ramal – Igarapé do Urubuí – Presidente Figueiredo	aço/concreto
BR 174	Avenida Torquato Tapajós – próximo ao posto Polícia Federal	aço/concreto
BR 319	Km 25 ramal margem direita sentido Autazes	madeira
BR 319	Km 25 ramal lado esquerdo sentido Autazes	madeira
BR 319	Km 32 ramal lado direito sentido Autazes	madeira
AM- 010	Km 32 – Ramal Águas Brancas - Manaus	madeira
AM- 010	Km 32 – Ramal do Breu - Manaus	madeira
AM- 010	Km 32 – Ramal Cristal - Manaus	madeira

5.2 Espécies de madeira encontradas nas pontes pesquisadas

Foram pesquisadas no entorno de Manaus e na BR 319 no município de Autazes, pontes de madeiras as quais foram catalogadas e retiradas amostras para identificação destas. Conforme mencionado, as amostras catalogadas foram identificadas pelo Laboratório de Física da Madeira da Universidade Federal do Amazonas - UFAM.

As espécies de madeira usadas nestas pontes conforme as identificações feitas foram:

- Cumaru - *Dipteryx odorata*
- Piquiarana - *Caryocar glabrum*
- Cupiúba - *Goupia glabra*
- Maçaranduba - *Manilkara longifolia*
- Muirapiranga - *Brosimum rubescens*
- Mandioqueira - *Qualea brevipedicellata*
- Matamatá - *Eschweilera sp*
- Anani - *Symphonia globulifera*
- Tauari - *Cariniana micrantha*
- Macucu - *Licania oblongifolia*
- Angelim pedra - *Hymenolobium petraeum*

5.3 Resultados quanto a caracterização da madeira

Das espécies de madeira identificadas durante as visitas de campo, a espécie Cumaru foi a escolhida para o presente estudo. Isto porque foi a espécie que se conseguiu adquirir no comércio de São Carlos, local onde foram realizados a produção das vigas e os ensaios de desempenho do sistema madeira concreto. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para a madeira coletada.

5.3.1 Umidade

O teor de umidade da madeira foi corrigido para a madeira seca entre 10,9% a 11,3%, sendo que os valores das propriedades das madeiras segundo a ABNT NBR 7190/1997 são referentes a umidade de 12%.

5.3.2 Densidade

A densidade básica ficou entre $0,94 \text{ g/cm}^3$ a $0,97 \text{ g/cm}^3$, a densidade aparente variou entre $1,04 \text{ g/cm}^3$ a $1,07 \text{ g/cm}^3$. Deste modo, a madeira foi classificada como pesada de acordo com Madeiras Tropicais Brasileiras (1997). Este resultado confirma a classificação feita por Carvalho (2009) que definiu a espécie Cumaru como uma madeira muito densa.

5.3.3 Resultados dos ensaios de compressão paralelo às fibras

Tabela 14: Valores de resistência e rigidez à compressão em corpos de prova secos.

Cumaru Seco			
Corpo de prova	F_{rup} (N)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
01	192080	98,27	25548,41
02	195510	98,70	31164,57
03	195510	99,78	26675,92
		Média 98,91	Média 27796,3
		Desvio padrão 1,10	Desvio padrão 4201,6

- a) F_{rup} - força de ruptura
- b) f_{c0} - resistência a compressão paralela às fibras
- c) E_{c0} - rigidez (módulo de elasticidade médio)

Observa-se da Tabela 14, que a média da resistência a compressão paralela as fibras ($f_{c0, m}$) foi de 98,9 MPa e o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0, m}$) apresentou o valor médio de 27796,3 MPa para a

madeira seca de acordo com ABNT NBR 7190/1997. Pode-se fazer uma comparação com a maçaranduba (*Manilkara Longifolia*) que tem as seguintes características de acordo com ABNT NBR 7190/1997:

- Compressão paralelo às fibras ($f_{c0, m}$) = 82,9 MPa.
- Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0, m}$) = 22733 MPa.

Portanto, observa-se que o Cumaru apresentou, para as duas principais características de resistência, valores superiores aos apresentados pela espécie Maçaranduba, outro tipo de madeira muito empregando em pontes.

5.3.4 Resultado dos ensaios de tração paralelo às fibras

Tabela 15: Valores de resistência à tração em corpos de prova secos.

Cumaru Seco			
Corpo de prova	F_{rup} (N)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
01	49000	131,76	22270,50
02	37926	108,63	23637,78
03	37935	108,76	23686,23
		Média 116,38	Média 23198,17
		Desvio padrão 18,82	Desvio padrão 1136,37

- a) F_{rup} - força de ruptura
 b) f_{t0} - tração paralela às fibras
 c) E_{c0} - rigidez (módulo de elasticidade)

Observa-se na Tabela 15 que a média da resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0, m}$) foi de 116,4 MPa para a madeira seca. Comparando-se com a maçaranduba (*Manilkara Longifolia*), que possui uma resistência à tração média paralela às fibras ($f_{t0, m}$) de 138,5 MPa, pode-se observar que os valores indicam uma característica de resistência maior por parte da Maçaranduba em relação ao Cumaru.

5.3.5 Resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento

Tabela 16: Valores de resistência ao cisalhamento em corpos de prova secos.

Cumaru Seco		
Corpo de prova	F_{rup} N	F_{v0} (MPa)
01	51940	20,28
02	56840	21,92
03	58800	22,37
		Média 21,52
		Desvio Padrão 1,55

- a) F_{rup} – força de ruptura
- b) $f_{v,m}$ - resistência ao cisalhamento
- c) $E_{c0,m}$ – rigidez (módulo de elasticidade)

Da Tabela 16, observa-se que a média da resistência ao cisalhamento ($f_{v,m}$) foi de 21,5 MPa para a madeira seca. Que ao fazer uma comparação com a maçaranduba (*Manilkara Longifolia*) que tem resistência ao cisalhamento ($f_{v,m}$) = 14,9 MPa, confirma que o Cumaru possui, em termos de resistência, características superiores.

5.4 Resultado de caracterização do concreto

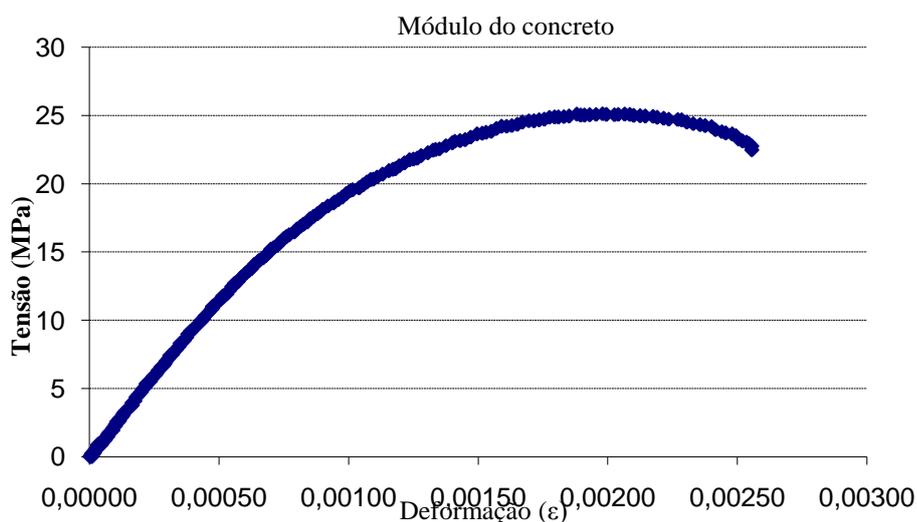


Figura 60: Curva tensão-deformação para um corpo de prova de concreto

Realizada a caracterização do concreto, conforme ABNT NBR 5738/2003 e ABNT NBR 8522/2003, verificou-se que o módulo de elasticidade na compressão (E_c) foi de 21,5 GPa e a resistência do concreto na compressão ($f_{c,c}$) de 26,89 MPa . A resistência mínima

recomendada pela norma ABNT NBR 6118/2003 deve ser superior a 20 MPa. A Figura 60 apresenta o gráfico tensão por deformação para um corpo de prova de concreto destacando o seu comportamento não linear.

5.5 Resultados dos ensaios nos corpos de prova mistos

Com relação a análise dos resultados estáticos, a partir do ensaio de cisalhamento para o corpo de prova com dois pares de conectores CPI, observou-se que a força última de ruptura (F_{rup}) foi de 43 kN. A resistência convencionada a deformação a 2‰ foi de 32,50 kN, Figura 61.

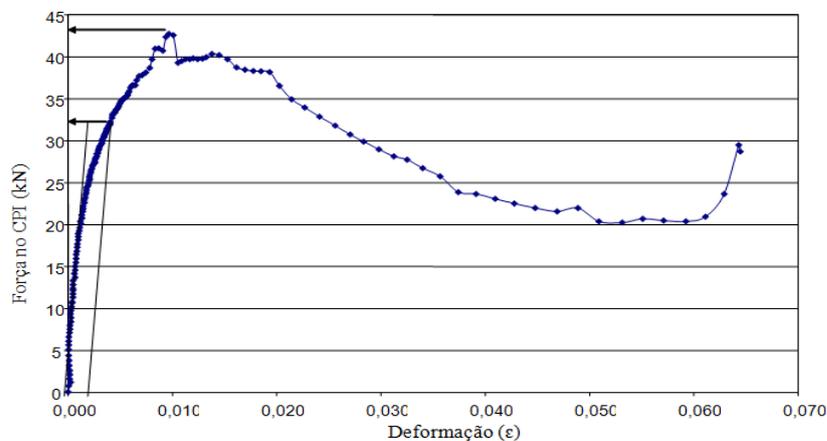


Figura 61: Curvas forças x deformação para CPI com dois pares de conectores para determinação da resistência convencionada de ligação.

Com base nos valores 10% e 40% da resistência convencionada da ligação foi obtido o valor do módulo de deslizamento: $(K) = 19,94$ kN/mm para 2 pares de conectores. A Figura 62 apresenta o gráfico do módulo de deslizamento K.

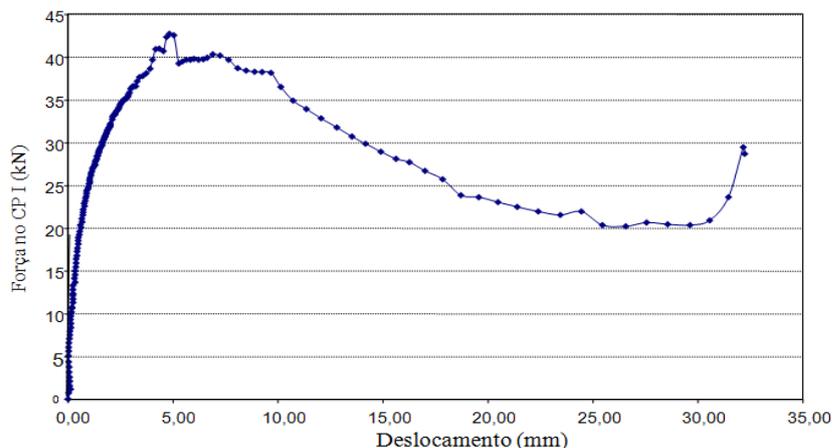


Figura 62: Curva força x deslocamento - CPI.

Para o corpo de prova com quatro pares de conectores a força de ruptura (F_{rup}) foi de 64 kN. A resistência convencionada a deformação a 2‰ foi de 60 kN, conforme a Figura 63.

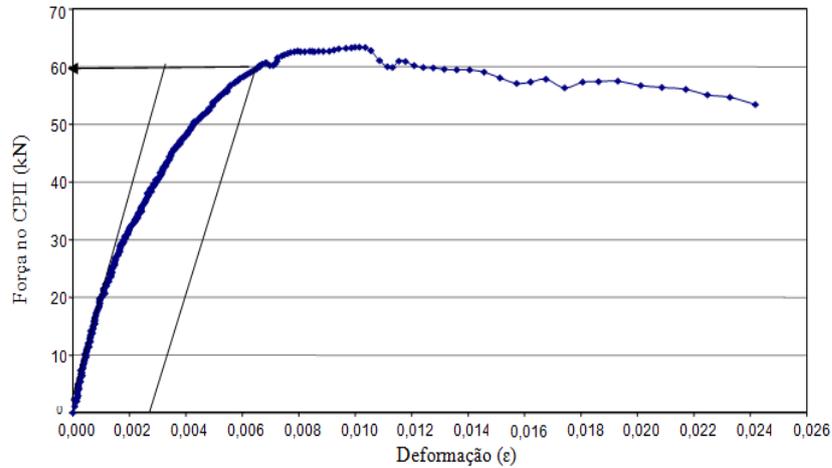


Figura 63: Curvas forças x deformação para CPII com quatro pares de conectores Resistência convencionada de ligação.

O módulo de deslizamento (K) foi de 28,88 kN/mm para 4 pares de conectores, obtido com base nos valores 10% e 40% da resistência convencionada de ligação como mostra a Figura 64.

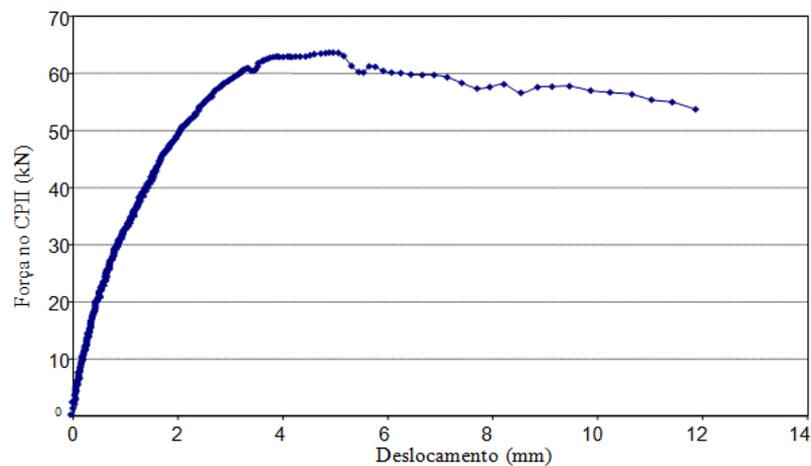


Figura 64: Força x deslocamento - CPII.

Sendo que o valor médio para o módulo de deslizamento (K) foi de 13,38 kN/mm para cada conector e de 15,62 kN para força última (F_u).

Ao comparar os dois corpos de prova foi observado que o corpo de prova (CPI) onde foram usados dois conectores em “X”, a resistência de cada conector foi de 16,25 kN. Sendo

que para o corpo de prova o qual foi utilizado 4 conectores em “X”, a resistência de cada conector foi de 15,00 kN.

Observou - se que pode ter ocorrido um efeito de grupo para conectores muito próximos onde os conectores de cima resistem mais que os conectores de baixo sendo que os conectores de baixo passam a trabalhar quando os conectores de cima já estão deformados e começam a distribuir força para os conectores de baixo.

Da análise visual após os ensaios de cisalhamento dos corpos de provas CPI e CPII, foi observado que ocorreram algumas falhas nos conectores. Estas falhas ocorreram por causa do embutimento do conector na madeira como mostrado na Figura 65 (a), enquanto os danos no concreto foram de pequena magnitude e corresponderam a fissuração do mesmo. No conector comprimido Figura 65(b), foi observada a tendência de formação de rótulas plásticas.



Figura 65: Embutimento do conector na madeira.

Os danos nos conectores do corpo de prova foram mais acentuados quando comparados com as vigas mistas em função de se ter cisalhamento puro na conexão.

Os danos na conexão ocorrem porque existe concentração de tensões nas regiões da conexão. Neste contexto, enquanto todo sistema misto trabalha dentro do regime linear, as regiões dos conectores atingem a resistência última dos materiais envolvidos na ligação mista.

De uma maneira geral os conectores em “X” apresentaram um bom comportamento, quando submetidos aos ensaios estáticos nos corpos de prova mistos, sendo que os valores de resistência e rigidez dos conectores apresentaram valores diferentes justamente pela diferença

do número de conectores de cisalhamento (CPI 2 conectores em “X” e o CPII 4 conectores em “X”) usados nos corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Valores dos ensaios dos corpos de prova mistos.

Corpos de prova Mistos			
	F_{rup} (kN)	$R_{v,1}$ (kN)	K (kN/mm)
CP I	32,5	16,25	9,77
CP II	60	15	7,22

F_{rup} = força de ruptura.

$R_{v,1}$ = resistência ao cisalhamento de cada conector “X”.

K = módulo de deslizamento de cada conector “X”.

Ressalta-se que Molina (2008) encontrou valores superiores àqueles apresentados na Tabela 17, muito embora tenha utilizado barras de aço como conectores em uma configuração em “X” um pouco diferente da empregada na presente pesquisa, além disso, a madeira e o concreto com características diferentes.

5.6 Resultados dos ensaios de flexão nas vigas mistas

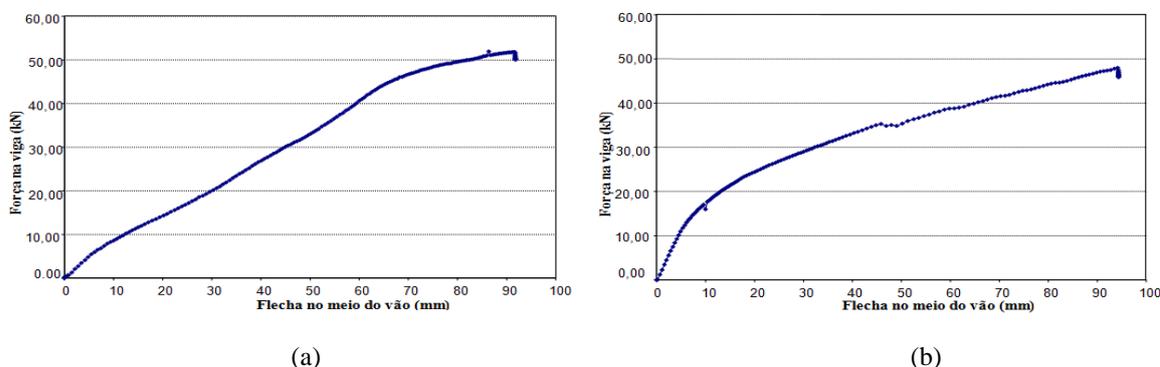


Figura 66: Resultados dos ensaios de flexão das vigas mistas.

(a) Viga Mista – VM I

(b) Viga Mista – VM II

Os valores das cargas últimas de ruptura (P_{rup}) foram iguais a 51 kN para VM I e 48 kN para VM II, respectivamente. Os valores experimentais das flechas foram de 90 mm para VM I e 95 mm para VM II, respectivamente. A força estimada graficamente corresponde a flecha $L/300$ no meio do vão. Sendo que a viga tem um vão de 370 cm, isto corresponde a $L/300 = 1,23$ cm, sendo que a força que provoca esta flecha é de 11 kN para a viga VM I e de aproximadamente 15 kN para a viga VM II, como mostra Figura 66.

Os valores de rigidez (EI) foram obtidos considerando carregamentos dentro do trecho linear da curva Força x Flecha da Figura 66, onde são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores dos ensaios de flexão das vigas mistas.

Vigas Mistas			
Vigas	P_{rup} (kN)	EI (kN.cm ²)	u (cm)
VMI	11	9437381,436	1,23
VMII	15	12869156,5	1,23

P_{rup} = Força última de ruptura aplicada na viga.

EI = rigidez efetiva.

u = flecha da estrutura mista madeira e concreto.

Os valores experimentais de rigidez (EI) foram calculados a partir dos deslocamentos máximos e cargas últimas de ruptura obtidas para cada viga, considerando a equação:

$$(EI)_{exp} = \frac{P_{m\acute{a}x} \cdot L^3}{48 \cdot u} \quad (33)$$

Sendo assim, os valores de rigidez calculados são EI = 9437381,44 kN/cm² para VM I e EI = 12869156,5 kN/cm² para VM II, respectivamente (Tabela 18), onde foram calculados pela equação 33.

Do gráfico de VM I, observa-se que a viga mista apresentou um comportamento aproximadamente linear até a ruptura.

O gráfico para a segunda viga mista (VM II), mostrado na Figura 66 (b), apresenta dois intervalos distintos, o primeiro, do início do ensaio até aproximadamente a carga de 20 kN, onde a viga apresenta um comportamento não linear, enquanto a partir desse instante o conjunto se comporta como no caso da viga mista I (VM I), apresentando um comportamento aproximadamente linear. Esse comportamento indica que a viga não teve uma acomodação imediata em função do carregamento aplicado. Nesse sentido durante o ensaio das vigas mistas é necessário que sejam realizados dois ciclos de carga sendo um com aproximadamente com 50% da carga última de ruptura obtida por viga gêmea para acomodação do sistema e o terceiro ciclo até a ruptura.

Além disso, dos gráficos observa-se que a viga mista VM I apresentou um deslocamento menor do que da viga mista VM II, indicando que o primeiro sistema é mais rígido de que o segundo. Se for considerado um valor de carga com 50% da carga de ruptura a viga mista (VM II) é mais rígida.

Do modelo de Mohler, conforme os cálculos mostrados no anexo A, três valores limites para o valor da carga “P” foram calculados. O primeiro, considerando a resistência da mesa de concreto, igual a 29,89 kN. O segundo, considerando a resistência da madeira empregada no sistema, igual a 57,62 kN; e o terceiro, considerando o cisalhamento nos

conectores, igual a 37,46 kN. Foi verificado também o limite para força de cisalhamento na linha neutra da viga mista igual a 525,51 kN/.

Apesar de não apresentar um comportamento praticamente linear, o gráfico para a segunda viga mista comprova que o modelo de Mohler, empregado no presente trabalho, fornece valores próximos para os limites analisados, conforme, observa-se, a seguir:

- A partir do modelo de Mohler a ruptura estimada da viga ocorreu primeiramente na mesa de concreto para uma carga de 29,89 kN, seguida do cisalhamento dos conectores para uma carga $P=37,46$ kN. Os demais modos de ruptura foram estimados para a tração na fibra inferior da madeira $P=57,62$ kN, e então por cisalhamento na LN para uma força $P=525,51$ kN.;

O modelo de Mohler responde com maior precisão para carregamentos de serviço.

Para valores últimos de carga aplicada o modelo apresenta diferenças consideráveis.

Da análise visual das vigas mistas após o ensaio de flexão, observou – se que houve uma melhor distribuição das tensões associada as solicitações conjuntas de tração, compressão e cisalhamento nas vigas.

Ressalta-se que o espaçamento entre os conectores foram admitidos constantes.



(a) (b)
Figura 67: Comportamento dos conectores das vigas mistas.
(a) Situação do conector no meio do vão.
(b) Situação do Conector na Extremidade do Vão.

Os conectores das extremidades foram mais solicitados do que os conectores do centro das vigas, isto em função dos esforços cisalhantes que foram originados da carga centrada, com isso, esses esforços são maiores nas extremidades das vigas que no meio do vão como mostrado na Figura 67, Portanto, na extremidade das vigas pode-se utilizar um maior número

de conectores com menores espaçamentos entre eles para absorver os esforços de cisalhamento oriundos da flexão.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES FINAIS

6.1 Identificação das pontes

Durante a visita técnica nos ramais do entorno de Manaus, verificou-se que algumas pontes de madeira estavam em péssimo estado de conservação, onde muitas não apresentavam sequer guarda-corpo e as que possuíam não garantiam segurança para apoio do pedestre.

Em alguns casos os rodeios estavam soltando das pranchas transversais, sendo comum estas apresentarem um processo acelerado de desgastes, ocasionando em alguns lugares perda de rigidez e colapso das peças, trazendo muitos transtornos aos moradores locais e também àqueles que de alguma forma utilizam as mesmas.

Observou-se que a vida útil destas pontes é de poucos anos e a estrutura não oferece segurança suficiente para o transporte de grande porte, ocorrendo muita trepidação da estrutura.

A manutenção das pontes é de responsabilidade da comunidade beneficiada, mas, em geral não possuem conhecimento técnico suficiente e, muitas vezes, ferramentas adequadas à manutenção das mesmas.

O estado de degradação destas pontes revela a necessidade de ampliar os estudos a respeito das estruturas de madeira que possam ser utilizadas para esta finalidade, com alternativa do uso de outros materiais que adicionados a essas estruturas, formando estruturas mistas que possam garantir maior durabilidade e melhor desempenho.

Neste contexto, observa-se a urgente necessidade de se implantar nas vias rurais avanços tecnológicos atuais para a construção de pontes para vias rurais, com isto, buscar auxílio no desenvolvimento das comunidades que dependem delas.

6.2 Identificação das madeiras usadas nas pontes identificadas

Outro objetivo desta pesquisa foi a identificação de algumas madeiras usadas em pontes de madeira no Estado.

A identificação das espécies de madeira utilizada nas pontes mostrou que estas são de ótima qualidade, porém, as pontes pesquisadas apresentavam baixa durabilidade, devido a falta de aplicação racional da madeira como material de construção, onde as técnicas construtivas utilizadas não eram adequadas aos fatores ambientais (umidade, oxigênio e

temperatura) a que estas foram expostas, permitindo o ataque biológico, e consequente redução da vida útil da estrutura.

Observou - se das visitas técnicas que as pranchas das pontes, devido à abrasão e ao intemperismo, estavam desgastadas, com isso alcançavam um curto tempo de uso. A umidade retida no solo e na madeira é o principal fator do processo de apodrecimento das pranchas do tabuleiro e das longarinas, também acarretando a oxidação dos elementos metálicos utilizados nas ligações das peças de madeira e reduzindo assim a durabilidade do conjunto.

6.3 Ensaios dos conectores e do modelo de Mohler

Nos ensaios do sistema misto ocorreram os maiores danos na madeira. Sendo que ocorreram falhas também nos conectores, devido ao embutimento do conector na madeira, sendo que os danos no concreto foram pequenos.

Nos corpos de prova mistos as falhas nos conectores foram mais acentuadas que nas vigas mistas devido ao comportamento dos corpos de prova ser caracterizados por cisalhamento puro, enquanto, que nas vigas há existência de um comportamento conjunto de tração, compressão e cisalhamento, reduzindo, desta forma, o efeito do último esforço (cisalhamento).

Os valores de resistência e rigidez são diferentes conforme os diferentes números de conectores utilizados nos corpos de prova.

Observou - se que no sistema de conexão em “X” analisado, um dos conectores trabalhou na tração e o outro na compressão, sendo que no conector comprimido existe a tendência de formação de rótulas plásticas.

O modelo analítico de Mohler, que foi usado, aproximou-se do comportamento experimental das vigas mista, principalmente quando se analisa o gráfico força por deslocamento da segunda viga mista.

6.4 Recomendações para futuros trabalhos

Para os trabalhos futuros recomenda-se:

1. Uma análise numérica das vigas mistas com sistema de conexão em “X”, para verificação dos efeitos localizados na região dos conectores;
2. Ampliar o estudo, contemplando uma análise do conjunto vigas e tabuleiro de concreto e madeira;

3. Verificar a questão da durabilidade do sistema vigas e tabuleiro de concreto e madeira;
4. Fazer um estudo comparativo de vigas de concreto e madeira com todas as espécies identificadas nas visitas feitas nos ramais no entorno de Manaus, com a finalidade de classificar as melhores espécies para utilização em pontes de estradas vicinais;
5. Utilizar outros tipos de conectores mais simples e comparar o desempenho com aqueles empregados no presente estudo.

APÊNDICE A – ESTIMATIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA AS VIGAS MISTAS COM CONECTORES EM “X”

Valores obtidos dos ensaios feitos no Laboratório Madeira e Estrutura de madeiras – LaMEM – USP São Carlos – SP

$E_c = 2151 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade médio do concreto na compressão);

$f_{c,c} = 2,68 \text{ kN/cm}^2$ (resistência média do concreto a flexão);

$E_w = 2779,6 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade médio da madeira na compressão);

$f_{w,c} = 9,8 \text{ kN/cm}^2$ (resistência média da madeira a compressão paralela às fibras);

$K_{ser} = 84,95 \text{ kN/cm}$ (módulo de deslizamento de serviço para cada conector “X”);

$K_u = 56,63 \text{ kN/cm}$ (módulo de deslizamento último de cada conector “X”);

$R_{v,1} = 15,65 \text{ kN}$ (resistência ao cisalhamento de cada conector “X”);

$d = 7,5$ (diâmetro das barras de aço que compõem o conector “X”);

$s = 18 \text{ cm}$ (espaçamento entre conectores em “X” da viga mista).

Propriedades geométricas da seção transversal “T” proposta:

$A_c = b_c \cdot h_c$ (área da seção da mesa de concreto)

$$A_c = 35 \cdot 7 = 245 \text{ cm}^2$$

$A_w = b_w \cdot h_w$ (área da seção da mesa de madeira)

$$A_w = 8,5 \cdot 12 = 102 \text{ cm}^2$$

$I_c = \frac{b_c \cdot h_c^3}{12}$ (momento de inércia da mesa de concreto)

$$I_c = \frac{35 \cdot 7^3}{12} = 1000,4 \text{ cm}^4$$

$I_w = \frac{b_w \cdot h_w^3}{12}$ (momento de inércia viga de madeira)

$$I_w = \frac{8,5 \cdot 12^3}{12} = 1224 \text{ cm}^4$$

Verificação dos estados limites últimos:

- Fatores de redução de inércia:

$$\gamma_w = 1 \text{ (fator para a madeira)}$$

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{K_u \cdot L^2} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot 2151,0 \cdot 245 \cdot 18}{56,63 \cdot 350^2} \right]^{-1}$$

$$\gamma_c = 0,074$$

Onde:

s = espaçamento entre os conectores “X” na viga mista;

L = vão da viga mista (distância entre apoios).

- Distância dos centróides das seções dos materiais a linha neutra (LN) da viga mista:

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c (h_c + h_w)}{2(\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w)} = \frac{0,074 \cdot 2151,0 \cdot 245 (7 + 12)}{2(0,074 \cdot 2151,0 \cdot 245 + 1 \cdot 2779,6 \cdot 102)}$$

$$a_w = 1,14 \text{ cm}$$

$$a_c = \left[\frac{h_c + h_w}{2} \right] - a_w = \left[\frac{7 + 12}{2} \right] - 1,14 \text{ cm}$$

$$a_c = 8,36 \text{ cm}$$

Onde:

a_c = distância do centróide da área de concreto até a linha neutra da viga mista;

a_w = distância do centróide da área da madeira até a linha neutra da viga mista;

h_c = altura da mesa de concreto;

h_w = altura da viga de madeira.

- Rigidez efetiva:

$$(EI_{ef}) = E_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + E_w \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w^2$$

$$(EI_{ef}) = 2151,0 \cdot 1000,4 + 0,074 \cdot 2151,0 \cdot 245 \cdot 8,36^2 + 2779,6 \cdot 1224 + 1 \cdot 2779,6 \cdot 102 \cdot 1,14^2$$

$$(EI_{ef}) = 8648081,114 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$

- Tensão normal do concreto na mesa de concreto:

$$\sigma_c + \sigma_{m,c} \leq f_{c,c} \text{ (verificação na extremidade da mesa de concreto);}$$

$$\sigma_c = \gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \text{ (tensão no concreto devido a força normal);}$$

$$\sigma_{m,c} = 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \text{ (tensão no concreto devido ao momento fletor).}$$

$$M = \frac{P.L}{4} \text{ (momento fletor na seção considerada devido a carga concentrada "P")}$$

$$\gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \frac{M}{(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \frac{M}{(EI)_{ef}} \leq f_{c,c}$$

$$\gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \frac{PL}{4(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \frac{PL}{4(EI)_{ef}} \leq f_{c,c}$$

$$= 0,074 \cdot 2151,0 \cdot 8,36 \frac{P \cdot 350}{4 \cdot 4.8648081,114} + 0,5 \cdot 2151,0 \cdot 7 \frac{P \cdot 350}{4 \cdot 4.8648081,114} \leq 2,68$$

$$0,0896 \cdot P \leq 2,68 \text{ kN/cm}^2$$

$$P = 29,89 \text{ kN. (limite para a força de compressão na mesa de concreto)}$$

- Tensão normal de tração na viga de madeira:

$$\sigma_w + \sigma_{m,w} \leq f_{w,t} \text{ (verificação na extremidade inferior)}$$

$$\sigma_w = \gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \text{ (tensão na madeira devido a força normal)}$$

$$\sigma_{m,w} = 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \text{ (tensão na madeira devido ao momento fletor)}$$

$$\gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \leq f_{w,t}$$

$$\gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{P \cdot L}{4(EI)_{ef}} + 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{P \cdot L}{4(EI)_{ef}} \leq f_{w,t}$$

$$1 \cdot 2779,6 \cdot 1,14 \cdot \frac{P \cdot 350}{4 \cdot 4.8648081,114} + 0,5 \cdot 2779,6 \cdot 12 \cdot \frac{P \cdot 350}{4 \cdot 4.8648081,114} \leq 11,638$$

$$0,2008 \cdot P \leq 11,638 \text{ kN/cm}^2$$

$$P = 57,95 \text{ kN. (limite para a força de tração na viga de madeira)}$$

Onde:

$f_{w,t}$ = resistência da madeira a tração na direção paralela as fibras.

- Tensão máxima de cisalhamento na viga mista:

$$\tau_{w,max} = 0,5 \cdot E_w \cdot h^2 \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq f_{v,0} \text{ (verificação na LN da seção)}$$

$$V = \frac{P}{2} \text{ (força máxima de cisalhamento na seção considerada)}$$

$$0,5 \cdot E_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_w \right)^2 \cdot \frac{P}{2(EI)_{ef}} \leq f_{v,w}$$

$$0,5 \cdot 2779,6 \cdot \left(\frac{12}{2} + 1,14 \right)^2 \cdot \frac{P}{2.8648081,114} \leq 2,1527$$

$$0,00409 \leq 2,1527 \text{ kN/cm}^2 \quad (\text{limite para a força de cisalhamento na LN da viga mista})$$

$$P = 525,51 \text{ kN}$$

Onde:

$f_{v,0}$ = resistência ao cisalhamento da madeira paralelamente as fibras.

Verificação dos estados limites de utilização:

- Fatores de redução de inércia:

$$\gamma_w = 1 \text{ (fator para a madeira)}$$

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{K_{ser} \cdot L^2} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot 2151,0 \cdot 245 \cdot 18}{84,95 \cdot 350^2} \right]^{-1}$$

$$\gamma_c = 0,111$$

Distância dos centróides das seções dos materiais a linha neutra (LN) da viga mista:

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c (h_c + h_w)}{2(\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w)}$$

$$a_w = \frac{0,111 \cdot 2151,0 \cdot 245 (7 + 12)}{2(0,111 \cdot 2151,0 \cdot 245 + 1 \cdot 2779,6 \cdot 102)}$$

$$a_w = 1,62 \text{ cm}$$

$$a_c = \left[\frac{h_c + h_w}{2} \right] - a_w =$$

$$a_c = \left[\frac{7 + 12}{2} \right] - 1,62$$

$$a_c = 7,88 \text{ cm}$$

- Rigidez efetiva:

$$(EI_{ef}) = E_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + E_w \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w^2$$

$$(EI_{ef}) = 2151,0 \cdot 1000,4 + 0,111 \cdot 2151,0 \cdot 245 \cdot 7,88^2 + 2779,6 \cdot 1224 + 1 \cdot 2779,6 \cdot 102 \cdot 1,62^2$$

$$(EI_{ef}) = 9930460,243 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$

- Força de cisalhamento na conexão:

$$F_{\text{conexão}} = \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c \cdot s \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq R_{v,1} \text{ (verificação)}$$

$$\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c \cdot s \frac{P}{2(EI)_{ef}} \leq R_{v,1}$$

$$0,111 \cdot 2151,0 \cdot 245 \cdot 7,88 \cdot 18 \frac{P}{2(9930460,243)} \leq 15,62$$

$$0,417 \leq 15,62 \text{ kN/cm}^2 \text{ (limite para a força de cisalhamento nos conectores "x")}$$

$$P = 37,46 \text{ kN.}$$

Onde:

$R_{v,1}$ = resistência ao cisalhamento de cada conector " X ".

- Deslocamento vertical para o concreto devido a carga acidental P:

$$\mu_{\text{lim} \text{ c}} = \frac{L}{500} \text{ (valor limite de flecha para o concreto)}$$

$$\mu_{\text{lim} \text{ c}} = \frac{350}{500} = 0,7 \text{ cm}$$

Deslocamento vertical para a madeira devido a carga acidental P.

$$\mu_{\text{lim} \text{ w}} = \frac{L}{200}$$

$$\mu_{\text{lim} \text{ w}} = \frac{350}{200} = 1,75 \text{ cm}$$

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA SEGUNDINHO, P. G. Análise Experimental de um Modelo Reduzido de uma Ponte Mista de Madeira-Concreto Utilizando Vigas de Madeira Rolixa IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA-, Cuiabá, 2004.

ALVIM, R. C. ALMEIDA, P. Estudo Paramétrico da Rigidez Efetiva dos Pisos Mistos de Madeira-Concreto. In Simpósio EPUSP - Estruturas de Concreto V. São Paulo 2003.

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

BRANCO, J. M., CRUZ, P. J. (2003). Ligações Mistas Madeira-Betão Leve. In Simpósio EPUSP – Estruturas de Concreto V. São Paulo (2003).

BRAZOLIN, SÉRGIO. Preservação de madeiras sistema de classe de risco. In: VII ENCONTRO NACIONAL ABPM – 2007.

CALIL JUNIOR, C., DIAS, A, A. (2006) Manual de projetos e Construção de pontes de madeira. Manual. 1p – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

CARVALHO, P. E. R. Cumaru-Ferro (*Dipteryx odorata*). Comunicado Técnico ISSN 1517-5030 Colombo – PR, Julho, 2009.

CECCOTI, A. Timber –concrete composite structures, STEP/EUROFORTECH E13 University of Florence, 1995.

EUROCODE 5(1993). ENV 1995-1-1, EUROCODE 5, Part 1-1, Design of timber structures. Bridges, Brussels, European Committee for Standardization, July, 45p.

GOES, J.L.N (2004) Analises de Vigas de Madeira Pregadas com Seção Composta I. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

GONZAGA, A. L. (2006) Madeira: Uso e Conservação – Cadernos Técnicos. Disponível em: http://www.monumenta.gov.br/upload/Caderno%20Madeiraweb_1173383037.pdf. Acesso em Agosto de 2009.

HOLSCHEMACHER, KLAUS. Application of Steel Fibre Reinforced Concrete for Timber-Concrete Composite Constructions. LACER N° 7,2002.

JORGE, LUÍS FILIPE DE CARVALHO. Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

MIOTTO, JOSÉ, LUÍS. Estruturas mistas de madeira – concreto avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de engenharia de São Carlos – USP. 2009.

MOLINA, JULIO CESAR. (2008). Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de engenharia de São Carlos – USP. 2008.

MORAIS, V. M.(2007). Ponte Mista de Madeira-Concreto em vigas Treliçadas de Madeira. Dissertação – Campos de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2007.

MOURA, PINTO, E. (2004). A Madeira: um Material Construtivo Resistente ao Fogo – Artigo. Disponível em: http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_27/madeira.html. Acesso em Junho de 2009.

MUNGWA, MARTIN S. Experimental study of a composite wood – concrete beam with the INSA – Hilti new flexible shear connector. In: Construction and Building Materials 13, 1999.

PIGOZZO, JULIO CESAR. (2004). Estudo e Aplicações de Barras de Aço Coladas, como Conectores em Placas Mistas de Madeira e Concreto para Tabuleiros de Pontes. Tese

(Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

SÁ RIBEIRO, RUY. A (2006)– Conferencia Brasileira sobre Matérias e Tecnologias não convencionais na Construção Ecológica e Sustentável – BRASIL NOCMAT 2006- Vigas de madeira-concreto com conectores de resíduos de construção - Salvador –BA. (2006).

SORIANO, J, MASCIA, N. T. (2008). Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais, Disponível em:
<http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n4/a138cr460.pdf>. Acesso em Maio de 2010.

SOUZA, HELENA MARIA. madeiras Tropicais Brasileiras. Ed. Ibama, Brasília, 1997

STOJIĆ, DRAGOSLAV. CVETKOVIĆ, RADOVAN. Analysis of composite timber-concrete structures according to the limit states. Architecture and Civil Engineering vol. 2, N° 3, 2001, pp. 169 – 184.

WEAVER, C. A. DAVIDS, W. G. (2004). Testing and analysis of Partially Composite Fiber – reinforced Polymer-Glulam-Concrete Bridge Girders. Journal of Bridge Engineering – ASCE, July/August, 316-325.