

JULIANO CORREIA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES DE PEÇAS MISTAS MADEIRA-  
CONCRETO E ENTRE PEÇAS DE MADEIRA COM CONECTORES DE BARRA  
DE AÇO E DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

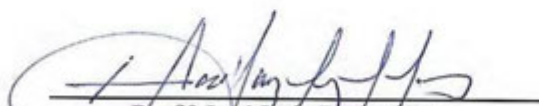
VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010


JULIANO CORREIA

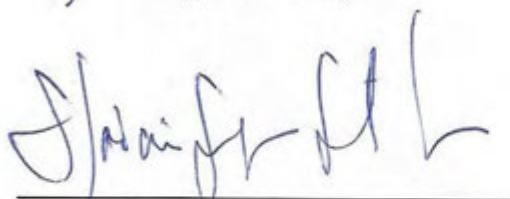
**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES DE PEÇAS MISTAS  
MADEIRA-CONCRETO E ENTRE PEÇAS DE MADEIRA COM  
CONECTORES DE BARRA DE AÇO E DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

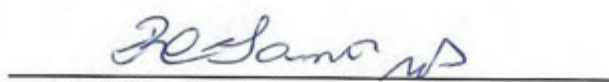
APROVADA: 20 de agosto de 2010.

  
Prof.º José Luiz Rangel Paes  
(Coorientador)

  
Prof.º Reginaldo Carneiro da Silva  
(Coorientador)

  
Prof.º Márcio Sampaio Sarmet  
Moreira

  
Prof.º Edgar Vladimiro Mantilla  
Carrasco

  
Prof.ª Rita de Cássia S. Sant'Anna Alvarenga  
(Orientadora)

*Somos anjos de uma só asa e só podemos voar  
de mãos dadas uns aos outros...*

*Aos meus pais Maria Inês e Gecelmino, meus irmãos Jairo, Dieisson e Daisson e à minha querida esposa Flávia.*

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a Deus pela vida, por tudo que tenho e tudo que sou.*

*Aos meus pais Maria Inês e Gecelmino, que sempre me apoiaram nas minhas escolhas e que são para mim exemplo e modelo de amor, coragem, dedicação...*

*Aos meus irmãos Jairo em sua seriedade e determinação, Dieisson em sua alegria e Daisson em sua mansidão, por estarem sempre ao meu lado.*

*A toda minha família: avós, tios e primos pelo apoio e pelas palavras de motivação.*

*Aos amigos irmãos: Cristiano, Ana Paula, Michel, Simone, Flávio Capelete e Handerson Tamerão sempre presentes nos momentos difíceis e, principalmente nos melhores.*

*Aos amigos de Macaé: Igor e Fernanda, pela motivação constante*

*Amigos do Mestrado para a vida: Maria Cláudia, Maila, Leidimar, Gislaine, Márcio, Cantinho, Thiago, Alex, Gustavo Irala, Gilcimar pela amizade, companheirismo e fidelidade aos nossos cafés nos intervalos das aulas.*

*A Professora Rita de Cássia pelo exemplo de dedicação, carinho e amor pela arte de ensinar e pela motivação nos momentos em que duvidei.*

*Ao Professor Márcio Sampaio Sarmet Moreira pelo apoio incondicional em todos os momentos, por sua disponibilidade e determinação, por todos os ensinamentos, pelos exemplos de humanidade, por transcender o limite de ser professor e tornar-se um grande amigo, e quando menos esperava, transcendia a linha da amizade e tornava-se praticamente um pai.*

*Aos amigos do Departamento de Engenharia Civil: Professores Jose Luiz Rangel Paes, Reginaldo Carneiro da Silva, Gustavo de Souza Veríssimo, Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Lauro Gontijo Couto e Eduardo Antônio Gomes Marques pelos ensinamentos, apoio, motivação e compreensão.*

*Ao amigo José Dias e todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil.*

*A Universidade Federal Viçosa por ter se tornado extensão de minha casa e minha querida terra natal.*

*Em especial, finalizo agradecendo à minha amada esposa Flávia que permaneceu incondicionalmente a meu lado, em todos os momentos, me apoiando e incentivando, por sua abdicação e dedicação e, principalmente pelo seu amor...*

*A todos que deixaram sua marca em minha vida e que me impulsionaram a ser quem sou e a estar onde estou, os meus mais sinceros agradecimentos.*

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUÇÃO	1
Justificativa	3
Objetivos do Trabalho	4
Estrutura da Dissertação	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
O Emprego de Sistemas de Piso Misto Madeira-Concreto	6
Comportamento de Peças Mistas e Compostas Fletidas	11
Tipos de Conectores de Ligação	13
Caracterização de Ligações por Conectores Mecânicos	16
Resultados de Rigidez e Resistência de Ligações	19
Modelos Analíticos de Avaliação do Comportamento de Peças Compostas de Madeira Submetidas à Flexão	32
Principais Conclusões Sobre o Comportamento de Conectores de Ligações e de Peças Mistas e Compostas.	34
MATERIAIS E MÉTODOS	36
Descrição Geral	36
Materiais	42
Madeira	42
Concreto	42
Aço	43
Ligações Madeira-Concreto com Conectores de Barras de Aço	44
Ligações Madeira-Concreto com Conectores de Concreto	48
Ligações de Peças de Madeira com Conectores de Concreto	51

Corpos-de-prova de Ligação com Três Peças de Madeira	51
Corpos-de-prova de Ligação com Duas Peças de Madeira	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
Materiais	55
Ligação Madeira-Concreto com Conectores de Barras de Aço	56
Ligação Madeira-Concreto com Conectores de Concreto	63
Ligação Madeira-Concreto: Avaliação Comparativa Entre os Conectores de Barras em Arco e de Concreto	74
Ligação de Peças de Madeira com Conectores de Concreto	76
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
Conclusões	87
Recomendações e Comentários Finais	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
APENDICE A. Resultados dos Ensaios de Ligação Madeira-Concreto com Conectores de Barra de Aço	95
APENDICE B. Resultados dos Ensaios de Ligação Madeira-Concreto com Conectores de Concreto	98
APENDICE C. Resultados dos Ensaios de Ligação entre Peças de Madeira com Conectores de Concreto	102
ANEXO A. Modelos Analíticos para Vigas Compostas de Madeira	112
ANEXO B. Síntese de Resultados de Ligações com Conectores Mecânicos Apresentados na Literatura	119

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Vista de sistema de piso misto em madeira-concreto, com emprego madeira serrada de seção retangular. Fonte: Miotto e Dias (2006).....7
- Figura 2.2. Componentes construtivos de laje de concreto executada em piso de madeira existente, com conector de pinos. Adaptado de Ceccotti (1995) apud Miotto & Dias (2006).....7
- Figura 2.3. Sistema misto madeira-concreto para tabuleiro de ponte: a) Detalhe do projeto, com emprego de pré-laje; b) Fase de concretagem da laje; c) Fase de ensaio experimental. Fonte: Segundinho e Mathiesen (2004).....8
- Figura 2.4. Avaliação comparativa de três diferentes sistemas de piso. FONTE: Adaptdo de Natterer et al, (1996).....9
- Figura 2.5. Comportamento de viga composta: a) com ligação rígida ou com peça monolítica; b) sem ligação, com flexão individual das peças; c) com ligação flexível por conectores mecânicos espaçados e ocorrência de descontinuidade das deformações normais; d) Esforços internos com ligação flexível. Fonte: Baseado em Alvim<sup>1</sup> (2002).....12
- Figura 2.6. . Tipologias freqüentes de conectores em estruturas mistas madeira-concreto: a) conectores de pinos e de barras de aço; b) conectores de anéis e chapas metálicas; c) conectores de entalhes preenchidos com concreto; d) conectores metálicos contínuos na

---

<sup>1</sup> ALVIM, R. C. A resistência dos pilares de madeira compostas. São Paulo. 277p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2002.

forma de treliça ou chapa de aço colados na madeira. Fonte: Baseado em Pigozzo (2004).....	14
Figura 2.7. Curvas Força x Escorregamento para diferentes tipos de conectores. Fonte: Dias e Jorge (2007).....	15
Figura 2.8 Vigas compostas de madeira com ligações por: a) dentes inclinados; b) dentes verticais; c) tarugos horizontais; d) tarugos inclinados. Fonte: baseado em Pfeil e Pfeil (2003).....	15
Figura 2.9. Curva típica força x deslocamento de ligação com pinos de aço. Fonte: Van Dyer (1992).....	17
Figura 2.10. . Curva força x deslocamento relativo em ligações e módulos de deslizamento relativos aos estados limites últimos ( $K_{ll}$ ) e de serviço ( $K_{ser}$ ). Fonte: Góes (2002).....	18
Figura 2.11. Ligação madeira concreto com conectores de barra de aço: a) Detalhes dos corpos-de-prova; b) configuração dos ensaios. Fonte: Tommola et al.....	20
Figura 2.12. Corpos-de-prova utilizados nos ensaios sob cargas cíclicas: geometria da seção transversal. Fonte: Tommola et al (1999).....	21
Figura 2.13. Configurações dos conectores: a) tipo X; b) tipo VE; c) tipo XE. Fonte: Tommola et al (1999).....	21
Figura 2.14. (a) Parafuso SFS VB 48-7.5x100; (b) disposição dos parafusos para realização dos ensaios de cisalhamento. Fonte: Jorge (2005).....	24
Figura 2.15. Conector de tarugo de madeira colada ensaiado por Jorge (2005). Fonte: Jorge (2005)..	24
Figura 2.16. a) conectores de barra de aço com gancho; b) dimensões relativas utilizadas nas ancoragens dos conectores. Fonte: Carvalho (2008). .....	26
Figura 2.17. Diferentes modelos de corpos-de-prova de ligação madeira-concreto. Fonte: Carvalho (2008).....	26

Figura 2.18. Dimensões mínimas para os diferentes modelos de corpos-de-prova de ligação. Fonte: Carvalho (2008).....	27
Figura 2.19. Corpos-de-prova de ligação madeira-concreto, com emprego de conectores de barra com diâmetro de 12.5 mm. Fonte: Carvalho (2008).....	28
Figura 2.20. Curva força x deslocamento idealizada, conforme EN 26891. Fonte: Carvalho (2008).....	29
Figura 2.21. Curvas força x deslocamento obtidas nos ensaios com conectores de 12,5 mm. Fonte: Carvalho (2008). ).....	30
Figura 3.1. Ligação com conectores de barras de aço na forma de pino com cabeça, fixados a 90°: a) representação esquemática dos pinos e de sua ligação com a madeira; b) corpo-de-prova antes da concretagem da peça central.....	37
Figura 3.2. Ligação do conector de barra de aço na forma de arco com emprego de chapa de ancoragem no lado comprimido: a) representação esquemática; b) vista parcial do corpo-de-prova antes da concretagem da peça central.....	38
Figura 3.3. Ligações entre peças de madeira e concreto com dentes simples (LMCDS) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.....	39
Figura 3.4. Ligações entre peças de madeira e concreto com dentes duplos (LMCDD) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.....	39
Figura 3.5. Ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com dentes simples (LMMDS) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.....	40
Figura 3.6 Ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com dentes duplos (LMMDD) e faces carregadas inclinadas em relação à interface: a) a 90°; b) a 75°; c) a 60°.....	40
Figura 3.7. Disposições do corpo-de-prova com duas peças de madeira para avaliação da ligação madeira-madeira com conectores de entalhe preenchido de concreto... ..	41

Figura 3.8. Corpo-de-prova de ligação com conectores de pinos com cabeça, fixados na madeira a 90 <sup>0</sup> : a) representações esquemáticas; b) vista antes da concretagem. ....	44
Figura 3.9. Corpos-de-prova com conectores de barra de aço em arco com fixação na madeira por cravação direta, com fixação por adesivo epóxi e com auxílio de placa de ancoragem e entalhe na madeira: a) Representação esquemática; b) Vista antes da concretagem das peças centrais; c) corte transversal esquemático e vista da ligação por pinos em arco, com chapa de ancoragem e entalhe na madeira.....	46
Figura 3.10. Ensaio de corpo-de-prova com conector em arco colado (LPAC2), em diferentes estágios do carregamento.....	47
Figura 3.11. Representação esquemática em perspectiva de corpos-de-prova de ligação de peças mistas com conectores de concreto: a) com dentes simples; b) com dentes duplos.....	48
Figura 3.12. Corpos-de-prova de ligação madeira-concreto com conectores de concreto antes da concretagem, com vista dos pinos de ancoragem e das armaduras de combate ao fendilhamento das peças de concreto: (a), (b), (c) corpos-de-prova com dentes duplos, respectivamente, a 60 <sup>0</sup> , 75 <sup>0</sup> e 90 <sup>0</sup> ; (d), (e) e (f) corpos-de-prova com dentes simples, respectivamente, a 60 <sup>0</sup> , 75 <sup>0</sup> e 90 <sup>0</sup> .....	49
Figura 3.13. Ensaio de ligações entre peças de madeira e concreto com ligação por conectores de concreto: (a), (b), (c) corpos-de-prova de dentes duplos, com entalhes à, respectivamente, 60 <sup>0</sup> , 75 <sup>0</sup> e 90 <sup>0</sup> ; (d), (e) e (f) corpos-de-prova de dentes simples, com entalhes à, respectivamente, 60 <sup>0</sup> , 75 <sup>0</sup> e 90 <sup>0</sup> .....	50
Figura 3.14. Corpos-de-prova de ligação com conectores de concreto entre três peças de madeira antes da concretagem.....	51
Figura 3.15. Representação dos corpos-de-prova de ligação entre três peças de madeira com conectores de concreto e dentes a 90 <sup>0</sup> : a) dentes duplos; b) dentes simples.....	51
Figura 3.16. . Ensaio de ligações entre três peças de madeira com ligação por conectores de concreto: a) dentes duplos a 75 <sup>0</sup> e a 90 <sup>0</sup> ; c) dentes simples a 90 <sup>0</sup> .....	52

Figura 3.17. Representação do corpo-de-prova com duas peças de madeira e um único conector de concreto, com face carregada inclinada de 300 em relação à normal à interface.....	53
Figura 3.18. Ensaio de corpos-de-prova de ligações com conectores de concreto com duas peças de madeira e um conector. ....	54
Figura 4.1. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações madeira-concreto com conectores de barra de aço. ....	57
Figura 4.2. Curva força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com pinos a 90 <sup>0</sup> , LMCP90, CP 1, Pu=130,9 kN.....	58
Figura 4.3. Curva força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco simples, LMCPAS, CP 1, Pu=115,7 kN.....	58
Figura 4.4. Curvas força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco coladas, LMCPAC, CP 1, Pu=167,2 kN.....	59
Figura 4.5 Curvas força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco, chapa de ancoragem e entalhe na madeira, LMCPAE, CP 2, Pu=102,7 kN.....	59
Figura 4.6. Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios de ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.....	61
Figura 4.7. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto com dentes duplos.....	64
Figura 4.8. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto com dentes simples. ....	64
Figura 4.9. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 90 <sup>0</sup> , LMCDD90, CP 1, Pu = 166,8 kN.....	65

Figura 4.10. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 75 <sup>0</sup> , LMCDD75, CP 1, Pu = 181,3 kN.....	65
Figura 4.11. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 60 <sup>0</sup> , LMCDD60, CP 1, Pu = 217,1 kN.....	66
Figura 4.12. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 90 <sup>0</sup> , LMCDS90, CP 1, Pu = 190,9 kN.....	66
Figura 4.13. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 75 <sup>0</sup> , LMCDS75, CP 1, Pu = 192,5 kN. ....	67
Figura 4.14. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 60 <sup>0</sup> , LMCDS60, CP 1, Pu = 200,2 kN.....	67
Figura 4.15. Representação gráfica das resistências médias (Pu) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a 90 <sup>0</sup> .....	70
Figura 4.16. Representação gráfica das rigidezes de serviço médias (Ks) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a 90 <sup>0</sup> .....	70
Figura 4.17. Representação gráfica das rigidezes últimas médias (Ku) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a 90 <sup>0</sup> .....	71
Figura 4.18. Representação gráfica das relações de rigidezes médias (Ku/Ks) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a 90 <sup>0</sup> .....	71
Figura 4.19. Resistências médias (Pu) das ligações madeira-concreto.....	74
Figura 4.20. Rigidezes médias de serviço (Ks) das ligações madeira-concreto.....	75
Figura 4.21. Rigidezes últimas médias (Ku) das ligações madeira-concreto.....	75
Figura 4.22. Relações de rigidezes médias (Ku/Ks) das ligações madeira-concreto.....	75
Figura 4.23. Curvas força x deslocamento obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto entre três peças de madeira.....	77
Figura 4.24. Curvas força x deslocamento relativo de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto com dentes inclinados a 15 <sup>0</sup> .....	78

Figura 4.25. Curvas força x deslocamento relativo de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto com dentes inclinados a 30 <sup>0</sup> .....	78
Figura 4.26. Curva força x deslocamento e retas de correlação e de definição das rigidezes, obtidas de ensaios de ligação entre três peças de madeira e conectores de concreto com dentes duplos a 90 <sup>0</sup> , LMM90, CP 1, Pu = 228,3 kN.....	79
Figuras 4.27. Curva força x deslocamento e retas de definição das rigidezes de ensaios de ligação entre duas peças de madeira e conectores de concreto com dentes a 15 <sup>0</sup> , com barra transversal rosqueada, L2PMDS15-BR, CP 2, Pu = 76 kN.....	79
Figura 4.28. Resultados de ensaios de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto: a) resistência Pu (kN); b) rigidez Ks (kN/mm); c) rigidez Ku (kN/mm); d) Relação Ku/Ks. ....	83
Figura 4.29. Resultados de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto: a) resistência Pu (kN); b) rigidez Ks (kN/mm); c) rigidez Ku (kN/mm); d) Relação Ku/Ks. ....	84

## FIGURAS APÊNDICES

Figura A.1. Curvas força x deslocamento, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com pinos a 90 <sup>0</sup> (CP 2) para corpo-de-prova madeira concreto.....	96
Figura A.2 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barra em arco simples (CP 2) .....	96
Figura A.3 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco coladas (CP 2). ....	97
Figura A.4 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barra em arco, chapa de ancoragem e com entalhe na madeira (CP2). ....	97

Figura B.1. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 90 <sup>0</sup> (CP-2). .....	98
Figura B.2. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 75 <sup>0</sup> (CP-2). .....	99
Figura B.3. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 60 <sup>0</sup> (CP-2). .....	99
Figura B.4. Curva força x deslocamento relativo obtida de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 90 <sup>0</sup> (CP-2). .....	100
Figura B.5. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 60 <sup>0</sup> (CP-2). .....	100
Figura B.6. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 60 <sup>0</sup> (CP-1). .....	101
Figura C.1. Corpos-de-prova de ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto em dentes simples e em dentes duplos. ....	102
Figura C.2. Ensaio de corpos-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto. ....	103
Figura C.3. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a 60 <sup>0</sup> . ....	103
Figura C.4. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a 75 <sup>0</sup> . ....	104
Figura C.5. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a 90 <sup>0</sup> (CP2). ..	104
Figura C.6. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 60 <sup>0</sup> . ....	105
Figura C.7. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 75 <sup>0</sup> . ....	105

Figura C.8. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 90 <sup>0</sup> (CP 2).....	106
Figura C.9. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra soldada (CP1). .....	106
Figura C.10. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra soldada (CP2). .....	107
Figura C.11. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 15 <sup>0</sup> e barra colada (CP2). .....	107
Figura C.12. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30 <sup>0</sup> e barra colada (CP1). .....	108
Figura C.13. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30 <sup>0</sup> e barra colada (CP2). .....	108
Figura C.14. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 15 <sup>0</sup> e barra rosqueada (CP2). .....	109
Figura C.15. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30 <sup>0</sup> e barra rosqueada (CP1). .....	109
Figura C.16. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30 <sup>0</sup> e barra rosqueada (CP2). .....	110
Figura C.17. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30 <sup>0</sup> e barra colada (CP2). .....	110
Figura C.18. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra colada (CP2). .....	111

## FIGURAS ANEXOS

Figura A.1. Parâmetros geométricos e diagrama de tensões normais na seção transversal de peças compostas. Fonte: DIN (1988), apud Góes (2002). .....	115
Figura A.2. Geometria das seções transversais de peças compostas e distribuição de tensões normais de flexão. Fonte: Eurocode (5), apud (GÓES, 2002). .....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparativo entre tipologias construtivas. Fonte: LEE, A. G. (1999).....	10
Tabela 2.2. Resultados de ligações madeira-concreto. Fonte: Tommola et al (1999). .....	20
Tabela 2.3. Resultados de ligações madeira-concreto submetidos a cargas cíclicas. Fonte: Tommola et al (1999).....	22
Tabela 2.4. Resistências (kN) obtidas nos ensaios de cisalhamento de ligações com quatro conectores de barra de aço com gancho. Fonte: Carvalho (2008). .....	29
Tabela 2.5. Rigidez ou módulo de deslizamento (Ks) por conector (kN/mm). Fonte: Carvalho (2008).....	31
Tabela 3.1. Características e procedência dos materiais empregados no concreto. ....	43
Tabela 3.2. Traço do concreto empregado na confecção dos corpos-de-prova. ....	43
Tabela 4.1. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira e de concreto com conectores de barras.....	56
Tabela 4.2. Resistências (Pu) e rigidezes (Ks) e (Ku) de ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço. ....	60
Tabela 4.3. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira e de concreto com conectores de concreto.....	63

Tabela 4.4. Resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) para ligações madeira-concreto com conectores de concreto com dentes duplos.....	68
Tabela 4.5. Resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) para ligações madeira-concreto com conectores com dentes simples. ....	69
Tabela 4.6. Valores médios de resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) de ligações madeira concreto.....	74
Tabela 4.7. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira com conectores de concreto. ....	76
Tabela 4.8. Resultados de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto com dentes duplos (LMDD).....	80
Tabela 4.9. Resultados de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto com dentes simples (LMDS). ....	81
Tabela 4.10. Resultados de ligações com conectores de concreto entre duas peças de madeira. ....	82

## **TABELAS ANEXOS**

Tabela A.1. Valores dos coeficientes de deslizamento $k'$ (N/mm) para vigas compostas. Fonte: DIN (1988), apud Góes (2002). ....	114
Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores. Fonte: Carvalho (2008). ....	120 a 128

## RESUMO

CORREIA, Juliano, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2010. **Avaliação experimental de ligações de peças mistas madeira-concreto e entre peças de madeira com conectores de barra de aço e de concreto.** Orientadora: Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga. Coorientadores: José Luiz Rangel Paes e Reginaldo Carneiro da Silva.

Apresenta-se neste trabalho uma avaliação experimental de ligações de peças mistas madeira-concreto e de peças compostas de madeira, com emprego de conectores de barras de aço e de conectores de concreto. Nas ligações de peças mistas, foram ensaiados corpos-de-prova simétricos com três peças, com peças laterais de madeira e peça central de concreto. Nas ligações entre de peças de madeira, foram ensaiados corpos-de-prova simétricos, com três peças e com duas peças. Os conectores de barras de aço foram executados como pinos retos com cabeça, dispostos normais às peças de madeira e na forma de arco, com fixação na madeira por cravação direta, com emprego de adesivo epóxi ou com auxílio de placa de distribuição de carga no lado comprimido. Os conectores de concreto foram obtidos pelo preenchimento de entalhes executados na madeira e barras transversais de aço, empregadas para impedir a abertura entre as peças ligadas. Os entalhes foram executados com diferentes inclinações, em um único lado ou nos dois lados das peças de madeira. Nos ensaios, os corpos-de-prova foram submetidos à força de compressão crescente, sendo obtidas as resistências, as curvas força x deslocamento relativo e as rigidezes relativas aos estados limites últimos ( $K_u$ ) e de utilização ou de serviço ( $K_s$ ). Os resultados indicaram a ocorrência de elevadas resistências e rigidezes para todas as ligações. Nas ligações de peças mistas com conectores de barra de aço ocorreram processos de ruptura com indícios de ductilidade, com rupturas finais no concreto por efeito de compressão-fendilhamento. Nas ligações com conectores de concreto ocorreram processos de ruptura predominantemente frágeis e valores de rigidezes praticamente constantes ao longo do carregamento.

## ABSTRACT

CORREIA, Juliano, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2010. **Experimental evaluation wood-to-concrete and wood composite members joints using steel-bar and concrete connectors.** Adviser: Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga. Co-advisers: José Luiz Rangel Paes and Reginaldo Carneiro da Silva

This work describes an experimental investigation of Wood-to-concrete and wood-to-wood joints for composite members using steel-bar and concrete connectors. In wood concrete joints, symmetric three-member specimens were built, with wood outside pieces and concrete inside. In wood-to-wood joints, both three-member and two-member symmetric specimens were built. The steel-bar connectors consisted of straight pins with heads, cut from the bars, inserted normally to the wood surface and shaped like arches. They were simply driven into the wood, glued with an epoxy adhesive or with load distribution plate in compression side. The concrete connector's joints are made with concrete-filled mortise. In addition, steel bars, placed normally to the joined pieces, were used to avoid opening and separation of the member during loading. In these connections, variable slope of the mortise and location at one or at both sides of the wood member are used. The specimens were then subjected to an increasing compressive force, and force-displacement diagrams were plotted, from which the stiffness were calculated, both of service ( $K_s$ ) and ultimate limit states ( $K_u$ ). These results for all connections have shown high values for strength and stiffness. In wood-to-concrete steel-bar connections ductile processes are obtained and the end failure occurs in concrete. In concrete connections, these results have shown that most of the failures occurred in a fragile manner, with stiffness remained approximately constant during the evaluation.

# 1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas das construções emprega-se uma gama considerável de materiais e de sistemas e processos construtivos. Em geral, busca-se obter do conjunto de soluções um bom comportamento estrutural, agilidade e competitividade econômica na produção, visando bons resultados estéticos e funcionais que permitam condições adequadas de conforto e uso das construções, além de segurança e durabilidade da estrutura.

A maior difusão do emprego dos diferentes materiais, processos e sistemas construtivos conhecidos e em desenvolvimento, depende inicialmente de seu conhecimento e disponibilidade, sendo também influenciado por aspectos culturais, ambientais, tecnológicos e econômicos. Dentre os materiais mais amplamente aplicados nas estruturas destacam-se a madeira, o concreto e o aço. Utilizados de forma combinada, esses materiais podem ser aplicados em diversas alternativas construtivas, na busca de soluções estruturais que permitam o aproveitamento adequado de suas características físicas e mecânicas, visando um bom comportamento estrutural e eficiência no processo construtivo.

Da aplicação conjunta de diferentes materiais resultam as soluções estruturais mistas. Da associação do aço, do concreto e da madeira são obtidas as estruturas mistas mais comuns, com várias composições possíveis. As peças compostas são obtidas com a associação de dois ou mais elementos longitudinais, de um mesmo material, ligados entre si.

Para se obter um comportamento conjunto efetivo das peças mistas ou compostas com elementos justapostos submetidas à flexão, devem ser utilizadas ligações nas interfaces

entre peças adjacentes, que impeçam ou minimizem os deslocamentos relativos entre elas, que sejam capazes de transmitir os esforços mobilizados nestas interfaces, de modo a se obter parte importante da capacidade resistente potencial da seção conjunta resultante.

Em geral, as ligações são efetuadas por conectores mecânicos especialmente projetados para este fim e adequadamente espaçados, embora seja possível o uso de ligações adesivas aplicadas continuamente nas faces em contato dos elementos adjacentes, que exige tecnologia específica de produção, como na madeira laminada colada.

O presente trabalho trata de uma avaliação experimental, de caráter exploratório, do comportamento de ligações de peças mistas madeira-concreto e também entre peças de madeira, utilizando diferentes tipos de conectores. Foram obtidas as resistências e rigidezes relativas aos estados limites último e de utilização, além de uma avaliação preliminar dos processos de ruptura desenvolvidos.

A primeira avaliação consistiu de ligações de peças mistas madeira-concreto, com conectores confeccionados com barras nervuradas de aço, nas seguintes formas:

- i) de pinos com cabeça, fixados normais à madeira com o auxílio de adesivo epóxi;
- ii) de arcos embutidos no concreto, com as extremidades fixadas inclinadas na madeira com: cravação direta e emprego de adesivo epóxi; uso de chapa de ancoragem fixada na barra de aço, no lado comprimido, apoiando em entalhes efetuados na madeira.

Para as ligações madeira-concreto foi avaliado um outro tipo de conector, constituído de dentes de concreto, obtidos por meio de entalhes efetuados na madeira preenchidos de concreto. Este tipo de conector também foi utilizado em ligações entre peças de madeira. Nessas ligações, entre peças de madeira com conectores de concreto, foram utilizadas, adicionalmente, barras transversais de aço para impedir a abertura entre as peças ligadas.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

As estruturas mistas vêm sendo empregadas na construção há mais de um século nas mais diversas formas de aplicação, com destaque para pisos de edifícios e tabuleiros de pontes. Em 1944, as estruturas mistas, mais especificamente em aço e concreto, passaram a ser contempladas pelas normas da American Association of State Highway Officials (AASHO, mais tarde a AASHTO), conforme Pigozzo (2004). Tem-se, a partir de então, um crescente avanço no desenvolvimento de metodologias construtivas, sistemas de conexão e sistemas mistos como um todo.

A associação do concreto e da madeira surgiu mais recentemente, tendo origem em países da Europa, como uma solução alternativa em situações de reabilitação de construções antigas, com vistas a evitar a descaracterização da construção, que representaria uma perda irreversível do valor arquitetônico agregado (BRANCO, 2003).

As estruturas mistas madeira-concreto são empregadas principalmente na execução de sistemas de pisos, tanto em casas e edifícios quanto em passarelas e pontes, com solução construtiva predominante obtida pela associação de um conjunto de vigas convenientemente afastadas com seção transversal T, com alma de peças de madeira apoiadas nas extremidades e mesa formada por uma laje contínua de concreto armado.

Sob o ponto de vista do comportamento estrutural, as peças mistas e as peças compostas são utilizadas visando ganhos no comportamento resistente, tanto em termos de resistência quanto em relação à rigidez do conjunto. Outros aspectos importantes estão relacionados à possibilidade de maior eficiência no processo construtivo, com obtenção de soluções mais simples, mais limpas e com bons resultados estéticos, além de redução de prazos de execução e de custos. As soluções mistas madeira-concreto também são beneficiadas por ganhos de durabilidade e de segurança da estrutura contra a ação do fogo em condições de incêndio.

A principal justificativa para este trabalho consiste do interesse de se avaliar conectores de ligação de peças mistas madeira-concreto e de peças compostas de madeira, que apresentam facilidade de execução, custos envolvidos não elevados e, principalmente, bom potencial de desempenho em relação ao comportamento estrutural.

## **1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar experimentalmente o desempenho de ligações de peças mistas madeira-concreto e entre peças de madeira, por meio de diferentes tipos conectores.

Os objetivos específicos relevantes do trabalho são:

- i) determinar a carga última ( $P_u$ ) e a rigidez de ligações de peças mistas madeira-concreto com conectores dos seguintes tipos:
  - a. Conectores de barras de aço: pinos e barras em arco;
  - b. Conectores de dentes de concreto.
  
- ii) avaliar o comportamento de ligações entre peças de madeira;
- iii) avaliar comparativamente as rigidezes de vigas compostas de madeira, obtidas experimentalmente e com a metodologia semi-analítica proposta pelo Eurocode 5

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos, sendo que o primeiro apresenta uma introdução ao tema abordado nesse trabalho, a justificativa, os objetivos geral e específicos, bem como a estrutura desse documento.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura, com foco nos empregos de sistemas de piso misto madeira-concreto e nos estudos do comportamento de conectores mecânicos de ligação.

O terceiro capítulo diz respeito aos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, com uma descrição sucinta dos materiais utilizados, seguida da descrição da metodologia empregada para avaliação experimental dos diferentes tipos de ligações.

O quarto capítulo apresenta os resultados referentes aos ensaios experimentais realizados, bem como uma comparação com os resultados obtidos com um modelo semi-analítico disponível na literatura. Apresenta-se, ainda, uma discussão sobre os temas abordados.

O quinto capítulo constitui-se na conclusão desse trabalho e sugestões para futuros trabalhos.

No Anexo A, são apresentados os modelos analíticos para vigas compostas de madeira e no Anexo B, apresenta-se uma síntese de resultados de ligações com conectores mecânicos apresentados na literatura.

No Apêndice A, são apresentados os resultados dos ensaios de ligação madeira-concreto com conectores de barras de aço realizados neste trabalho. No apêndice B, são apresentados os resultados dos ensaios de ligação madeira-concreto com conectores de concreto e, no apêndice C, são apresentados os resultados dos ensaios de ligação entre peças de madeira com conectores de concreto, realizados neste trabalho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. O EMPREGO DE SISTEMA DE PISO MISTO MADEIRA-CONCRETO**

Na composição de sistemas de pisos mistos em madeira-concreto, podem ser empregadas peças de madeira com as mais variadas formas, como peças roliças com seção circular, peças serradas de seção retangular, além das peças estruturais de madeira mais eficientes à flexão, fabricadas com tecnologia de madeira laminada colada (MLC), como peças compostas ou na forma de treliças estruturais. Na Figura 2.1, apresenta-se uma solução de piso mista madeira-concreto com uso de peças serradas de madeira.

As soluções mistas madeira-concreto para sistemas de piso apresentam algumas vantagens potenciais quando comparadas a outras soluções. Assim, se comparadas com as estruturas comuns de madeira, as estruturas mistas madeira-concreto apresentam maior rigidez e resistência, além de menores vibrações e maior isolamento acústico. Se comparadas com as estruturas convencionais de concreto armado, tem-se uma redução significativa no peso da estrutura, com alívio das fundações, além do emprego de vigas prontas de madeira, de fácil manuseio ao invés da execução de vigas de concreto armado, resultando em redução de formas, escoramento e tempo de execução.

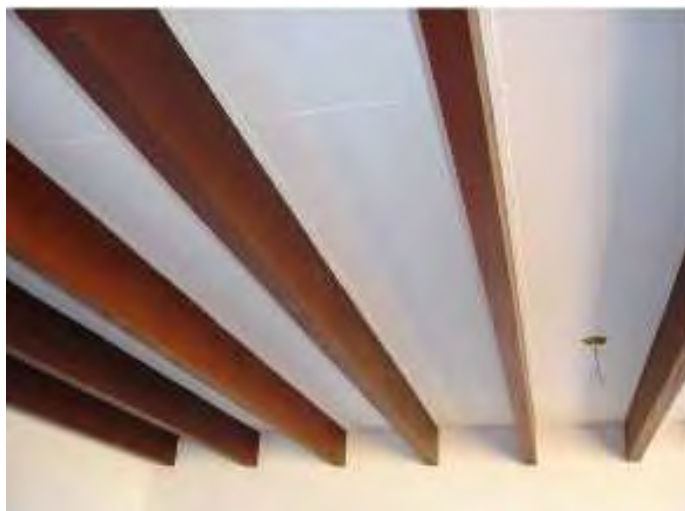


Figura 2.1. Vista de sistema de piso misto em madeira-concreto, com emprego madeira serrada de seção retangular. Fonte: Miotto e Dias (2006).

Nas soluções usuais de pisos madeira-concreto, em geral as formas utilizadas na concretagem das lajes não tem função estrutural, podendo ser provisórias ou incorporadas, dependendo de fatores como: forma das peças de madeira, material disponível para forma, qualidade de acabamento exigida, umidade ambiente, etc. No entanto, podem ser empregados componentes pré-fabricados, com função estrutural do tipo pré-laje.

Na Figura 2.2 são mostrados detalhes construtivos de um sistema de piso misto em madeira-concreto, com forma elevada, empregado na restauração de piso de construções antigas.

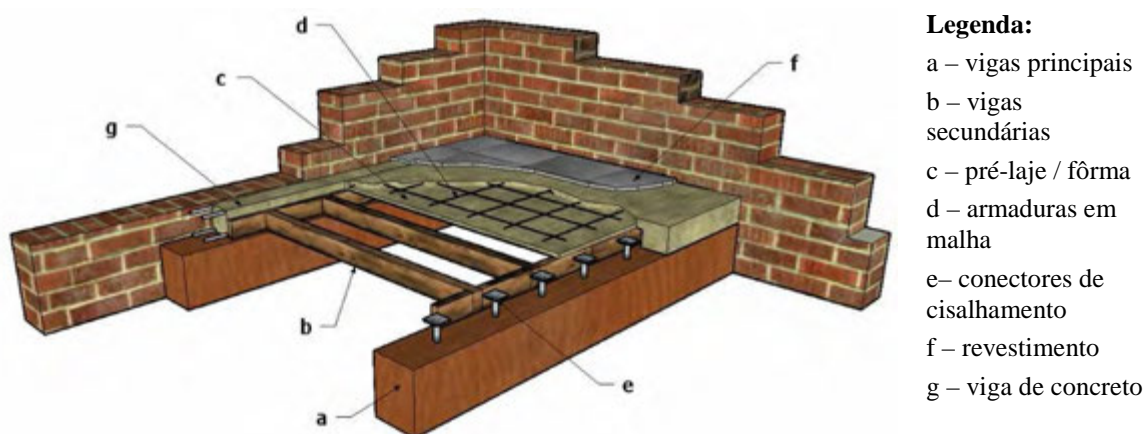
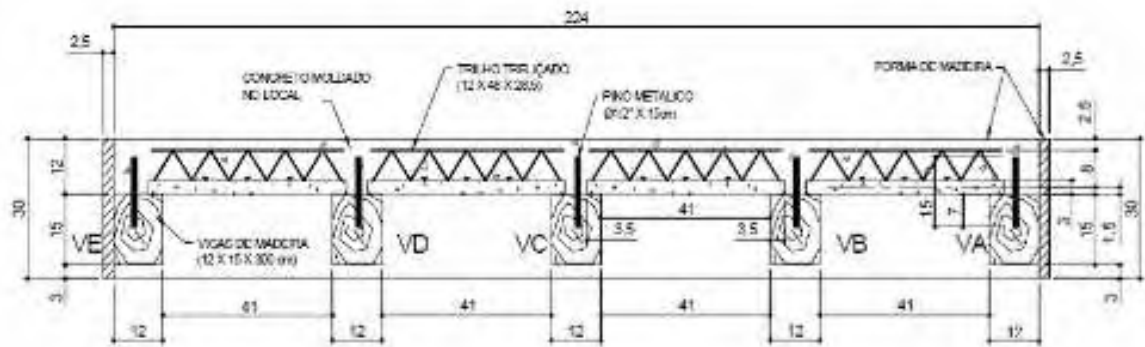


Figura 2.2. Componentes construtivos de laje de concreto executada em piso de madeira existente, com conector de pinos. Adaptado de Ceccotti (1995) apud Miotto & Dias (2006).

Nas Figuras 2.3, são apresentados o esquema e a preparação para experimento com sistema misto madeira-concreto para tabuleiro de pontes (SEGUNDINHO e MATHIESEN, 2004).



(a)



(b)

(c)

Figura 2.3. Sistema misto madeira-concreto para tabuleiro de ponte: a) Detalhe do projeto, com emprego de pré-laje; b) Fase de concretagem da laje; c) Fase de ensaio experimental.

Fonte: Segundinho e Mathiesen (2004).

Segundo Flach e Frenette (2004), o uso de lajes de concreto em associação com vigas de madeira em edifícios melhora o isolamento acústico e a resistência ao fogo. Em pontes, aumenta a resistência e melhora a distribuição de forças, além de agregar sustentabilidade.

De fato, as lajes de concreto se constituem em uma eficiente barreira à propagação do fogo em comparação com soluções unicamente de madeira. Além disso, têm-se constatado que as peças de madeira que compõem a alma das vigas mistas podem ser mais resistentes à ação do fogo quando comparadas com vigas fabricadas em aço ou concreto armado (TACITANO, 2000).

Nas pontes, a laje de concreto de sistemas de piso misto proporciona à madeira proteção contra a abrasão causada pelo tráfego. Em pontes e em lajes externas, a laje promove uma proteção contra a ação das intempéries, o que promove acréscimo de durabilidade à estrutura se comparada às estruturas de madeira convencionais. Yttrup e Nolan (1999) observaram, em estudo sobre diversas pontes em estrutura mista em madeira-concreto construídas na Austrália, que a durabilidade de pontes mistas madeira-concreto atinge até três vezes às de pontes de madeira, em função da proteção pela laje superior às peças de madeira contra a ação direta da chuva e do sol.

Natterer *et al* (1996) apresentam uma avaliação comparativa de três diferentes sistemas de piso, com soluções em madeira, em concreto armado e em madeira-concreto. Foi avaliado o comportamento em relação ao crescimento do peso próprio e à capacidade de isolamento acústico, em função do vão de trabalho, variando entre 2,0 m e 10,0 m, considerando uma sobrecarga fixa de 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Na Figura 2.4, apresenta-se gráfico referente aos resultados obtidos da avaliação de diferentes tipos de sistema de piso.

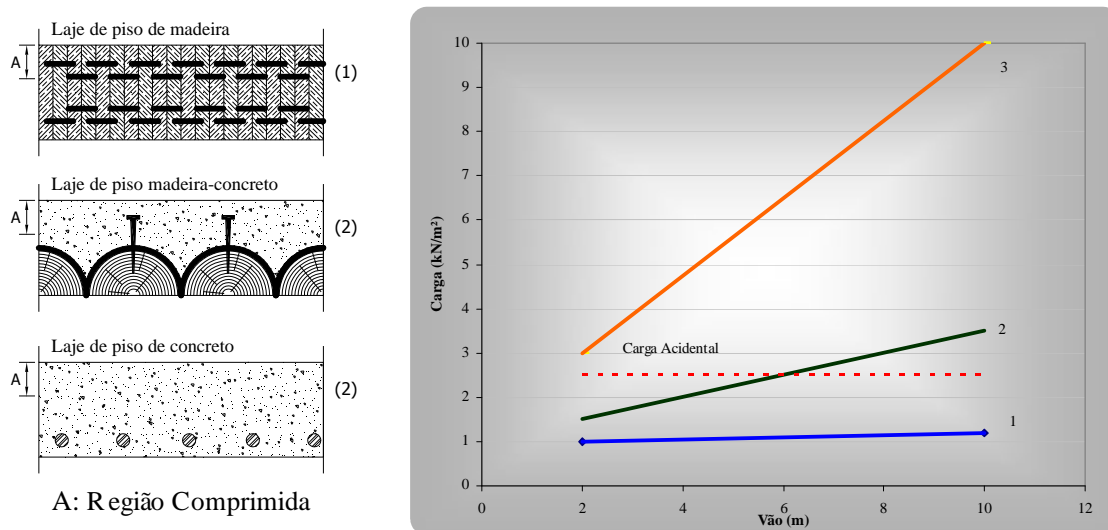


Figura 2.4. Avaliação comparativa de três diferentes sistemas de piso.

FONTE: Adaptado de Natterer et al, (1996).

Os resultados apresentados comprovam que a laje de piso em concreto armado apresenta peso próprio cada vez mais elevado, à medida que se aumenta o vão, e sempre maiores que a sobrecarga de utilização. Na solução em madeira-concreto, o peso próprio supera o valor da carga acidental apenas para vãos maiores que cinco metros (5,0 m). A solução em madeira apresenta sempre peso próprio significativamente inferior à sobrecarga. Em

relação ao isolamento acústico, a solução em concreto é a de melhor comportamento, seguido do piso madeira/concreto que é significativamente superior à solução em madeira.

Embora seja sujeita a críticas, a Tabela 2.1, obtida de Lee (1999), apresenta um comparativo entre pontes com as seguintes tipologias: construídas exclusivamente em madeira; em estrutura mista madeira-concreto e em estrutura de aço ou concreto armado, que o autor chamou de permanentes.

Tabela 2.1. Comparativo entre tipologias construtivas. Fonte: LEE, A. G. (1999)

	<b>Ponte de Madeira</b>	<b>Ponte em estrutura mista</b>	<b>Pontes de aço ou concreto armado</b>
<b>Período de projeto</b>	20 anos	Estimado em 40 anos	≥80 anos
<b>Custos de construção</b>	\$ 400/m <sup>2</sup>	\$ 600/m <sup>2</sup>	≥\$ 800/m <sup>2</sup>
<b>Tempo de construção</b>	Uma semana	Mais três semanas (necessidade de cura do concreto)	Depende do material; para tabuleiros de concreto, por exemplo, deve-se respeitar o período de cura.
<b>Dificuldade de instalação</b>	Moderado	Alto	Alto
<b>Requisitos de manutenção</b>	Alto, dependendo do uso – necessidade de troca de pranchas do tabuleiro.	Baixo	Baixo, dependendo dos materiais aplicados na construção

Apesar dos estudos desenvolvidos, existe ainda um vasto campo de fenômenos cujas influências necessitam ser mais bem avaliadas, tais como a fluência dos materiais, as variações de temperatura e do teor de umidade da madeira, principalmente em estruturas externas de maiores dimensões.

É importante ressaltar que, em geral, não se pode abrir mão dos métodos e tratamentos preservativos contra a ação de insetos e outros organismos xilófagos, apesar da proteção proporcionada pela capa de concreto. O tratamento adequado é definido em função da classe de uso ou de risco de ataque de agentes biológicos a qual está sujeita a madeira, definida em função da agressividade do ambiente, da durabilidade natural da madeira utilizada e da facilidade da realização de inspeções e manutenções preventivas periódicas.

## 2.2. COMPORTAMENTO DE PEÇAS MISTAS E COMPOSTAS FLETIDAS

O comportamento de uma peça mista ou composta, independentemente de seus materiais componentes, é definido em função do comportamento da ligação que promove a interação entre as partes componentes. Por sua vez, o comportamento da ligação é função de diversos fatores tais como as propriedades mecânicas dos materiais, a natureza dos materiais, o número de conectores, a geometria, as disposições construtivas e o tipo de conector empregado.

Como representado na Figura 2.5, o comportamento das ligações é considerado rígido, semirrígido ou flexível, com ocorrência de interação total ou parcial entre as peças ligadas, função da intensidade dos deslocamentos relativos ou deslizamentos mobilizados na interface, que define também o nível de transferência de esforços entre as peças da seção transversal. O comportamento da ligação é considerado rígido ou monolítico, quando não ocorrem deslocamentos relativos significativos. O comportamento é flexível ou semirrígido quando os deslocamentos relativos não podem mais ser desprezados (PIGOZZO, 2004).

Se empregada uma ligação perfeitamente rígida, não surgem deslocamentos relativos entre os pontos de borda que delimitam a zona de contato entre as peças ligadas. Por outro lado, os conectores mecânicos usualmente utilizados são deformáveis, ou seja, com o carregamento ocorrem deformações nas ligações ocasionando escorregamentos (deslocamentos relativos) das peças interligadas (GÓES, 2002).

A ruptura de peças mistas ou compostas submetidas à flexão pode ter origem nas tensões normais decorrentes dos esforços de flexão ou por efeito dos esforços cortantes, tanto nas peças componentes quanto nas ligações.

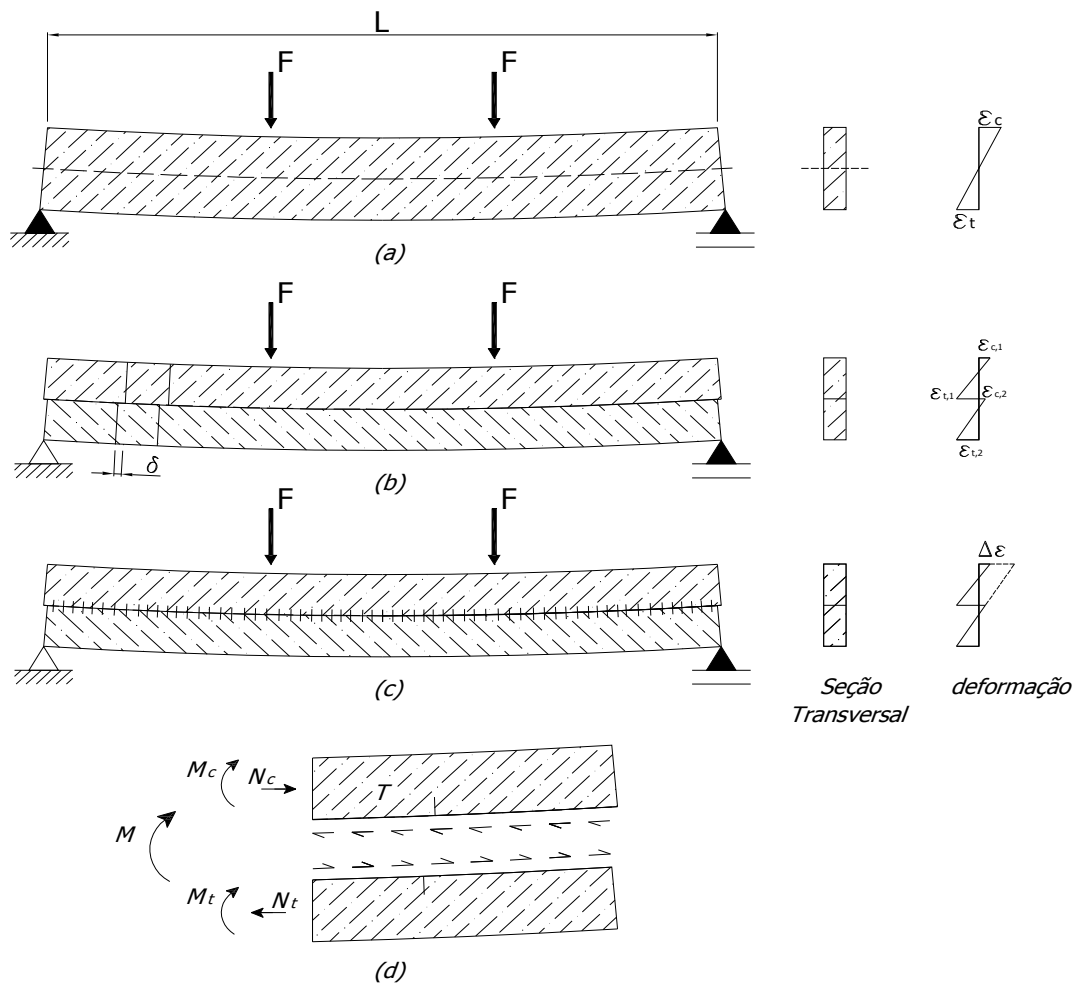


Figura 2.5. Comportamento de viga composta: a) com ligação rígida ou com peça monolítica; b) sem ligação, com flexão individual das peças; c) com ligação flexível por conectores mecânicos espaçados e ocorrência de descontinuidade das deformações normais; d) Esforços internos com ligação flexível. Fonte: Adaptado de Alvim (2002).

Em sistemas de conexão com elementos mecânicos as ligações são basicamente flexíveis, com a eficiência estrutural das ligações podendo ser avaliada pela relação entre a rigidez efetiva obtida ( $I_{ef}$ ) e uma rigidez de comparação, correspondente à rigidez máxima, obtida com o conjunto considerado monolítico ( $I_a$ ) ou à rigidez mínima, obtida com o sistema sem conexão. Uma forma mais objetiva de definir a eficiência das ligações em peças compostas é pela razão do ganho efetivo de rigidez promovido pela ligação em relação ao ganho máximo possível.

### 2.3. TIPOS DE CONECTORES DE LIGAÇÃO

A eficiência global das soluções construtivas utilizadas em peças mistas e compostas é função do comportamento estrutural dos conectores, definidos pela resistência, rigidez e processo de ruptura, e também pela facilidade de execução e custos envolvidos. Conforme Soriano e Mascia (2009), a escolha do dispositivo de ligação entre as peças componentes do sistema misto relaciona-se diretamente com as condições do projeto, envolvendo a resistência e rigidez necessárias, os custos e a facilidade de execução.

Os conectores de ligação têm a função primordial de transmitir os esforços de cisalhamento atuantes nas interfaces, além de evitar a abertura ou separação entre as peças ligadas (“*up lift*”). Os conectores ideais deveriam: apresentar elevada rigidez e resistência, desenvolver um processo de ruptura dúctil, ser de fácil execução e de baixo custo, requisitos difíceis de serem simultaneamente e integralmente atingidos.

Existem diferentes conectores que podem ser empregados nas ligações mistas madeira-concreto, destacando-se o uso de pinos metálicos (pregos, parafusos e barras de aço), anéis e chapas de aço, e os obtidos por entalhes na madeira preenchidos com concreto. Alguns conectores, como os de anéis e de concreto, necessitam de elementos transversais adicionais de barras de aço para garantir a segurança contra a abertura entre as peças ligadas. Na Figura 2.6 são representados alguns tipos de conectores de uso mais comum.

Nas ligações de peças compostas de madeira com elementos justapostos, os conectores mecânicos mais usuais são os anéis metálicos, os tarugos de madeira e os dentes e entalhes, como representado na Figura 2.7.

As ligações com estes conectores tendem a apresentar elevadas resistência e rigidez, com custos não elevados e aparente facilidade de execução. No entanto, essas ligações necessitam de parafusos transversais para impedir a abertura entre as peças ligadas e, principalmente, apresentam dificuldades para uma execução precisa dos cortes e entalhes, que permitam o encaixe perfeito das peças e o trabalho simultâneo de todos os conectores quando a peça composta é solicitada.

De fato, o emprego de conectores obtidos com entalhes na madeira exige a adequada definição da geometria dos entalhes e dos espaçamentos, de modo que as forças transmitidas possam ser adequadamente distribuídas pelos conectores, garantindo a segurança necessária contra os possíveis modos de ruptura, como no cisalhamento da madeira na superfície correspondente ao fundo do entalhe entre dois conectores consecutivos.

Na Figura 2.8 são representadas curvas típicas força x deslocamento relativo, obtidas de ensaios de ligação de alguns tipos de conectores.

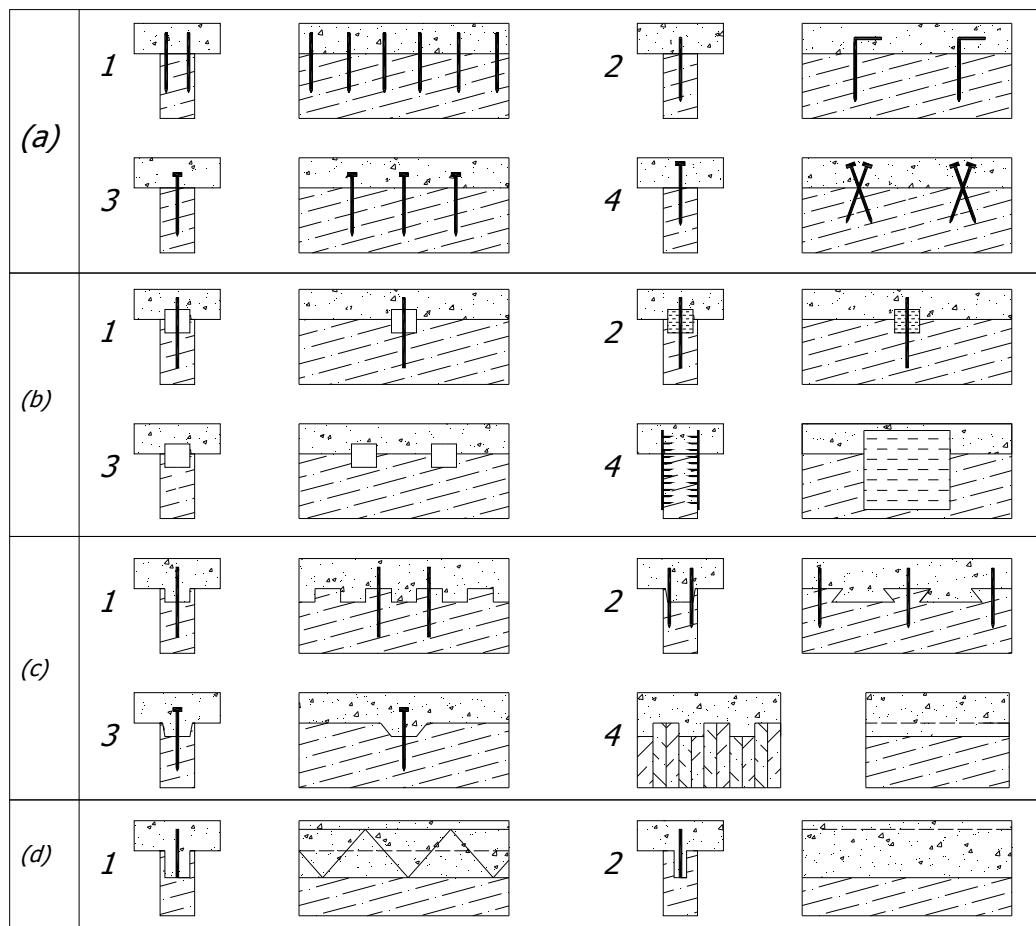


Figura 2.6. Tipologias frequentes de conectores em estruturas mistas madeira-concreto: a) conectores de pinos e de barras de aço; b) conectores de anéis e chapas metálicas; c) conectores de entalhes preenchidos com concreto; d) conectores metálicos contínuos na forma de treliça ou chapa de aço colados na madeira. Fonte: Adaptado de Pigozzo (2004).

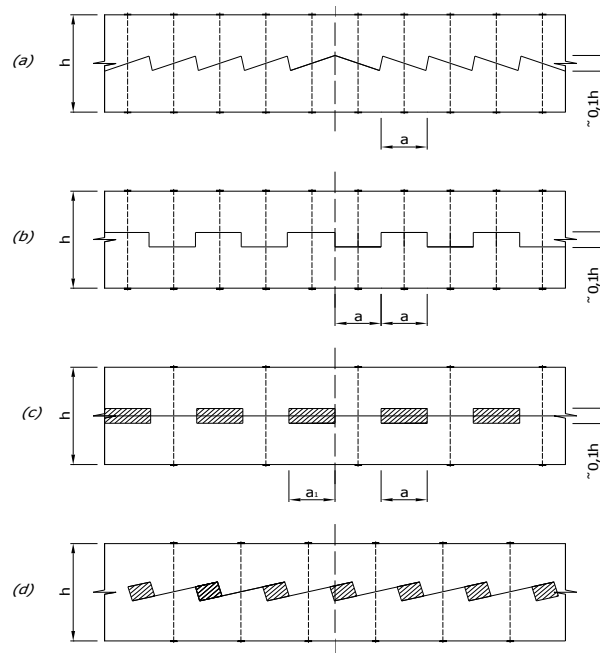


Figura 2.7. Vigas compostas de madeira com ligações por: a) dentes inclinados; b) dentes verticais; c) tarugos horizontais; d) tarugos inclinados.

Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003).

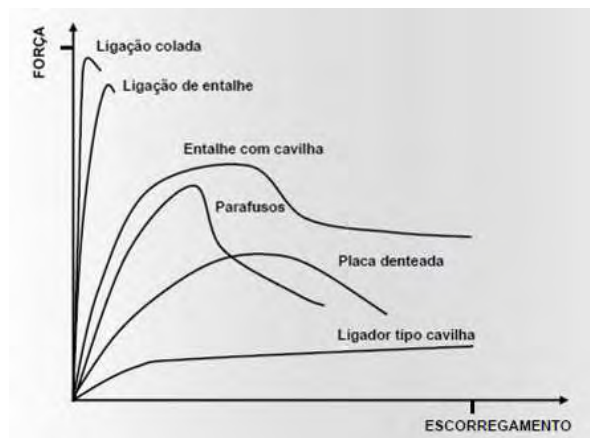


Figura 2.8. Curvas Força x Escorregamento para diferentes tipos de conectores. Fonte: Dias e Jorge (2007).

As ligações efetuadas por meio de conectores de concreto apresentam em geral elevadas rigidezes e comportamento dominante elasto-frágil, sendo a rigidez e a resistência de fácil obtenção. Para ligações com conectores com barras de aço, existe uma tendência de comportamento dúctil, não existindo uma metodologia universalmente aceita para avaliação da resistência e rigidez.

## 2.4. CARACTERIZAÇÃO DE LIGAÇÕES POR CONECTORES MECÂNICOS

O comportamento de ligação por conectores mecânicos, em peças mistas ou compostas, é definido pela resistência, pela curva força x deslocamento relativo e pela caracterização do processo de ruptura. A rigidez de uma ligação é definida pela relação entre as forças aplicadas e os deslocamentos relativos mobilizados, sendo designada usualmente de módulo de deslizamento (K).

Em ligações em que a rigidez é variável com o valor da força aplicada, seu valor é definido pela tangente à curva força x deslocamento relativo no ponto considerado. Para fins práticos de verificação da segurança e dimensionamento estrutural é necessário avaliar as rigidezes representativas do comportamento, em condições correspondentes aos estados limites últimos e de utilização ou serviço, sendo o caminho natural o emprego de valores de rigidezes secantes relativos a trechos adequados.

Conforme Pigozzo (2004), a rigidez das ligações sofre influência de diversos fatores, tais como: tipo e forma dos conectores, forma e dimensões das peças ligadas, posicionamento e espaçamento dos conectores e características mecânicas dos materiais dos conectores e das peças ligadas. Em ligações de peças mistas, seu comportamento e, conseqüentemente sua rigidez, dependem também das armaduras empregadas no concreto.

A resistência e a rigidez de ligações podem ser avaliadas adequadamente por meio de ensaios experimentais. Em ligações com processo de ruptura frágil, a resistência é definida pela força limite máxima resistida. Em ligações dúcteis, a resistência é definida por um valor convencional correspondente a limitações impostas às deformações plásticas ou às deformações totais.

Na literatura, são relatadas diferentes alternativas para avaliação da resistência e da rigidez de ligações por conectores mecânicos, tanto em termos de modelos de corpos-de-prova, de metodologia de ensaio e de critérios de avaliação da resistência e rigidez, tanto para ligações de peças compostas quanto para ligações de peças mistas. Na Figura 2.8, está representada uma curva força x deslocamento típica de ligações com pinos de aço, com o módulo de deslizamento instantâneo dado pela tangente à curva no ponto considerado.

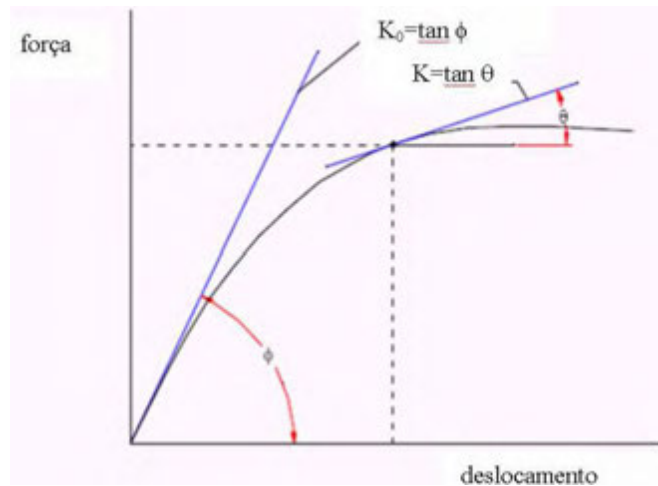


Figura 2.9. Curva típica força x deslocamento relativo de ligação com pinos de aço.

Fonte: Van Dyer (1992).

A norma NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira – (1997) apresenta as regras gerais de projetos com emprego da metodologia de dimensionamento segundo os estados limites. Essa norma define apenas critérios muito simplificados para avaliação do comportamento e dimensionamento de peças compostas de madeira. No entanto, define claramente uma metodologia para determinação experimental da resistência de ligações por elementos mecânicos, que pode ser empregada para avaliar também a rigidez para situações de serviço ou correspondente aos estados limites de utilização.

Pigozzo (2004) relata os critérios de algumas referências normativas relativas a ligações entre peças de madeira e peças mistas, tais como: a norma ISO 6891 – 83, onde são bem definidos o procedimento de carregamento e a medida dos deslizamentos; a norma DIN 1052 (1988), que apresenta valores para o módulo de deslizamento em diferentes seções compostas de peças de madeira, para alguns tipos de conectores; a norma BS 5400 (1979) que apresenta detalhadamente o corpo-de-prova para estudo de conexões em elementos em aço-concreto, com os conectores perpendiculares à superfície de interação; a norma Eurocode 4, que apresenta modelo de corpo-de-prova, procedimentos e avaliações de ensaio, para conectores de peças compostas de aço-concreto.

Conforme Soriano (2001), em ligações por pinos metálicos, devem ser verificados a resistência dos conectores ao corte e o efeito do embutimento na madeira, bem como o efeito da compressão localizada no concreto. Desta forma, a capacidade do sistema de ligação depende das propriedades da madeira e do concreto utilizadas na seção mista.

A norma Eurocode 5 define, para ligações de peças de madeira utilizando pregos, expressão analítica explícita para determinação do coeficiente de deslizamento para situação de serviço ( $K_s$ ) e também para obtenção do valor correspondente aos estados limites últimos ( $K_u$ ), com  $K_u = 2/3 K_s$ . Define também uma metodologia, descrita no Anexo A, para avaliação e dimensionamento estrutural de peças compostas de madeira, com diferentes composições para seções T e I.

Ehlbeck e Larsen<sup>2</sup> (1991), *apud* Góes (2002), caracterizam os módulos de deslizamento de serviço ( $K_s$ ) e último ( $K_u$ ), considerando os valores secantes à curva força x deslocamento relativo, correspondentes aos trechos compreendidos, respectivamente, entre 0% e 40% e entre 0% e 70% da resistência, como representado na Figura 2.10.

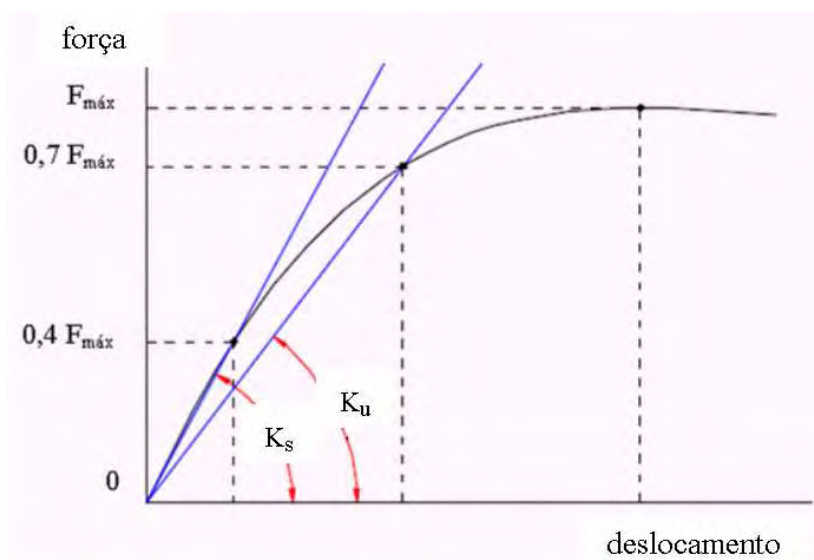


Figura 2.10. Curva força x deslocamento relativo de ligação e módulos de deslizamento relativos aos estados limites últimos ( $K_u$ ) e de serviço ( $K_{ser}$ ). Fonte: Góes (2002).

Uma avaliação mais adequada para ( $K_s$ ), consistente com o Eurocode 5, utiliza o trecho entre 10% e 40% da resistência, desprezando o trecho inicial usualmente irregular. Uma alternativa mais elaborada e consistente pode considerar um comportamento bi-linear, com um trecho inicial com rigidez  $K_s$ , seguido de outro trecho com rigidez  $K_u$ .

<sup>2</sup> EHLBECK, J. LARSEN, H. J. Eurocode 5 – Design of timber structures: Joints. p9-23. 1991.

## 2.5. RESULTADOS DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES

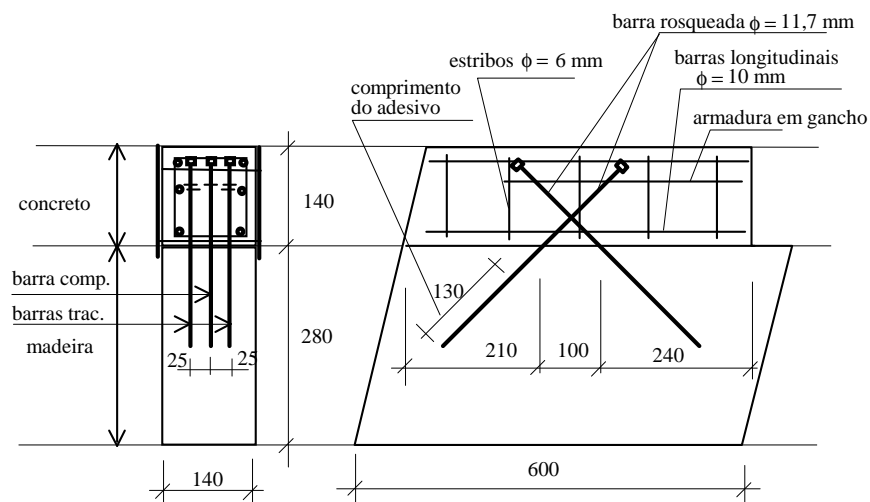
Na literatura são relatados os resultados de inúmeros estudos relacionados à avaliação do comportamento de ligações por meio de conectores mecânicos, tanto para ligações entre peças de madeira, quanto para ligações de peças mistas de madeira-concreto, com emprego de diferentes conectores, corpos-de-prova e metodologias. A seguir descrevem-se sucintamente alguns dos resultados mais relacionados a este trabalho, destacando-se o desenvolvido por Carvalho (2008) e por Tommola *et al* (1999).

Tommola *et al* (1999) utilizaram conectores com barras de aço coladas na madeira com tramo horizontal de ancoragem no concreto e, posteriormente, utilizaram entalhe na madeira associado a barras de aço. Foram utilizados madeira laminada colada e corpos-de-prova especiais de cisalhamento na compressão, constituídos de duas peças e apenas uma interface inclinada em relação à direção de aplicação da força, como representado na Figura 2.11. Foram realizados ensaios quase-estáticos e sob cargas cíclicas.

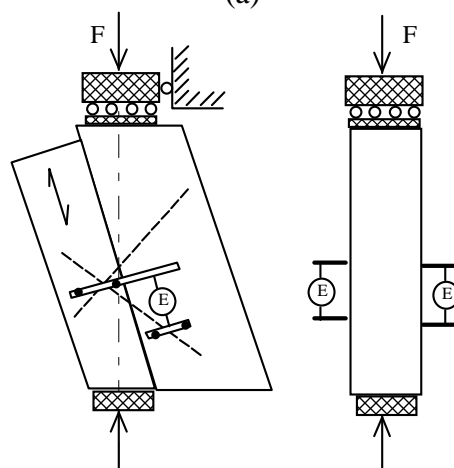
Inicialmente foram ensaiados seis (6) corpos-de-prova com um sistema de conexão com barras de aço rosqueadas inclinados em forma de X, colados na madeira (Southern Finnish Pine laminada colada), com pré-furação de 12 mm de diâmetro, 15 cm de profundidade e comprimento efetivo de colagem de 130 mm. Foram empregados adesivo epóxi, duas barras tracionadas (flexo-tração) e uma barra comprimida (flexo-compressão), com diâmetro de 11,7 mm, conforme representado nas Figuras 2.11.a.

Empregou-se armadura longitudinal com barras aço de diâmetro de 10 mm e estribos de 6 mm, com uma manta plástica na interface madeira-concreto para impermeabilizar a madeira e reduzir o atrito na interface. Foram obtidos os deslocamentos relativos em ambos os lados do corpo-de-prova, com o carregamento aplicado com base na norma ISO 68691 (1983).

Os autores apresentam as curvas força x deslocamento obtidas nos ensaios, com a constatação de ocorrência de grande proximidade entre as curvas e obtenção de relações lineares até a força aplicada da ordem de 100 kN.



(a)



(b)

Figura 2.11. Ligação madeira concreto com conectores de barras de aço: a) detalhes dos corpos-de-prova; b) configuração dos ensaios. Fonte: Tommola *et al* (1999).

Nos carregamentos a carga foi aplicada até um valor correspondente a 40% da força resistente estimada, posteriormente descarregada até 10% dessa força e a seguir carregada até a ruptura. A rigidez, correspondente a situação de serviço, foi obtida pelo coeficiente angular do trecho correspondente a faixa entre 10% e 40% da força máxima. A Força resistente estimada no primeiro ensaio foi de 60 kN e nos demais de 120 kN. Os resultados das avaliações iniciais, com carregamentos quase-estáticos, são transcritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Resultados de ligações madeira-concreto. Fonte: Tommola *et al* (1999)

Ensaio/ CP	1	2	3	4	5	6	Média
$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	121,8	111,6	125,5	130,4	128,3	111,9	121,58
$K_s$ (kN/mm)	156	138	141	132	144	127	140

Nos ensaios de avaliação da resistência à fadiga foram utilizados corpos-de-prova de maiores dimensões, próximas às previstas para uso em uma ponte real, com quatro diferentes sistemas de conexão representados nas Figuras 2.12 e 2.13.

Nos conectores tipo X foram utilizadas barras inclinadas nas duas direções, com emprego de adesivo poliuretano (Xp) e adesivo epóxi (Xp e Xe), respectivamente, numerados de corpos-de-prova 1 e 2. Nos corpos-de-prova 3 e 4 foram utilizados adesivo poliuretano e conexões com entalhes, respectivamente com emprego de barras inclinadas nas duas direções (XE<sub>p</sub>) e com barras inclinadas trabalhando apenas à tração (VE<sub>p</sub>).

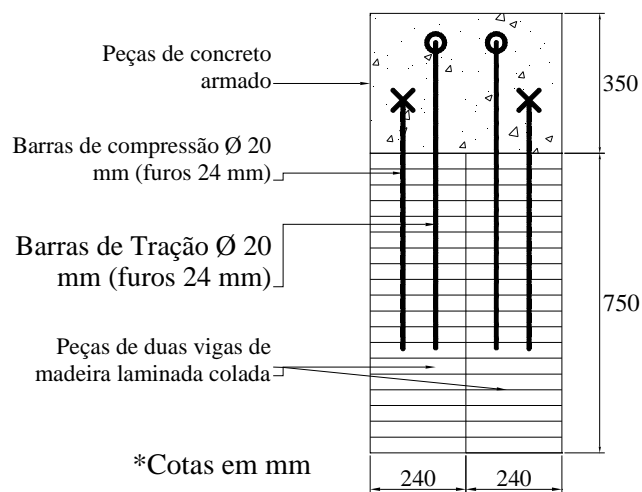


Figura 2.12. Corpos-de-prova utilizados nos ensaios sob cargas cíclicas: geometria da seção transversal. Fonte: Tommola *et al* (1999).

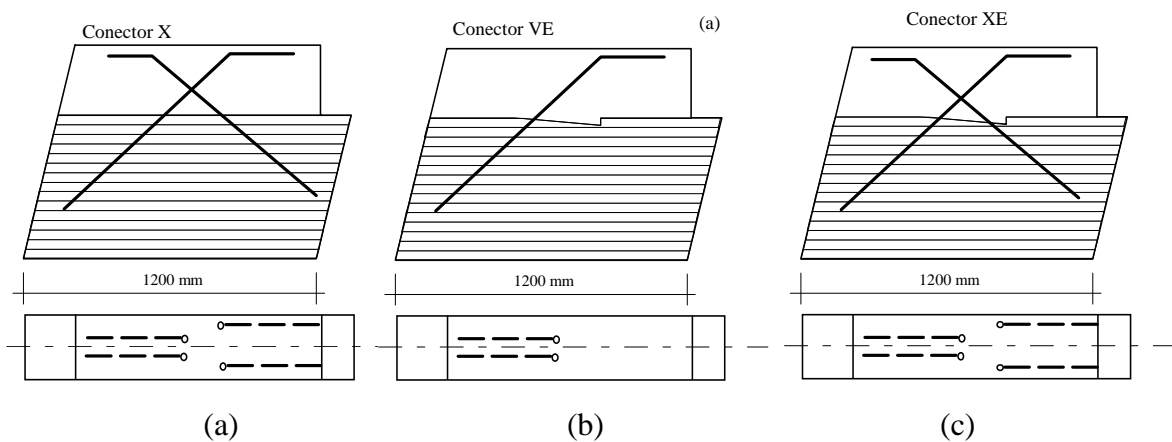


Figura 2.13. Configurações dos conectores: a) tipo X; b) tipo VE; c) tipo XE. Fonte: Tommola *et al* (1999).

Nos ensaios sob força cíclica a amplitude da força foi de 145 kN, com variação entre 10 e 155 kN. O número de repetições de ciclos foi variável e superior a um milhão de ciclos em todos os ensaios. Após os ensaios à fadiga os corpos-de-prova foram submetidos a um carregamento quase-estático, crescente monotonicamente, até a ruptura.

Os autores apresentam a evolução das relações força x deslizamento obtidas nos ensaios em função do número de ciclos de carga e também os resultados dos valores numéricos mais significativos, transcritos na Tabela 2.3, com o deslizamento total correspondendo ao valor da força máxima de 155 kN.

Tabela 2.3. Resultados de ligações madeira-concreto submetidos a cargas cíclicas. Fonte:

Tommola *et al* (1999)

Ensaio / Corpo-de- prova	Conector	Nº de ciclos	Deslizamento		Módulo de deslizamento (MN/mm)	Força última (kN)
			Total (mm)	Remanescente (mm)		
1	Xp	1	0,08	0,00	2,03	588
		1.000.000	0,65	0,10	0,27	
2	Xe	1	0,03	0,00	5,86	663
		2.100.000	0,28	0,13	0,77	
3	VEp	1	0,22	0,13	1,92	921
		1.200.000	0,35	0,25	1,46	
4	XEp	1	0,06	0,02	2,19	914
		1.700.000	0,13	0,06	1,46	

Os autores relatam que não foram detectados danos aparentes durante os carregamentos cíclicos, sendo constatada em todos os casos, considerável perda de rigidez. Com base nos valores numéricos obtidos os autores concluíram que:

- i) O conector Xp foi o que apresentou maior perda de rigidez, com rigidez remanescente, após um milhão de ciclos de carga, da ordem de 13% do valor inicial.
- ii) O conector Xe foi o que apresentou maior rigidez inicial, cerca de três vezes a rigidez do conector Xp, com rigidez remanescente após 2,1 milhões de ciclos também da ordem de 13% do valor inicial.
- iii) Os entalhes utilizados nos conector VEp e XEp permitiram um aumento considerável tanto para a rigidez remanescente quanto para a resistência.

Soriano e Mascia (2000) em estudo de ligações em vigas mistas de madeira-concreto, com conectores de pregos 22 x 48 ( $d=5,4$  mm;  $l=110$  mm), obteve um comportamento considerado pouco rígido, com ocorrência de pequenos deslizamentos horizontais entre os materiais, concluindo que a eficiência do sistema de conexão utilizado é de pouca relevância em relação às vigas de mesmas características executadas sem um sistema de ligação entre os dois materiais.

Soriano (2001), em seu estudo de vigas mistas com conectores de prego, realizou uma série de ensaios de cisalhamento para determinação do módulo de deslizamento, variando o número de conectores, com e sem utilização de pintura com tinta a óleo na interface. Avaliou ainda o caso de ligações coladas com o emprego de adesivo epóxi na interface. Constatou que a ligação por adesivo epóxi se mostrou mais rígida, cerca de três vezes mais que as ligações com dois pregos e cerca de duas vezes mais que as ligações com quatro pregos. As ligações por pregos apresentaram perdas de rigidez da ordem de 33% para rigidez última ( $K_u$ ) em relação à rigidez de serviço ( $K_s$ ).

Numa segunda série experimental, Soriano (2001) ensaiou ligações com conectores de pinos metálicos do tipo pregos 24x60 ( $d = 6,4$  mm;  $l = 138$  mm) e parafusos sextavados com rosca soberba, com diâmetros de 3/8" e de 1/2", com determinação do módulo de deslizamento por meio de ensaios de cisalhamento.

Constatou que o uso de conectores de pregos 24x60, apresentou elevado módulo de deslizamento, com resultados semelhantes aos obtidos com as ligações por parafusos. Essas ligações apresentaram perdas de rigidez da ordem de 33% da rigidez última ( $K_u$ ) em relação à rigidez de serviço ( $K_s$ ). Por outro lado, se mostraram consideravelmente mais rígidas que a primeira série de ensaios com pregos 22x48.

Segundinho e Matthiesen (2004) avaliaram experimentalmente o comportamento de quatro vigas de madeira-concreto, com ligações por meio de conectores de pinos colados, obtidos de barras de aço para concreto armado, com emprego de adesivo à base de resina de mamona. Nos ensaios, foram aplicadas forças nos terços médios das vigas. A partir das relações força x deslizamento, foi verificada a influência da variação do espaçamento entre conectores. Os resultados obtidos não foram considerados satisfatórios. Foi constatado que as rupturas ocorreram por tração nos pontos de aplicação das forças.

Jorge (2005) efetuou um estudo sobre o comportamento de vigas mistas de madeira-concreto com agregados leves e ligações e diferentes tipos de conectores. Foram utilizadas ligações flexíveis com o emprego de parafusos de forma especial, representado na Figura 2.14 e conectores obtidos pela colagem de um tarugo de madeira de média densidade, conforme Figura 2.15. Foram avaliadas ligações com variações na espessura do tarugo de madeira e na resistência do concreto. Por fim, para fins de comparação, foram ensaiadas ligações com conectores de chapas denteadas.

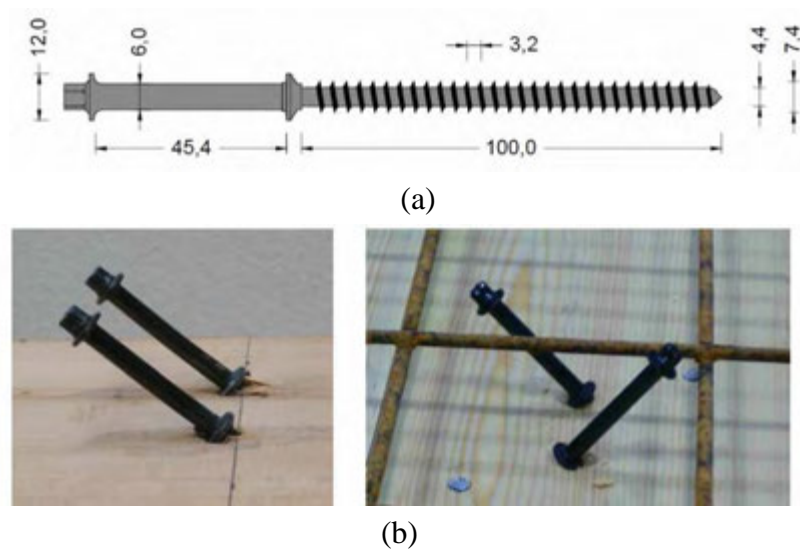


Figura 2.14. (a) Parafuso SFS VB 48-7.5x100; (b) disposição dos parafusos para realização dos ensaios de cisalhamento. Fonte: Jorge (2005).



Figura 2.15. Conector de tarugo de madeira colada ensaiado por Jorge (2005). Fonte: Jorge (2005).

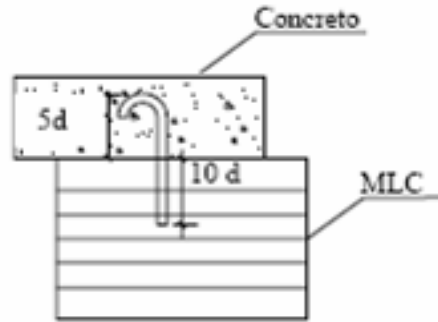
Foram avaliados os seguintes aspectos: capacidade de carga; módulo de deslizamento; modos de ruptura; capacidade de deformação pós-escoamento dos conectores metálicos e a relevância da existência de forma incorporada no comportamento mecânico da ligação.

Todas as conexões foram avaliadas por meio de ensaios de cisalhamento na compressão, conforme EN 26891, determinando-se a relação força x deslizamento e a capacidade resistente da ligação. Foi verificado que não ocorreram perdas significativas nas propriedades mecânicas das ligações com emprego de concreto com agregados leves com relação às ligações executadas com concreto convencional.

Carvalho (2008), em estudo do comportamento mecânico ao cisalhamento de ligações de peças mistas de madeira-concreto, com emprego de madeira laminada colada e conectores de barras de aço com ganchos, apresenta uma compilação ampla sobre os resultados experimentais de resistência, rigidez e processos de ruptura de ligações de peças mistas de trabalhos de diversos autores. Os resultados, na forma de tabelas, são transcritos no ANEXO B.

Carvalho (2008) apresenta uma avaliação da resistência em ensaios de arrancamento e da resistência e rigidez em ensaios de cisalhamento. Nos ensaios de cisalhamento, foram utilizados corpos-de-prova simétricos com três elementos, sendo os conectores obtidos de barras nervuradas, de aço tipo CA-50, dobradas na extremidade embutida no concreto, na forma gancho, como representado na Figura 2.16a. Foram avaliados três diferentes diâmetros para as barras (8 mm, 10 mm e 12,5 mm), três diferentes configurações para os corpos-de-prova e uso de três diferentes adesivos do tipo epóxi, na fixação do pino com a madeira.

Com base na análise de resultados obtidos por outros pesquisadores, foram estabelecidas as seguintes premissas na definição dos corpos-de-prova: comprimento de ancoragem na madeira maior que 10 vezes o diâmetro do pino e uso de no mínimo quatro conectores e emprego de armadura e espaçadores no concreto. Após avaliação dos resultados de arrancamento, foram definidos os comprimentos e forma para os conectores, conforme reproduzido na Figura 2.16b.



(a)

(b)

Figura 2.16. a) conectores de barra de aço com gancho; b) dimensões relativas utilizadas nas ancoragens dos conectores. Fonte: Carvalho (2008).

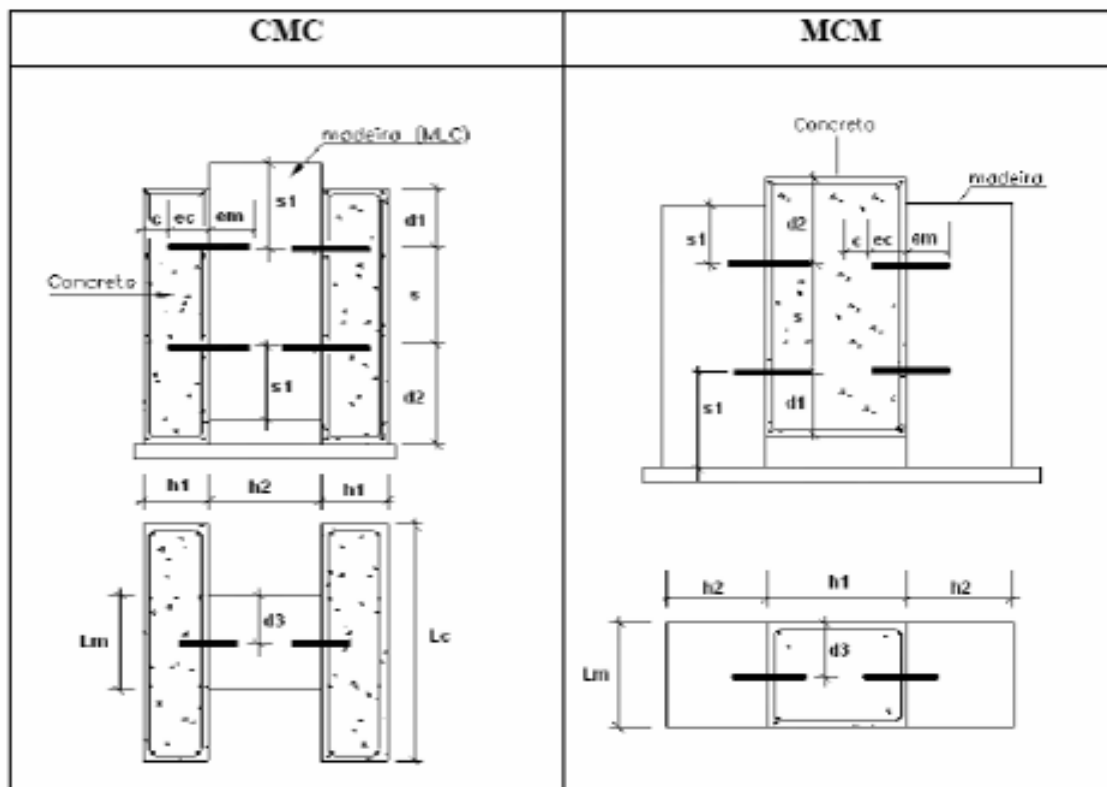
Foram definidos três modelos dos corpos-de-prova designados, respectivamente, de A, B e C, envolvendo variações nas disposições das peças nos corpos-de-prova, na forma madeira-concreto-madeira (MCM) e concreto-madeira-concreto (CMC), conforme representado nas Figuras 2.17.



Figura 2.17. Diferentes modelos de corpos-de-prova de ligação madeira-concreto.

Fonte: Carvalho (2008).

A partir da avaliação de dimensões mínimas obtidas para os conectores foram definidas as geometrias para os corpos-de-prova, representados na Figura 2.18.



TIPO	c	ec	em	s1	d1	s
CMC	$\geq 2,0$ cm	4 $\Phi$	10 $\Phi$	$\geq \max(7\Phi; 80$ mm)	$\geq 2,5$ cm	5 $\Phi \leq s \leq 20$ $\Phi$
MCM	$\geq 2,0$ cm	4 $\Phi$	10 $\Phi$	$\geq \max(7\Phi; 80$ mm)	$\geq 2,5$ cm	5 $\Phi \leq s \leq 20$ $\Phi$

TIPO	d2	h1	h2	d3
CMC	$\geq 2,5$ cm	$h1 \geq \{5\text{cm ou } (c + ec)\}$	$(2 \times em) + s$	$\geq 3$ $\Phi$
MCM	$\geq 2,5$ cm	$2 \times (ec + c)$	$(em) + s$	$\geq 3$ $\Phi$

Figura 2.18. Dimensões mínimas para os diferentes modelos de corpos-de-prova de ligação.

Fonte: Carvalho (2008).

Os corpos-de-prova para os diferentes modelos estudados, para pinos com diâmetro de 12,5 mm, são representados na Figura 2.19.

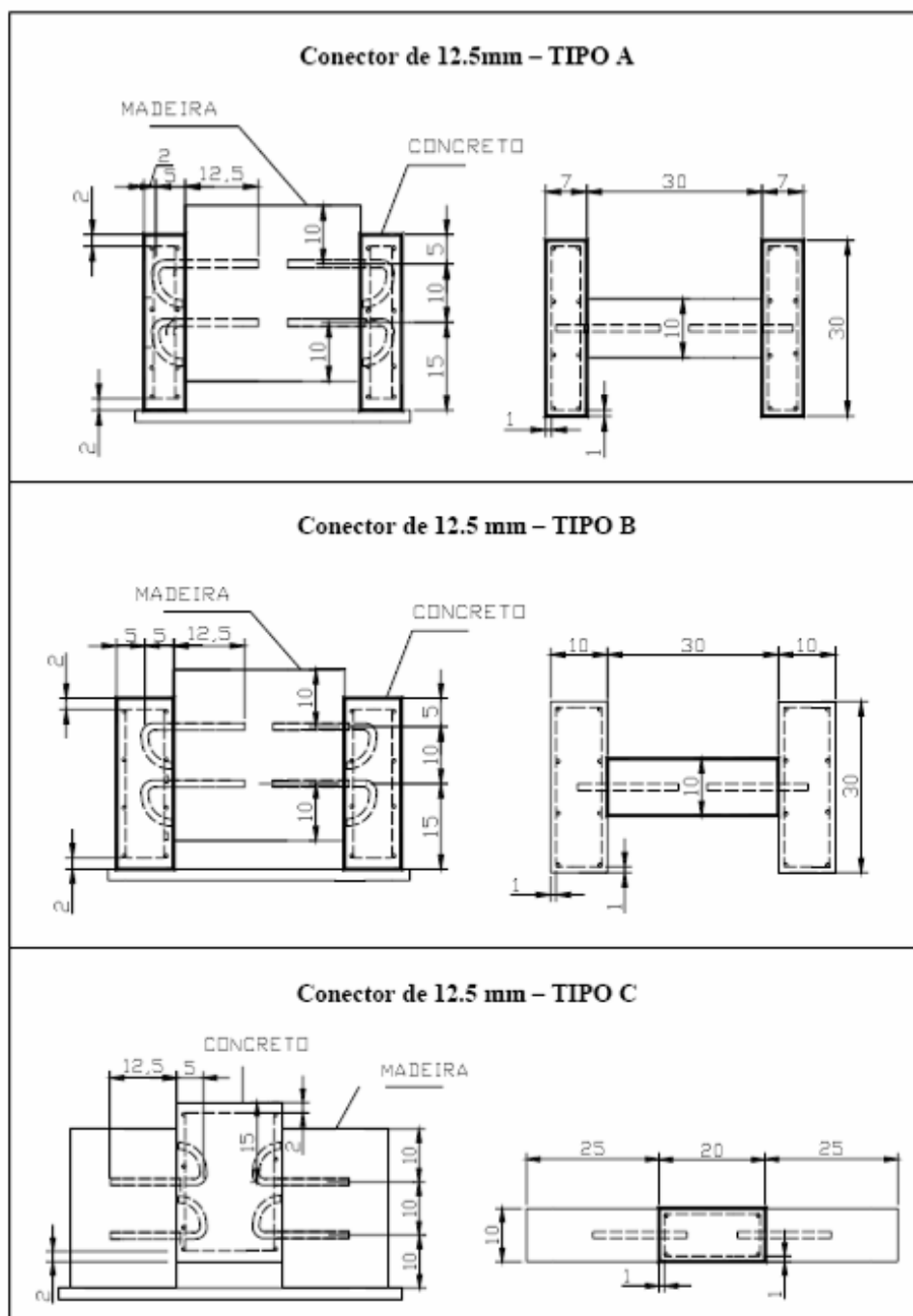


Figura 2.19. Corpos-de-prova de ligação madeira-concreto, com emprego de conectores de barra com diâmetro de 12.5 mm. Fonte: Carvalho (2008).

Nos ensaios os deslocamentos relativos foram monitorados com emprego de transdutores de deslocamentos fixados em ambas as faces dos corpos-de-prova. Foram realizadas quatro repetições para cada diferente tratamento, com obtenção nos ensaios da resistência, da curva força x deslocamentos e da rigidez relativa à condição de serviço. Os resultados de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento são reproduzidos na Tabela 2. 4.

Tabela 2.4. Resistências (kN) obtidas nos ensaios de cisalhamento de ligações com quatro conectores de barra de aço com gancho. Fonte: Carvalho (2008).

CP	Tipo do CP								
	ϕ 8 A	ϕ 8 B	ϕ 8 C	ϕ 10 A	ϕ 10 B	ϕ 10 C	ϕ 12,5 A	ϕ 12,5 B	ϕ 12,5 C
CP 1	91,96	85,30	65,95	123,84	119,34	70,24	132,79	139,92	80,07
CP 2	87,01	87,23	63,69	137,22	119,90	68,48	130,09	122,65	85,18
CP 3	95,54	105,31	64,89	105,93	112,04	71,42	121,79	146,33	85,63
CP 4	103,11	97,07	75,38	118,58	124,66	59,69	136,15	147,32	72,49
Mediana ( $\bar{X}$ )	94,40	93,73	67,48	121,39	118,99	67,46	130,20	139,06	80,84
Desvio padrão (s)	6,78	9,28	5,38	12,96	5,21	5,31	6,13	11,42	6,11

Os modos de ruptura dominante se deram por flexão do pino, com formação de rótula plástica na região de interface, com esmagamento da madeira na região dos furos, fissuração e esmagamento no concreto e, em alguns casos, com fissuração na madeira.

As rigidezes das ligações foram obtidas a partir do trecho correspondente a 10% e 40% da força máxima de resistência esperada, como reproduzido na Figura 2.20. Na Figura 2.21, estão representados as curvas força x deslocamentos relativos obtidas nos ensaios com conectores de 12,5 mm. Os resultados obtidos para as rigidezes de serviço são apresentados na Tabela 2.5.

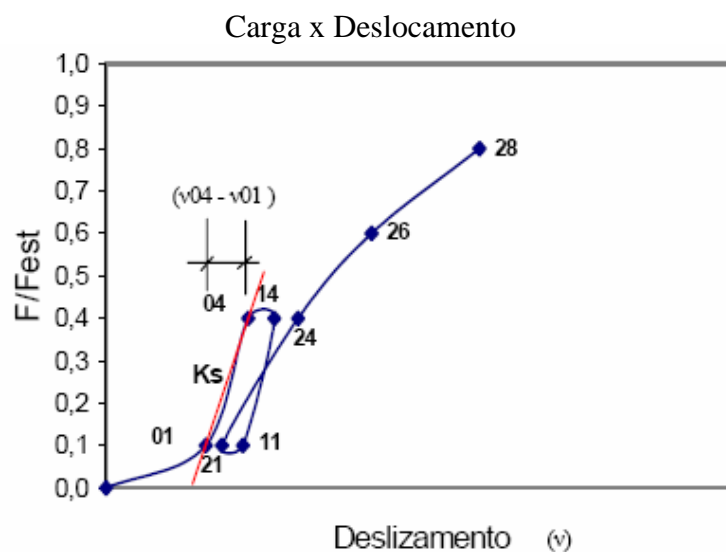


Figura 2.20. Curva força x deslocamento idealizada, conforme EN 26891. Fonte: Carvalho (2008).

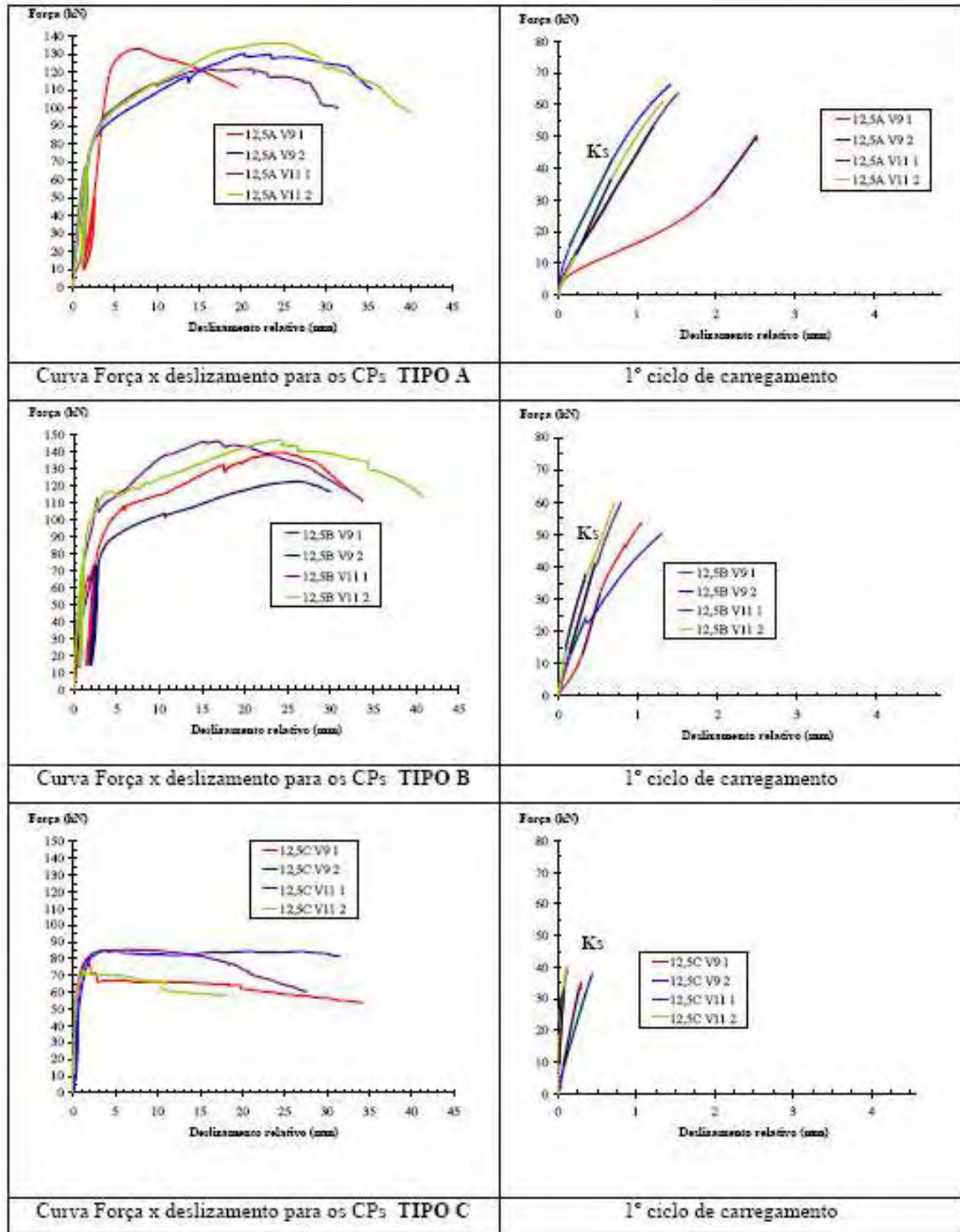


Figura 2.21. Curvas força x deslocamento obtidas nos ensaios com conectores de 12,5 mm.

Fonte: Carvalho (2008).

Tabela 2.5. Rigidez ou módulo de deslizamento ( $K_s$ ) por conector (kN/mm). Fonte: Carvalho (2008).

CP	Tipo								
	$\Phi$ 8 A	$\Phi$ 8 B	$\Phi$ 8 C	$\Phi$ 10 A	$\Phi$ 10 B	$\Phi$ 10 C	$\Phi$ 12,5 A	$\Phi$ 12,5 B	$\Phi$ 12,5 C
CP 1	7,69	8,26	18,16	11,77	8,92	23,57	8,98	21,61	30,67
CP 2	7,37	7,12	16,87	9,40	6,89	36,08	12,66	13,34	20,82
CP 3	7,62	9,90	11,62	12,36	8,47	34,59	10,28	21,50	93,67
CP 4	8,20	8,97	13,06	11,55	10,97	32,57	13,63	22,88	62,36
$\bar{x}$	7,72	8,56	14,93	11,27	8,81	31,70	11,39	19,83	51,88
s	0,35	1,17	3,09	1,29	1,68	5,61	2,13	4,37	33,02

Sendo:

$\bar{x}$  = média da amostra e  
s = desvio padrão da amostra.

Dos resultados de resistência obtidos, pôde-se verificar que o aumento do diâmetro das barras acarretou, em termos médios, o aumento da resistência das ligações. Os modos de ruptura dominantes se deram por flexão do pino, com formação de rótula plástica na região de interface, com esmagamento da madeira na região dos furos, fissuração e esmagamento no concreto e, em alguns casos, com fissuração na madeira.

Conforme os resultados obtidos para as curvas força x deslocamento relativo, a autora salienta a elevada capacidade de deformação das ligações, indicando comportamento dúctil, atribuído à formação de rótulas plásticas nos conectores e a plastificação da madeira na região de contato com o pino. Concluiu ainda que a disposição dos elementos do corpo-de-prova influencia os resultados dos ensaios.

## 2.6. MODELOS ANALÍTICOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PEÇAS COMPOSTAS DE MADEIRA SUBMETIDAS À FLEXÃO

Conforme Góes (2002) e Souza (2004), em estudos de vigas compostas com ligações por conectores metálicos, a rigidez efetiva de vigas compostas considerando-se a deformabilidade das ligações pode ser obtida por meio da utilização de coeficientes de eficiência aplicados às rigidezes aparentes.

Os modelos teóricos para avaliações do comportamento de peças fletidas com ligações flexíveis, disponíveis na literatura, têm por base certas hipóteses básicas e a aplicação das condições de equilíbrio e de compatibilidade de deslocamentos em um elemento de comprimento infinitesimal fletido, considerando-se os deslizamentos nas interfaces devidos à flexibilidade ou rigidez real das ligações, conforme Chui e Barclay<sup>3</sup> (1988), *apud* Góes (2002).

No desenvolvimento destes modelos são definidas as equações diferenciais representativas do comportamento idealizado, cujas soluções particulares são obtidas para determinadas condições de contorno simplificadas de forças e apoios. A partir destes modelos teóricos, foram desenvolvidos métodos analíticos aproximados para a avaliação da rigidez efetiva de peças compostas ou mistas, que levam em conta a rigidez da ligação.

Com base nesses procedimentos, foram desenvolvidos métodos analíticos simplificados de análise, sendo o mais utilizado o método  $\gamma$ , proposto por Möller<sup>4</sup> (1955), adotado pela Norma alemã DIN 1052 desde os anos 1970, *apud* Natterer e Weinand (2008). Neste método, o momento de inércia à flexão efetiva da seção transversal ( $I_{ef}$ ) de uma peça composta é obtido pela soma de duas parcelas, com a primeira definida pela soma dos momentos de inércia individuais e a segunda, pela contribuição do afastamento das peças em relação ao centro geométrico da seção composta, conforme expressão (2.1).

---

<sup>3</sup> CHUI, Y.H; BARCLAY, D. W. (1988). Analysis of three-layer beams with non-identical layers and semi-rigid connections. Canadian Journal of Civil Engineering. V.25, n.2, p.271-276.

<sup>4</sup> MÖHLER, K. (1955). "Über das Tragverhalten von Biegeträger und Ruckstäben mit zusammengestellten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln." Habilitation (TH Karlsruhe).

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^m I_i + \sum_{i=1}^m \gamma_i A_i a_i^2, \quad (2.1)$$

Onde:

$I_i$ , momento de inércia individual da peça de ordem  $i$  em relação ao eixo paralelo ao eixo de flexão passando pelo seu centróide;

$A_i$ , a área de cada peça;

$a_i$ , distância do centróide da peça componente à linha neutra da seção composta;

$\gamma_i$ , coeficiente ( $\gamma_i \leq 1$ ) que define a contribuição da peça de ordem  $i$  no ganho de inércia da peça composta;

$m$ , número de peças componentes.

Para materiais com diferentes rigidezes ou módulos de elasticidades ( $E_i$ ), a rigidez à flexão equivalente ( $EI_{eq}$ ) pode ser obtida por uma expressão análoga, na forma:

$$(EI)_{eq} = \sum_{i=1}^m (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (2.2)$$

O Eurocode 5 emprega uma formulação considerando diferentes peças compostas de madeira, de seção transversal I ou T, apresentada no Anexo A. esta formulação utiliza a expressão 2.2 para obtenção da rigidez equivalente, fazendo para a peça 2, que forma alma da viga,  $\gamma_2=1$ , e:

$$k'_i = \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i L^2}, \quad (2.3)$$

com:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + k'_i}, \text{ para } i=1,3, \quad (2.4)$$

sendo:

$K_i$ , o valor da rigidez ou módulo de deslizamento da ligação da peça 2 com a peça de ordem  $i$ , com  $K_i = K_{s,i}$  para os estados limites de utilização e  $K_i = K_{u,i}$  para os estados limites últimos;

$L$ , o vão da viga (para vigas biapoiadas) e 80% do maior vão (para vigas contínuas) e duas vezes o vão (para vigas em balanço);

$s_i$ , o espaçamento entre os conectores da ligação da peça  $i$ . No caso do espaçamento variar com a força cortante, com  $s_{m\acute{a}x} \leq 4 s_{m\acute{i}n}$ , considera-se um valor efetivo:

$$s_{i,ef} = 0,75s_{i,m\acute{i}n} + 0,25s_{i,m\acute{a}x}. \quad (2.5)$$

A norma DIN (1988) utiliza uma metodologia semelhante ao Eurocode 5, também apresentada no Anexo A.

A relação  $\frac{K_i}{s_i}$  define a rigidez da ligação por unidade de comprimento, com o coeficiente  $\gamma_i$  podendo ser escrito na forma:

$$\gamma_i = 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i}{L^2 \frac{K_i}{s_i}} \quad (2.6)$$

Assim, à medida que cresce a rigidez unitária, diminui o segundo termo da equação (2.6) e  $\gamma_i$  se aproxima da unidade. Ao contrário, à medida que se reduz a rigidez unitária, cresce o valor do segundo termo e diminui o valor de  $\gamma_i$ .

## **2.7. PRINCIPAIS CONCLUSÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE LIGAÇÕES E DE PEÇAS MISTAS E COMPOSTAS.**

Com base em uma análise geral dos resultados obtidos pelos diferentes autores citados anteriormente e de outros disponíveis na literatura, pode-se afirmar que a rigidez, a resistência e o processo de ruptura das ligações dependem de diferentes fatores, tais como tipo, material, dimensões, geometria, inclinações, uso de adesivo na fixação com a madeira e espaçamento dos elementos de conexão. Depende também da resistência e da rigidez dos materiais das peças ligadas.

De modo semelhante, pode-se afirmar também que o tipo básico de conector utilizado em ligações de peças mistas madeira-concreto é o de pino de aço (prego, parafuso ou segmento de barra), fixado na madeira ortogonalmente à superfície de contato.

Estes conectores de pino são de fácil execução e de baixo custo. Ficam carregados transversalmente e submetidos à flexão simples. Como possuem reduzida rigidez à flexão e trabalham em situação estática desfavorável, parcialmente engastado nas peças ligadas, produzem efeitos de concentração de tensões próximas às interfaces dos materiais,

resultando em ligações com baixa rigidez, apesar de permitirem processos de ruptura dúcteis.

O emprego de conectores de segmentos de barra de aço, posicionados inclinados em relação à interface de separação, com fixação na madeira com uso de adesivo epóxi e ancoragem no concreto com uso de ganchos ou trechos paralelos à interface produzem em geral ganhos importantes de resistência e rigidez das ligações. No entanto, quando submetido a carregamentos cíclicos, com número elevado de ciclos, a degradação da rigidez tende a ser significativa e a rigidez final pode ser muito reduzida.

Uma forma de garantir ganhos de resistência e rigidez nas ligações de peças mistas madeira-concreto, reside no emprego de entalhes na madeira preenchidos de concreto, formando dentes de concreto. Estes conectores são capazes de garantir também, uma rigidez remanescente importante para ligações submetidas a carregamentos cíclicos com número elevado de ciclos.

No entanto, as ligações com conectores de dentes de concreto necessitam de dispositivos adicionais que impeçam a abertura das ligações e tendem a provocar rupturas frágeis. Além disso, a influência dos efeitos de variações ambientais de temperatura e umidade nestas ligações ainda é pouco conhecida, podendo ser particularmente importante nos casos de estruturas externas de grandes vãos.

No trabalho de peças mistas ou compostas submetidas à flexão, a rigidez das ligações e o espaçamento dos conectores, cuja razão define a rigidez da ligação por unidade de comprimento, são de fundamental importância para definição da rigidez efetiva à flexão do conjunto, que é o parâmetro básico para obtenção das deformações transversais e também para a avaliação da distribuição das tensões normais e cisalhantes médias ao longo da seção transversal.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1. DESCRIÇÃO GERAL**

O presente trabalho apresenta uma avaliação experimental do comportamento de ligações entre peças mistas de madeira e concreto e entre peças de madeira. Nas ligações entre peças mistas de madeira e concreto foram utilizados conectores de barras de aço e conectores de dentes de concreto. Nas ligações entre peças de madeira foram empregados conectores formados por tarugos de concreto.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios experimentais foram projetados com dimensões adequadas a acomodar os conectores previstos e visando também uma execução simplificada, maior facilidade de manuseio e a realização dos ensaios com a máquina universal disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Viçosa.

Em função destas demandas, considerando também a facilidade para a realização de estudos complementares, decidiu-se pelo uso de peças serradas de madeira nativa de densidade e resistências mecânicas médias, de fácil obtenção no comércio na Região de Viçosa – MG. Decidiu-se, também, pela execução dos corpos-de-prova das ligações com emprego de peças de concreto com a mesma espessura das peças de madeira.

Assim, nas ligações entre peças mistas de madeira e concreto foram utilizados corpos-de-prova simétricos de três peças de mesma espessura, com peça central de concreto e peças laterais de madeira, formando duas interfaces de ligação. Foram realizados ensaios de cisalhamento com os corpos-de-prova com aplicação de força de compressão paralela às peças ligadas e às interfaces, designado internacionalmente como ensaio “*push-out*”.

Nas ligações entre peças de madeira foram confeccionados e ensaiados dois tipos de corpos-de-prova. Inicialmente, foram utilizados corpos-de-prova simétricos de três peças de mesma espessura e duas interfaces de ligação, também submetidos a ensaios de cisalhamento na compressão. Adicionalmente, foi estudado o comportamento de ligações em corpos-de-prova de forma especial, confeccionados com duas peças de madeira e uma única interface, ensaiados com aplicação de força de compressão inclinada em relação às peças ligadas e à interface.

Para uma avaliação do comportamento das ligações estudadas nesse trabalho, tomou-se como referência os resultados obtidos de ligações com emprego de pinos de aço a 90°. Visando um melhor comportamento desse tipo de ligação, em termos de rigidez e de resistência, foram utilizados nas ligações estudadas pinos com cabeças e fixação na madeira com emprego de adesivo epóxi, como visto na Figura 3.1.

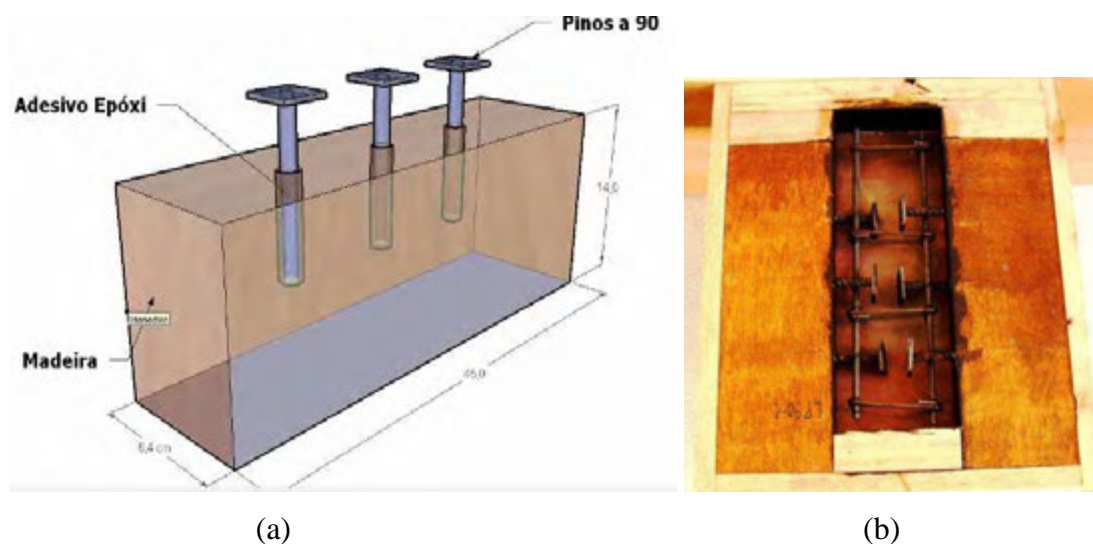


Figura 3.1. Ligação com conectores de barras de aço na forma de pino com cabeça, fixados a 90°: a) representação esquemática dos pinos e de sua ligação com a madeira; b) corpo-de-prova antes da concretagem da peça central.

Com o objetivo de obter ganhos de resistência e rigidez em relação a essas ligações com pinos a 90°, concebeu-se um conector de barra de aço na forma de arco embutido no concreto. Este conector consiste, basicamente, em dois segmentos de barras fixados na madeira inclinados, posteriormente moldados na forma de arco e soldados entre si. Este conector, de barra de aço na forma de arco embutido no concreto, foi projetado para obter um máximo de resistência e rigidez do conector e de sua ligação com a madeira, visando transferir a limitação de capacidade resistente e de rigidez para a ligação com o concreto.

Nas ligações com este conector de arco, quando solicitadas por cisalhamento, os trechos de extremidade do conector embutidos na madeira ficam submetidos, a esforços de flexão e a esforços dominantes de compressão em um dos lados e tração em outro, função da direção dos esforços cisalhantes atuantes. Visando uma melhoria na capacidade de transmissão destes esforços nas extremidades, foram utilizadas soluções construtivas alternativas.

Assim, além do emprego de conectores com as extremidades diretamente cravadas na madeira, foi utilizado adesivo epóxi na fixação na extremidade tracionada, de forma a melhorar a aderência da barra de aço à madeira. Por fim, foi utilizada também placa de ancoragem na interface entre os materiais no lado comprimido. Essa placa consistiu de uma arruela soldada à barra, na seção prevista para entrar em contato com a madeira, acomodada em um entalhe efetuado para este fim, de modo a aumentar a área de distribuição das tensões de compressão na madeira, como apresentado na Figura 3.2.

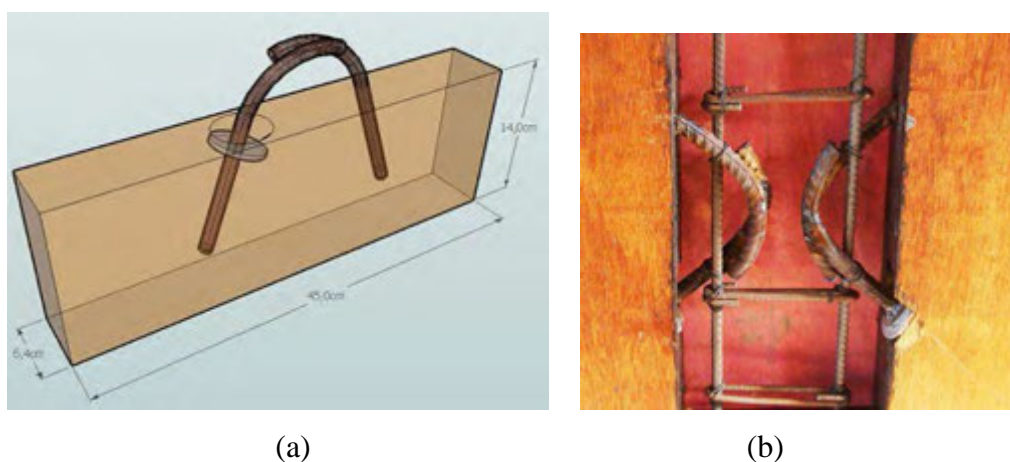


Figura 3.2. Ligação do conector de barra de aço na forma de arco com emprego de chapa de ancoragem no lado comprimido: a) representação esquemática; b) vista parcial do corpo-de-prova antes da concretagem da peça central.

Resumidamente, de início foram avaliadas ligações de peças mistas de madeira e concreto com emprego de conectores de barras de aço, na forma de pinos com cabeça, fixados normais à madeira com o auxílio de adesivo epóxi, como representado na Figura 3.1. A seguir foram avaliados os conectores na forma de arco embutido no concreto, com fixação na madeira por cravação direta, com emprego de adesivo epóxi no lado tracionado ou com chapa de ancoragem no lado comprimido, como visto na Figura 3.2.

Devido à elevada rigidez e boa capacidade resistente, além da facilidade de execução e baixo custo, foram avaliadas ligações entre peças mistas de madeira e concreto com emprego de conectores de dentes de concreto, obtidos por meio de entalhes efetuados na madeira preenchidos de concreto. Foram utilizados conectores com dentes simples e com dentes duplos, com diferentes inclinações da face diretamente carregada do dente de concreto, como representados nas Figuras 3.3 e 3.4.

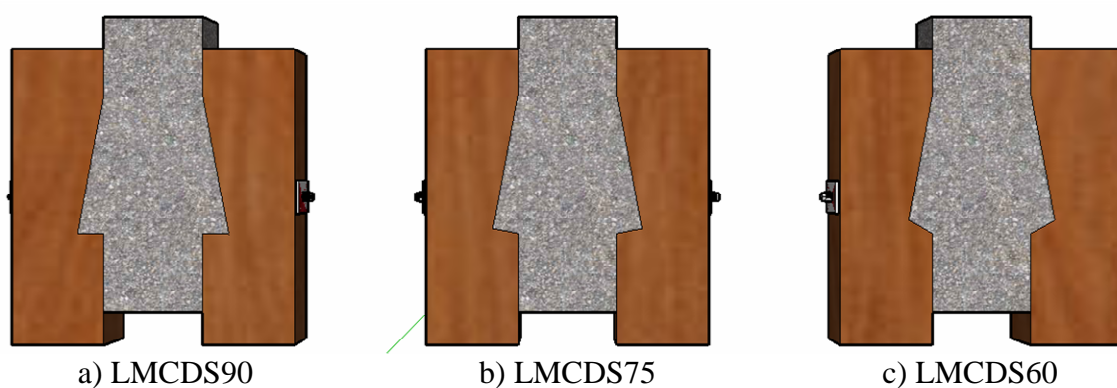


Figura 3.3. Ligações entre peças de madeira e concreto com dentes simples (LMCDS) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.

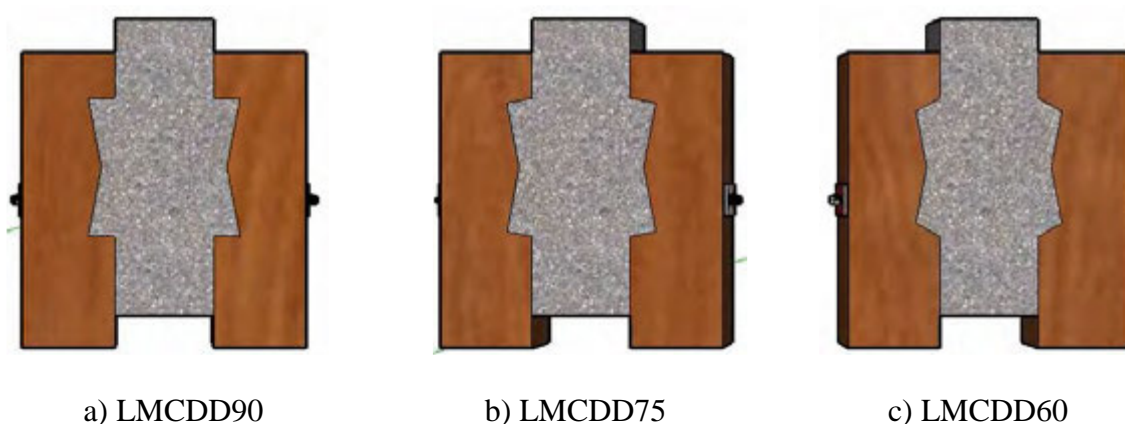


Figura 3.4. Ligações entre peças de madeira e concreto com dentes duplos (LMCDD) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.

As ligações com dentes duplos foram concebidas para serem utilizadas nas situações em que o fluxo de tensões cisalhantes possa atuar nos dois sentidos, como na região central de vigas submetidas à carga móvel ou variável.

A seguir, foram avaliadas ligações entre peças de madeira com emprego de conectores de tarugos de concreto, obtidos também pelo preenchimento de concreto de entalhes efetuados na peças de madeira. Inicialmente foram executados corpos-de-prova de ligação com três peças de madeira e duas interfaces, com conectores com dentes simples e com dentes duplos, como representadas nas Figuras 3.5 e 3.6.

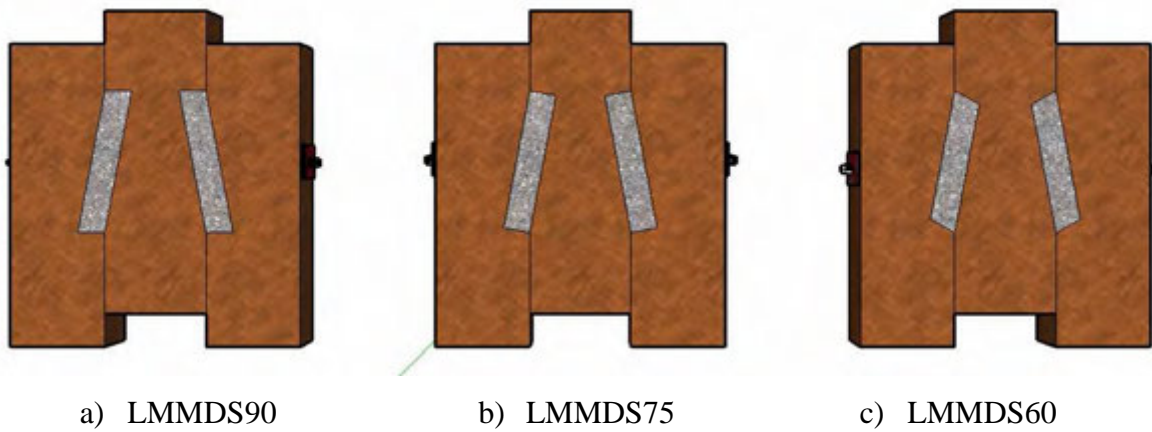


Figura 3.5. Ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com dentes simples (LMMDS) e faces carregadas inclinadas em relação à interface de: a) 90°; b) 75°; c) 60°.

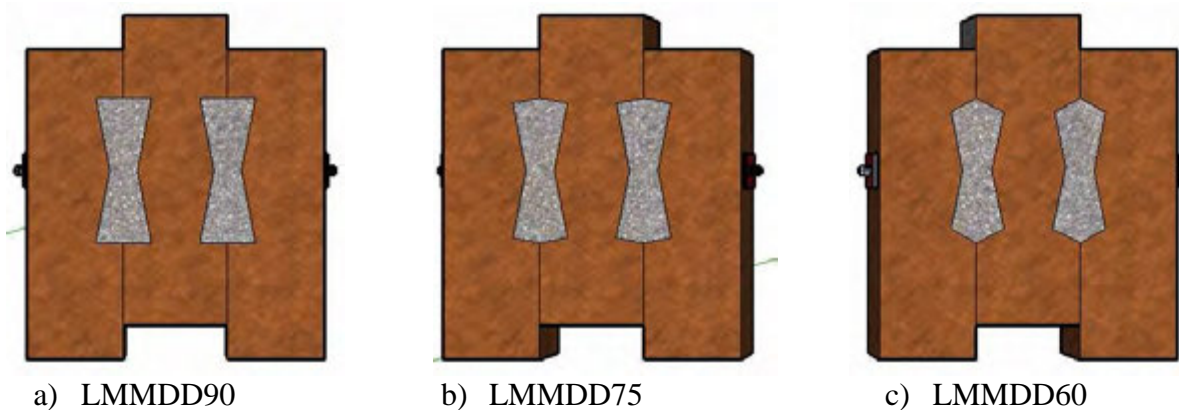


Figura 3.6. Ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com dentes duplos (LMMDD) e faces carregadas inclinadas em relação à interface: a) a 90°; b) a 75°; c) a 60°.

Nestas ligações entre peças de madeira com conectores de concreto foram utilizadas barras transversais rosqueadas de aço com porca e arruelas nas extremidades, para impedir a abertura entre as peças ligadas.

Com a finalidade de avaliar de forma exploratória, o comportamento de ligações com uso de corpos-de-prova especiais entre duas peças e uma única interface, semelhantes às apresentadas por Tommola *et al* (2000), foram realizados ensaios de ligação entre duas peças de madeira com conectores de concreto, como representado na Figura 3.7.

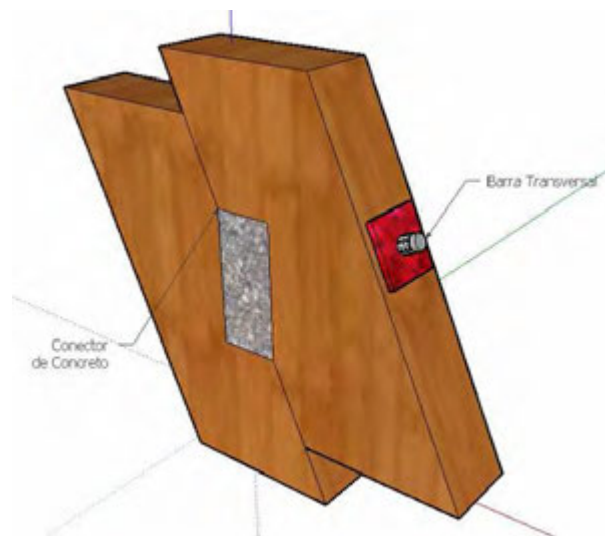


Figura 3.7. Disposições do corpo-de-prova com duas peças de madeira para avaliação da ligação madeira-madeira com conectores de entalhe preenchido de concreto.

Para obter maior resistência das ligações dos conectores de barras de aço com o concreto e aumentar a própria resistência dos conectores de dentes de concreto e, assim, permitir avaliação mais efetiva do comportamento das ligações destes conectores com a madeira, foi utilizado concreto de elevada resistência, compensando em parte a pequena espessura transversal das peças de concreto.

## **3.2. MATERIAIS**

### **3.2.1. Madeira**

Na execução dos corpos-de-prova das ligações foi utilizada madeira serrada de densidade média da espécie *Vataireopsis araroba*, de nome popular Angelim Amargoso, nativa da Região Amazônica, adquirida no mercado local na forma de vigas com espessura de sete centímetros e altura variável de 12 cm, 15 cm e 20 cm. As peças de madeira foram dispostas para secar ao ar, atingindo um teor de umidade entre 12% a 15%.

Após a secagem, as peças de madeira foram aparelhadas, obtendo-se uma seção transversal aproximada de 6,4 cm x 14 cm. Foi obtida a resistência à compressão paralela da madeira, por meio de ensaios em seis corpos-de-prova de 5 cm x 5 cm x 15 cm. Foi obtido o módulo de elasticidade na flexão, por meio de ensaios de seis vigas de 500 cm de comprimento, ensaiadas simplesmente apoiadas sob força central concentrada. Foi obtida a densidade média da madeira seca ao ar ( $U \cong 12\%$ ) em 12 corpos-de-prova de dimensões nominais de 2 cm x 2 cm x 3 cm, sendo valor obtido igual a  $\rho_{ap} = 677,7 \text{ kg/m}^3$ .

### **3.2.2. Concreto**

O concreto utilizado na fabricação dos corpos-de-prova madeira-concreto foi produzido no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMC/DEC/UFV). Este concreto foi devidamente dosado com base em uma resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 40 MPa. Foram empregados brita zero e aditivo plastificante, a fim de reduzir o consumo de água, com avaliação da resistência à compressão por meio de ensaios em seis corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro. Foram ainda realizados ensaios de compressão diametral para estimativa da resistência à tração do concreto. A composição, o traço e os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do concreto estão apresentados a seguir.

Na produção do concreto foram empregados materiais conforme Tabela 3.1, onde estão apresentados o tipo e procedência dos materiais. Do estudo e da caracterização dos materiais relacionados na Tabela 3.1 resultou o traço definido na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Características e procedência dos materiais empregados no concreto.

Material	Tipo / Procedência
Cimento	CP - III - 40, Cauê Mais, Camargo Corrêa Cimentos S/A, Pedro Leopoldo, DF
Areia 1	Artificial gnáissica da Pedreira Rolim Ltda., Ipatinga, MG
Areia 2	Natural quartzosa do Rio Piranga, Ponte Nova, MG
Brita 1	Gnáissica da graduação 0, Pedreira Rolim Ltda., Ipatinga, MG
Aditivo 1	Polifuncional, Mastermix 460, Basf CC, São Paulo, SP
Aditivo 2	Superplastificante, Glenium 51, Basf CC, São Paulo, SP

Tabela 3.2. Traço do concreto empregado na confecção dos corpos-de-prova.

Relação água/cimento:	0,420	l/kg	Consumo de água	180	l/m <sup>3</sup>		
Consumo de cimento:	429	kg/m <sup>3</sup>	Volume agregado graúdo	0,582	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		
Consumo agregado graúdo:	879	kg/m <sup>3</sup>	Consumo agregado miúdo	889	kg/m <sup>3</sup>		
Parâmetros do traço:	1,000	0,830	1,245	2,051	0,000	0,420	+ Aditivos
Teor de argamassa seca em peso:	0,600		Relação água/materiais secos em volume:		0,220		

Nos conectores de concreto utilizados nas ligações entre peças de madeira foi empregado concreto obtido da mistura de graute comercial de resistência nominal de 40 MPa, brita zero e água, na proporção de 1:2 entre peso do graute e peso da brita seca. Foi utilizada quantidade de água recomendada pelo fabricante do graute. O graute (“grout”) é uma argamassa composta por cimento, areia, quartzo, água e aditivos especiais, tendo como destaque sua elevada resistência mecânica e sua consistência auto-adensável.

### 3.2.3. Aço

Nos conectores de barra de aço e nas armaduras das peças de concreto, utilizadas para evitar a ruptura por fendilhamento global dessas peças, foram empregadas barras de aço nervurado para concreto, CA50, adquiridas no mercado local com diâmetros de 12.5 mm para os conectores, de 10 mm para as armaduras longitudinais e de 5,0 mm para os grampos transversais de amarração das barras longitudinais. As cabeças dos pinos fixados normais às peças de madeira foram obtidas de barras chatas de aço de 5 mm de espessura.

### 3.3. LIGAÇÕES MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE BARRAS DE AÇO

Foram confeccionados corpos-de-prova de ligação para ensaios de cisalhamento na compressão, conhecido internacionalmente como “*push-out*”. Nas ligações madeira-concreto foram utilizados corpos-de-prova simétricos com três peças, com peças laterais de madeira e peça central de concreto, como representado na Figura 3.8 a 3.10. Para promover a proteção das peças de madeira, evitar a absorção de água do concreto pela madeira e reduzir a transferência de força por meio do atrito entre os materiais, foi realizada pintura com tinta a óleo nas faces de contato da madeira com o concreto.

Foram avaliadas as ligações com dois tipos básicos de conectores de barra de aço: com pinos retos a  $90^0$  e na forma de arco embutido no concreto, com três diferentes soluções construtivas na ligação com a madeira. Foram realizados ensaios em dois corpos-de-prova para cada um dos quatro diferentes conectores utilizados.

Nas ligações com pinos a  $90^0$ , denominados (LP90), foram utilizados três pinos retos com cabeça fixados normais às peças de madeira, como representado na Figura 3.8. Foi utilizado adesivo epóxi na fixação com a madeira, com a cabeça executada pela solda de placa de dimensões 38 mm x 50 mm x 5 mm. Os conectores de arco embutido no concreto foram executados pela fixação de dois segmentos de barra de aço inclinados na madeira, posteriormente moldados na forma de arco e soldados entre si.

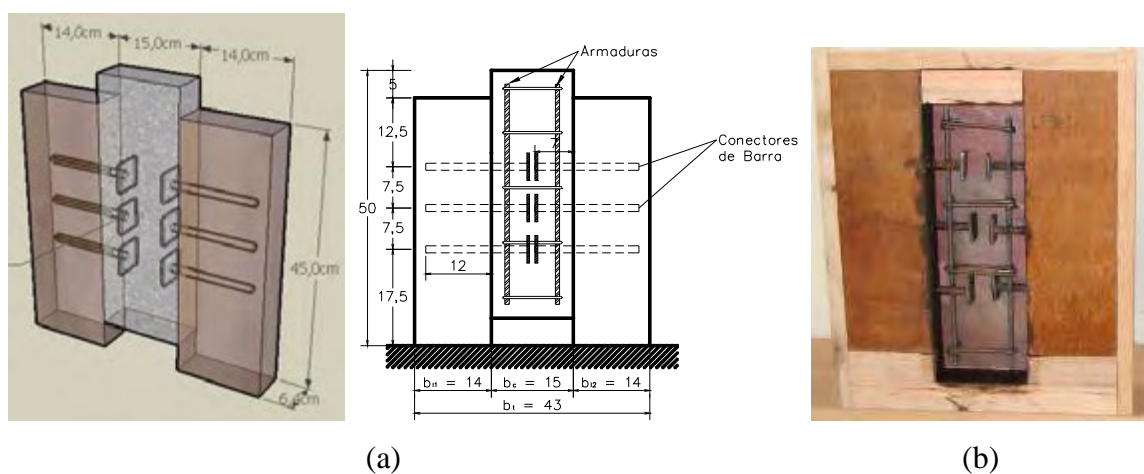


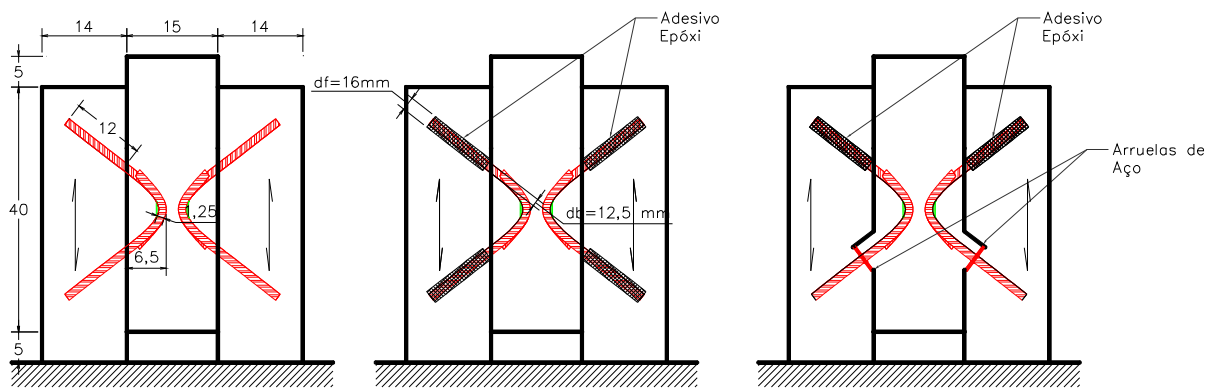
Figura 3.8. Corpo-de-prova de ligação com conectores de pinos com cabeça, fixados na madeira a  $90^0$ : a) representações esquemáticas; b) vista antes da concretagem.

Assim, foram empregados três diferentes formas de fixação das barras de aço na madeira: por cravação direta simples (Ligação de Pinos em Arco Simples - LPAS), com emprego de adesivo epóxi (Ligação por Pinos em Arco Colado - LPAC) e com emprego de chapa de ancoragem no lado comprimido, efetuada com fixação de arruela redonda de 50 mm de lado e 3 mm de espessura, soldada normal à barra e ancorada em entalhe efetuado na madeira (Ligação por Pinos em Arco e Entalhe - LPAE).

Como o diâmetro das barras de aço dos conectores foi de 12,5 mm, em sua fixação por cravação direta na madeira foi utilizada furação com diâmetro de 12 mm. Na fixação com adesivo epóxi foi utilizada uma furação com 16 mm de diâmetro. Para evitar o efeito de fendilhamento global no elemento central de concreto, foi utilizada uma armadura de costura, na forma de grampos transversais com barras de 5 mm de diâmetro, ancorados em barras longitudinais de 10 mm de diâmetro.

A forma de arco dos conectores, como pode ser visto nas Figuras 3.9, foi concebida principalmente visando obter ganhos significativos na rigidez individual dos conectores. Elementos de pinos transversais possuem rigidez reduzida à flexão. A união das extremidades de elementos, inicialmente isolados, formando arcos, produz significativo acréscimo de rigidez ao conector.

A inclinação das barras de aço dos conectores, na fixação com a madeira e também em relação à direção dos esforços transmitidos, permite ganhos de rigidez e resistência do conector. Também, o confinamento do concreto sob o arco aumenta a resistência e a rigidez da ligação do conector com o concreto. Além disso, como a forma em arco evita que as pontas das barras de aço fiquem posicionadas para cima, ocorre uma melhora da segurança e facilidade operacional nas fases de transporte, montagem, colocação das armaduras e concretagem.

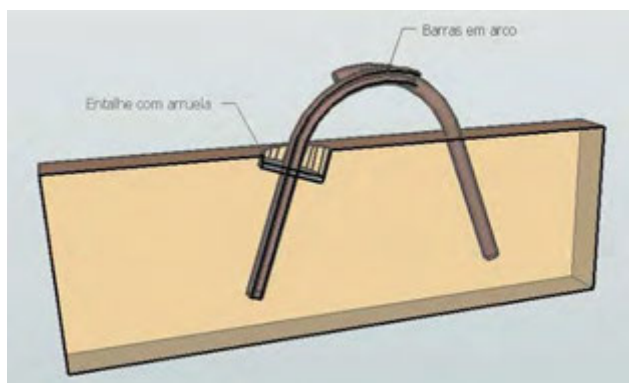


$d_b$ - diâmetro da barra,  $d_f$  – diâmetro do furo, dimensões em cm

(a)



(b)



(c)

Figura 3.9. Corpos-de-prova com conectores de barra de aço em arco com fixação na madeira por cravação direta, com fixação por adesivo epóxi e com auxílio de placa de ancoragem e entalhe na madeira: a) Representação esquemática; b) Vista antes da concretagem das peças centrais; c) corte transversal esquemático e vista da ligação por pinos em arco, com chapa de ancoragem e entalhe na madeira.

Os ensaios dos corpos-de-prova da ligação madeira-concreto foram realizados em máquina universal de ensaio, no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMC/DEC/UFV), com aplicação de força de compressão crescente, com taxa constante aproximada de 15 kN/minuto e duração de 10 a 15 minutos.

Foram medidos os deslocamentos relativos entre as peças laterais de madeira e a peça central de concreto, entre pontos situados sobre uma mesma reta, normal à interface de ligação e posicionada no centro da ligação. Foram empregados relógios comparadores, com medição de milésimos de milímetros, dispostos em ambos os lados da ligação, como visto na Figura 3.10.



Figura 3.10. Ensaio de corpo-de-prova com conector em arco colado (LPAC2), em diferentes estágios do carregamento.

Foram obtidas as resistências últimas ( $P_u$ ) e as curvas força x deslocamento relativo, a partir das quais foram avaliadas as rigidezes relativas aos estados limites últimos ( $K_u$ ) e de serviço ( $K_s$ ). Estas rigidezes foram obtidas pela inclinação da reta secante aos pontos extremos dos trechos compreendidos, respectivamente, entre 10% e 40% e entre 10% e 70% da resistência.

### 3.4. LIGAÇÕES MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE CONCRETO

Nas ligações de peças mistas de madeira e concreto por meio de conectores de concreto foram utilizados corpos-de-prova simétricos com três peças, sendo as peças laterais de madeira e a peça central de concreto, como visto nas Figuras 3.11 a 3.13..

Os conectores foram obtidos por meio de entalhes executados na madeira preenchidos de concreto, formando dentes de concreto embutidos na madeira. Em cada conector de concreto foi utilizado um pino com cabeça fixado na madeira com emprego de adesivo epóxi, para garantir a ancoragem do dente na peça de madeira evitando assim a abertura entre as peças ligadas, como representado na Figura 3.11. Novamente, foi utilizada uma armadura para combater o fendilhamento global da peça central de concreto com grampos transversais de 5 mm e barras longitudinais de 10 mm, como visto na Figura 3.12.

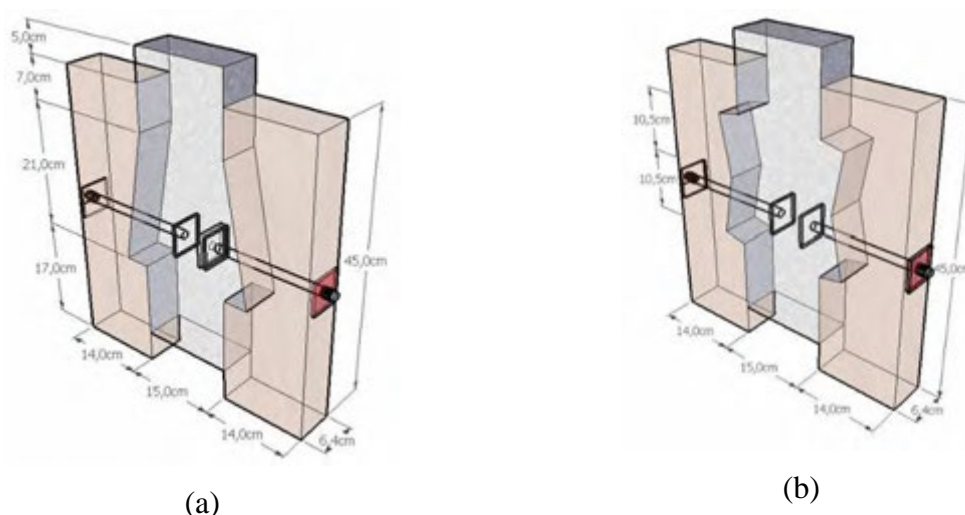


Figura 3.11. Representação esquemática em perspectiva de corpos-de-prova de ligação de peças mistas com conectores de concreto: a) com dentes simples; b) com dentes duplos.

Foram estudados dois tipos básicos de conectores: com entalhe em apenas um lado de cada peça de madeira ou dente simples (LDS) e, com entalhe nos dois lados de cada peça de madeira ou dente duplo (LDD). Esta última configuração (LDD) foi estudada visando sua utilização nos casos em que há possibilidade do cisalhamento atuar nos dois sentidos, como ocorre na região central de vigas submetidas à carga móvel. Para cada tipo básico de conector de concreto foram confeccionados e ensaiados corpos-de-prova com entalhes efetuados a  $90^{\circ}$ , a  $75^{\circ}$  e a  $60^{\circ}$  em relação à interface entre as peças.

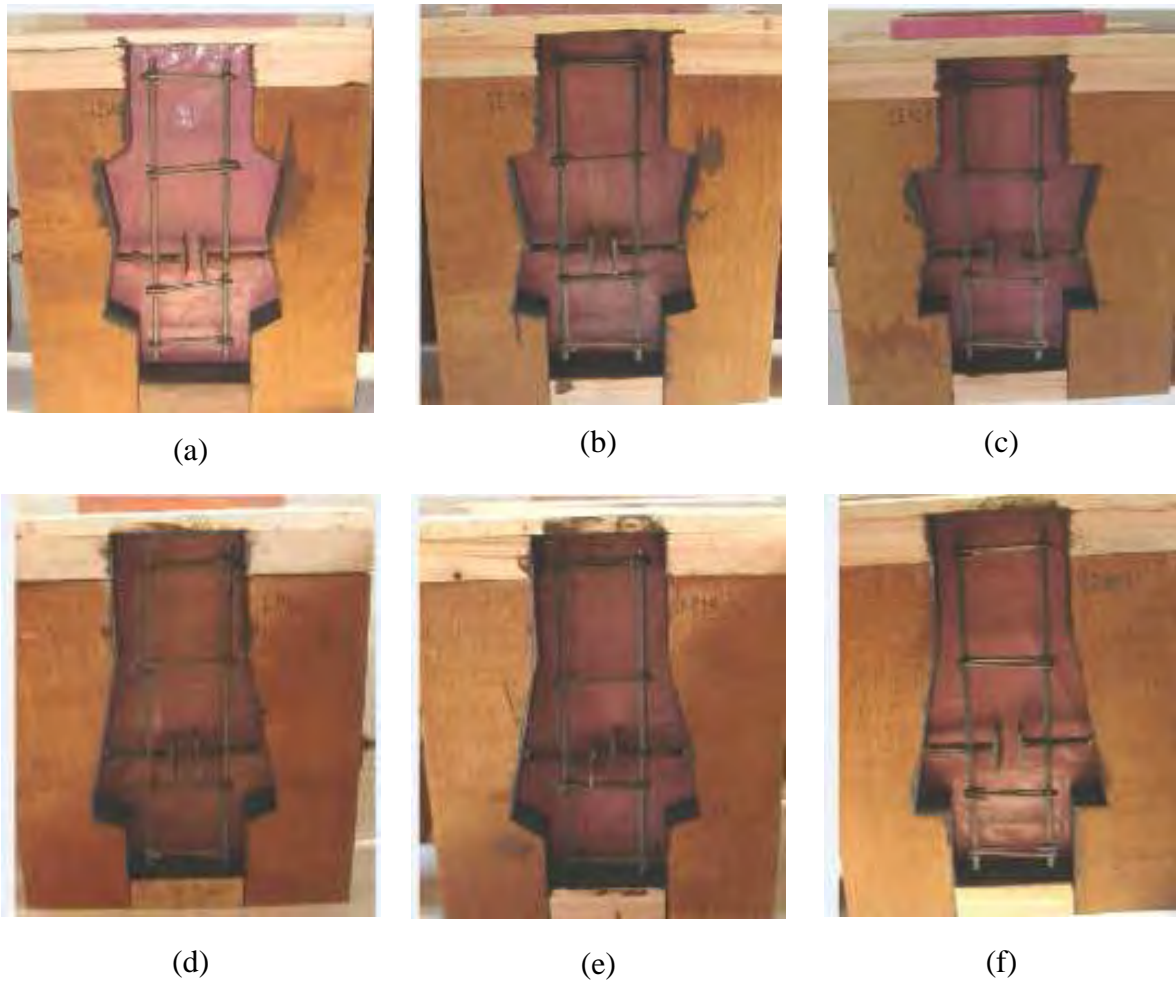


Figura 3.12. Corpos-de-prova de ligação madeira-concreto com conectores de concreto antes da concretagem, com vista dos pinos de ancoragem e das armaduras de combate ao fendilhamento das peças de concreto: (a), (b), (c) corpos-de-prova com dentes duplos, respectivamente, a  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ ; (d), (e) e (f) corpos-de-prova com dentes simples, respectivamente, a  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ .

Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaio no LMC/DEC/UFV, com aplicação de força de compressão crescente, taxa constante aproximada de 15 kN/min e duração de 10 a 20 minutos. Foram medidos os deslocamentos relativos entre as peças laterais de madeira e a peça central de concreto, entre pontos situados sobre uma mesma reta, normal à interface e no centro da ligação, com emprego de relógios comparadores digitais nas duas faces, com leitura de milésimos de milímetros, como visto na Figuras 3.13.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.13. Ensaio de ligações entre peças de madeira e concreto com ligação por conectores de concreto: (a), (b), (c) corpos-de-prova de dentes duplos, com entalhes à, respectivamente,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ ; (d), (e) e (f) corpos-de-prova de dentes simples, com entalhes à, respectivamente,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ .

Foram obtidas as resistências ( $P_u$ ) e as curvas força x deslocamento relativo, a partir das quais foram avaliados os processos de rupturas e as rigidezes relativas aos estados limites últimos ( $K_u$ ) e de serviço ( $K_s$ ). Estas rigidezes foram obtidas pela inclinação da reta secante à referida curva entre os pontos extremos dos trechos compreendidos, respectivamente, entre 10% a 40% e entre 10% e 70% da resistência.

Para garantir a integridade dos relógios comparadores, em um determinado nível de carregamentos os mesmos foram retirados, com registro posterior somente da força última ou resistência dos corpos-de-prova ( $P_u$ ).

### 3.5. LIGAÇÕES DE PEÇAS DE MADEIRA COM CONECTORES DE CONCRETO

#### 3.5.1. Corpos-de-prova de Ligação com Três Peças de Madeira

Na avaliação das ligações entre peças de madeira com conectores de concreto, inicialmente foram confeccionados e ensaiados 8 corpos-de-prova com três peças de madeira, sendo a metade com dentes simples e a outra metade com dentes duplos, com diferentes inclinações da face carregada do dente de concreto, como visto nas Figuras 3.14 e 3.15.



Figura 3.14. Corpos-de-prova de ligação com conectores de concreto entre três peças de madeira antes da concretagem.

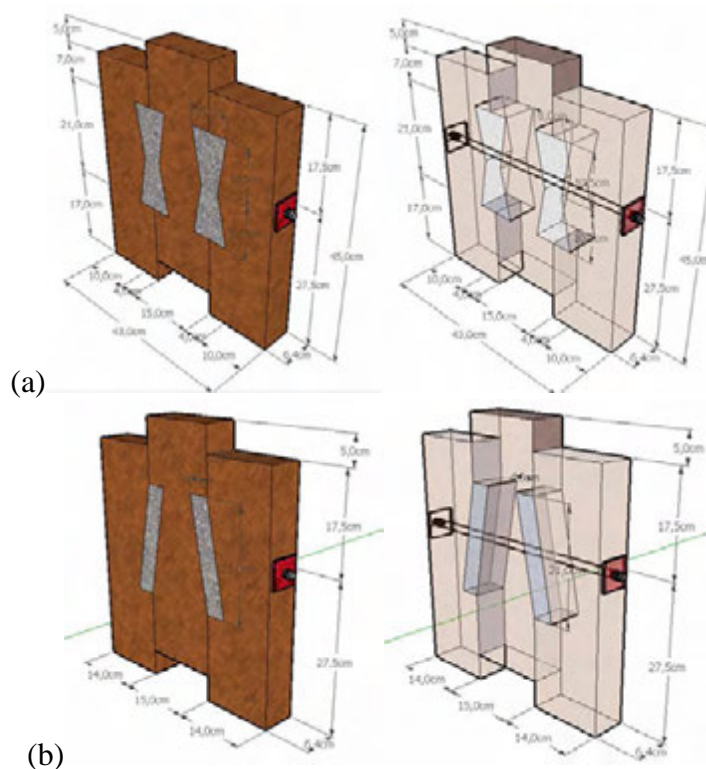


Figura 3.15. Representação dos corpos-de-prova de ligação entre três peças de madeira com conectores de concreto e dentes a 90°: a) dentes duplos; b) dentes simples.

O comprimento das peças de madeira foi de 45 cm, a largura das peças centrais foi de 20 cm e das peças laterais de 12 cm. Os entalhes foram executados com 3,5 cm de profundidade e 21 cm de extensão, nos dois lados de cada peça (dentes duplos) e apenas de um lado (dentes simples). Para impedir a abertura entre as peças de madeira foram utilizadas barras transversais de aço de diâmetro nominal de 12,5 mm, com porca e arruela. Foram executados entalhes normais à interface em dois corpos-de-prova e nos outros dois, entalhes inclinados de  $15^\circ$  e  $30^\circ$  em relação a esta normal, ou de forma equivalente inclinados de  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $60^\circ$  em relação à interface, como visto nas Figuras 3.14 e 3.15..

Nos ensaios foram repetidos os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios das ligações madeira-concreto com conectores de dentes de concreto descritos no item 3.4. Na Figura 3.16 são apresentados fotos de ensaios destes corpos-de-prova.

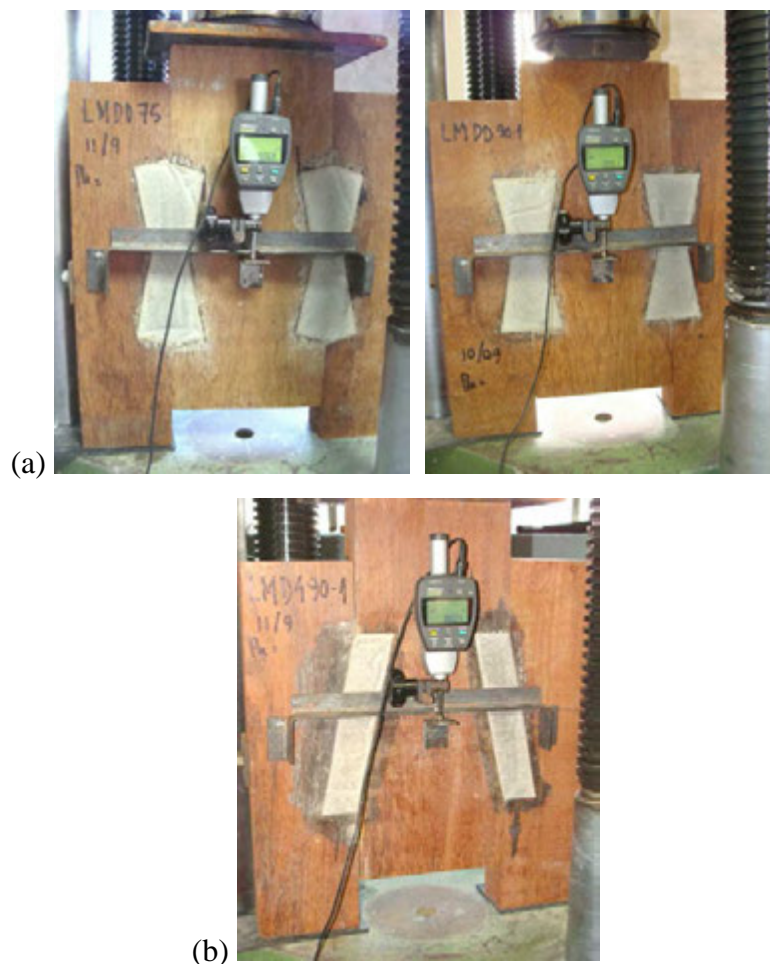


Figura 3.16. Ensaios de ligações entre três peças de madeira com ligação por conectores de concreto: a) dentes duplos a  $75^\circ$  e a  $90^\circ$ ; c) dentes simples a  $90^\circ$ .

### 3.5.2. Corpos-de-prova de Ligação com Duas Peças de Madeira

Para avaliar o comportamento de ligações com um único conector, foram fabricados e ensaiados oito corpos-de-prova de ligação com duas peças de madeira, semelhante aos utilizados em Tommola *et a.* (2000), com largura de 14 cm.

Os entalhes foram de dentes simples, com profundidade de 3,25 cm e comprimento de 14 cm, divididos em dois grupos de quatro corpos-de-prova. No primeiro grupo foi utilizada barra rosqueada e no segundo, barras nervuradas coladas com adesivo epóxi, com emprego de pré-furação. De cada grupo de quatro corpos-de-prova, em dois as faces carregadas dos dentes foram executadas inclinadas de  $15^{\circ}$  e nos outros dois de  $30^{\circ}$  em relação à normal da interface.

A forma dos corpos-de-prova foi ajustada para que a resultante das forças aplicadas passasse pelo centro do conector, resultando em faces de carregamento inclinadas de aproximadamente  $23,7^{\circ}$ , como visto nas Figuras 3.17.

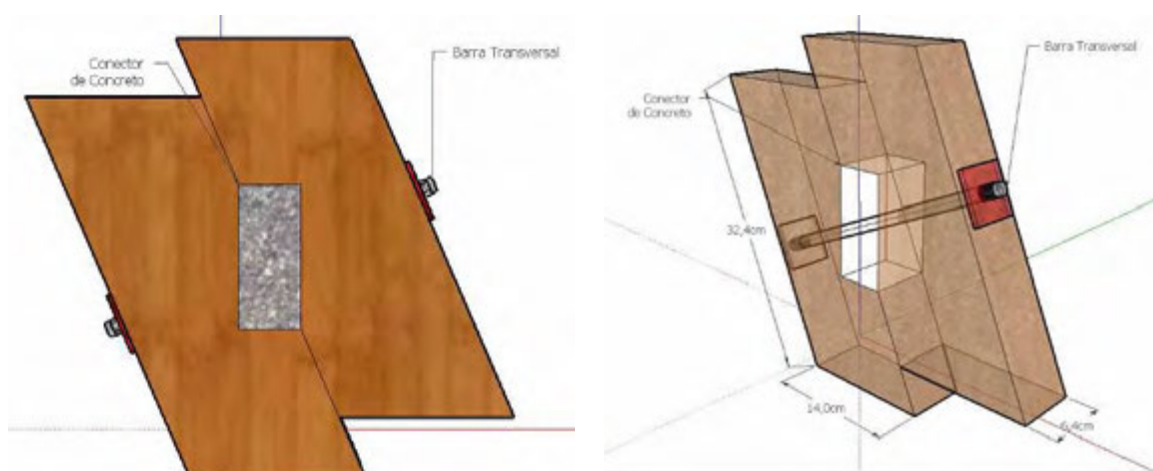


Figura 3.17. Representação do corpo-de-prova com duas peças de madeira e um único conector de concreto, com face carregada inclinada de  $30^{\circ}$  em relação à normal à interface.

Esta configuração geométrica apresenta a vantagem de ser capaz de melhor representar o carregamento próximo aos apoios de ligações em vigas, situadas nas regiões em que o fluxo de tensões principais atua também inclinado em relação ao eixo da viga.

Novamente, foram seguidos os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios de ligações de peças mistas madeira-concreto com conectores de concreto, com medição dos deslocamentos relativos entre as peças de madeira, entre pontos situados sobre uma mesma reta, com emprego de relógios comparadores digitais, dispostos em ambos os lados da ligação e fixados com dispositivos auxiliares, como visto nas Figuras 3.18.

Os ensaios tiveram duração aproximada de 10 minutos, com aplicação de força crescente. Foram obtidas a resistência e a rigidez de cada ligação. A rigidez para os estados limites de serviço ( $K_s$ ) e para os estados limites últimos ( $K_u$ ) foram obtidas pelas retas correspondentes ao trecho compreendido, respectivamente, entre 10% e 40% da resistência e entre 10% e 70% da resistência.



(a)



(b)

Figura 3.18. Ensaio de corpos-de-prova de ligações com conectores de concreto com duas peças de madeira e um conector.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados e a discussão dos mesmos.

Inicialmente, são apresentados os resultados relativos à caracterização dos materiais. Em seguida, apresentam-se aqueles referentes às ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço e conectores de concreto, respectivamente.

Para facilitar a interpretação dos resultados das ligações madeira-concreto, foi efetuada uma análise comparativa entre os conectores de barras de aço em arco com os conectores de dentes de concreto.

São também apresentados os resultados referentes às ligações entre peças de madeira com conectores de concreto, obtidas tanto com corpos-de-prova com três peças quanto com duas peças.

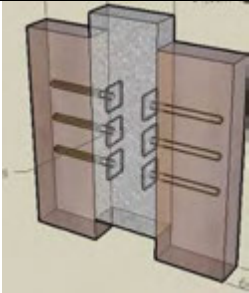
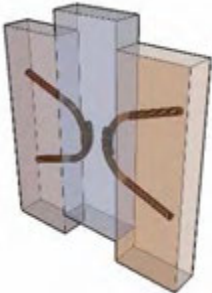
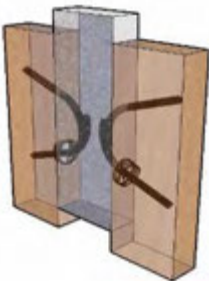
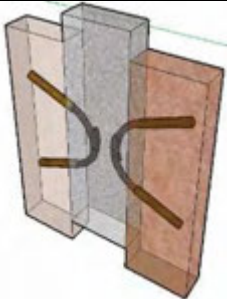
### **4.1. MATERIAIS**

Para a madeira foi obtida uma resistência média à compressão paralela de 48,2 MPa (desvio padrão de 5,76) e valor médio para o módulo de elasticidade na flexão de 13776 MPa. A densidade média para teor de umidade de 12% foi de 657 kg/m<sup>3</sup>. A resistência média do concreto utilizado nas ligações entre peças de madeira e concreto foi de 42,9 MPa (desvio padrão de 3,65) os 28 dias.

## 4.2. LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE BARRAS DE AÇO

Para maior facilidade de apresentação dos resultados e melhor entendimento dos mesmos, utiliza-se para as ligações madeira-concreto com conectores de barra de aço a nomenclatura definida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira e de concreto com conectores de barras.

Sigla	Esquema do corpo-de-prova	Descrição
<b>LMCP90</b>		Ligação Madeira-Concreto com pinos a 90°
<b>LMCPAS</b>		Ligação Madeira-Concreto com barras em arco simples ou com extremidades das barras cravadas na madeira
<b>LMCPAE</b>		Ligação Madeira-Concreto com barras em arco com emprego de chapas de ancoragem e entalhes na madeira.
<b>LMCPAC</b>		Ligação Madeira-Concreto com barras em arco com extremidades das barras coladas na madeira coladas com adesivo epóxi.

Na Figura 4.1 estão representadas as curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios das ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.

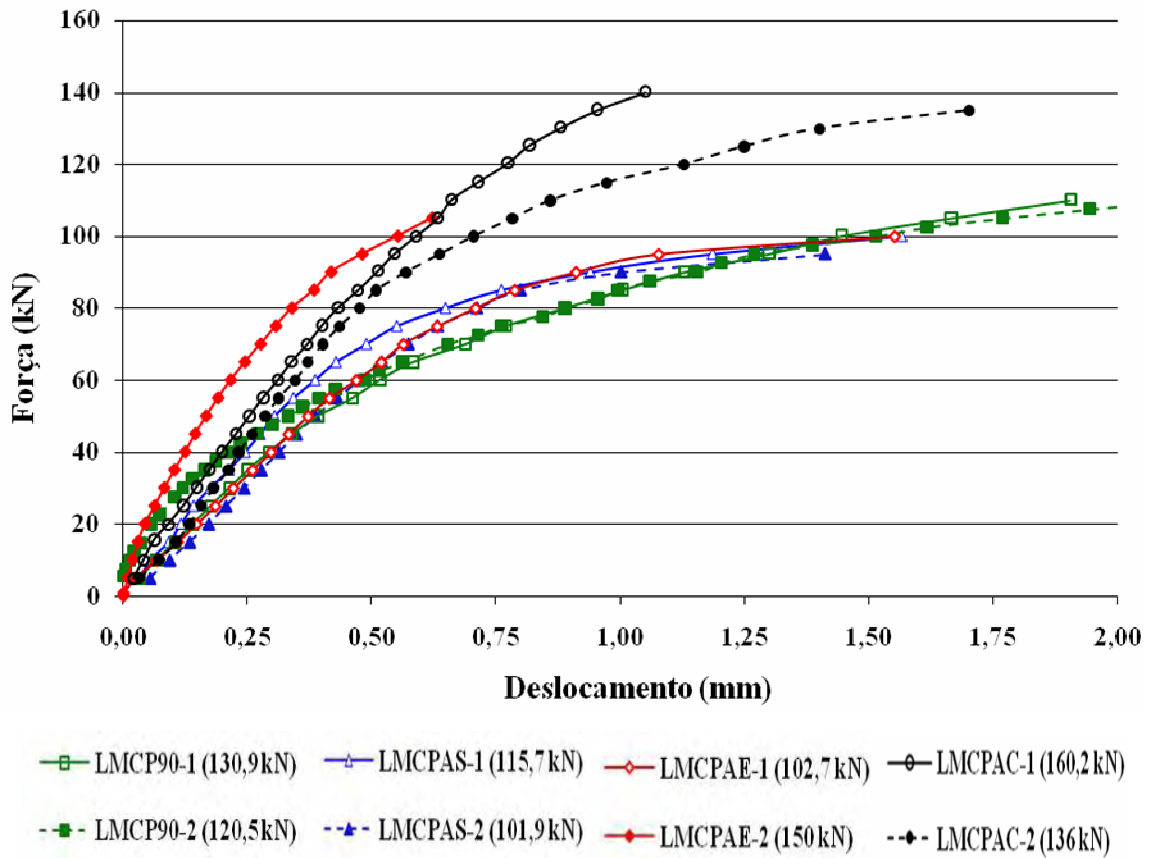


Figura 4.1. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.

Nas Figuras 4.2 a 4.5, estão representadas, para ligações com diferentes conectores, as respectivas curvas força x deslocamento relativo, bem como as curvas polinomiais de correlação e as retas secantes utilizadas para obtenção das rigidezes das ligações. Os resultados dos ensaios das demais ligações são apresentados no Apêndice B.

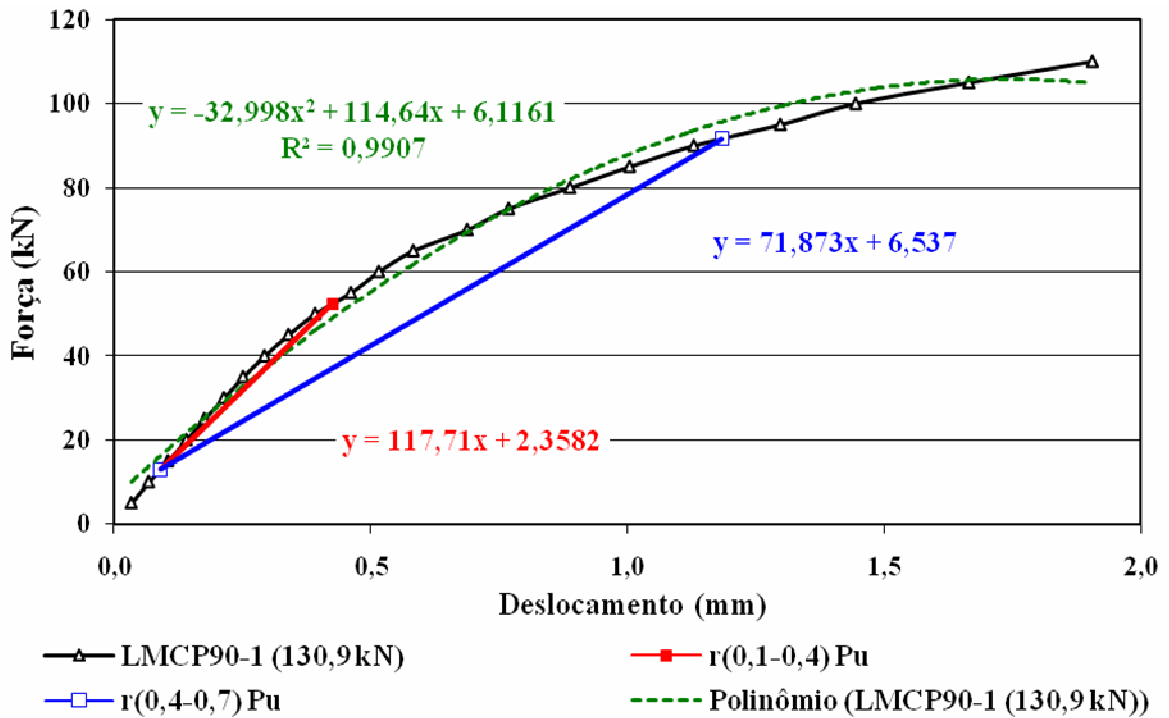


Figura 4.2. Curva força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com pinos a  $90^0$ , LMCP90, CP 1,  $P_u=130,9$  kN.

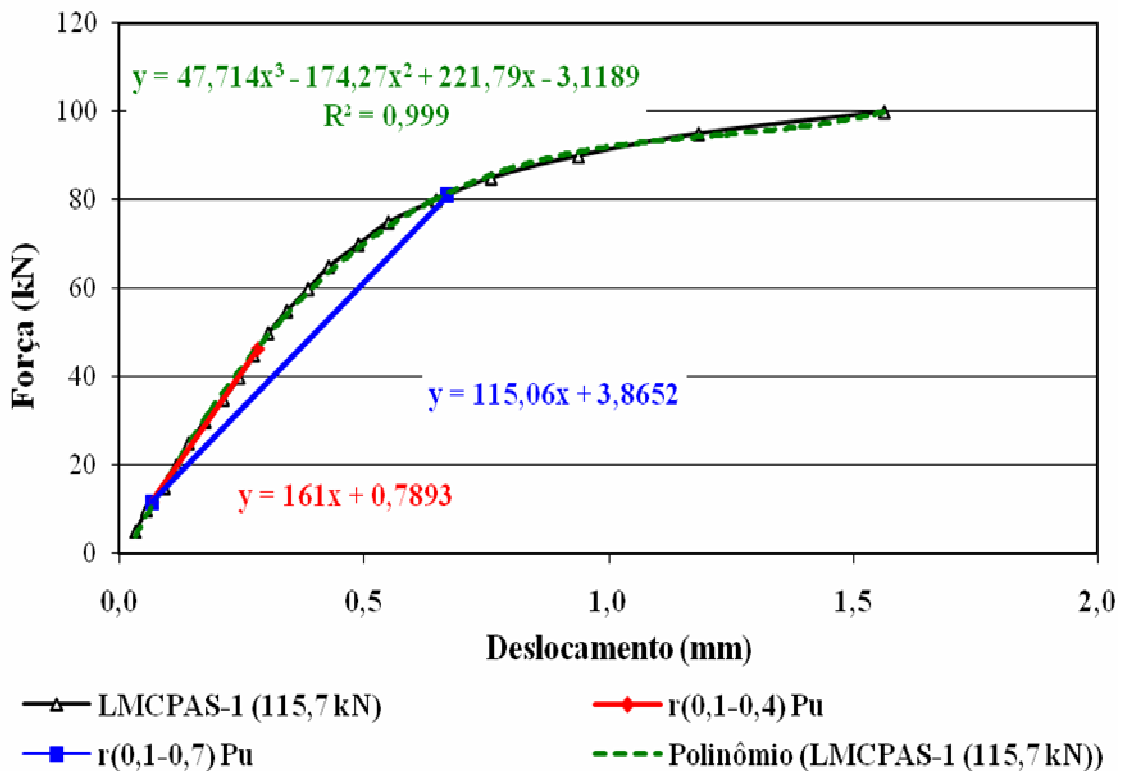


Figura 4.3. Curva força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco simples, LMCPAS, CP 1,  $P_u=115,7$  kN.

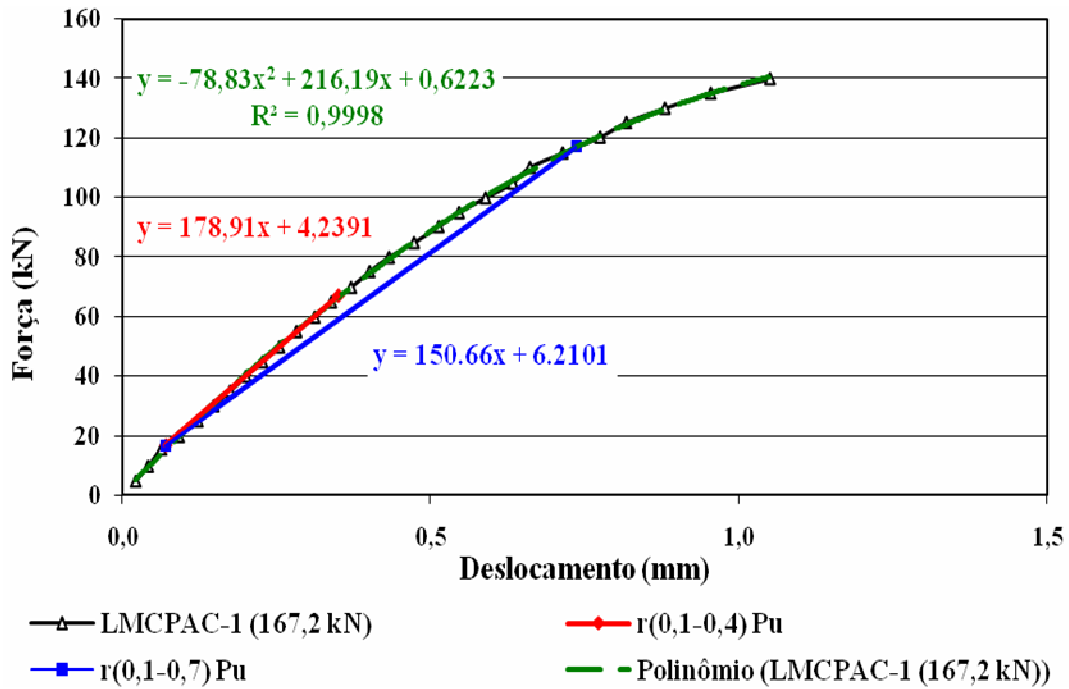


Figura 4.4. Curvas força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco coladas, LMCPAC, CP 1,  $P_u=167,2$  kN.

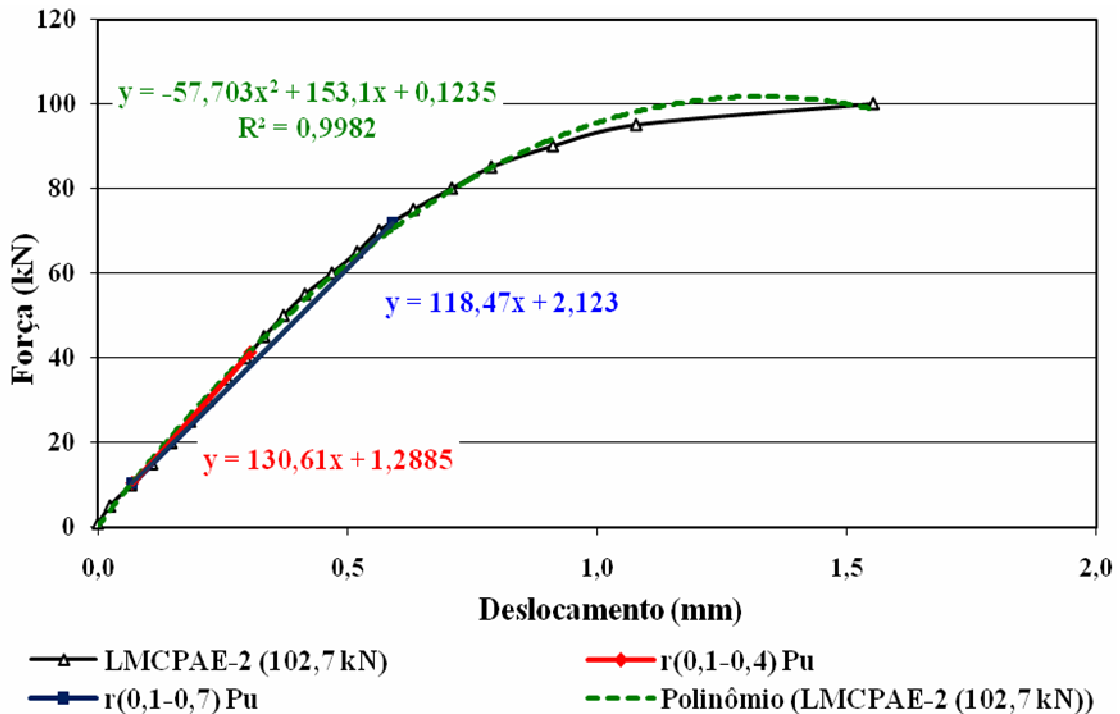
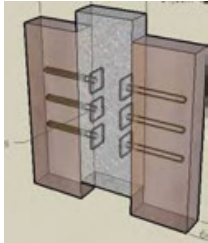
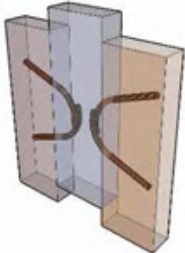
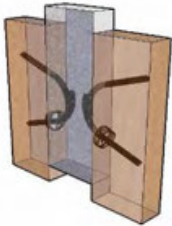
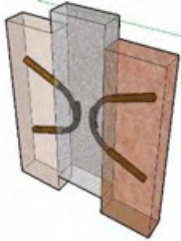


Figura 4.5. Curvas força x deslocamento relativo, polinômio de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco, chapa de ancoragem e entalhe na madeira, LMCPAE, CP 2,  $P_u=102,7$  kN.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores das resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ).

Tabela 4.2. Resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) de ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.

Esquema/Sigla	Corpo-de-prova	$P_u$ (kN)	$K_s$ (kN/mm)	$K_u$ (kN/mm)	Relação $K_u/K_s$ (%)
 <b>LMCP90</b>	LP90-1	130,9	117,71	71,87	61,1
	LP90-2	120,5	125,73	75,02	59,7
	Média	125,7	121,72	73,455	60,4
	<hr/>				
 <b>LMCPAS</b>	LPAS-1	115,7	161,00	115,06	61,1
	LPAS-2	101,9	136,95	123,88	90,5
	Média	108,8	148,98	119,47	75,8
	<hr/>				
 <b>LMCPAE</b>	LPAE-1	102,7	130,61	118,47	90,7
	LPAE-2	150,0	241,29	152,16	63,1
	Média	126,4	185,90	135,31	76,9
	<hr/>				
 <b>LMCPAC</b>	LPAC-1	167,2	178,91	150,66	84,2
	LPAC-2	136,0	192,47	150,45	78,2
	Média	151,6	185,69	150,55	81,2

LMCP90 - Ligação com pinos a 90°; LMCPAS - Ligação com barra em arco simples; LMCPAE - Ligação com barra em arco e entalhe; LMCPAC - Ligação com barra em arco colado.

Na Figura 4.6 são apresentados os gráficos com o resumo dos resultados dos ensaios das ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.

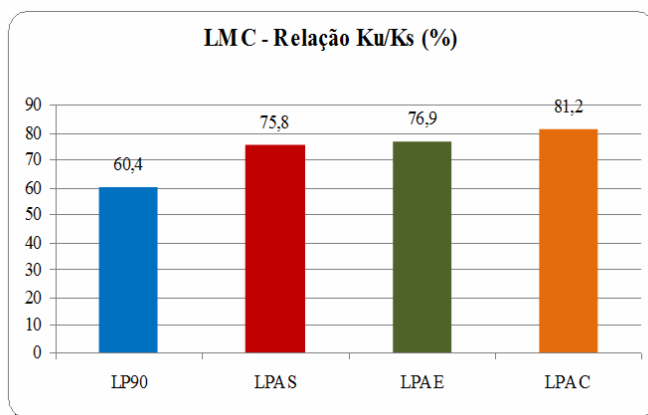
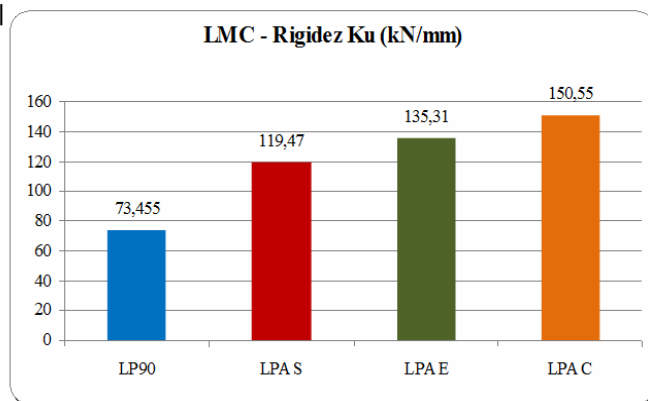
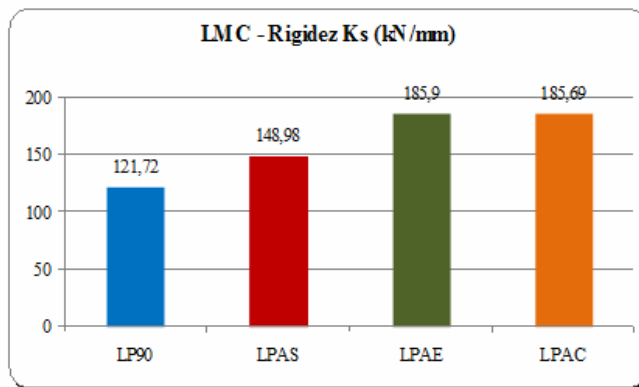
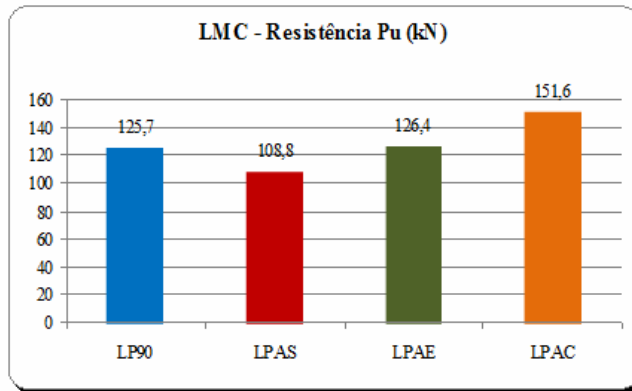


Figura 4.6. Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios de ligações madeira-concreto com conectores de barras de aço.

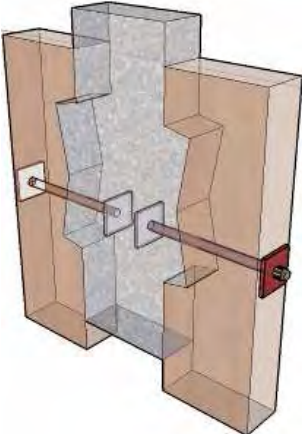
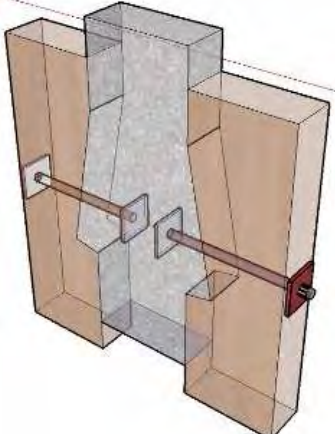
Embora as duas repetições utilizadas nos ensaios de cada conector não permitam uma análise estatística adequada e conclusões definitivas, as seguintes tendências foram observadas:

- ganho de resistência média nas ligações com arco colado (LPAC) em relação às demais, que apresentaram variações de resultados reduzidas entre si;
- ganho de rigidez nas ligações com conectores com arco colado (LPAC) e com entalhe (LPAE) em relação às ligações com pino a  $90^0$  (LP90) e com arcos simples (LPAS);
- perda relativa importante de rigidez  $K_u$  em relação à  $K_s$ , mais acentuada nas ligações com pinos (LP90), que apresentaram redução média de 40%, enquanto que as ligações com arco simples (LPAS) e arco com entalhe (LPAE) apresentaram perda média da ordem de 25%. Nas ligações com arco colado (LPAC) a perda média foi inferior a 20%.
- embora o monitoramento dos deslocamentos tenha sido limitado, devido à necessidade de se garantir a integridade dos relógios comparadores, uma avaliação consistente dos processos de rupturas não foi possível, apesar de serem detectados indícios de ductibilidade, fenômeno esse mais acentuado nas ligações com pinos a  $90^0$ ;
- ocorreram perdas progressivas de rigidez, com aumento nas taxas de variação dos deslocamentos, como visto na Figura 4.1.
- pode-se observar que em todos os ensaios de ligações madeira-concreto com conectores de barra de aço foram obtidas boas aproximações das curvas força-deslocamento por meio de curvas de correlação polinomiais de segundo grau, com valores de  $R^2$  superiores a 0,99;
- as rupturas finais ocorreram no concreto em torno dos conectores por efeito combinado de compressão e fendilhamento;
- avaliações visuais realizadas após a realização dos ensaios, nas ligações das barras de aço com emprego de adesivo epóxi, não detectaram indícios de ocorrência de escorregamento das barras de aço na madeira.

### 4.3. LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE CONCRETO

Para maior facilidade de apresentação dos resultados e melhor entendimento dos mesmos, utiliza-se para as ligações madeira-concreto com conectores de concreto a nomenclatura definida na Tabela 4.3. Outra diferença entre os conectores foi definida pela inclinação da face carregada em relação à interface de, respectivamente,  $90^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $60^{\circ}$ .

Tabela 4.3. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira e de concreto com conectores de concreto.

Ligação		
	<b>LMCDD</b>	<b>LMCDS</b>
Descrição	Ligação Madeira-Concreto com conectores de concreto com dentes duplos.	Ligação Madeira-Concreto com conectores de concreto com dentes simples.

Na Figura 4.7 estão representadas as curvas força x deslocamento relativo, obtidas nos ensaios das ligações madeira-concreto efetuadas com conectores de concreto e uso de dentes duplos. Na Figura 4.8, apresentam-se as curvas obtidas com conectores com dentes simples.

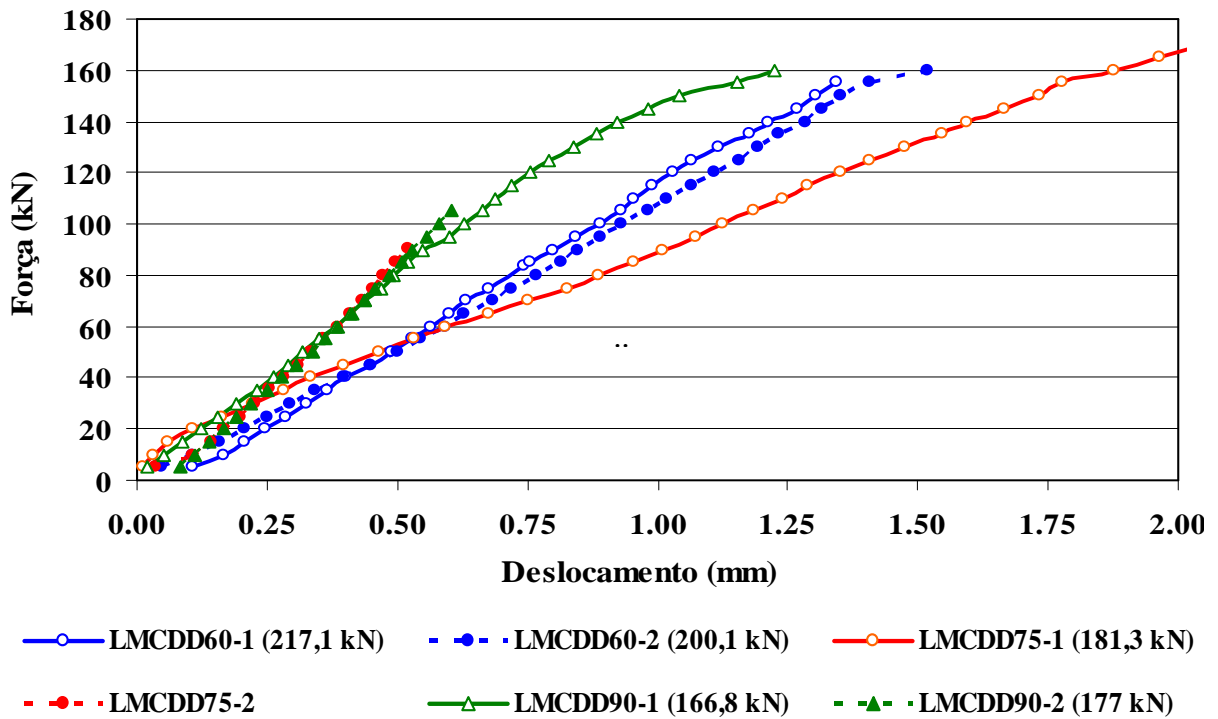


Figura 4.7. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto com dentes duplos.

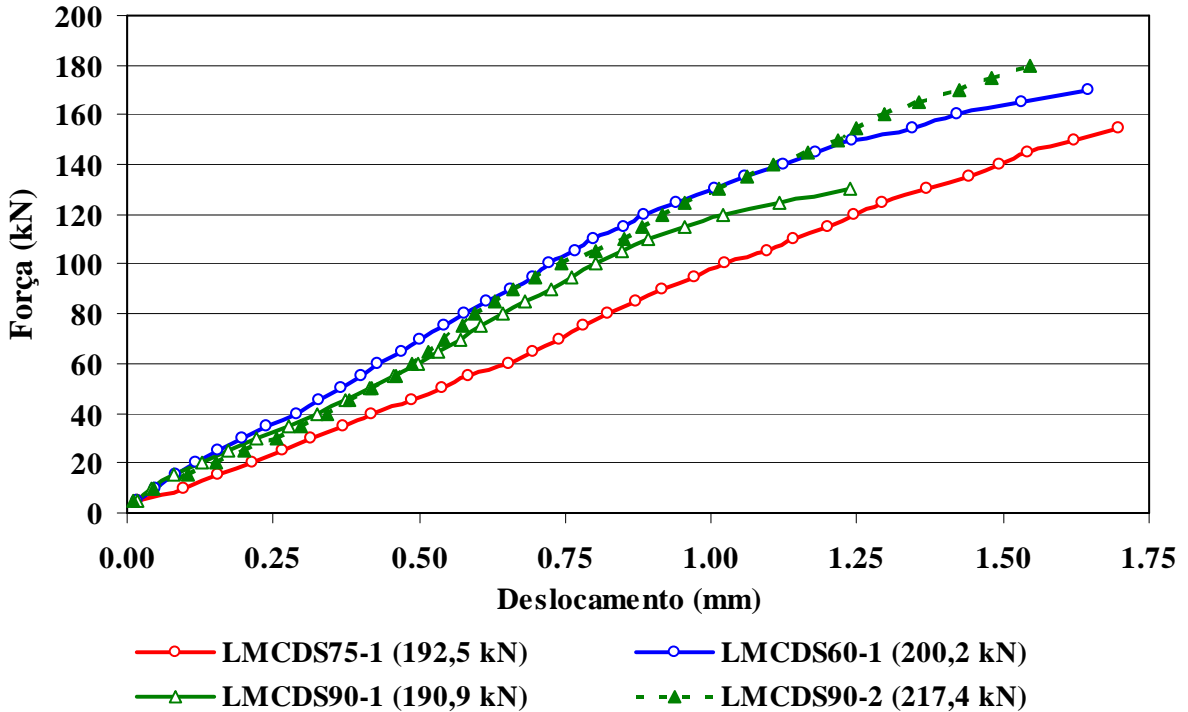


Figura 4.8. Curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto com dentes simples.

Nas Figuras 4.9 a 4.11 estão representadas, para ligações com dentes duplos, as curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de correlação e de obtenção das rigidezes.

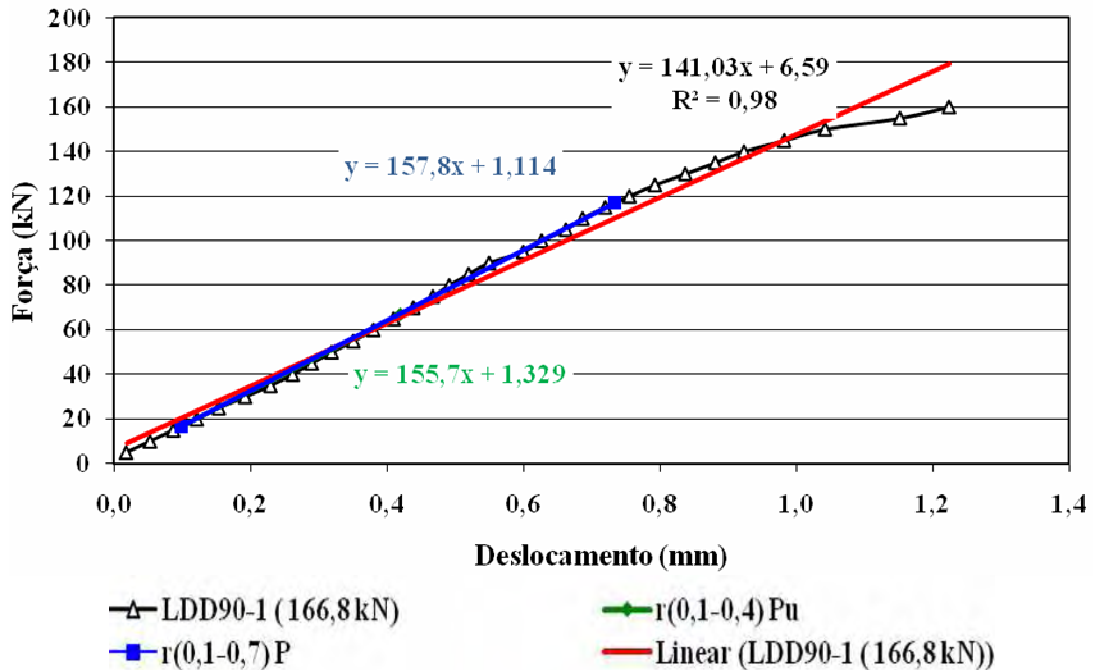


Figura 4.9. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a  $90^0$ , LMCDD90, CP 1,  $P_u = 166,8$  kN.

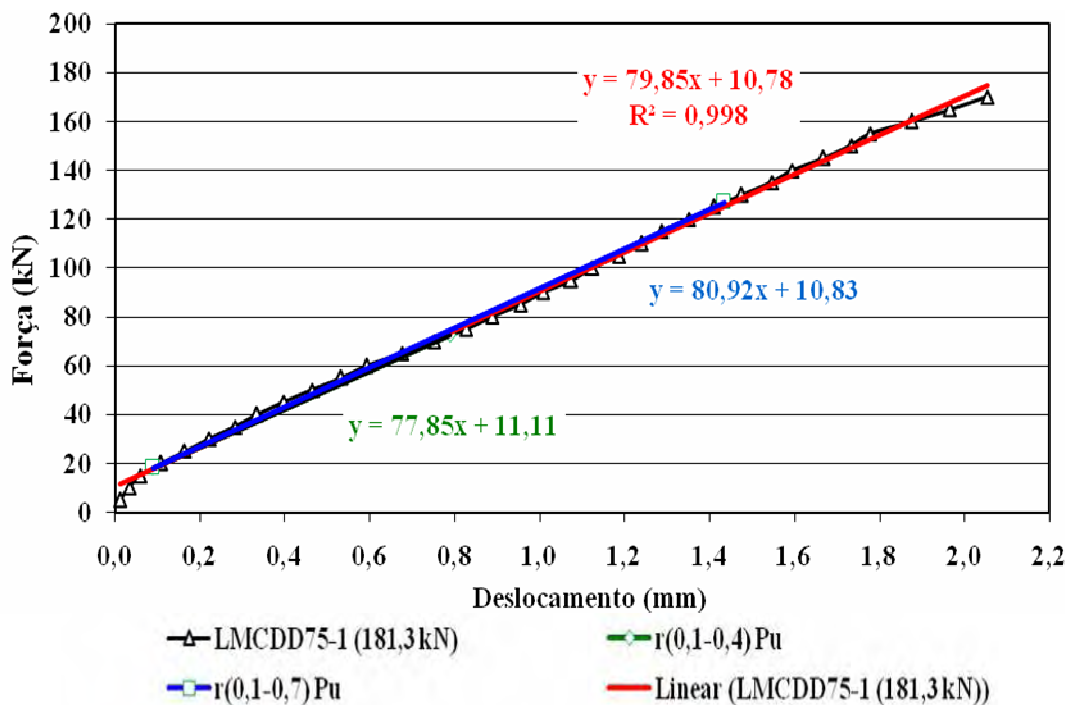


Figura 4.10. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a  $75^0$ , LMCDD75, CP 1,  $P_u = 181,3$  kN.

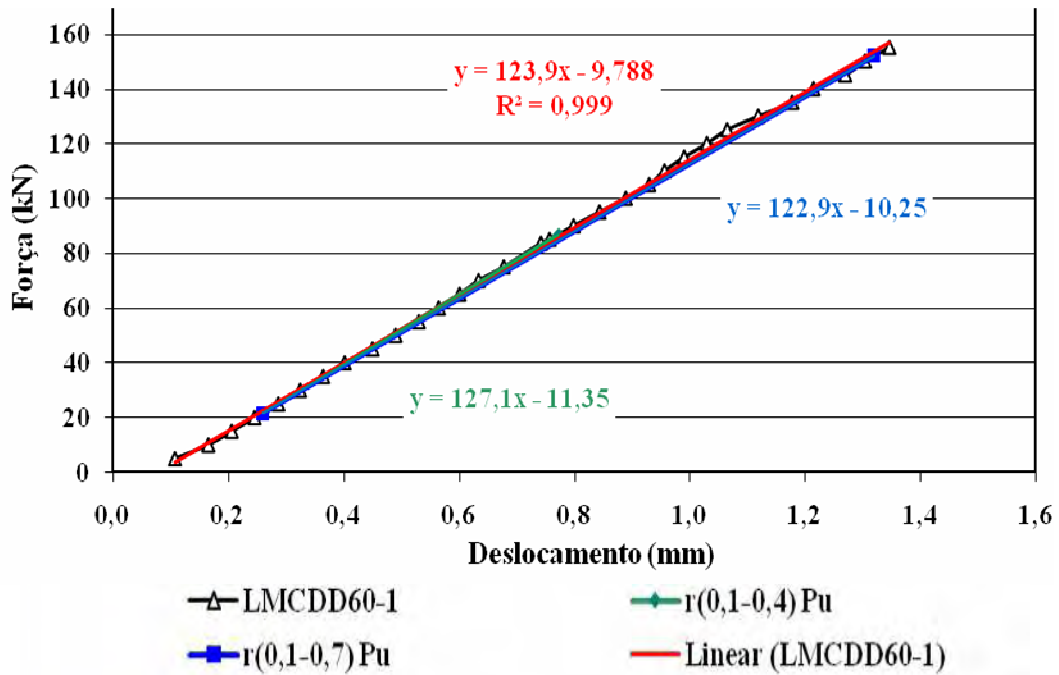


Figura 4.11. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a  $60^\circ$ , LMCDD60, CP 1,  $P_u = 217,1$  kN.

Nas Figuras 4.12 a 4.14 estão representadas, para ligações com dentes simples, as curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de correlação e de obtenção das rigidezes.

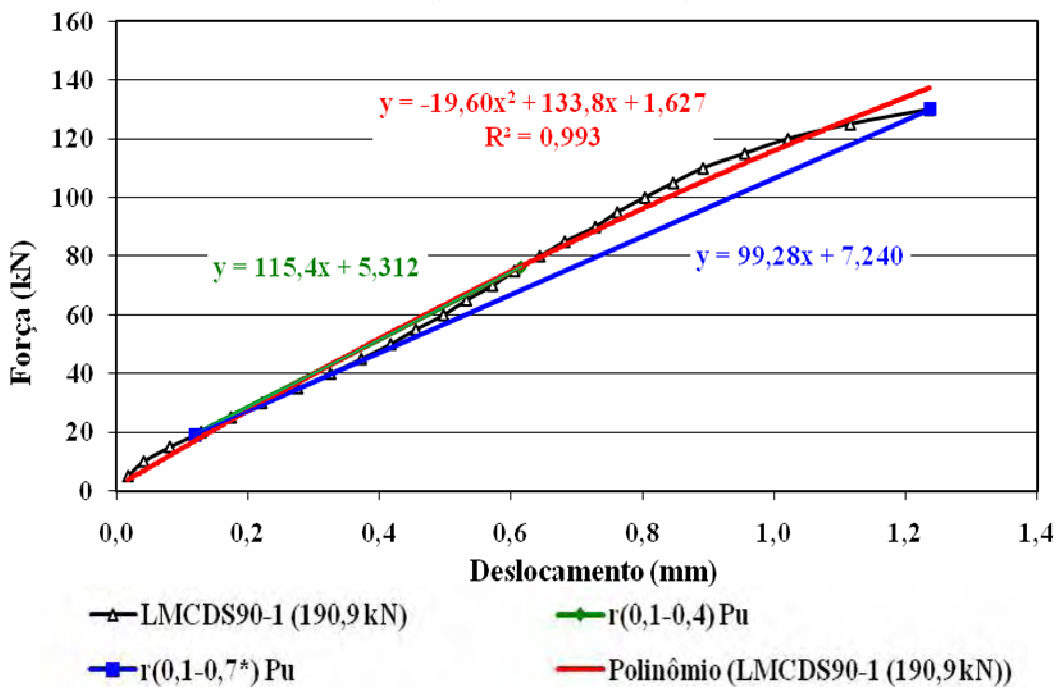


Figura 4.12. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a  $90^\circ$ , LMCDS90, CP 1,  $P_u = 190,9$  kN.

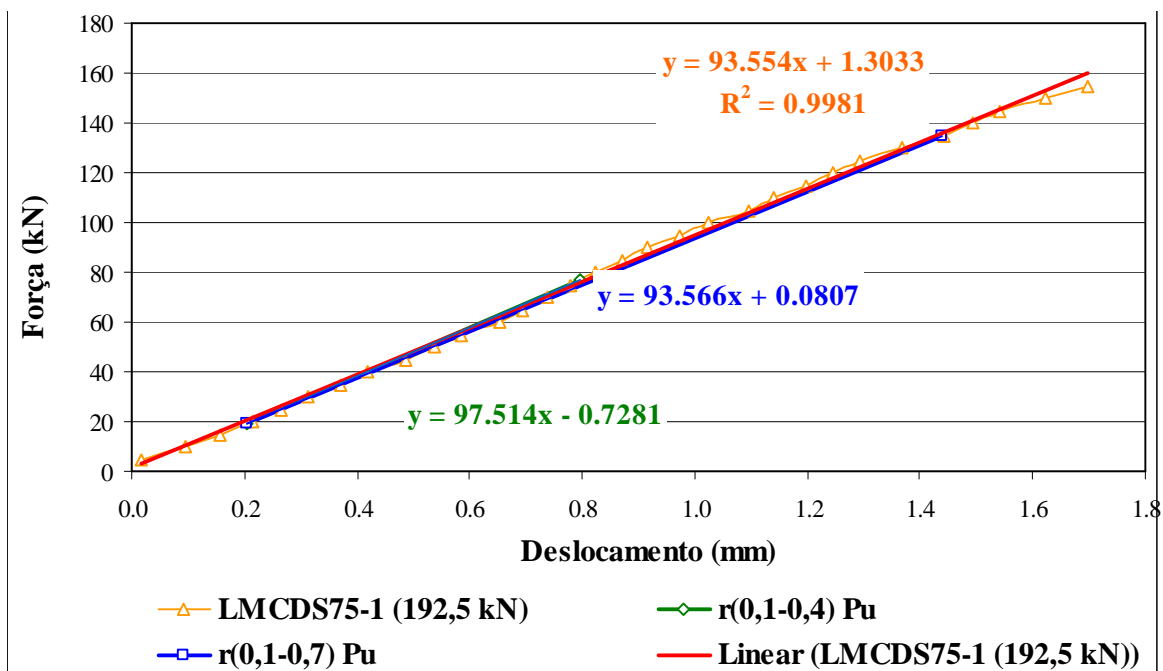


Figura 4.13. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 75°, LMCDS75, CP 1, Pu = 192,5 kN.

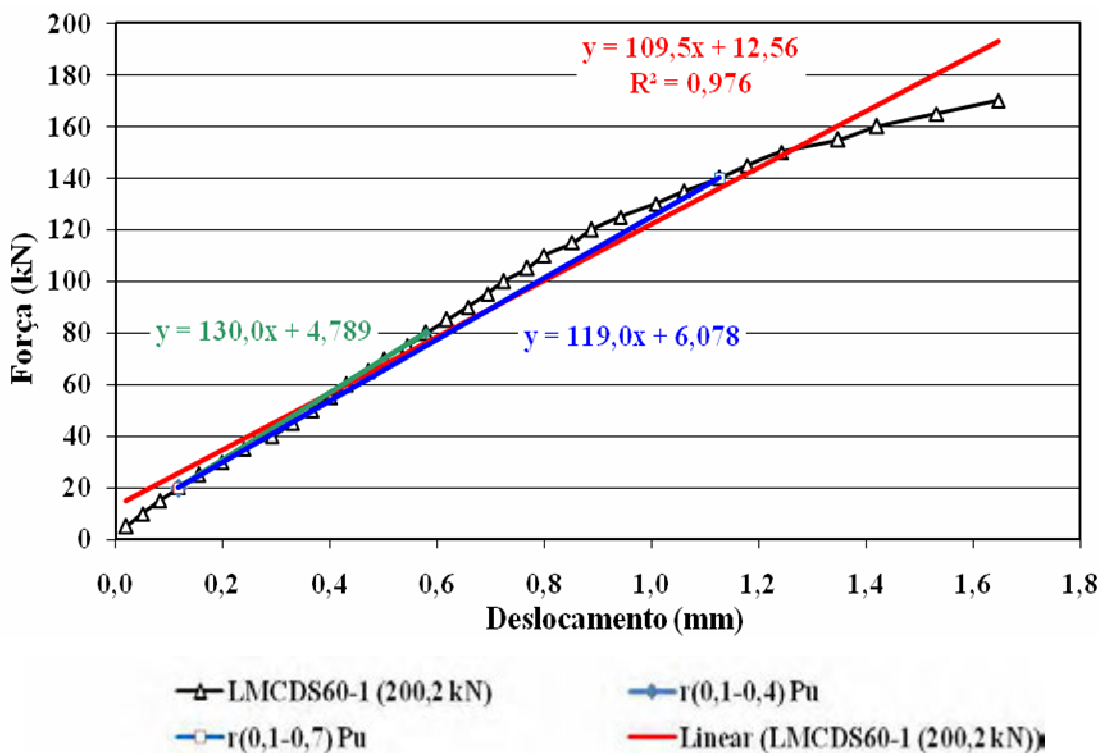
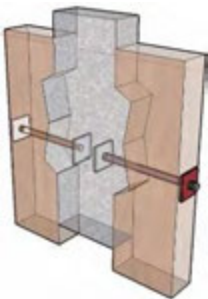
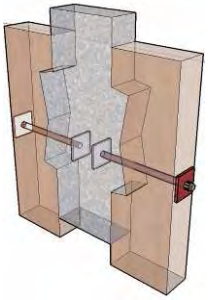
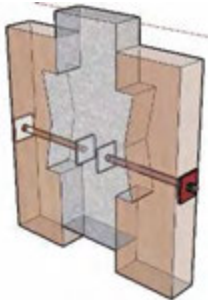


Figura 4.14. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a 60°, LMCDS60, CP 1, Pu = 200,2 kN.

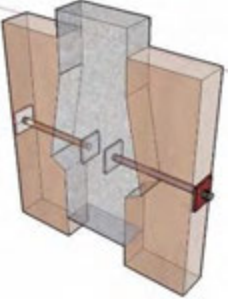
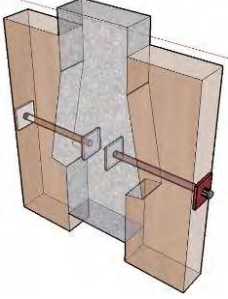
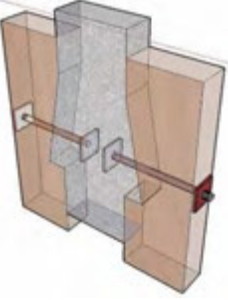
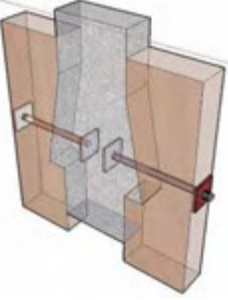
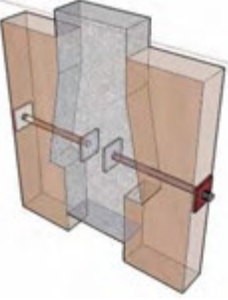
Na Tabela 4.4, são apresentadas as resistências ( $P_u$ ) e as rigidezes  $K_s$  e  $K_u$  obtidas para os conectores de concreto com dentes duplos. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores obtidos para as resistências ( $P_u$ ) e para as rigidezes  $K_s$  e  $K_u$ , para os conectores de concreto com dentes simples.

Tabela 4.4. Resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) para ligações madeira-concreto com conectores de concreto com dentes duplos.

Esquema	Parâmetro / Corpo-de-prova	$P_u$ (kN)	$K_s$ (kN/mm)	$K_u$ (kN/mm)	$K_u/K_s$
	LMCDD60-1	217,1	127,1	122,9	96,7
	LMCDD60-2	200,1	107,0	111,2	103,9
	Média	208,6	117,1	117,0	100,3
	LMCDD75-1	181,3	77,9	80,92	103,9
	LMCDD75-2	147,5	185,0	186,4	100,8
	Média	164,4	131,4	133,6	102,4
	LMCDD90-1	166,8	155,7	157,8	101,3
	LMCDD90-2	177,0	185,4	193,4	104,3
	Média	171,9	170,6	175,6	102,8

Ex: LMCDD60-1.= Ligação madeira-concreto dente duplo a 60°, corpo de prova 1.

Tabela 4.5. Resistências ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) para ligações madeira-concreto com conectores com dentes simples.

Esquema	Parâmetro / Corpo-de-prova	$P_u$ (kN)	$K_s$ (kN/mm)	$K_u$ (kN/mm)	$K_u/K_s$
	LMCDS60-1	200,2	130,0	119,0	91,5
	LMCDS75-1	192,5	97,5	93,6	96,0
	LMCDS90-1	190,9	115,4	99,3	86,0
	LMCDS90-2	217,4	138,4	122,8	88,7
	Média	204,2	126,9	111,0	87,4

Ex: LMCDS60-1.= Ligação madeira-concreto dente simples a 60°, corpo de prova 1.

Nessas ligações pode ser notado nitidamente que as rupturas ocorreram por esmagamento das bielas comprimidas de concreto que se formaram a partir das forças transmitidas pelas faces dos entalhes na madeira, com ocorrência de acentuada fissuração transversal da peça de concreto, limitada pelo trabalho à tração das barras transversais.

Nas Figuras 4.15 a 4.18. são apresentados gráficos com o resumo dos resultados dos ensaios das ligações madeira-concreto com conectores de concreto de dentes duplos e de dentes simples, respectivamente.

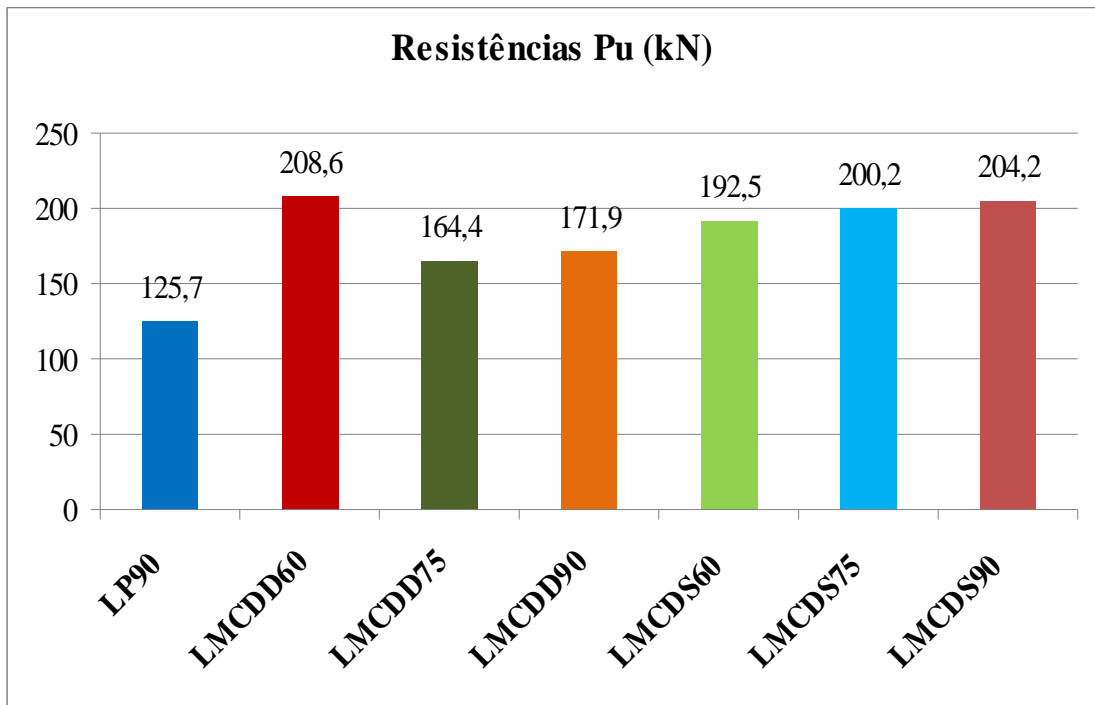


Figura 4.15. Representação gráfica das resistências médias ( $P_u$ ) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a  $90^\circ$ .

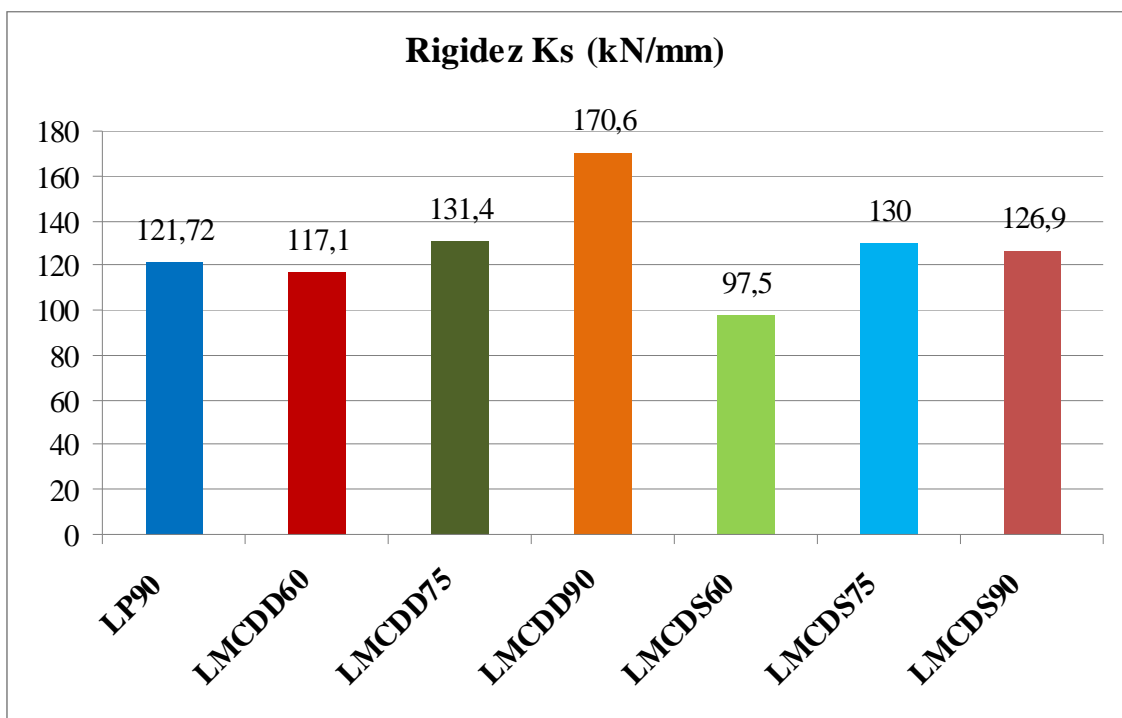


Figura 4.16. Representação gráfica das rigidez de serviço médias ( $K_s$ ) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a  $90^\circ$ .

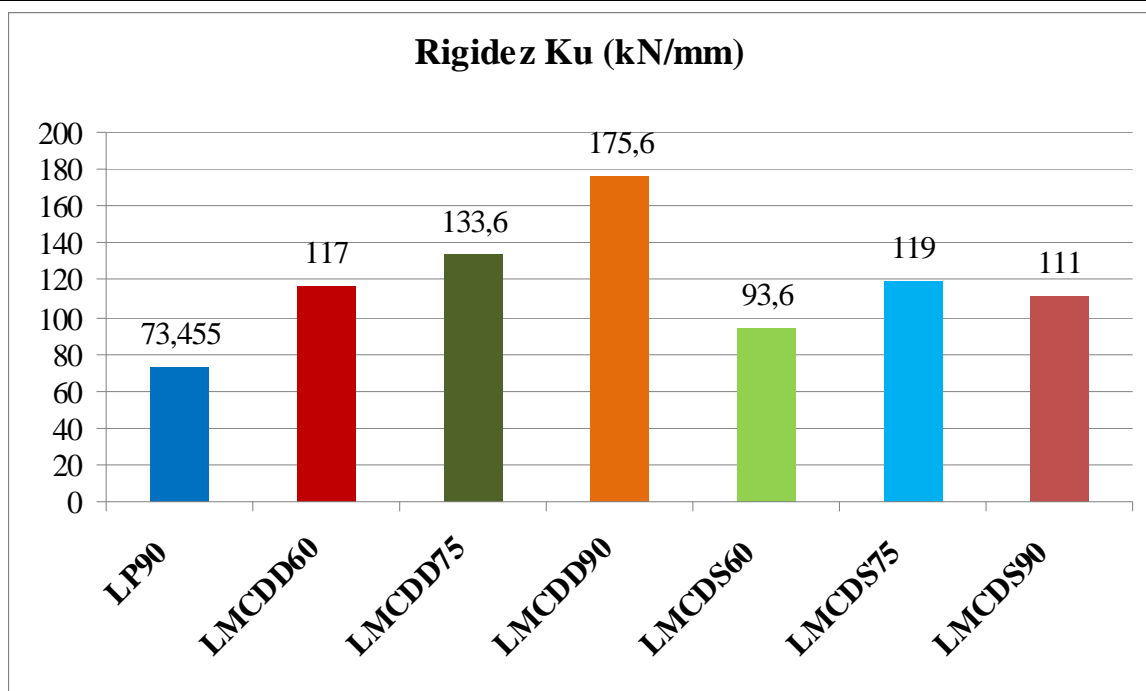


Figura 4.17. Representação gráfica das rigidezes últimas médias ( $K_u$ ) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a  $90^\circ$ .

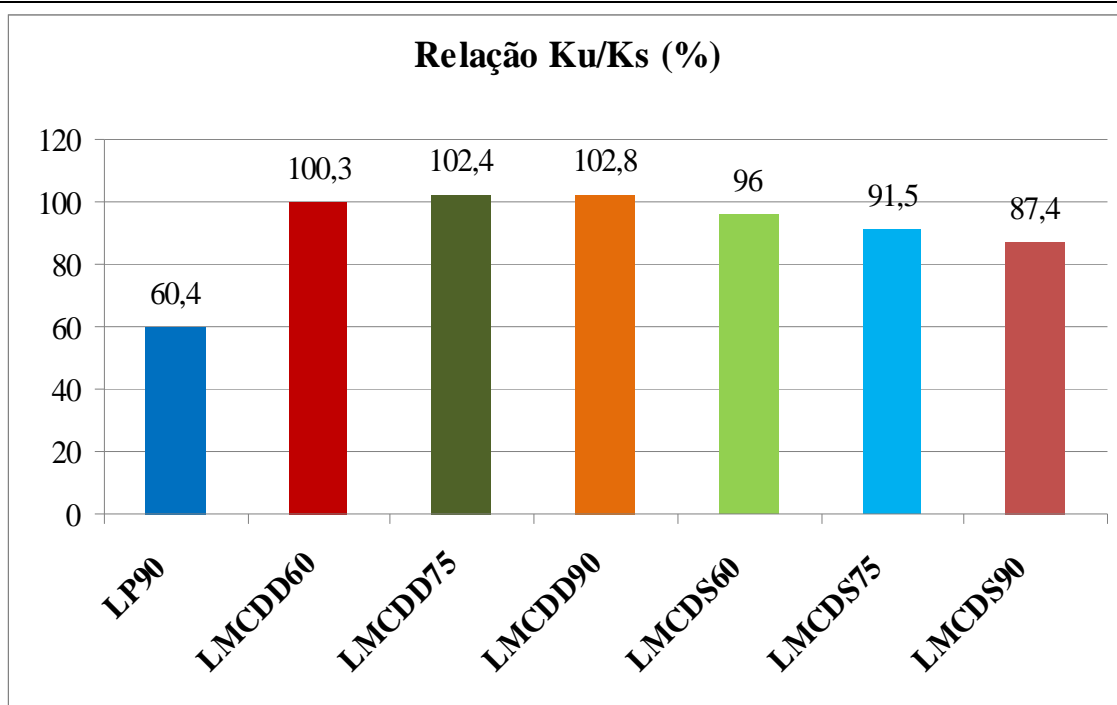


Figura 4.18. Representação gráfica das relações de rigidezes médias ( $K_u/K_s$ ) das ligações madeira-concreto com conectores de concreto e com pinos a  $90^\circ$ .

Embora, novamente, a execução de no máximo dois ensaios para cada diferente geometria estudada não permita uma análise estatística adequada, os seguintes resultados foram obtidos:

- ocorrência de diferenças não elevadas das resistências das ligações com conectores de concreto com dentes simples;
- ocorrência de maiores diferenças entre as resistências das ligações com conectores com dentes duplos, com maior resistência média obtida para os conectores com face carregada inclinada de  $60^0$ ;
- ocorrência de pequena variação das rigidezes das ligações com conectores de concreto ao longo de todo o carregamento, com diferenças inferiores a 4% entre  $K_s$  e  $K_u$  para conectores com dentes duplos e redução média de 10% de  $K_u$  em relação à  $K_s$ , para conectores de dentes simples;
- as ligações com conectores de concreto com dentes duplos apresentaram um valor médio de rigidez superior aos obtidos com os conectores de dentes simples, particularmente importante nas ligações com conectores a  $90^0$  ;
- ocorrência de maior rigidez para os conectores a  $90^0$  em relação aos demais, tanto para dentes duplos quanto simples;

Nos ensaios realizados, os conectores de concreto estavam livres para se deformarem na direção transversal ao plano de ensaio. Em condições reais de trabalho de vigas T mistas madeira-concreto ocorre uma continuidade da laje nesta direção transversal, que pode ser capaz influenciar modo importante a resistência do concreto nestas regiões.

Essa influência é positiva quando a continuidade da laje, a presença de armadura e a ocorrência de esforços transversais forem capazes de confinar o concreto dos conectores. Por outro lado, essa influência pode ser negativa quando houver predominância de esforços transversais que tracionem ainda mais o concreto nesta direção.

Embora não perfeitamente caracterizada, pode-se observar influência da inclinação dos entalhes, inicialmente pela geração de maior área de contato entre a madeira e o concreto, que permite melhor distribuição da força transmitida, aumentando a resistência do dente de concreto. Com maior inclinação dessas forças em relação às fibras da madeira, ocorre perda de rigidez da madeira, que se reflete na rigidez da ligação como um todo, gerando também um maior esforço de tração no elemento transversal de aço, pelo comportamento de bielas e tirantes, de fundamental importância neste tipo de conector.

O carregamento do dente duplo produz um efeito de cunha que amplia a força transversal de abertura da ligação, produzindo também maior confinamento no concreto, capaz de explicar o ganho de rigidez em relação às ligações com dentes simples

Efetuada uma comparação, em termos gerais, entre ligações madeira-concreto com conectores de pinos a  $90^0$  e conectores de concreto, os seguintes pontos podem ser observados:

- ocorrência de uma resistência média significativamente maior das ligações com conectores de concreto em relação aos conectores com pinos a  $90^0$  (LMCP90), com ganhos médios de 30% a 66%;
- reduzida diferença da rigidez média de serviço ( $K_s$ ) das ligações com conectores de concreto em relação aos conectores com pinos  $90^0$  (LMCP90), com exceção das ligações com dentes duplos a  $90^0$  (LMCDD90), que apresentaram ganho médio de rigidez de 40%;
- como as ligações com pinos a  $90^0$  (LP90) apresentaram perda acentuada de rigidez última ( $K_u$ ) em relação à de serviço ( $K_s$ ) e as ligações com conectores de concreto apresentaram reduzida diferença entre ( $K_u$ ) e ( $K_s$ ), observou-se grande diferença de rigidez média última ( $K_u$ ) das ligações de conectores de concreto em relação às com pinos a  $90^0$  (LMCP90), com ganho da ordem de 140% para ligação com dentes duplos a  $90^0$  (LMCDD90).

#### 4.4. LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS CONECTORES DE BARRAS EM ARCO E DE CONCRETO

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores médios de resistência ( $P_u$ ) e de rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ), para conectores de barra de aço e conectores de dentes de concreto. Nas Figuras 4.19 a 4.22 são apresentados gráficos comparativos entre os resultados obtidos para os conectores de barra e os conectores de concreto para ligação madeira-concreto.

Tabela 4.6. Valores médios de resistência ( $P_u$ ) e rigidezes ( $K_s$ ) e ( $K_u$ ) das ligações entre peças de concreto e de madeira.

Ligação / Parâmetro	LMCDD	LMCDS	LMCPA	LMCP90
$P_u$ (kN)	184,5	200,3	131,2	125,7
$K_s$ (kN/mm)	143,0	120,4	163,1	121,7
$K_u$ (kN/mm)	144,0	108,7	119,2	
$K_u/K_s$	1,01	0,90	73,5	0,60

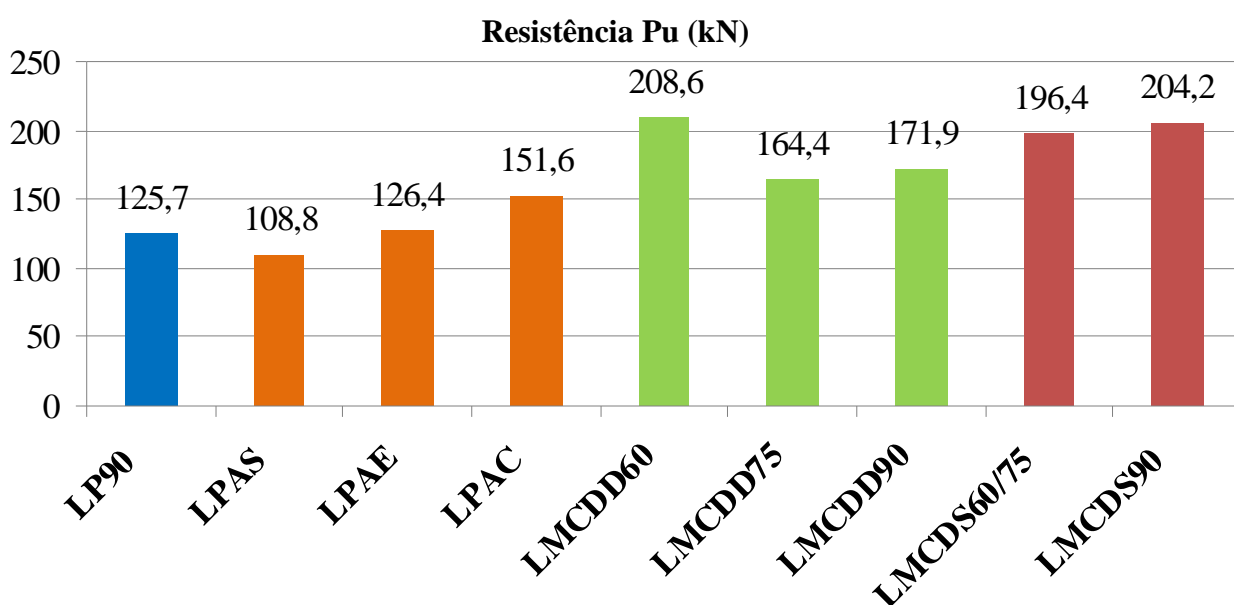


Figura 4.19. Resistências médias ( $P_u$ ) das ligações madeira-concreto.

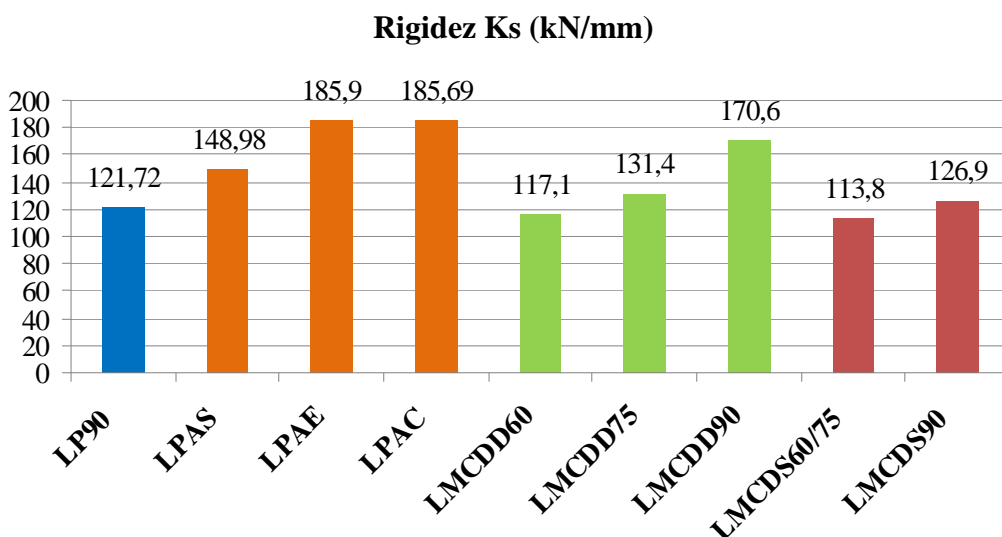


Figura 4.20. Rigidezes médias de serviço (Ks) das ligações madeira-concreto.

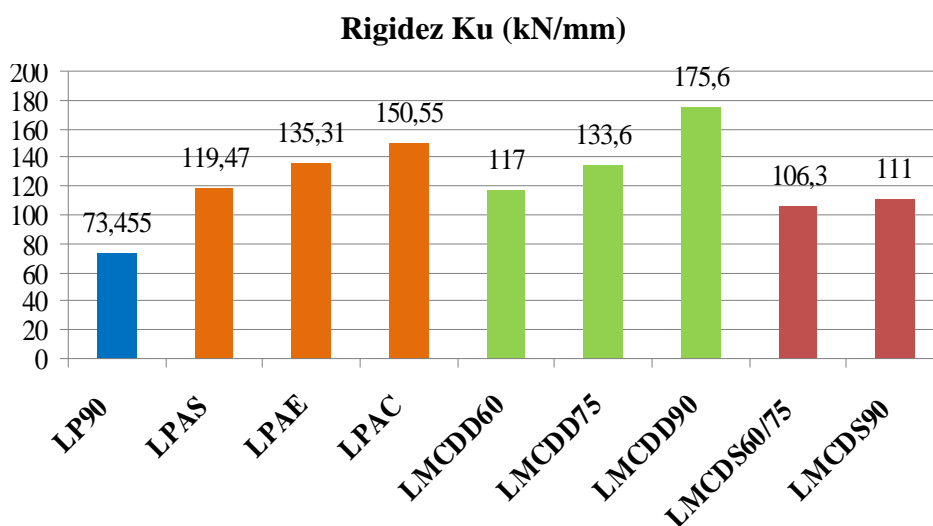


Figura 4.21. Rigidezes últimas médias (Ku) das ligações madeira-concreto.

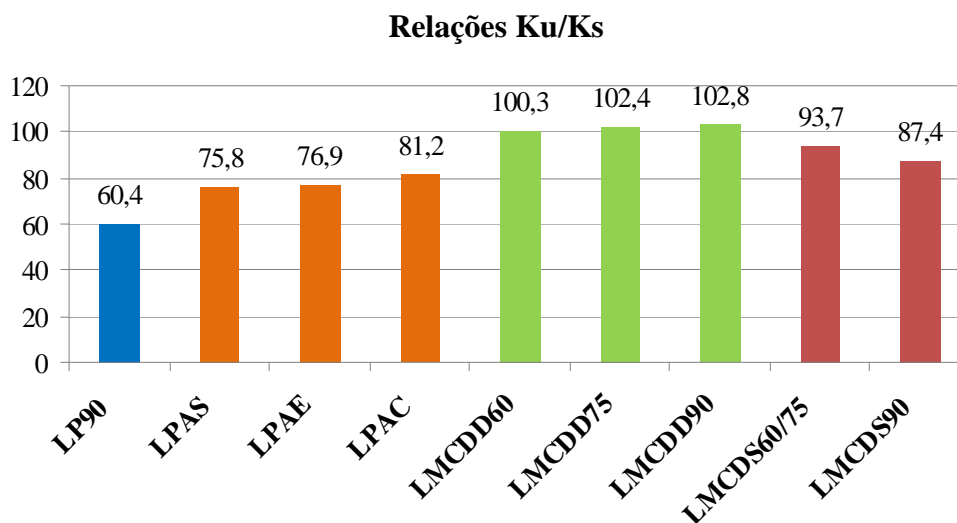


Figura 4.22. Relações de rigidezes médias (Ku/Ks) das ligações madeira-concreto.

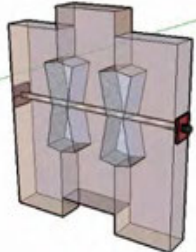
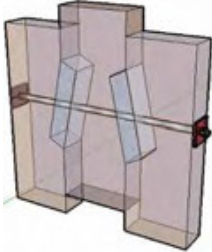

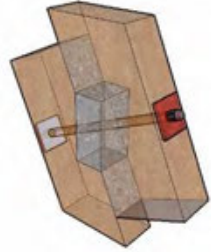
Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.5 e as Figuras 4.19 a 4.22, os seguintes comportamentos foram observados:

- as resistências das ligações com conectores de concreto foram significativamente maiores que os obtidos com barras em arco com ganhos superiores a 40% para conectores de concreto com dentes duplos e a 50% para dentes simples;
- os conectores de pinos em arco apresentaram maiores resultados médios de rigidez de serviço ( $K_s$ ) em relação aos conectores de dentes de concreto;
- para a rigidez última ( $K_u$ ), a média obtida para os conectores de barra de aço em arco foi intermediária aos valores médios obtidos para os conectores de concreto, isto é, superior ao valor obtido para os dentes simples e inferior aos dentes duplos.

#### 4.5. LIGAÇÃO DE PEÇAS DE MADEIRA COM CONECTORES DE CONCRETO

Para maior facilidade de apresentação dos resultados e melhor entendimento dos mesmos, utiliza-se para as ligações entre peças de madeira com conectores de concreto a nomenclatura definida na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Nomenclatura e descrição das ligações entre peças de madeira com conectores de concreto.

Ligação				
	<b>LMDD</b>	<b>LMDS</b>	<b>L2PMDS-BS</b>	<b>L2PMDS-BR</b>
<b>DESCRIÇÃO</b>	Ligação entre três peças de Madeira com conectores de concreto de dentes duplos.	Ligação entre três peças de madeira com conectores de concreto de dentes simples.	Ligação entre duas peças de madeira com conectores de dentes simples e barras coladas.	Ligação entre duas peças de madeira com conectores de dentes simples e barras rosqueadas.

Outra diferença entre os conectores foi definida pela inclinação da face carregada em relação à interface. Nas ligações entre três peças de madeira foram de  $90^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  e  $60^{\circ}$ . Nas ligações entre duas peças estas inclinações foram de  $75^{\circ}$  e  $60^{\circ}$ , ou alternativamente, com inclinações medidas em relação à normal à interface, respectivamente de,  $15^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ .

As curvas força x deslocamento relativo obtidas nos ensaios de ligações entre três peças de madeira são apresentadas na Figura 4.23 e entre duas peças de madeira nas Figuras 4.24 e Figura 4.25.

Nas Figuras 4.26 e Figura 4.27 são apresentadas as curvas força x deslocamento relativo e as retas de correlação e de obtenção das rigidezes  $K_s$  e  $K_u$ , para ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com, respectivamente, três peças e duas peças de madeiras.

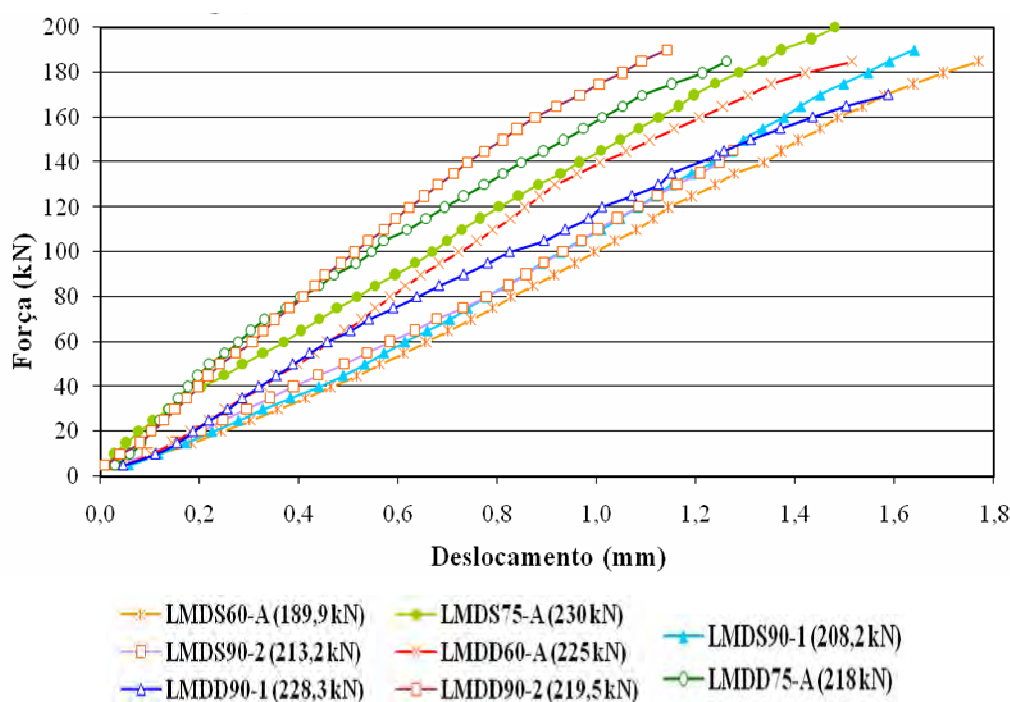


Figura 4.23. Curvas força x deslocamento obtidas nos ensaios de ligações com conectores de concreto entre três peças de madeira.

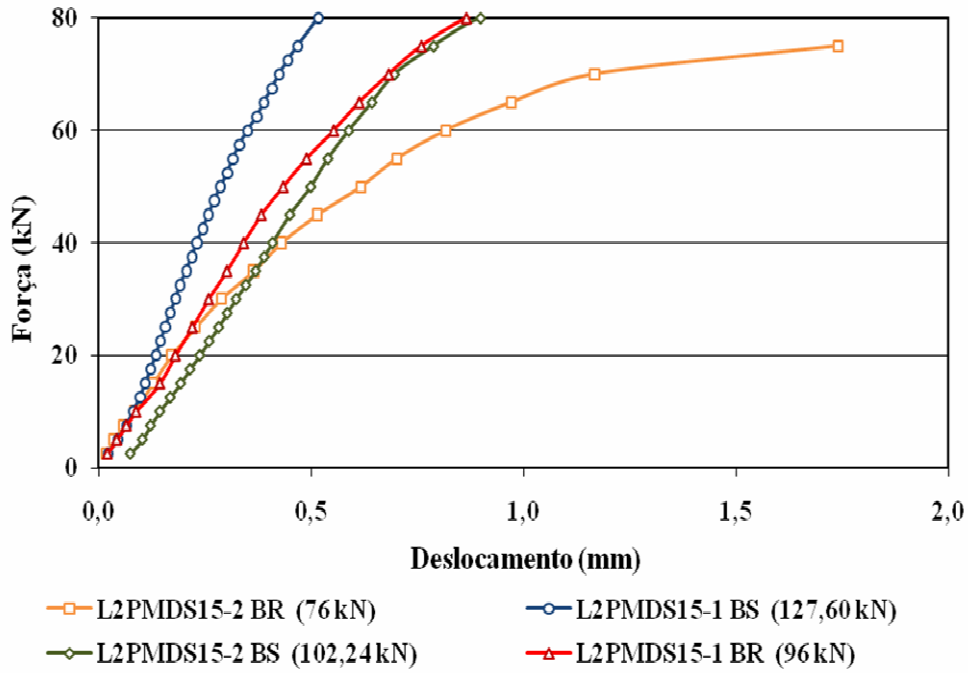


Figura 4.24. Curvas força x deslocamento relativo de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto com dentes inclinados a  $15^{\circ}$ .

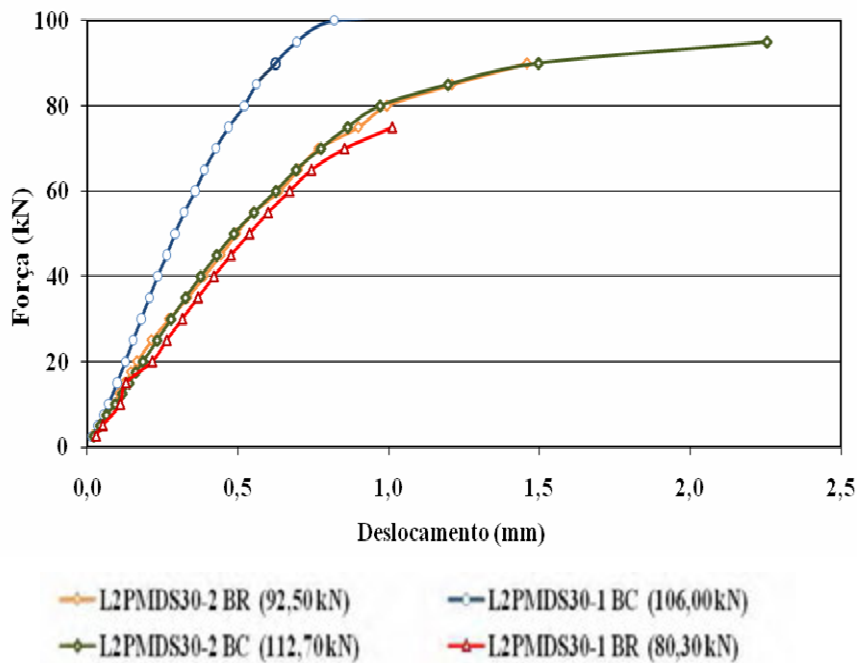


Figura 4.25. Curvas força x deslocamento relativo de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto com dentes inclinados a  $30^{\circ}$ .

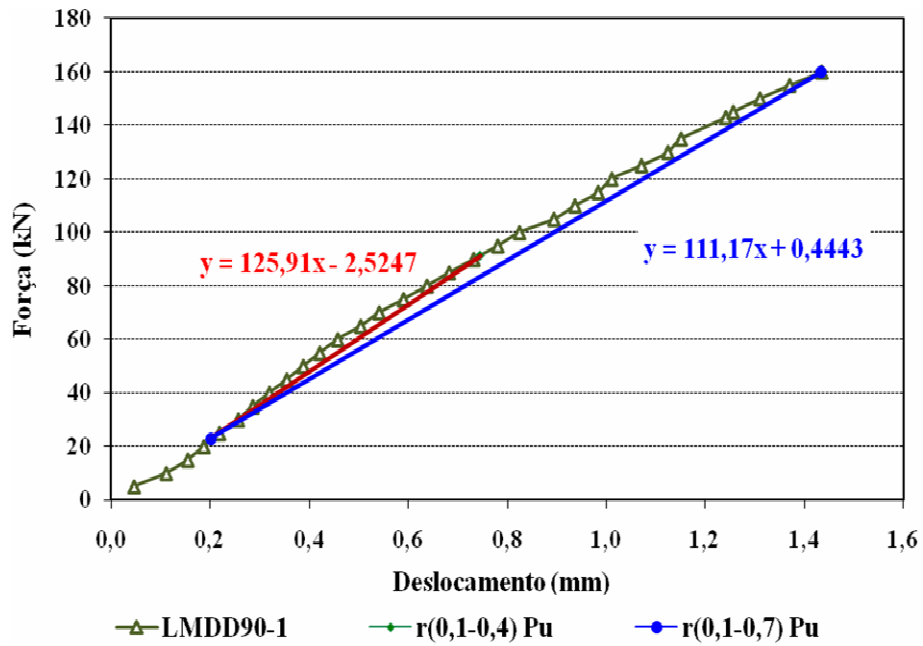


Figura 4.26. Curva força x deslocamento e retas de correlação e de definição das rigidezes, obtidas de ensaios de ligação entre três peças de madeira e conectores de concreto com dentes duplos a  $90^{\circ}$ , LMM90, CP 1,  $P_u = 228,3$  kN.

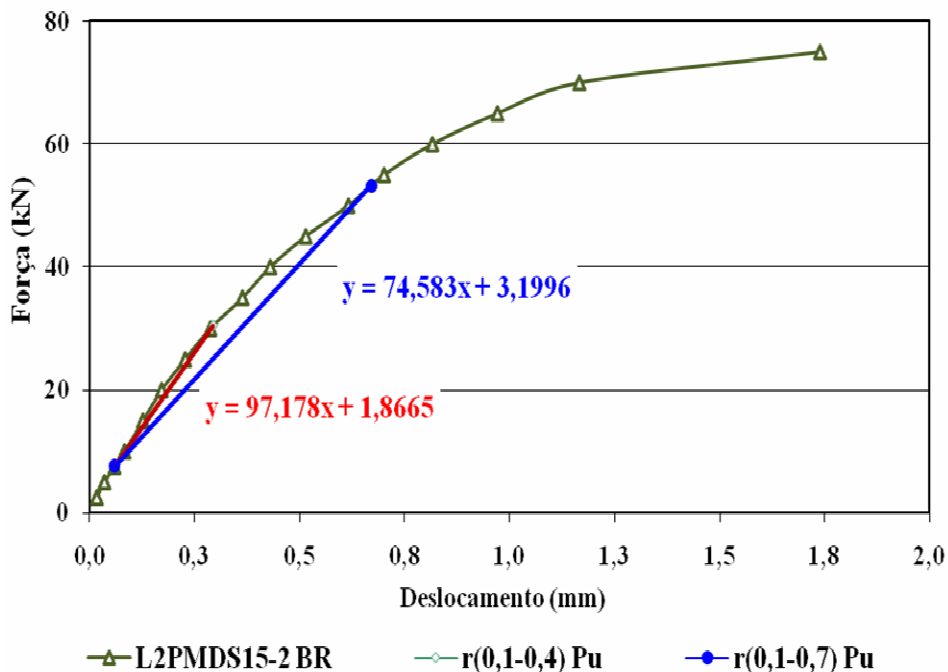


Figura 4.27. Curva força x deslocamento e retas de definição das rigidezes de ensaios de ligação entre duas peças de madeira e conectores de concreto com dentes a  $15^{\circ}$ , com barra transversal rosqueada, L2PMDS15-BR, CP 2,  $P_u = 76$  kN.

Os resultados de resistência ( $P_u$ ) e rigidez para ensaios de ligações com três peças de madeira são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9 e com duas peças na Tabela 4.10.

Tabela 4.8. Resultados de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto com dentes duplos (LMDD)

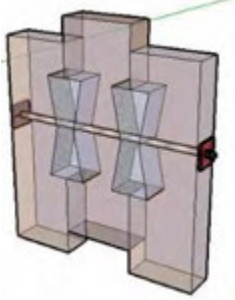
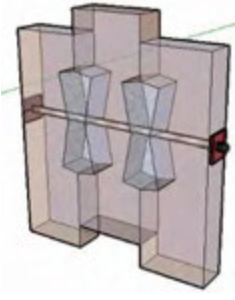
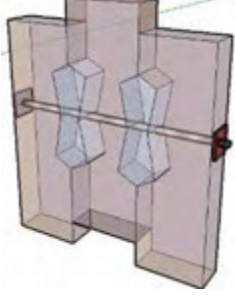
Ligação	Ensaio (CP)	$P_u$ (KN)	$K_s$ (kN/mm)	$K_u$ (kN/mm)	$K_u/K_s$ (%)
	LMDD90-1	228,3	125,91	111,17	88,3
	LMDD90-2	219,5	198,95	183,05	92,0
	Média	223,9	162,43	147,11	90,2
	LMDD75	225	151,18	137,51	91,0
	LMDD60	218	188,68	154,61	81,9

Tabela 4.9. Resultados de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto com dentes simples (LMDS)

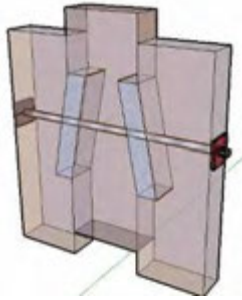
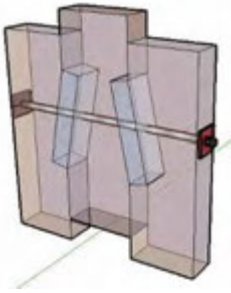
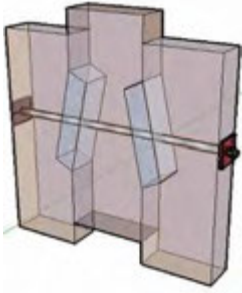
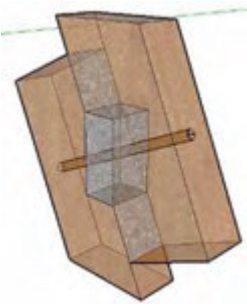
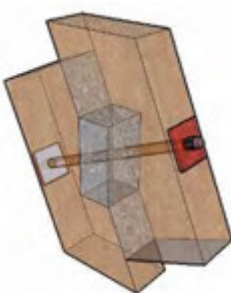
Esquema	Ensaio (CP)	Pu (KN)	Ks (kN/mm)	Ku (kN/mm)	Ku/Ks (%)
	LMDS90-1	208,2	109,68	120,02	109,4
	LMDS90-2	213,2	105,48	116,53	110,5
	Média	210,7	107,58	118,275	110,0
	LMDS75	189,9	133,85	132,92	99,3
	LMDS60	230	100,58	110,61	110,0

Tabela 4.10. Resultados de ligações com conectores de concreto entre duas peças de madeira.

Barras coladas					
Ensaio (CP)	Pu (kN)	Ks (kN/mm)	Ku (kN/mm)	Ku/Ks	
	BC 15-1	127,6	195,95	182,85	0,93
	BC 15-2	102,4	113,56	105,83	0,93
	Média	115,0	154,75	144,34	0,93
	BC 30-1	106,0	182,59	163,82	0,90
	BC 30-2	112,7	104,17	80,29	0,77
	Média	109,3	143,38	122,05	0,83
Média geral	112,2	149,1	133,2		
Barras rosqueadas					
Ensaio (CP)	Pu (kN)	Ks (kN/mm)	Ku (kN/mm)	Ku/Ks	
	BR 15-1	96,0	117,77	102,90	0,87
	BR 15-2	76,0	97,18	74,58	0,77
	Média	86,0	107,47	88,74	0,82
	BR 30-1	80,3	88,85	90,10	1,01
	BR 30-2	92,5	100,29	89,74	0,89
	Média	86,4	94,57	89,92	0,95

Nas Figuras 4.28 são apresentados gráficos com os resultados médios dos ensaios das ligações de três peças de madeira com conectores de concreto.

Na Figura 4.29 são apresentados gráficos com os resultados médios dos ensaios das ligações de duas peças de madeira.

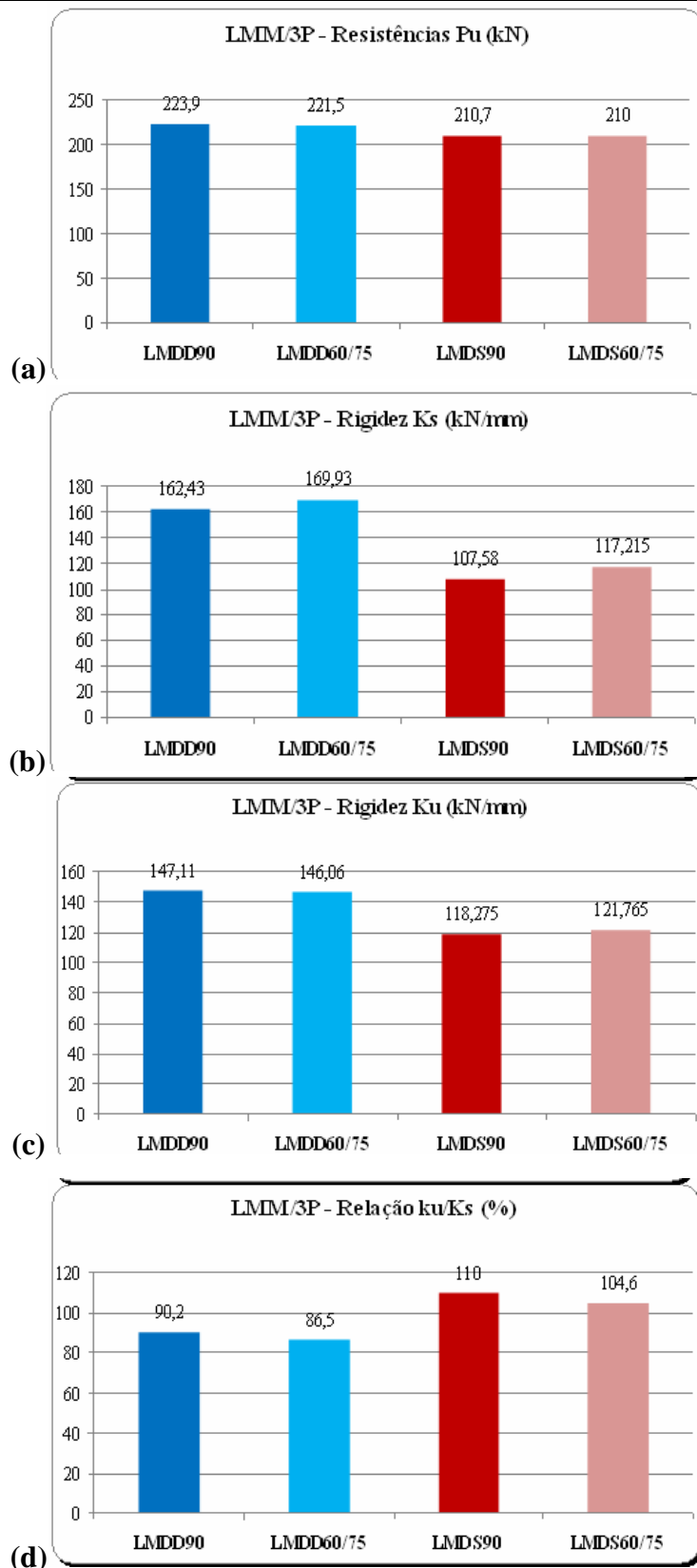


Figura 4.28. Resultados de ensaios de ligações entre três peças de madeira com conectores de concreto: a) resistência  $P_u$  (kN); b) rigidez  $K_s$  (kN/mm); c) rigidez  $K_u$  (kN/mm); d) Relação  $K_u/K_s$

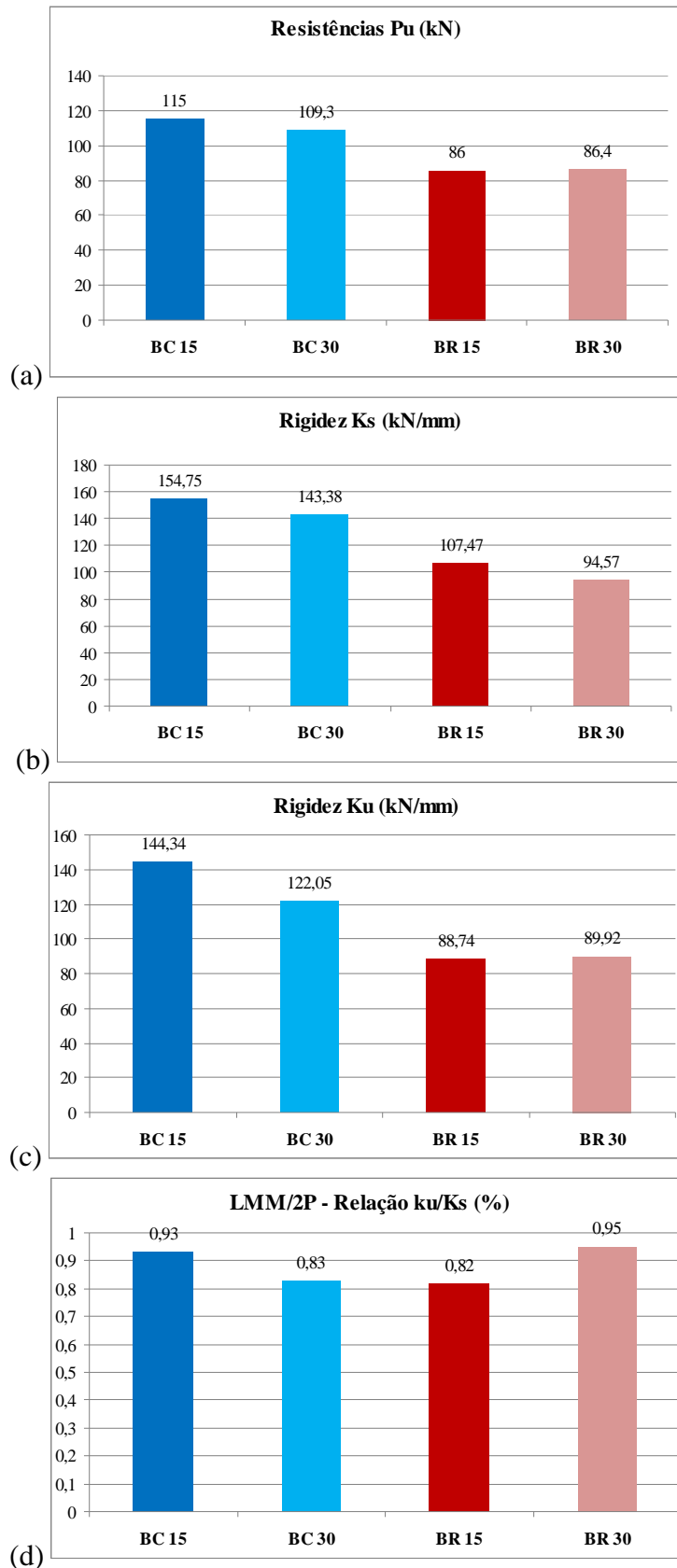


Figura 4.29. Resultados de ensaios de ligações entre duas peças de madeira com conectores de concreto: a) resistência  $P_u$  (kN); b) rigidez  $K_s$  (kN/mm); c) rigidez  $K_u$  (kN/mm); d) Relação  $K_u/K_s$

Embora, novamente, o reduzido número de repetições dos ensaios de ligação com conectores de concreto não permita uma análise estatística qualificada, os seguintes resultados podem ser destacados:

a) Para as ligações com conectores de concreto entre três peças de madeira:

- as resistências ( $P_u$ ) apresentaram reduzidas variações;
- nas ligações com dentes duplos, as rigidezes de serviço ( $K_s$ ) e as rigidezes últimas ( $K_u$ ) apresentaram variações não elevadas, com perdas de 8% a 18% para a rigidez última ( $K_u$ ) em relação à rigidez de serviço ( $K_s$ );
- para as ligações com dentes simples as rigidezes de serviço ( $K_s$ ) e as rigidezes últimas ( $K_u$ ) também apresentaram variações reduzidas, com ganhos da ordem de 10% para a rigidez última ( $K_u$ ) em relação à rigidez de serviço ( $K_s$ ), com exceção da ligação LMMDS75, cujos valores correspondentes foram praticamente iguais;
- as rigidezes de serviço ( $K_s$ ) e última ( $K_u$ ) das ligações com dentes duplos foram significativamente superiores às rigidezes obtidas com dentes simples, com ganhos superiores a 45% para  $K_s$  e superiores a 20% para  $K_u$ .

b) Para as ligações com conectores de concreto entre duas peças de madeira:

- as resistências e rigidezes apresentaram variações reduzidas para o mesmo tratamento em relação ao tipo de barra transversal;
- as resistências médias com barras rosqueadas foram da ordem de 75% das obtidas com as barras coladas;
- as rigidezes médias com barras rosqueadas atingiram valores entre 60 e 75% dos valores obtidos com as barras coladas;
- as resistências médias obtidas com duas peças de madeira e emprego de barra colada foram próximas aos valores individuais obtidos nos ensaios com três peças de madeira;
- as rigidezes obtidas nos ensaios com duas peças de madeira e barras coladas foram significativamente superiores aos valores obtidos com três peças de madeira, tanto com dentes simples quanto com dentes duplos:

- Para  $K_s$  foram obtidos valores superiores a 69% dos obtidos com conectores com dentes duplos e, valores superiores a 145% para os obtidos com conectores de dentes simples;

- Para  $K_u$  foram obtidos valores superiores a 67% aos obtidos com conectores com dentes duplos e valores superiores a 100% para os obtidos com conectores de dentes simples.

Estes resultados podem ser atribuídos à maior rigidez transversal promovida pela colagem da barra de aço nervurada, em relação à obtida com o emprego de barra rosqueada ancorada nas faces externas do corpo-de-prova.

Os ensaios realizados com corpos-de-prova de dois elementos de madeira podem, possivelmente, representar melhor o comportamento de conectores empregados em vigas submetidas a cargas transversais. Nestes casos são formados fluxos de tensões principais inclinados em relação ao eixo da viga e os conectores de concreto podem ser posicionados de forma a transmitirem melhor as bielas decorrentes da concentração dos fluxos de compressão, que passam a exigir também um maior esforço de tração nas barras de aço dispostas transversais ou inclinadas na direção dos os fluxos das tensões de tração.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

Efetuuou-se neste trabalho um estudo experimental, de caráter exploratório, do comportamento de ligações mistas madeira-concreto e entre peças de madeira, por meio de diferentes tipos de conectores mecânicos. Foram obtidas as resistências e as rigidezes relativas aos estados limites último e de utilização.

Todos os conectores de ligação estudados apresentaram simplicidade de execução e bom desempenho mecânico para os ensaios realizados, com carregamento crescente monotônico quase-estático, com obtenção de valores elevados de resistência e rigidez.

O comportamento das ligações entre peças de madeira e peças de concreto com conectores de barra de aço apresentaram forte não linearidade, com perda progressiva de rigidez, fenômeno mais acentuado nos conectores de pinos a  $90^0$ . As rupturas finais destas ligações se deram na peça central de concreto, por efeito combinado de compressão e fendilhamento na região de contato dos conectores com o concreto.

Os processos de ruptura obtidos para as ligações com conectores de concreto, obtidos pelo preenchimento de entalhes preenchidos de concreto, apresentaram processos de ruptura predominantemente frágeis, com perda de rigidez e indícios de comportamento dúctil para menores inclinações das faces dos entalhes em relação às fibras da madeira.

## 5.2. RECOMENDAÇÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Para complementação dos estudos realizados, os seguintes temas de trabalhos podem ser sugeridos:

- realização de um maior número de repetições de ensaios experimentais de ligação para os diferentes conectores estudados, visando uma análise estatística consistente dos resultados;
- realização de ensaios experimentais de ligações entre peças de madeira e peça de concreto com emprego de peça central com maior dimensão transversal e com armaduras transversais simulando um trecho de laje;
- utilização de corpo-de-prova madeira-concreto com dois elementos, com peça de concreto na forma de um trecho de laje, com pequena espessura e maior largura. No caso de ligações com conectores de barra de aço, avaliar a influência do emprego de armaduras transversais junto aos conectores;
- realização de ensaios experimentais para caracterização do comportamento dos conectores de barras de aço em arco, variando os principais parâmetros construtivos: diâmetro das barras de aço, forma dos conectores de arco e resistência do concreto;
- realização de ensaios experimentais para os diferentes conectores estudados com monitoramento dos deslocamentos relativos até a ruptura para caracterização do tipo de ruptura, particularmente importante nas ligações que apresentaram indícios de comportamento dúctil, como nas ligações madeira-concreto com conectores de barra de aço e nas ligações entre peças de madeira com conectores de concreto com dentes mais inclinados em relação às fibras da madeira;
- avaliação experimental do comportamento de ligações madeira-concreto e entre peças de madeira sob carregamentos cíclicos, visando a caracterização do possível efeito de degradação da rigidez;
- avaliação do comportamento de ligações com conectores de concreto com inclinação dos entalhes variando de 0 a 45°;
- avaliação do comportamento das ligações estudadas em vigas isoladas e em sistemas de piso;
- avaliação do comportamento de ligações com os conectores empregados por meio de modelagem numérica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro. 1997.

INTERNATIONAL STANDARD, ISO 68691 Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics, 1983. 4p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Banco de Dados das Madeiras Brasileiras**. (<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/caracteristicas.php?ID=264&caracteristica=191>).

ALVIM, R. C. A resistência dos pilares de madeira compostas. São Paulo. 277p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2002.

BATHON, L. A., GRAF, M. **A continuous wood-concrete-composite system.** In: World Conference on Timber Engineering, 6<sup>th</sup>, Portland, 2000.

BRANCO J. M. G. **Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira – betão.** Dissertação – Universidade do Minho, Lisboa, 2003.

BRAVO, C. G., MARTITEGUI, F. A., RAMOS, L. M., BARRA, R. D. **Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos situados en la cara superior.** Universidad Antonio de Nebrija, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010.

CARRASCO, E. V. M., OLIVEIRA, A. L. C. **Análise do comportamento de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

CARVALHAR, F. C. **Determinação experimental da carga de flambagem e da excentricidade acidental de pilares compostos de madeira.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerai, Belo Horizonte. 2001, 91p.

CARVALHO, E. P., **Avaliação do comportamento mecânico ao cisalhamento de conectores de barras de aço com ganchos em vigas mistas de madeira laminada colada e concreto.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte. 2008, 173 p.

FAKURY, R. H. **Dimensionamento básico de elementos de estruturas de aço.** Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte. 2008, 220 p.

FLACH, M., FRENETTE, C. D. **Wood-concrete-composity-technology in bridge construction..** In: World Conference on Timber Engineering, 8<sup>th</sup>. , 2004.

JORGE, L. F. C. **Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves.** Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2005 253 p.

KIDWELL, E.. **The efficiency of built-up wooden beams.** *American Institute of Mining Engineers.* v.27, , 1987, p.732-818.

LEE, A. G., **Bridge option for forest roads: a composite timber beam and concrete deck bridge.** 1999, 8 p.

([http://www.forestrytas.com.au/assets/0000/0173/tasforests11\\_part\\_6.pdf](http://www.forestrytas.com.au/assets/0000/0173/tasforests11_part_6.pdf))

LIMEIRA, R. D, **Aços para a construção civil – notas de aula.** Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET), Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira, 2000 16p. (<http://www.scribd.com/doc/7330792/Materiais-Acos>).

MADSEN, B., Timber connections with strenght and reliability of steel. International wood conference, Toronto, Canadá, 1996, p.4-504- 4-511

MIOTTO, J. L., DIAS, A. A. **Reforço e recuperação de estruturas de madeira.** Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2006, 11 p.

MOLINA, J. C., JUNIOR, C. C. **Barras de aço coladas utilizadas em tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 32, 2006, p. 77-80.

MOREIRA, L. F. N. **Dimensionamento a flexão de vigas mistas madeira/concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2001, 75 p.

NATTERER, J., HAMM, J., FAVRE, P.A. , **Composite wood-concrete floors for multi-story buidings, 1996.** In: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, New Orleans, v.3, 1996 p. 431-435.

NATTERER, J., WEINAND, Y., **Modelling of multi layer beam with inter-layer slips.** Laboratory for Timbers Constructions IBOIS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL Lausanne, Suíça, 2008, 8 p.

NICOLAS, E. A., **Estudo de ligações em estruturas mistas de concreto-madeira.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 2001, 108p.

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

OLIVEIRA, A. L. C., **Contribuição para a análise de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto (MLC/concreto).** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2002, 119 p.

PETRUCCI<sup>1</sup>, E. G. R. **Concreto de cimento portland,** São Paulo, Editora Globo, 1998, 307 p.

PETRUCCI<sup>2</sup>, E. G. R. **Materiais de construção.** São Paulo, Editora Globo, 1996, 435 p.

PFEIL, W., PFEIL, M., **Estruturas de madeira,** Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 6ª ed., 2003.

PIGOZZO, J. C., **Estudos e Aplicações de Barras de Aço Coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. 374 p.

QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., LUCIENE, A. C. M. **Elementos de estruturas mistas aço-concreto.** Belo Horizonte, Editora O Lutador, 2001, 336 p.

SEGUNDINHO, P. G. A., MATTHIESEN, J. A. **Ligações em vigas mistas T de madeira-concreto utilizando pinos metálicos colados.** In: IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Cuiabá, 2004.

SORIANO, J., **Estruturas mistas em concreto e em madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP, 2001, 257 p.

SORIANO, J., MASCIA, N. T. **Estruturas mistas em concreto e madeira em pontes**, **Revista Técnica**, 1999.

SORIANO, J., MASCIA, N. T. **Comportamento mecânico de ligações flexíveis em vigas mistas de concreto-madeira**. 2000, 10 p.

SORIANO, J., MASCIA, N. T. **Estruturas mistas madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais**. *Ciência Rural*, 2009, v.39, n.4, p1260-1269, julho de 2009 (<http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n4/a138cr460.pdf>).

SOUZA, C. R. **Utilização de estruturas mistas na recuperação da capacidade de carga de pontes de madeira do Estado do Mato Grosso do Sul**. Dissertação de Mestrado,, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2004,140 p.

TACITANO, M. **Análise teórica de vigas de seção “T” em madeira-concreto com ligação semi-rígida por pregos**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000, 258 p.

TOMMOLA, J., SALOKANGAS, L., JUTILA, A. **Wood-concrete composite bridges: teste on shear connectors**. Helsinki University of Technology, Laboratory of Bridge Engineering, Nordic Wood, Nordic Timber Bridge. Helsinki, 1999, 19 p.

VALLE, A., KÖLLER, A. D., SZÜCS, C. A., FUSCO, P. B. **Determinação experimental da resistência e da rigidez de embutimento da madeira com orientação das fibras variável**. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos, 2000.

VAN DYER, D. B. **Slip modulus in bolted timber joints**. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.19, n.6, p.960-964. Dec. 1992.

YTTRUP, P. J., NOLAN, G. (1999), Concrete **and timber composite construction for enhanced strenght, stiffness and service life for timber bridges.** Australia.  
<http://oak.arch.utas.edu.au>

## **APÊNDICE A. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE BARRA DE AÇO**

Nas Figuras A.1 a A.4, estão representadas, para ligações com diferentes conectores em barras de aço, as respectivas curvas força-deslocamento relativo, bem como as curvas polinomiais de correlação e as retas secantes utilizadas para obtenção das rigidezes das ligações.

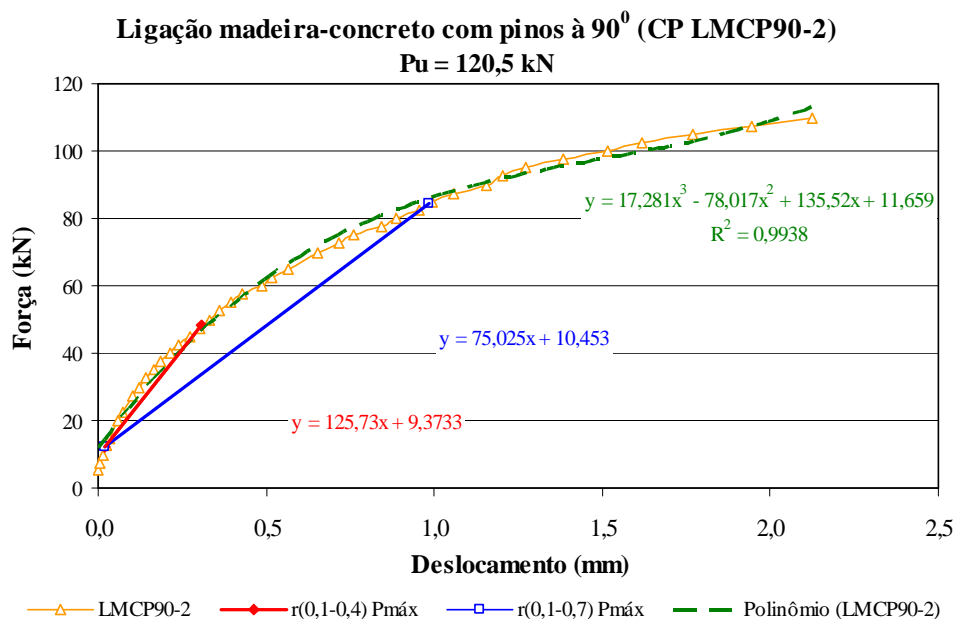


Figura A.1. Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com pinos a 90°(CP 2) para corpo-de-prova madeira concreto.

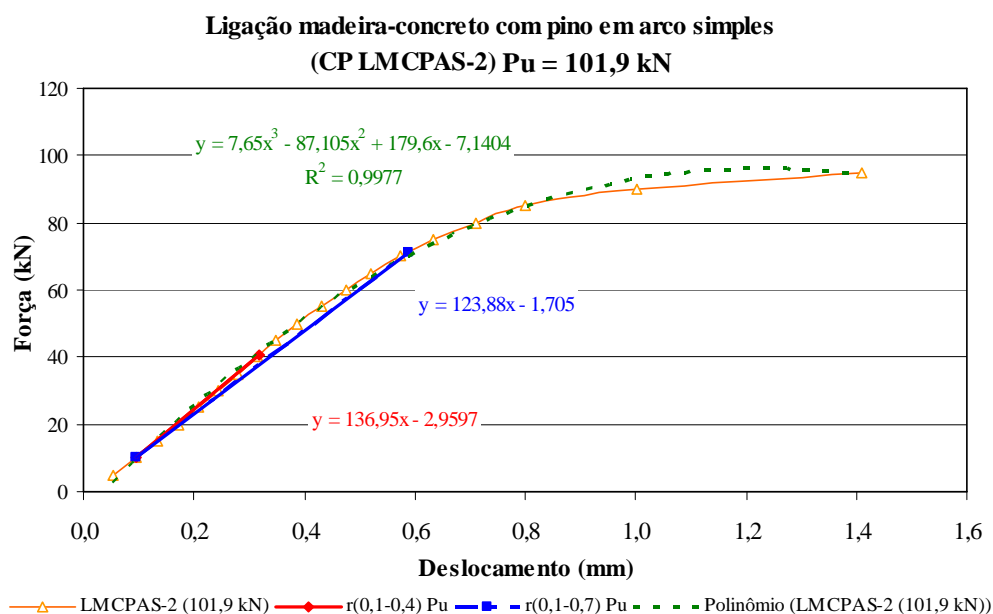


Figura A.2 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barra em arco simples (CP 2).

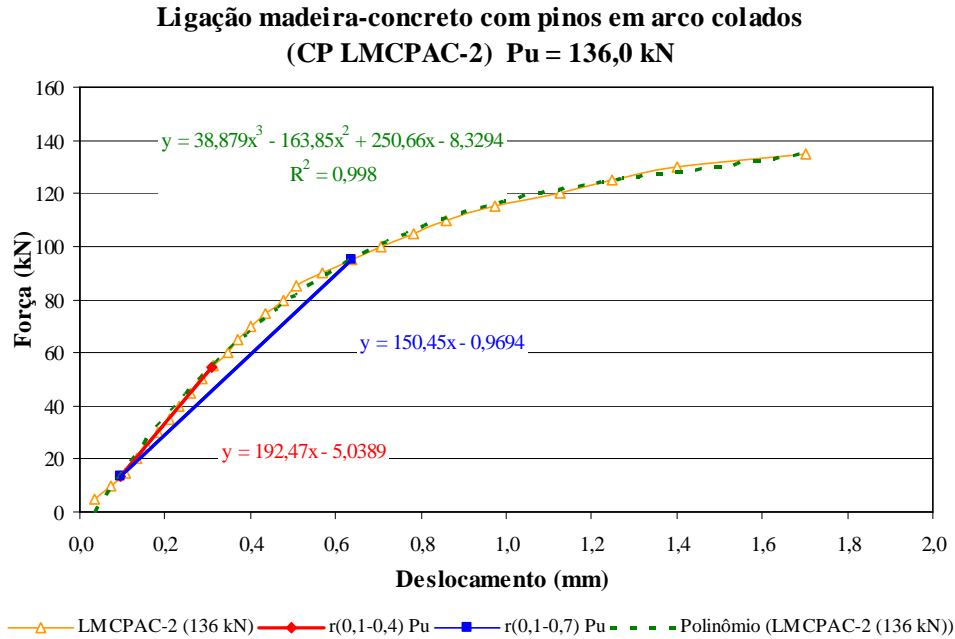


Figura A.3 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barras em arco coladas (CP 2).

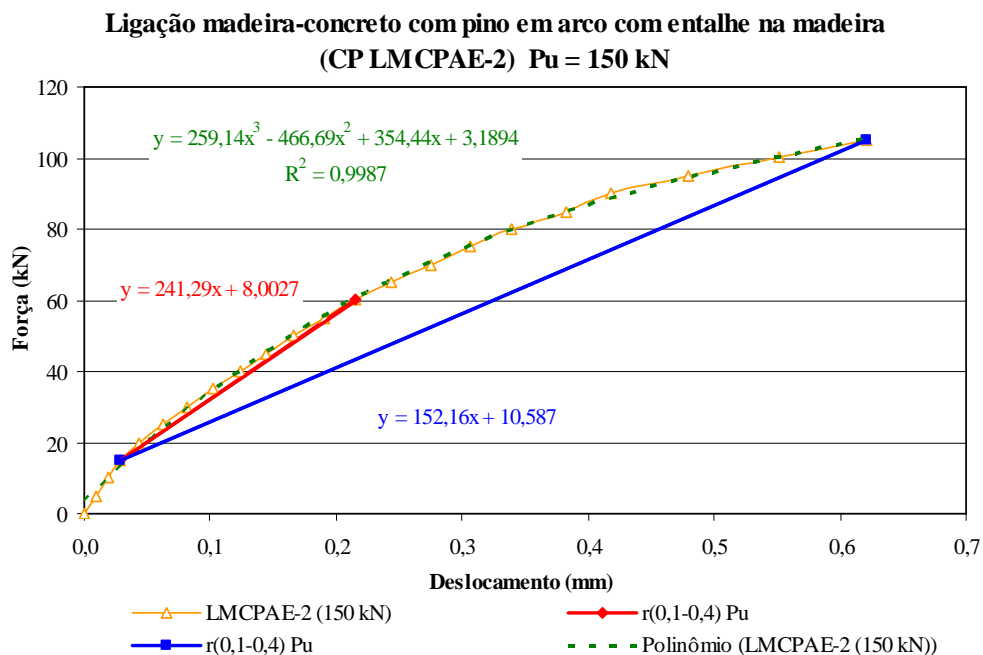


Figura A.4 Curvas força x deslocamento relativo, polinômios de correlação e retas de definição das rigidezes para ligação com barra em arco, chapa de ancoragem e com entalhe na madeira (CP2).

# APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO COM CONECTORES DE CONCRETO

## B.1 Conectores de concreto com dentes duplos

Nas Figuras B.1 a B.3, estão representadas, para ligações com variações de conectores em dentes duplos de concreto para ligação madeira concreto, as curvas força-deslocamento relativo e respectivas curvas polinomiais de correlação e retas secantes utilizadas para obtenção das rigidezes.

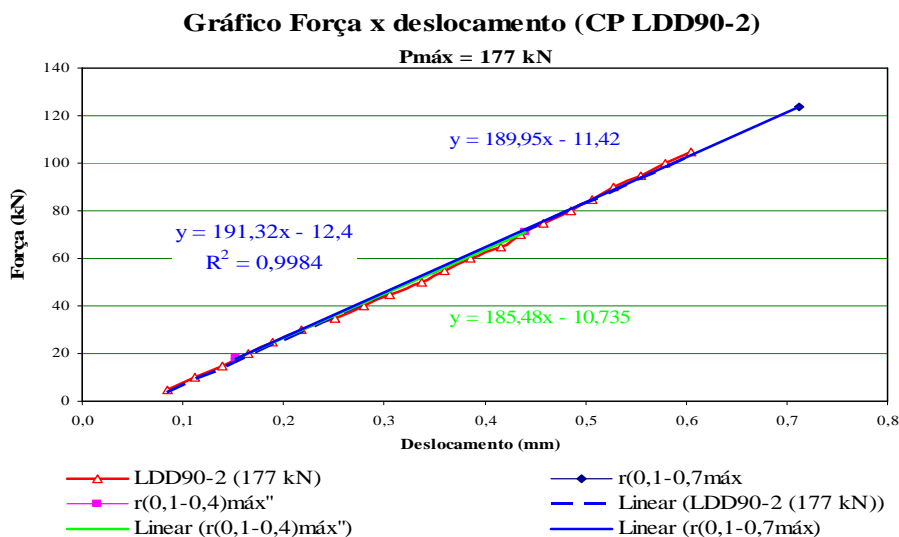


Figura B.1. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 90<sup>0</sup> (CP-2).

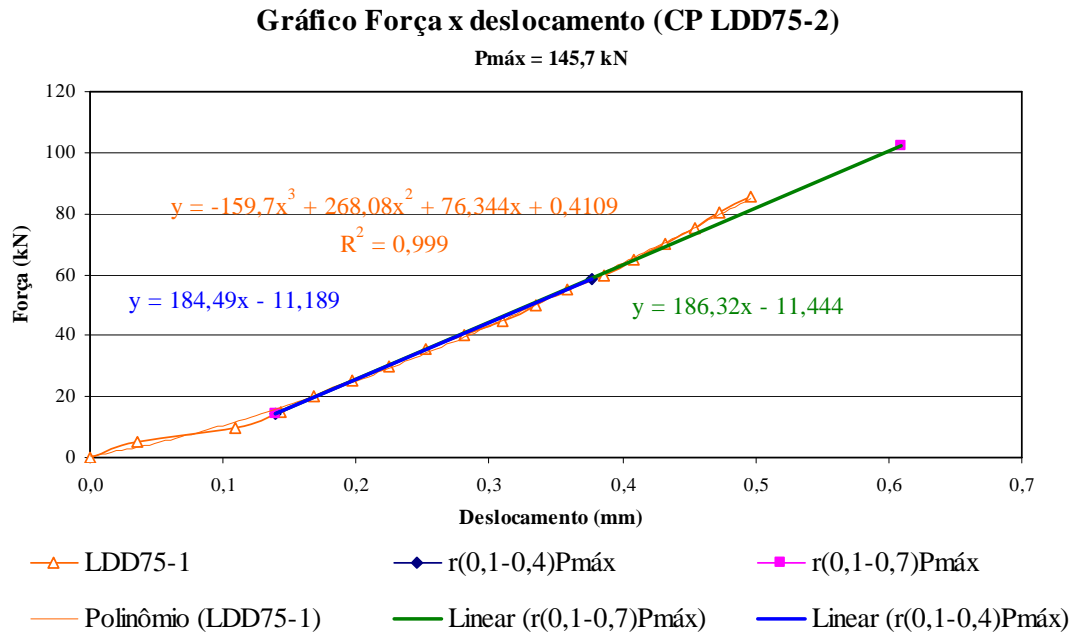


Figura B.2. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 75° (CP-2).

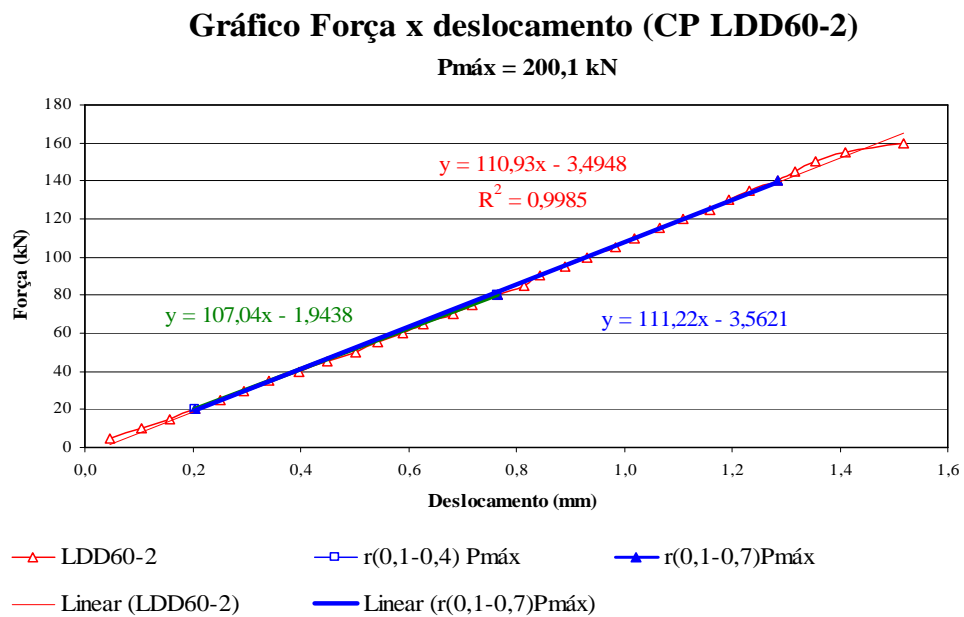


Figura B.3. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes duplos a 60° (CP-2).

## B.2 Conectores de concreto com dentes simples

Nas Figuras B.4 a B.7, estão representadas as curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de correlação e retas secantes de obtenção das rigidezes, para ligações com dentes simples

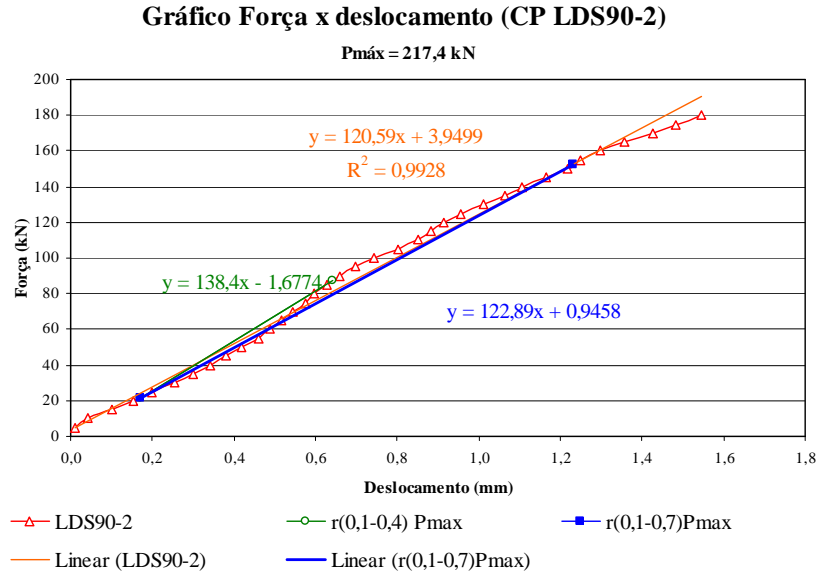


Figura B.4. Curva força x deslocamento relativo obtida de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a  $90^0$  (CP-2).

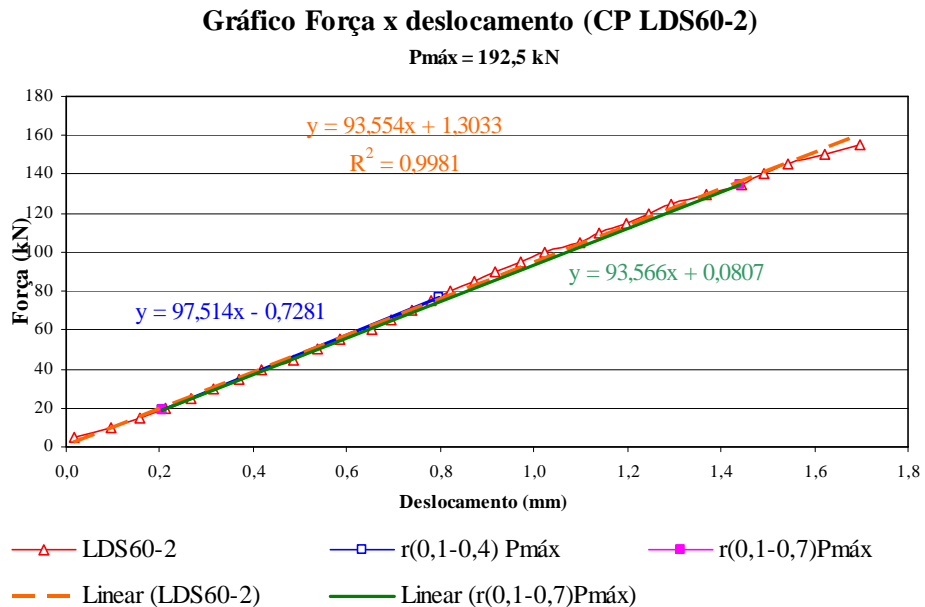


Figura B.5. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a  $60^0$  (CP-2).

### Gráfico Força x deslocamento (CP LDS60-2)

$P_{\text{máx}} = 192,5 \text{ kN}$

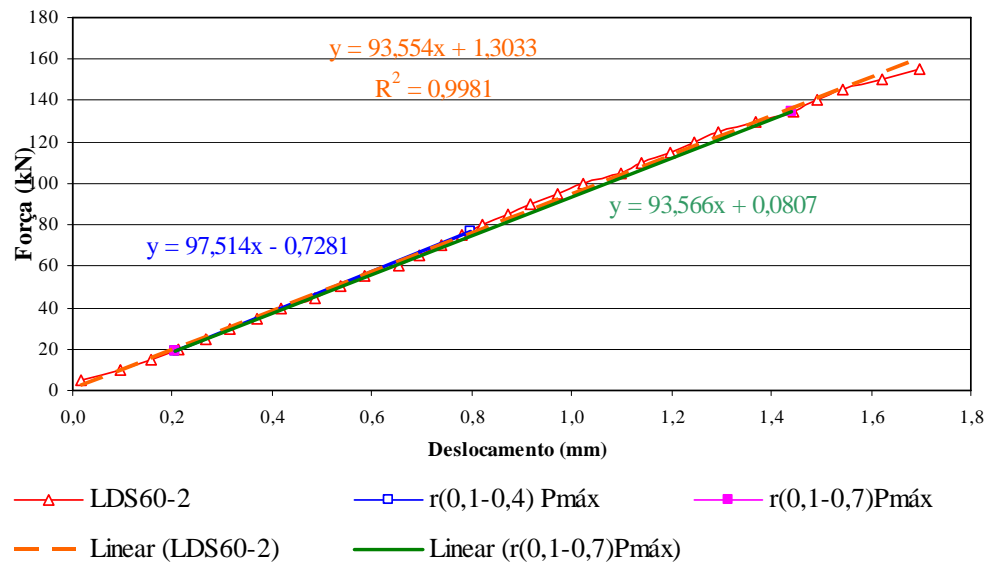


Figura B.6. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação com conectores de concreto com dentes simples a  $60^\circ$  (CP-1).

## **APÊNDICE C. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ENSAIOS DE LIGAÇÃO ENTRE PEÇAS DE MADEIRA COM CONECTORES DE CONCRETO**

Nas figuras C.1 e C.2 estão representados os corpos-de-prova com três elementos de madeira e com dois elementos de madeira, respectivamente.



Figura C.1. Corpos-de-prova de ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto em dentes simples e em dentes duplos.



Figura C.2. Ensaio de corpos-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto.

Nas Figuras C.3 a C.5 estão representadas curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de definição das rigidezes de ensaios com três peças de madeira com diferentes inclinações para a face de apoio dos conectores em dentes duplos de concreto.

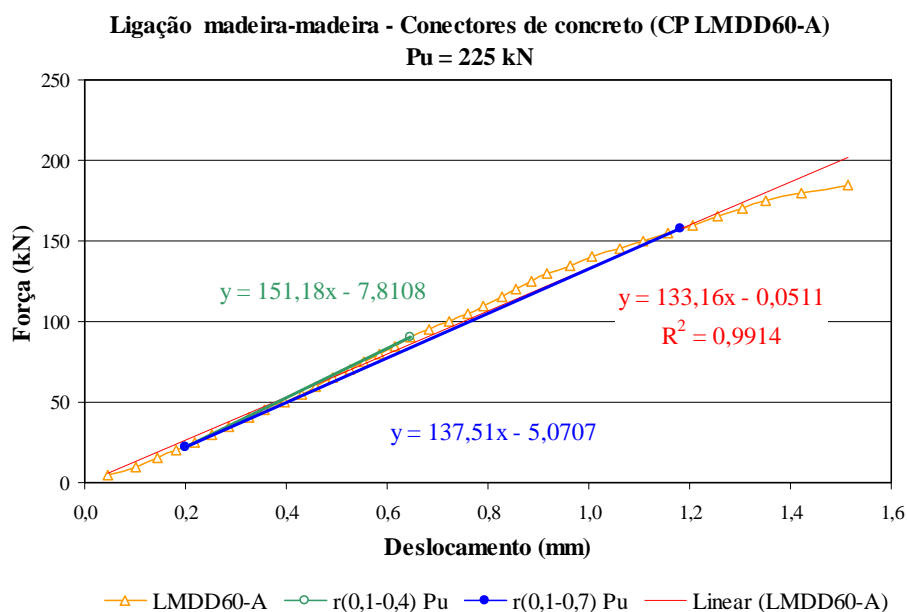


Figura C.3. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a 60°.

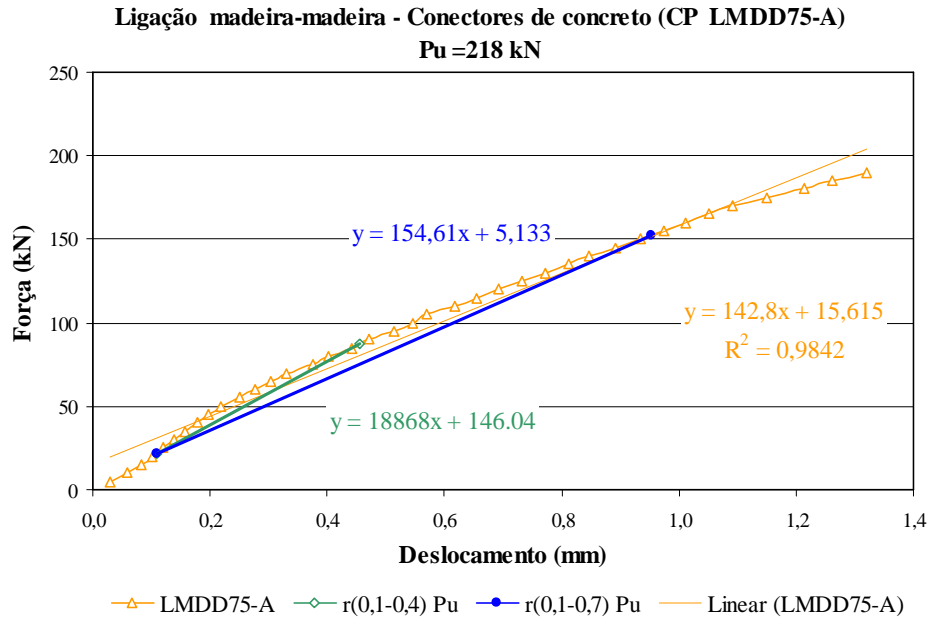


Figura C.4. Curva força x deslocamento relativo obtida no ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a  $75^{\circ}$ .

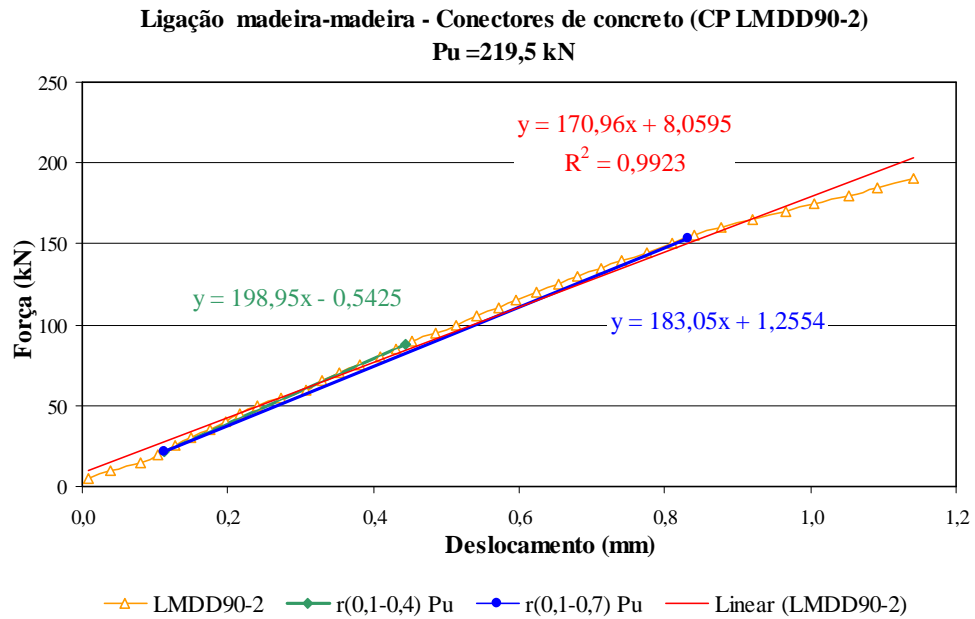


Figura C.5. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes duplos a  $90^{\circ}$  (CP 2).

Nas Figuras C.6 a C.8 estão representadas curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de definição das rigidezes de ensaios com três peças de madeira com diferentes inclinações para a face de apoio dos conectores em dentes simples de concreto.

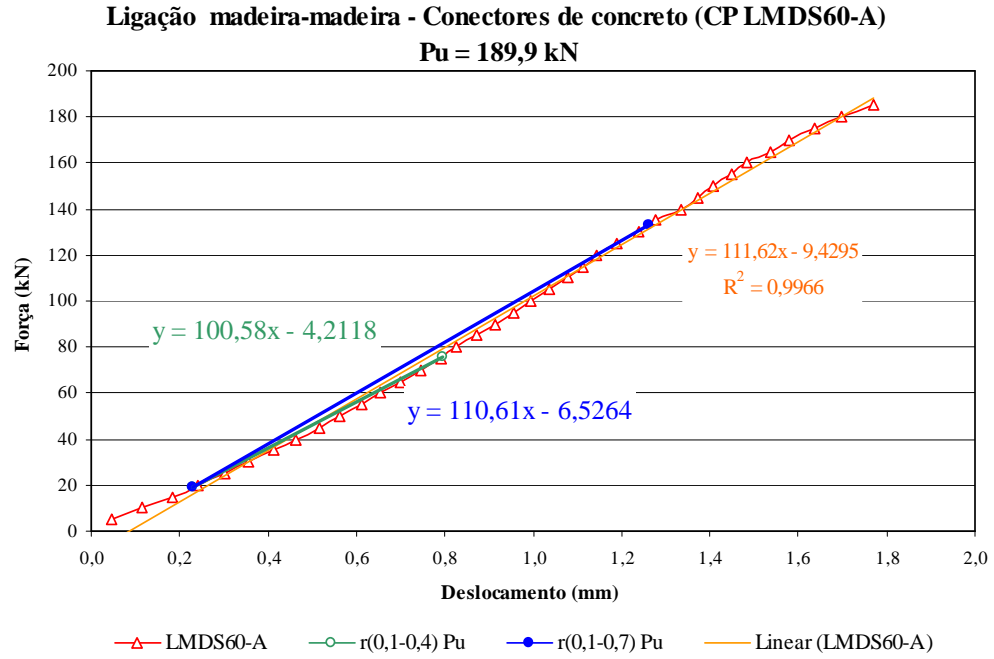


Figura C.6. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 60°.

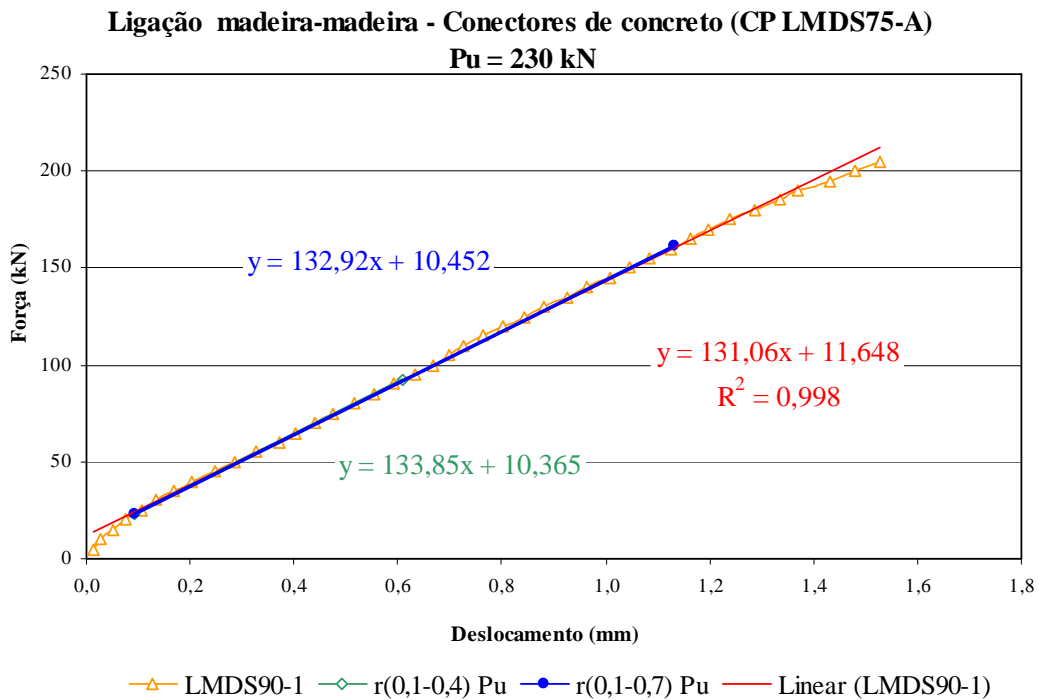


Figura C.7. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 75°.

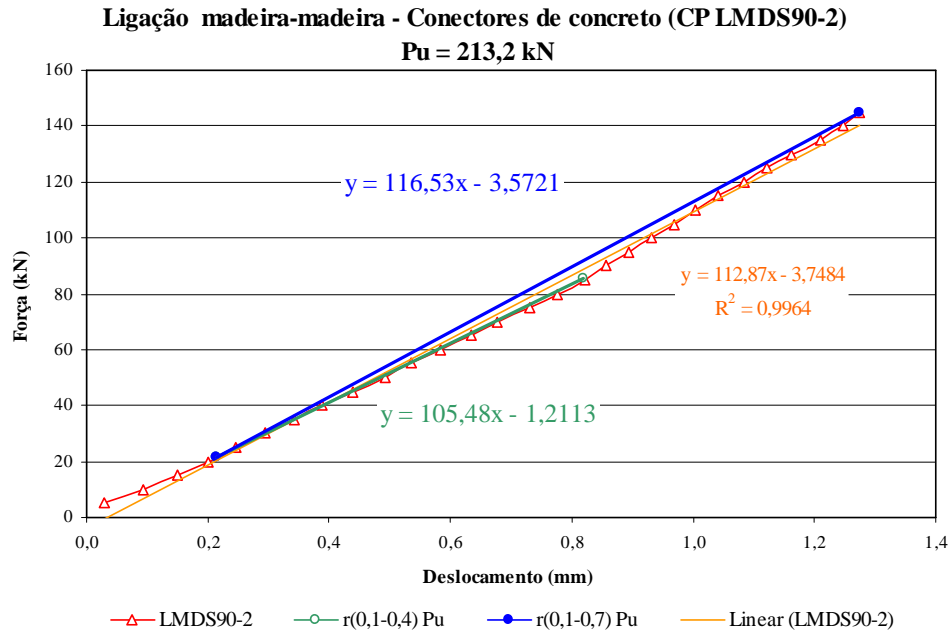


Figura C.8. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com três peças de madeira, com conectores de concreto de dentes simples a 90° (CP 2).

Nas Figuras C.9 a C.14 estão representadas curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de definição das rigidezes de ensaios com duas peças de madeira com conectores em concreto combinado com barras de aço coladas..

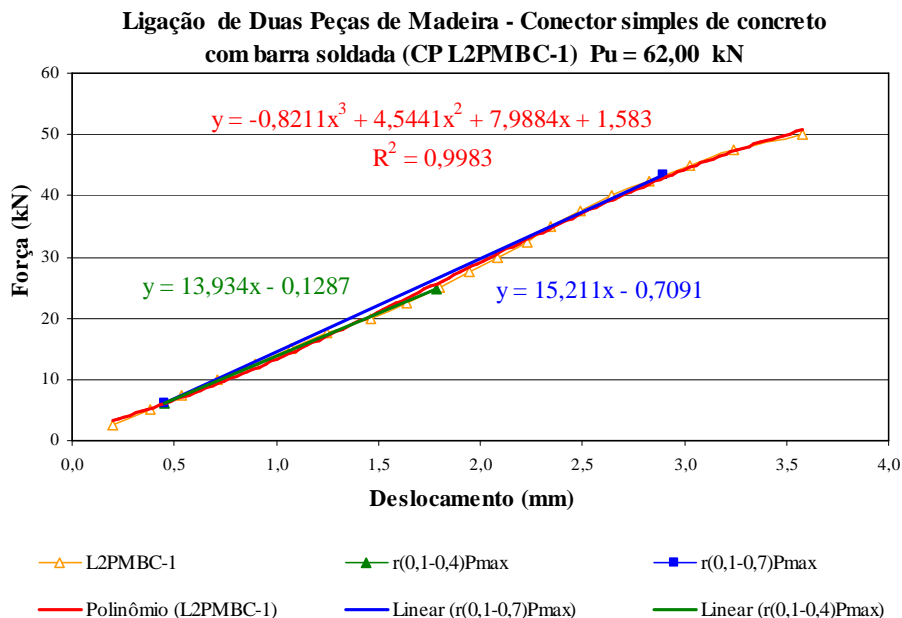


Figura C.9. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra soldada (CP1).

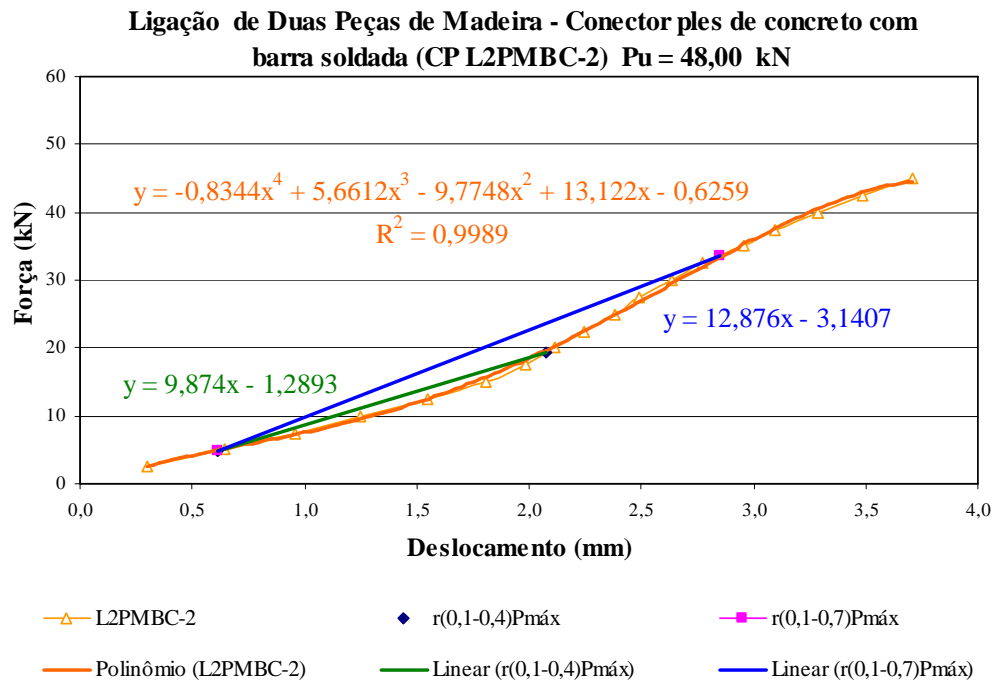


Figura C.10. Curva força x deslocamento relativo de ensaio da ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra soldada (CP2).

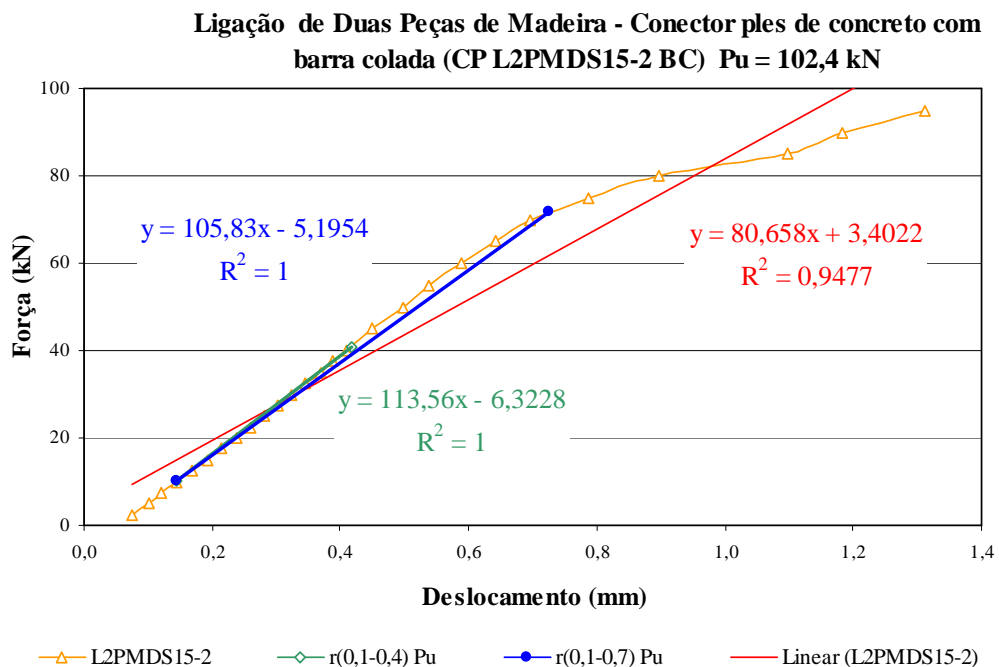


Figura C.11. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 15° e barra colada (CP 2).

**Ligação de Duas Peças de Madeira - Conector ples de concreto com barra colada (CP L2PMDS30-1 BC)  $P_u = 106 \text{ kN}$**

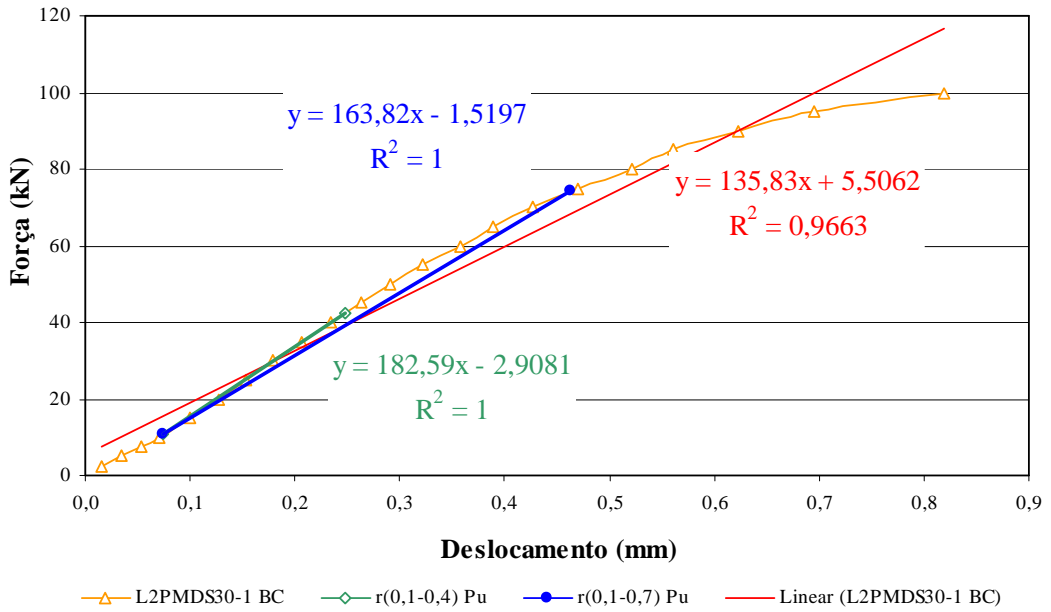


Figura C.12. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a  $30^\circ$  e barra colada (CP1).

**Ligação de Duas Peças de Madeira - Conector ples de concreto com barra colada (CP L2PMDS30-2 BC)  $P_u = 112,7 \text{ kN}$**

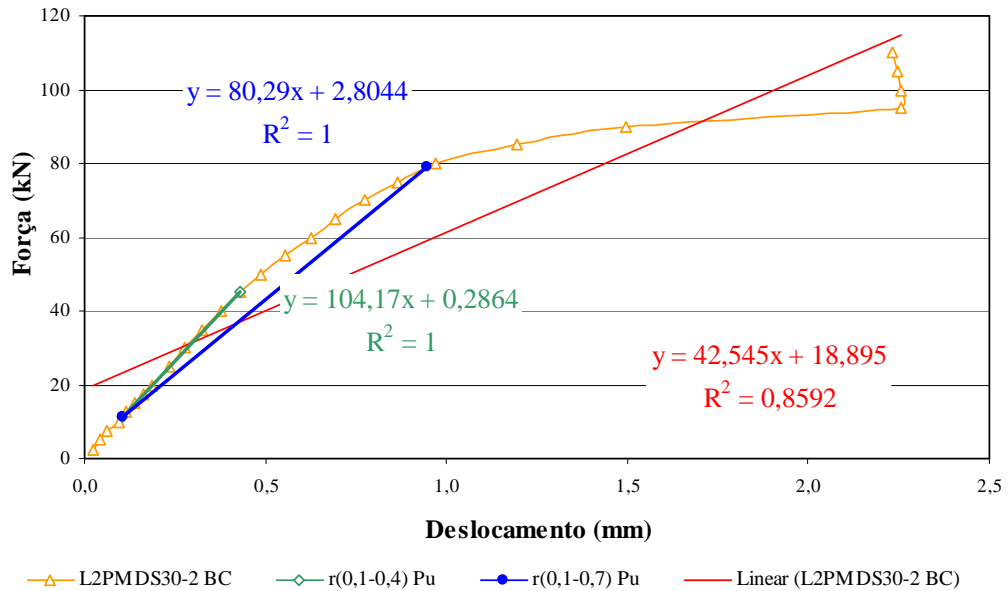


Figura C.13. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a  $30^\circ$  e barra colada (CP 2).

Nas Figuras C.14 a C.18 estão representadas curvas força x deslocamento relativo e respectivas retas de definição das rigidezes de ensaios com duas peças de madeira com conectores em concreto combinado com barras de aço rosqueadas.

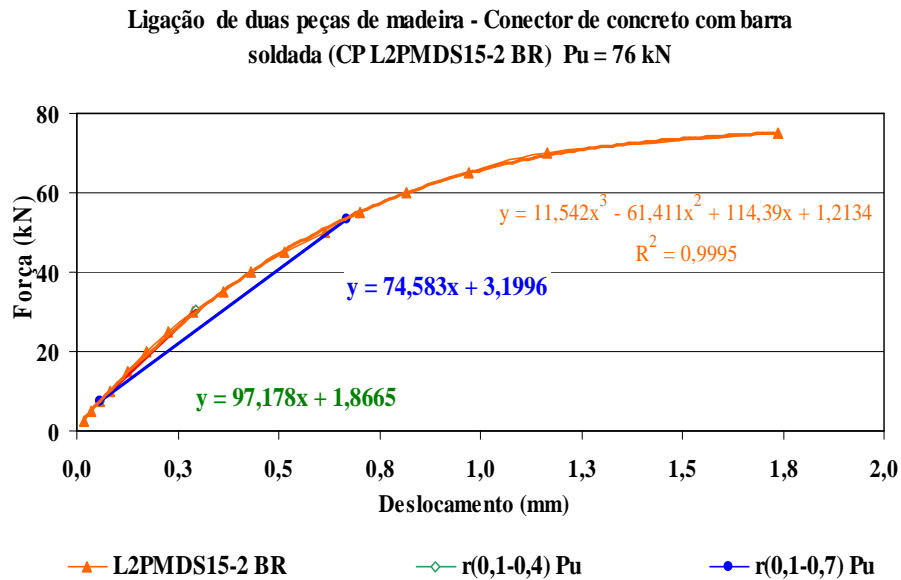


Figura C.14. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 15<sup>o</sup> e barra rosqueada (CP2).

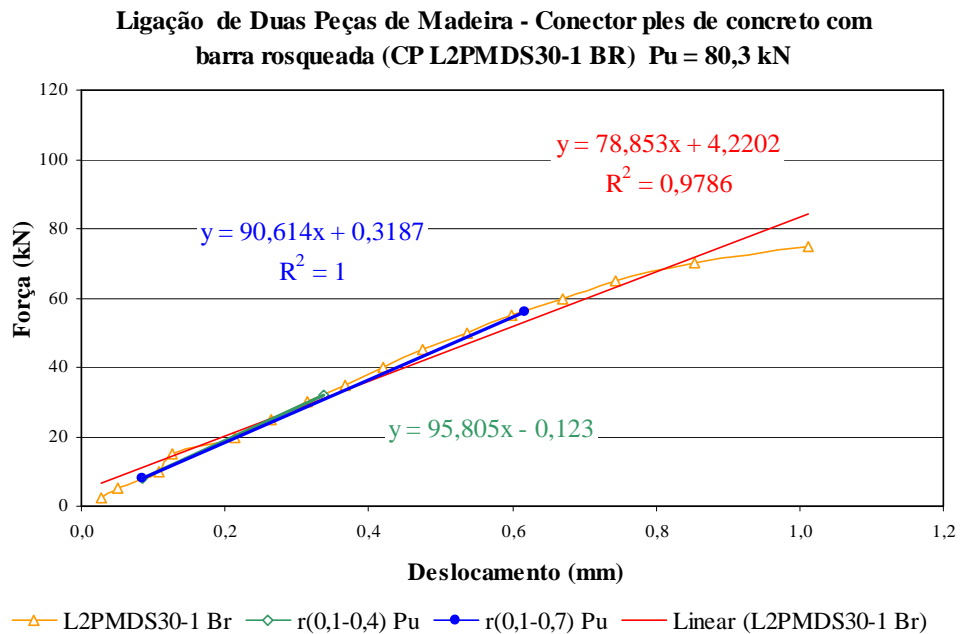


Figura C.15. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a 30<sup>o</sup> e barra rosqueada (CP1).

**Ligação de Duas Peças de Madeira - Conector ples de concreto com barra soldada (CP L2PMDS30-1 Br)  $P_u = 92,50$  kN**

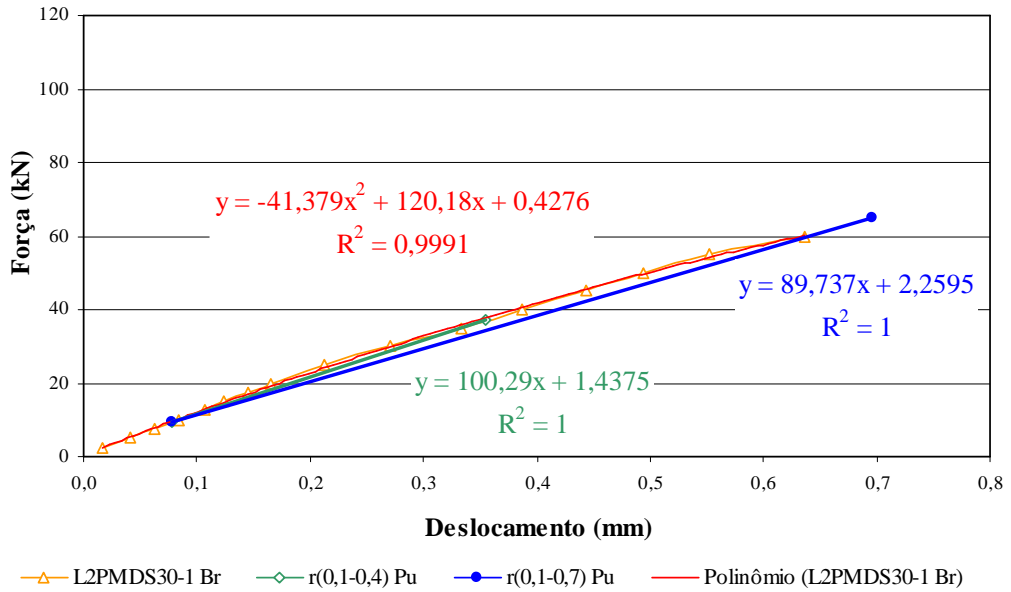


Figura C.16. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a  $30^\circ$  e barra rosqueada (CP 2).

**Ligação de Duas Peças de Madeira - Conector ples de concreto com barra colada (CP L2PDS30-2 BS)  $P_u = 112,7$  kN**

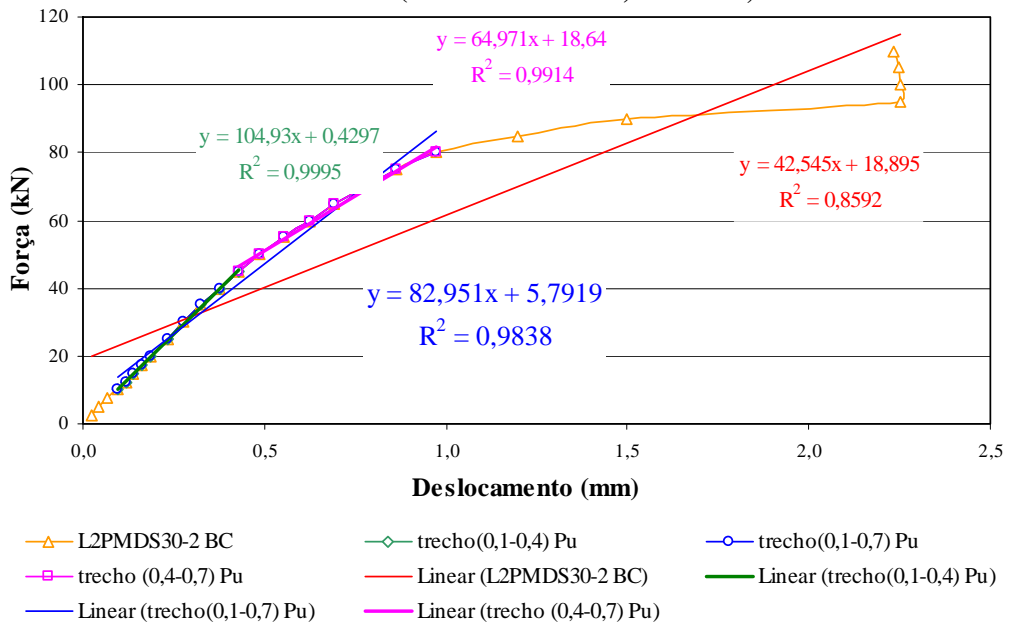


Figura C.17. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples a  $30^\circ$  e barra colada (CP 2).

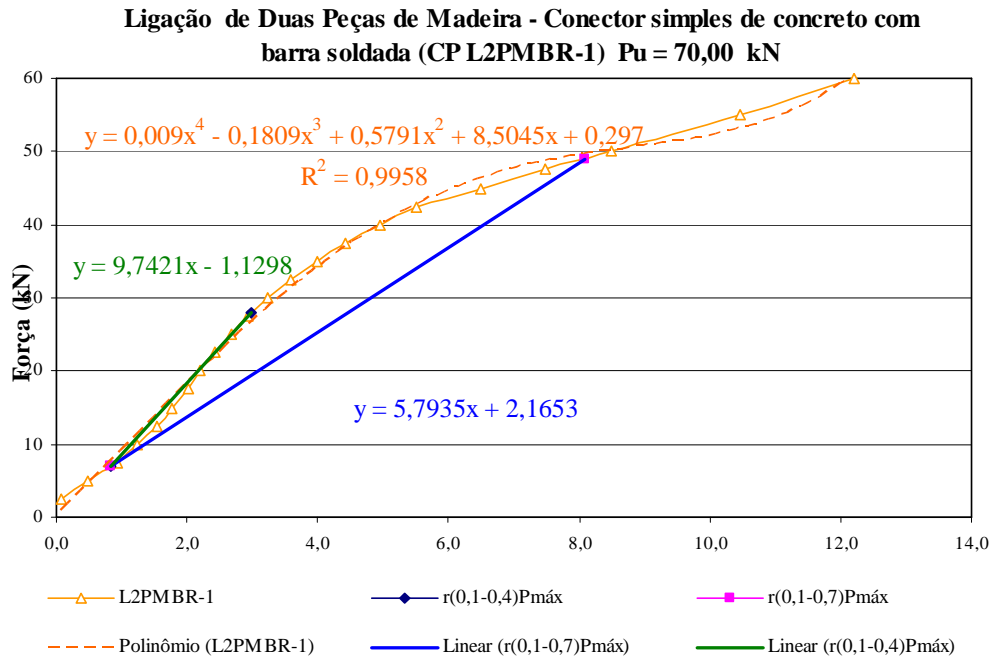


Figura C.18. Corpo-de-prova ligação madeira-madeira, com duas peças de madeira, com conectores de concreto de dente simples e barra colada (CP 2).

# ANEXO A. MODELOS ANALÍTICOS PARA VIGAS COMPOSTAS DE MADEIRA

## A.1 Modelo da DIN 1052 (1988) para peças compostas de madeira

GÓES (2002), referenciando a versão da DIN (1988)<sup>5</sup>, apresenta a Tabela para obtenção do módulo de deslizamento de ligações pregadas. A rigidez da ligação considerando as deformações K é definida para cada peça 1 ou 3 na forma:

$$K_{1,3} = \frac{\pi^2 \cdot E_{1,3} \cdot A_{1,3} \cdot s_{1,3}}{k'_{1,3} \cdot L^2} \quad (\text{A.1})$$

sendo:

$E_1, E_3$ , os módulos de elasticidades correspondentes das peças 1 e 3;

$A_1, A_3$ , as áreas correspondentes das peças 1 e 3;

$s_1, s_3$ , os afastamentos dos conectores, respectivamente, das peças 1 e 3;

$K'_1, K'_3$ , os módulos de deslizamento dos conectores obtidas na Tabela 2, respectivamente, para as peças 1 e 3;

A inércia efetiva fica definida pela expressão:

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^n (n_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (\text{A.2})$$

---

<sup>5</sup> DEUTSCHE INSTITUT FUR NURMING. DIN-1052 - Structural use of timber - Design and construction . Berlim. 1988.

sendo:

$\gamma_i$ , o coeficiente de redução do ganho potencial de inércia é definido para cada peça correspondente por:

$$\gamma_{1,3} = \frac{1}{1+K_{1,3}}, \text{ com } \gamma_2 = 1, \quad (\text{A.3})$$

$n$ , o número de peças componentes da peça composta;

$a_i$ , a distância do centróide da área da peça componente correspondente até a linha neutra y-y ( com  $a_2$  maior que zero e menor que  $h_2/2$ ), representada na Figura 2, definida por:

$$a_2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma_1 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot n_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i}, \quad (\text{A.4})$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1 + h_2}{2}\right) - a_2, \text{ e: } a_3 = \left(\frac{h_2 + h_3}{2}\right) + a_2, \quad (\text{A.5})$$

sendo:

$I_i = b_i h_i^3 / 12$ ,  $A_i = b_i \cdot h_i$ , definem, respectivamente, a inércia e área de cada peça i:

$b_i$ ,  $h_i$ , a largura e a altura de cada peça componente correspondente;

$n_i$ , a razão modular entre o módulo de elasticidade da peça componente correspondente e o valor utilizado como referência:  $n_i = E_i / E_r$

As tensões normais importantes são representadas na Figura 3, sendo definidas por:

$$\sigma_{si} = \pm \frac{M}{I_{ef}} \cdot \gamma_i \cdot a_i \cdot n_i \left( \frac{A_i}{A_{in}} \right), \quad (\text{A.6})$$

$$\sigma_{ri} = \pm \frac{M}{I_{ef}} \cdot n_i \cdot \left( \gamma_i \cdot a_i \cdot \frac{A_i}{A_{in}} + \frac{h_i}{2} \cdot \frac{I_i}{I_{in}} \right), \quad (\text{A.7})$$

sendo:

$\sigma_{si}$ , a tensão normal no centróide da peça componente i;

$\sigma_{ri}$ , a tensão normal no bordo da peça componente i;

$I_i$ ,  $I_{in}$  -  $A_i$ ,  $A_{in}$ , momentos de inércia e áreas das mesas, respectivamente, sem reduções e obtidas com a seção enfraquecida;

A força atuante em cada elemento da ligação fica definida por:

$$F_{1,3} = \frac{V}{I_{ef}} M_{s,1,3} \gamma_{1,3} \cdot n_{1,3} \cdot s_{1,3}, \quad (A.8)$$

sendo:

$V$ , esforço cortante atuante;

$$M_{s,1,3} = b_{1,3} \cdot h_{1,3} \cdot a_{1,3} \quad (A.9)$$

o momento estático da peça componente correspondente em relação a linha neutra;

A tensão cisalhante máxima ocorre na linha neutra, sendo definida por:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{b_2 \cdot I_{ef}} \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot n_i \cdot M_{si} \quad (A.10)$$

sendo:

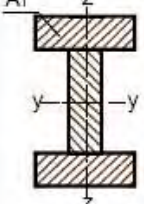
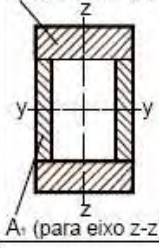
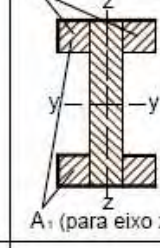
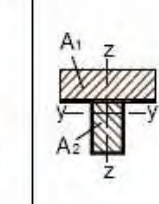
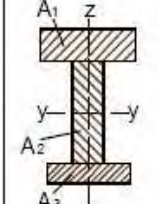
$V_{m\acute{a}x}$ , esforço cortante máximo atuante;

$M_{s,i}$ , o momento estático da peça componente correspondente, situada acima ou a baixo da linha neutra, em relação à linha neutra, com:

$$M_{s,2} = \frac{b_2}{2} \cdot \left( \frac{h_2}{2} - a_2 \right)^2. \quad (A.11)$$

Tabela A.1. Valores dos coeficientes de deslizamento  $k'$  (N/mm) para vigas compostas.

FONTE: DIN (1988), apud Góes (2002).

Eixo	Conector	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
						
y - y	Pregos (um plano de corte)	600	600	900	600	600
	Pregos (dois planos de corte)	700 por ligação	700 por ligação	900 por ligação	-	700
z - z	Pregos (um plano de corte)	-	900	600	-	-
	Pregos (dois planos de corte)	-	900 por ligação	700 por ligação	-	-

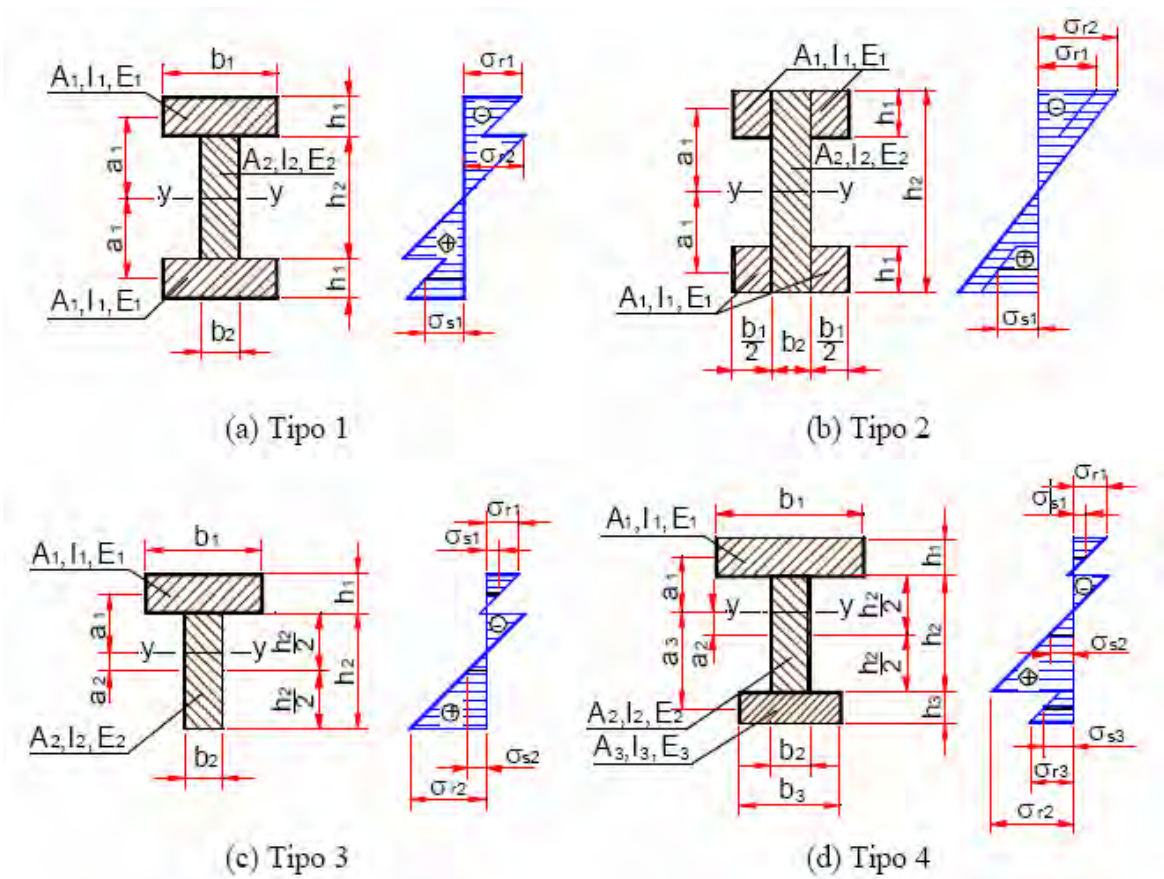


Figura A.1. Parâmetros geométricos e diagrama de tensões normais na seção transversal de peças compostas. FONTE: DIN (1988), APUD GÓES (2002)

## A.2 Modelo do prEN 1995-1 – 1: (2003) para peças compostas de madeira

A norma europeia EN 1995 – Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1.1: General rules - General rules and rules for buildings, em seu Anexo B, Mechanically jointed beams, apresenta um critério para avaliação do comportamento de vigas compostas com ligações mecânicas, com base na teoria da elasticidade linear e considerando adicionalmente que:

- A viga trabalha simplesmente apoiada, com um vão  $L$ , para vigas contínuas  $L$  vale 0,8 do maior vão e para vigas em balanço, tomado igual a duas vezes seu comprimento;

- Cada peça componente apresenta o comprimento total da viga ou é executada com emprego de ligações adesivas nas extremidades, sendo conectada a outra peça por meio de ligações com conectores mecânicos com módulo de deslizamento  $K$ ;

- O espaçamento entre os conectores é constante ou varia uniformemente com a força cortante entre  $s_{\min}$  e  $s_{\max}$ , com  $s_{\max} \leq 4 s_{\min}$ ;

- O carregamento atuante gera um momento de flexão atuante  $M = M(x)$  que apresenta variação senoidal ou parabólica e esforço cortante  $V=V(x)$ .

A distribuição de tensões normais de flexão é representada na Figura A.2 para as composições consideradas.

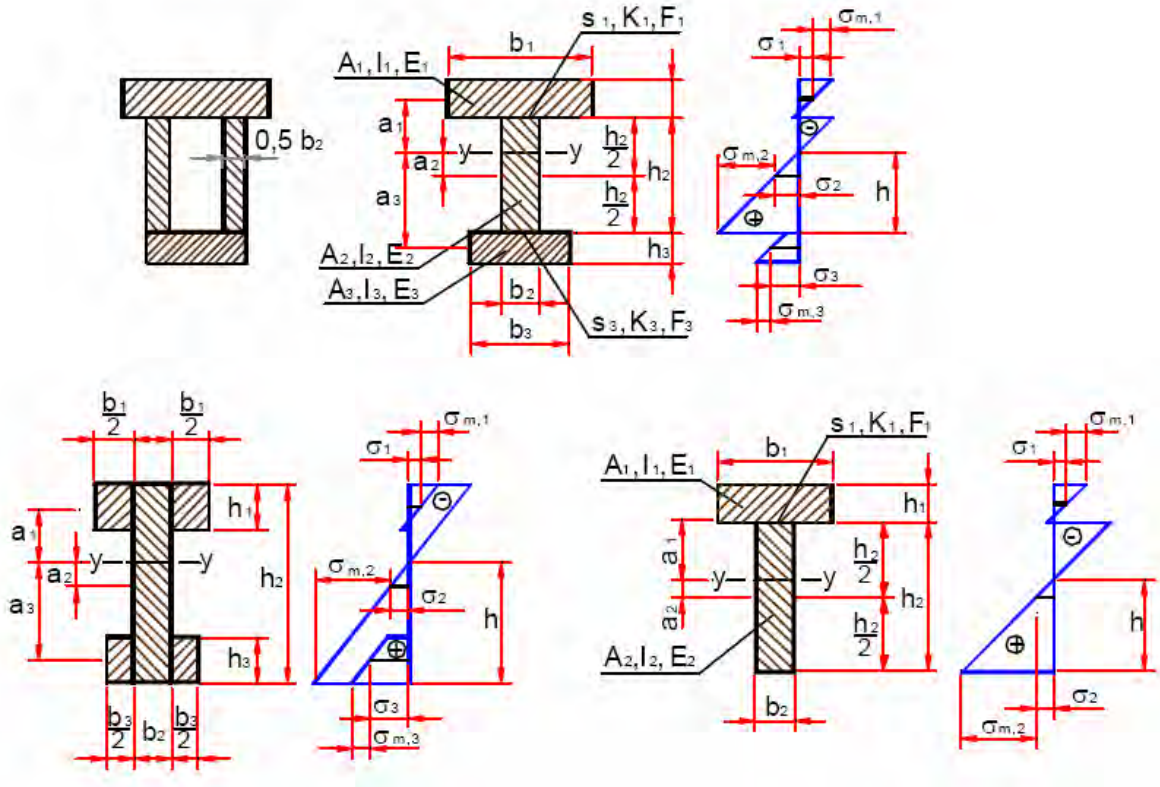


Figura A.2. Geometria das seções transversais de peças compostas e distribuição de tensões normais de flexão. EUROCODE (5), apud (GÓES, 2002).

A rigidez efetiva a flexão é obtida como:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (A.12)$$

sendo:

$n$ , o número de peças da seção composta;

$i$ , o índice da ordem da peça componente;

$E_i$ , o módulo de elasticidade do material;

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}, \quad (A.13)$$

o momento de inércia da peça  $i$  em relação ao seu eixo centroidal;

$b_i$ ,  $h_i$ , altura e largura da peça componente  $i$ ;

$a_i$ , a distância entre centróide da seção composta ao centróide da peça  $i$ ;

$$A_i = b_i h_i, \quad (\text{A.14})$$

a área da seção transversal da peça  $i$ .

$\gamma_i$ , coeficiente que define da contribuição da peça  $i$  no ganho de inércia da peça composta, em termo de porcentagem do valor correspondente a uma ligação rígida, com:

$$\gamma_2 = 1 \quad (\text{A.15})$$

Para  $i=1$  e  $i=3$ :

$$k'_i = \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot L^2}, \quad (\text{A.16})$$

$$\text{e: } \gamma_i = \frac{1}{1 + k'_i} \quad (\text{A.17})$$

sendo:

$K_i$ , valor do módulo de deslizamento da ligação da peça correspondente, com:

$K_i = K_{\text{ser},i}$ , para verificações no estado limite de utilização;

$K_i = K_{\text{u},i}$ , para verificações no estado limite último;

$s_i$ , representa o espaçamento entre os conectores da ligação da peça  $i$ . No caso do espaçamento variar com a força cortante, pode-se considerar um valor efetivo intermediário:

$$s_{i,\text{ef}} = 0,75s_{i,\text{mín}} + 0,25s_{i,\text{máx}}, \text{ com } s_{\text{máx}} \leq 4 s_{\text{mín}}; \quad (\text{A.18})$$

$L$ , vão da viga para vigas biapoiadas, 0,8 do maior vão para vigas contínuas e duas vezes o vão para vigas em balanço.

A distância entre o centro de gravidade da peça componente até a linha neutra da peça composta, vale:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i} \quad (\text{A.19a})$$

$$a_1 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} - a_2, \quad (\text{A.19b})$$

$$a_3 = \frac{(h_2 + h_3)}{2} - a_2 \quad (\text{A.19c})$$

As tensões normais de flexão são obtidas por meio das expressões:

$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \frac{M}{(EI)_{ef}}, \quad (A.20)$$

e:

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (A.21)$$

sendo:

$M$ , momento fletor atuante;

$\sigma_i$ , tensão normal no centróide da peça  $i$ ;

$\sigma_{m,i}$ , tensão normal na borda da peça  $i$ .

A tensão cisalhante máxima ocorre na linha neutra, valendo;

$$\tau_{2,m\acute{a}x} = \frac{V}{b_2 \cdot (EI)_{ef}} (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2) \quad (A.22)$$

sendo:

$V$ , a força cortante atuante;

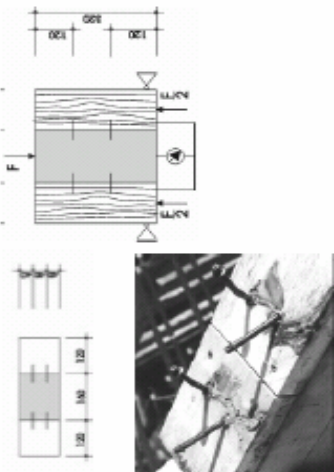
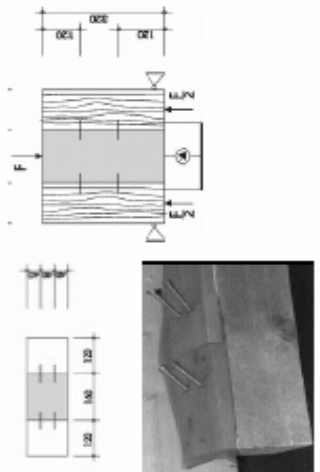
A força atuante em um conector da ligação vale:

$$F_i = \frac{V}{(EI)_{ef}} \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i, \text{ para } i=1 \text{ e } 3. \quad (A.23)$$

**ANEXO B. SÍNTESE DE RESULTADOS DE  
LIGAÇÕES COM CONECTORES MECÂNICOS  
APRESENTADOS NA LITERATURA**

(Fonte: Carvalho 2008)

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores. Fonte: Carvalho (2008)

Autor (es)	Madeira				Concreto		Elemento de ligação				$F_{ms}$ (kN) por conector	Modos Ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	$f_{c,0,90}$ (MPa)	$F_{0,90}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,90}$ (MPa)	$E_{c,90}$ (MPa)	Tipo	$\Phi$ (mm)	$l_m$ (mm)	$l_c$ (mm)			
FAUST e SELLE (1999)	S10	21,0	11000	420	22,5	12700	Parafuso	6,1	78	78	7,90	Esmagamento do concreto e flexão dos pinos	
											20,14		
FAUST e SELLE (1999)	S10	21,0	11000	420	22,5	12700	Parafuso	5,9	78	78	12,67	Esmagamento do concreto	
											16,54		

Obs: A metodologia adotada para o ensaio foi a EN 26 891.

Foi utilizado concreto com agregado leve, densidade de 1250 kgf/m<sup>3</sup>.

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

Autor (es)	Madeira				Concreto		Elemento de ligação				$F_{100}$ (kN) por conector	Modos de Ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	$f_{com}$ (MPa)	$E_{com}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{cm}$ (MPa)	$E_{cm}$ (MPa)	Tipo	$\phi$ (mm)	$L_m$ (mm)	$L_c$ (mm)			
3	SORLANO (2001)	Cupinba	59,10	14928	*	22,0	23500	Prego	5,4	*	8,3	*	
4	NICOLAS EMASCIA (2002)	Cupinba	53,32	15220	*	22,74	21760	Prego	5,4	75	35	7,7	
								Prego	6,6	80	40	7,7	
								Parafuso	9,5	80	40	11,10	
								Parafuso	12,7	80	40	9,1	
								Parafuso	12,7	80	40	14,51	
								Parafuso	12,7	80	40	14,51	

Obs: Em 3 e 4, a metodologia adotada para o ensaio foi a EN 26 891.

\* - Não especificado no trabalho.

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

Autor (es)	Madeira				Concreto		Elemento de ligação				F <sub>res</sub> (kN) por conector	Modos Ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	f <sub>com</sub> (MPa)	E <sub>max</sub> (MPa)	E <sub>mod</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	f <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	Tipo	φ (mm)	L <sub>in</sub> (mm)	L <sub>c</sub> (mm)			
<b>5</b> BRANCO (2003)	Pinho Bravo	18,0	13000	585	34,6	16200	Prego	6,0	80	80	7,48	Esmagamento da madeira, com flexão dos pinos	
							Parafuso	7,5	100	48	15,0		
							Tecunaria	-	100	40	32,5		
<b>6</b> WEAVER (1999)	Southern Pine no 1	30,0	12240	*	34	-	Barra nerv.	25,0	200	130	96,75	esmagamento na madeira e flexão nas barras de aço	

Obs.: Em **5**, a metodologia adotada para o ensaio foi a EN 26891.

Obs.: Em **6**, a rigidez da ligação foi determinada a partir da inclinação do trecho linear da curva carga x deslizamento. Nos CPs de cisalhamento foram utilizadas chapas de aço e parafusos para confinar o concreto.

\* - Não especificado no trabalho.

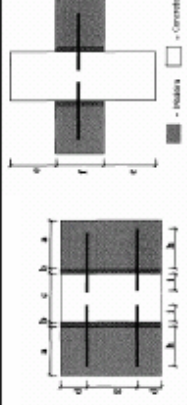
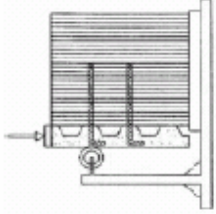
Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

Autor (s)	Madeira				Concreto		Elemento de ligação				F <sub>100</sub> (kN) por conector		Modos de Ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	E <sub>0</sub> (MPa)	E <sub>0,05</sub> (MPa)	E <sub>0,1</sub> (MPa)	P (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>ca</sub> (MPa)	E <sub>cs</sub> (MPa)	Tipo	Φ (mm)	L <sub>m</sub> (mm)	L <sub>c</sub> (mm)	K <sub>ser</sub> (kN/mm)		
PIGOZZO (2004)	Escalipo cimdora	69,82	*	1030	26,0	*	26,0	Barra serv.	8,0	7,6	20,0	41,5	47,4	
	Escalipo cimdora	71,01	*	1047	26,0	*	26,0	Barra serv.	12,5	10,0	20,0	65,3	61,3	
	Escalipo cimdora	69,82	*	1030	26,0	*	26,0	Barra serv.	8,0	7,6	20,0	31,2	42,53	
	Escalipo cimdora	71,01	*	1047	26,0	*	26,0	Barra serv.	12,5	10,0	20,0	24,97	38,20	
	Escalipo cimdora	69,82	*	1030	26,0	*	26,0	Barra serv.	8,0	7,6	20,0	8,97	8,67	
	Escalipo cimdora	71,01	*	1047	26,0	*	26,0	Barra serv.	12,5	10,0	20,0	8,95	6,85	

Obs: A resistência da ligação foi determinada de acordo com anexo c da NBR 7190 e o K<sub>ser</sub> através da curva carga-deslizamento.

\* - Não especificado no trabalho.

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

Autor (es)	Madeira			Concreto		Elemento de ligação				F <sub>10d</sub> (kN) por conector	Modos de ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	f <sub>trac</sub> (MPa)	E <sub>mod</sub> (MPa)	P (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>con</sub> (MPa)	E <sub>ch</sub> (MPa)	Tipo	Φ (mm)	L <sub>m</sub> (mm)			
8 DIAS (2005)	Spruce	*	*	454	46	34000	Barra lisa	10,0	100	40	5,65	 <p>formação de duas rotulas plásticas nas barras, com esmagamento da madeira e do concreto</p>
	Spruce	*	*	454	84	42000	Barra lisa	10,0	100	40	3,80	
	Spruce	*	*	454	27	15000	Barra lisa	10,0	100	40	5,90	
	Chestnut	*	*	566	46	34000	Barra lisa	10,0	100	40	3,45	
	Maritime pine	*	*	605	46	34000	Barra lisa	10,0	100	40	4,63	
	Spruce	*	*	454	46	34000	Barra lisa	8,0	80	40	3,63	
	Spruce	*	*	454	46	34000	Barra nerv.	10,0	120	60	6,55	
9 CECOTTI et al (2006)	Spruce	21	10000	420	30,4	*	Barra nerv.	18,0	*	*	39,7	
											25,0	

Obs: Em 8 e 9, a metodologia adotada para o ensaio foi a EN 26 891. \* - Não especificado no trabalho.

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

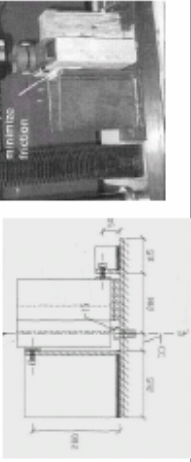
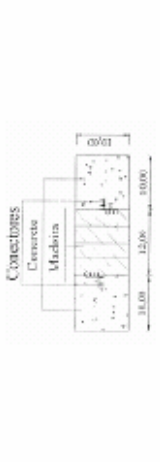
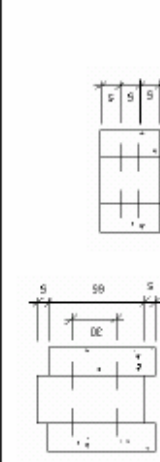


Autor (es)	Madeira				Concreto		Elemento de ligação				$F_{ur}$ (kN) por conector	Modos de ruptura
	Tipo	$f_{com}$ (MPa)	$E_{com}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{cm}$ (MPa)	$E_{cm}$ (MPa)	Tipo	$\Phi$ (mm)	$L_m$ (mm)	$L_c$ (mm)		
10 MATTHESEN e SEGUNDINHO (2002)	Cupiniba	51,3	10524	838	41,7	39020	Prego	7,0	85	78	11,25	Esmagamento da madeira
							Parafuso	9,5	64	64	21,43	Esmagamento da madeira
											13,15	Esmagamento da madeira
											19,20	Esmagamento da madeira
37,2	41210	Parafuso	12,5	64	64	17,85	Esmagamento da madeira					
312,46	24,03	33,1	38450	Barra nerv.	12,5	80	70	312,46	Esmagamento da madeira			
										60,4	Esmagamento do concreto	
11 BENTEZ (2000)	Dormentes de uma estrada de ferro antiga de Eucalyptus sideroyllon e Eucalyptus microcupa Maridã	79	24	1170	25,0	Pino aço liso	20,0	*	*	*	60,4	Esmagamento do concreto
						Perfil I	*	*	*	173,1	Esmagamento do concreto	
										204,5	Esmagamento do concreto	
										176,6	Esmagamento do concreto e da madeira	
115,5	Esmagamento do concreto e da madeira											

Obs.: Em 10, a resistência da ligação foi determinada de acordo com anexo c da NBR 7190 (1997). O  $K_{ur}$  foi determinado de acordo com o item B.8.4 da NBR 7190 (1997).

\* - Não especificado no trabalho.



Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

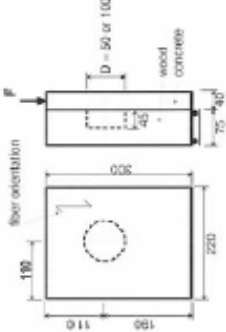
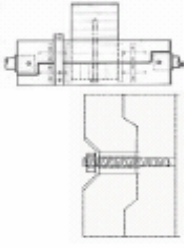
Autor (es)	Madeira				Concreto		Conector				F <sub>lim</sub> (kN) por conector	Modos Ruptura	CF para ensaio da ligação		
	Tipo	f <sub>ten</sub> (MPa)	E <sub>ten</sub> (MPa)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>cm</sub> (MPa)	Tipo	Φ (mm)	L <sub>m</sub> (mm)	L <sub>c</sub> (mm)				K <sub>ser</sub> (kN/mm)	
14 CLOUSTON et al. (2004)	Southern pine	30,0	13800	*	22,0	27900	Malha de aço com espessura de 2,8 mm	-	45	55	52,05	Escoramento do conector			
											21,35				
15 OLIVEIRA (1999)	Eucalyptus Grandis	72,4	20983	804	17,40	*	Chapa com dentes estrançados espessura de 1,35 mm	-	59	40	13,0	Escoramento do conector			
											91,84				
16 SOUZA (1997)	Parajá	85,0	27621	*	19,4	27118	Cavilhas	31,4	50,0	49,8	34,0	fissuração do concreto			
											-			17,0	fissuração do concreto
											7,7			emburramento dos pinos na madeira.	

Obs: Em 14, a metodologia adotada para o ensaio foi a ASTM D 5652.

Obs: Em 15, o módulo de deslizamento foi calculado através da declividade da reta secante à curva carga-deslizamento, em seu trecho inicial.

\* - Não especificado no trabalho.

Tabela B.1. Características e resultados de ensaios de ligações realizados por diversos pesquisadores (continuação). Fonte: Carvalho (2008)

Autor (es)	Madeira				Concreto		Conector				$F_{1m}$ (kN) por conector	Modos Ruptura	CP para ensaio da ligação
	Tipo	$f_{c,m}$ (MPa)	$E_{c,m}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c,n}$ (MPa)	$E_{c,n}$ (MPa)	Tipo	$\Phi$ (mm)	$L_m$ (mm)	$L_c$ (mm)			
<b>17</b> HEIDUSCHKE e KLASAL (2003)	Soubiram pine	*	12200	530	123,0	50000	entalhe	50	40	45	30,0	Cisalhamento do pino de concreto	
											*		
<b>18</b> GUTKOWSKI et al (2001)	*	*	*	*	27,6	*	Eentalhe e parafusos Hilti	12,0	38	67	82,0	Ruptura na madeira Ruptura no concreto	
											24,29		

Obs: Em **17** foi utilizado concreto reforçado com fibras de aço.

\* - Não especificado no trabalho.