

CLÉCIO MAGALHÃES DO VALE

**LIGAÇÕES ESTRUTURAIS PARA MADEIRA
ROLIÇA DE *Eucalyptus* DE PEQUENO
DIÂMETRO**

LAVRAS-MG

2011

CLÉCIO MAGALHÃES DO VALE

**LIGAÇÕES ESTRUTURAIS PARA MADEIRA ROLIÇA DE *Eucalyptus*
DE PEQUENO DIÂMETRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Co-orientador

Prof. Dr. José Tarcísio Lima

**LAVRAS-MG
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Vale, Clécio Magalhães do.

Ligações estruturais para madeira roliça de *Eucalyptus* de pequeno diâmetro / Clécio Magalhães do Vale. ó Lavras : UFLA, 2011.

127 p. : il.

Tese (doutorado) ó Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilha Carrasco.

Bibliografia.

1. Estruturas de madeira. 2. Propriedades da madeira. 3. Ligações mecânicas madeira-aço. 4. Secagem da madeira. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD ó 674.12

CLÉCIO MAGALHÃES DO VALE

**LIGAÇÕES ESTRUTURAIS PARA MADEIRA ROLIÇA DE *Eucalyptus*
DE PEQUENO DIÂMETRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 04 de agosto de 2011

Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
Prof. Dr. Jorge Manuel Gonçalves Branco
Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Prof. Dr. Luis Eustáquio Moreira

UFLA
UMINHO
UFLA
UFMG

Orientador

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
UFMG

Co-Orientador

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
UFLA

**LAVRAS-MG
2011**

Dedicado aos meus pais
Ary e Clélia.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edgar Carrasco, pela rica convivência e pela orientação zelosa e esclarecedora.

Aos professores do Programa em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo aprendizado, em especial ao prof. José Tarcísio Lima, pela atenção dedicada.

À PUC Minas, pelo apoio financeiro através de bolsa concedida por seu programa de capacitação docente.

À Escola de Engenharia da UFMG, pela disponibilização do Laboratório de Estruturas para os ensaios mecânicos.

À Universidade Federal de Ouro Preto, em especial ao chefe do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Humberto Guimarães e à presidente do Colegiado do Curso de Arquitetura e Urbanismo, Clarisse Vilella, pelo apoio e incentivo.

À CENIBRA ó Celulose Nipo-Brasileira S/A, pela doação do material desta pesquisa. À ESMADÉ - Estruturas de Madeira, pelo apoio na confecção dos corpos-de-prova.

Ao CEDETEM SENAI - Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Madeira e do Mobiliário "Petrônio Machado Zicaö, em Contagem/MG, pelo apoio na confecção dos corpos-de-prova.

Ao Marcos Vinicius Pereira e à Luisa Guasti, pelo apoio fundamental para a realização dos ensaios físico-mecânicos.

Aos colegas do Programa em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA, pelo companheirismo na temporada em Lavras.

Aos colegas da Pós-graduação em Estruturas da Madeira, da Escola de Engenharia da UFMG, Valmir Sartori e Ana Lúcia Crespo, pelas trocas de experiências.

À Arlaine, da CP2, e à profa. Maria Cláudia, da UFOP, pelo apoio na análise estatística.

À secretária Cristiane Rodrigues Carvalho, pela presteza e apoio.

Ao Edson, marceneiro, e ao Homero, serralheiro, profissionais zelosos.

Aos meus irmãos Penha, Tânia e Rodrigo.

À Tuca e Clara, pelo apoio, compreensão e carinho necessários.

RESUMO

VALE, Clécio Magalhães do. **LIGAÇÃO ESTRUTURAL PARA MADEIRA ROLIÇA DE *Eucalyptus* DE PEQUENO DIÂMETRO**. 2011. 127 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) ó Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

As ligações em estruturas de madeira potencializam sua aplicação. Ampliam as soluções construtivas com durabilidade, resistência e segurança. Com o objetivo de desenvolver uma solução de ligação mecânica para a madeira roliça de *Eucalyptus* de pequeno diâmetro avaliou-se, experimentalmente, modelo de ligação estrutural, empregando barra de aço rosqueada. Para a caracterização da madeira, foram determinadas suas propriedades físicas, de resistência e rigidez ó umidade (U), densidade aparente (ρ), módulo de elasticidade na flexão (E_{mo}), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{co}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{co}) e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{vo}) ó mediante metodologia de ensaios híbrida orientada pela NBR7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira e a norma européia EN14251:2003 - Structural Round Timber - Test Methods. Os parâmetros geométricos da ligação ó diâmetro da peça de madeira (D), diâmetro da barra metálica (d), profundidade de ancoragem da barra metálica na madeira (p) ó foram estatisticamente significativos para seu desempenho e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira (f_{vo}) estabeleceu relação linear com sua resistência mecânica. Investigou-se a secagem da madeira com efeitos localizados sobre a superfície de adesão da ligação proposta, mediante emprego de artefato elétrico emissor de calor. Os resultados de resistência mecânica ao arrancamento equivaleram ao da madeira em umidade de equilíbrio, comprovando a eficácia da metodologia empregada. A ligação proposta aplica-se, entre outras tipologias estruturais, a treliças espaciais (ou tridimensionais).

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Propriedades da madeira. Ligações mecânicas madeira-aço. Secagem da madeira.

¹ Comitê Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco ó UFMG (Orientador), José Tarcísio Lima ó UFLA (Co-Orientador), José Reinaldo Moreira da Silva ó (UFLA).

ABSTRACT

VALE, Clécio Magalhães do. **Structural joints for *Eucalyptus* small diameter roundwood**. 2011. 127 p. Thesis (Doctors in Wood Science and Technology). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.²

Joints for wood structures extend wood applicability with strength, durability and safety. In order to develop a joint solution for *Eucalyptus* small diameter round wood were experimentally evaluated an adhesive joint model with threaded steel rod. For the wood characterization, its physical, strength and stiffness properties were determined ó moisture content (U), density (ρ), modulus of elasticity in bending (E_{mo}), modulus of elasticity in compression parallel to grain (E_{co}), compressive strength parallel to grain (f_{co}) and shear strength parallel to grain (f_{vo}) ó trough a hybrid test methodology oriented by NBR7190: 1997 - Design of Wood Structures and European Standard EN14251: 2003 - Structural Round Timber - Test Methods. The joint geometrical parameters ó wood piece diameter (D), metal bar diameter (d), steel rod anchoring depth (p) ó presented statistical significance performance and the parallel to grain shear strength (f_{vo}) kept linear relationship with pullout mechanical strength. By using electric heat emitter device, effects of a localized wood drying on adhesion surface were investigated. Results were equivalent to pullout strength of wood in equilibrium moisture content, proving the methodology efficacy. The evaluated joint applies, among other structural typologies, to spatial trusses (or three-dimensional).

Keywords: Wood structures. Wood properties. Wood-steel mechanical joints. Wood drying.

² Guidance Committee: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco ó UFMG (Orientador), José Tarcísio Lima ó UFLA (Co-Orientador), José Reinaldo Moreira da Silva ó (UFLA).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 ó DISTRIBUIÇÃO, POR SEGMENTO INDUSTRIAL, DE ÁREA DE FLORESTAS PLANTADAS COM <i>EUCALYPTUS</i> , NAS EMPRESAS ASSOCIADAS À ABRAF EM 2009. TOTAL: 2.445.070 HA.	21
FIGURA 2 ó PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE MADEIRA EM TORA DE FLORESTAS PLANTADAS, POR SEGMENTO, EM 2009.....	22
FIGURA 3 ó OFICINAS DA ARCHITECTURAL ASSOCIATION (DORSET, INGLATERRA) EXECUTADA EM MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENOS DIÂMETROS.	26
FIGURA 4 ó EFEITO DO LENHO JUVENIL SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS: 1) PROPRIEDADES QUE INCREMENTAM COM A PASSAGEM DO LENHO JUVENIL PARA O LENHO ADULTO; 2) PROPRIEDADES QUE DECRESCEM COM A PASSAGEM DO LENHO JUVENIL PARA O LENHO ADULTO.....	28
FIGURA 5 ó MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENO DIÂMETRO DE EUCALIPTO: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO LENHO JUVENIL NO TRONCO DA ÁRVORE.....	29
FIGURA 6 ó PEÇA DE SEÇÃO RETANGULAR OBTIDA DE OUTRA DE SEÇÃO CIRCULAR.....	31
FIGURA 7 ó APLICAÇÃO DE MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENO DIÂMETRO: TORRE DE DRENTHE, HOLANDA.	32
FIGURA 8 ó CHILDRENØS CENTER, ESCÓCIA: ESTRUTURA PREVIAMENTE FLEXIONADA....	35
FIGURA 9 ó CORPO-DE-PROVA PARA CARACTERIZAÇÃO DE UMIDADE E DENSIDADE APARENTE; MÉTODO DE OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES.....	37
FIGURA 10 ó DIAGRAMA DE ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA A QUATRO PONTOS, CONFORME EN 14251 (ECS, 2003); GRÁFICO DE FORÇA CORTANTE.	39
FIGURA 11 ó ESQUEMA DE VARIAÇÃO DO VÃO (L) PARA O ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA A QUATRO PONTOS.	41
FIGURA 12 ó ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA E MECANISMO DE SUPORTE DOS TRANSDUTORES, FIXADOS EM AMBAS AS FACES DOS CORPOS-DE-PROVA.....	42
FIGURA 13 ó VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (E_{M0}) PARA AS DIFERENTES RELAÇÕES L/D.....	44
FIGURA 14 ó DIAGRAMA DE EXECUÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS, COM CLIP-GAGE EM AMBAS AS FACES DO CORPO-DE-PROVA.	45
FIGURA 15 ó DIAGRAMA DE CARREGAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA À COMPRESSÃO, CONFORME NBR 7190 (ABNT, 1997).....	47
FIGURA 16 ó CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO A ENSAIO; DETALHE DO PADRÃO DE RUPTURA.	48
FIGURA 17 ó CORPO-DE-PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS: A) CONFORME NBR 7190; B) ADAPTADO PARA MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENO DIÂMETRO.	52
FIGURA 18 ó PADRÃO DE RUPTURA DOS CPS EM ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS.	52
FIGURA 19 ó CORPO-DE-PROVA DE EXPERIMENTO CONDUZIDO POR ECKELMAN (2004). .	56
FIGURA 20 ó CORPOS-DE-PROVA COM FURAÇÃO TRANSVERSAL REDONDA E ENSAIO DE ARRANCAMENTO.....	59
FIGURA 21 ó CORPO-DE-PROVA: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	59
FIGURA 22 ó PADRÕES DE RUPTURA.	60

FIGURA 23 ó CONJUGAÇÃO DOS ESFORÇOS ATUANTES SOBRE O CORPO-DE-PROVA.....	61
FIGURA 24 ó RUPTURA POR FENDILHAMENTO.	61
FIGURA 25 ó CORPOS-DE-PROVA (FUROS QUADRADOS): MADEIRA LAMINADA COLADA, BARRA METÁLICA ROSQUEADA, BARRA CHATA METÁLICA, PORCA.	63
FIGURA 26 ó PADRÕES DE RUPTURA.	64
FIGURA 27 ó ENSAIO DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE FORÇA MÁXIMA.	66
FIGURA 28 ó CORPOS-DE-PROVA (FURAÇÃO QUADRADA E REDONDA): COMPARAÇÃO ENTRE PADRÕES DE RUPTURA.....	66
FIGURA 29 ó EXEMPLOS DE CONEXÕES COM BARRAS METÁLICAS EMBUTIDAS NA MADEIRA.	69
FIGURA 30 ó PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE CONFIGURAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO LONGITUDINAL ÀS FIBRAS.	74
FIGURA 31 ó DIAGRAMA EXPLICATIVO PARA HIPÓTESES DE CISLHAMENTO (ASSIMÉTRICO E SIMÉTRICO).....	75
FIGURA 32 ó PLANEJAMENTO DA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.	79
FIGURA 33 ó DIAGRAMA DE RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO.	80
FIGURA 34 ó CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.	81
FIGURA 35 ó PADRÕES DE RUPTURA.	83
FIGURA 36 ó ANÁLISE DE REGRESSÃO DA VARIÁVEL DEPENDENTE E DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS.....	87
FIGURA 37 ó GRÁFICOS DE RESÍDUOS PARA LOG F.....	94
FIGURA 38 ó REGRESSÃO DE F _{calc} SOBRE F _{máx}	97
FIGURA 39 ó GRÁFICO DE RESÍDUOS.	97
FIGURA 40 ó GRÁFICO DE RESÍDUOS DA REGRESSÃO DA EQUAÇÃO 20 SOBRE VALORES DE F _{máx}	100
FIGURA 41 ó TESTE DE INTERVALO DE CONFIANÇA.	102
FIGURA 42 ó CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS, COM DIFERENTES TEORES DE UMIDADE.	106
FIGURA 43 ó CORPOS-DE-PROVA E ENSAIO TÍPICO DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO.	109
FIGURA 44 ó CORPOS-DE-PROVA E INTRODUÇÃO DA RESINA EPÓXI NA PEÇA DE MADEIRA PERFURADA.	110
FIGURA 45 ó SECAGEM E OBTENÇÃO DE TEMPERATURA POR LASER.	112
FIGURA 46 ó PADRÕES DE RUPTURA DA LIGAÇÃO ADESIVA.	113
FIGURA 47 ó VARIAÇÃO DA FORÇA MÁXIMA, EM RELAÇÃO NÚMERO DE VEZES DE INTRODUÇÃO DA BARRA AQUECIDA NA MADEIRA PERFURADA.	115
FIGURA 48 ó ARTEFATO PARA SECAGEM LOCALIZADA DA MADEIRA: RESISTÊNCIA ELÉTRICA.	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE E_{M0} PARA DIFERENTES RELAÇÕES ENTRE VÃO ENTRE APOIOS E O DIÂMETRO DO CORPO-DE-PROVA (MPA)	42
TABELA 2 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS	43
TABELA 3 ó VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (E_{c0}), CONFORME EN 14251 (1) E NBR 7190 (2).....	48
TABELA 4 ó VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS ($FC0$), CONFORME EN 14251 (1) E NBR 7190 (2).....	50
TABELA 5 ó VALORES DE RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS, CONFORME NBR 7190	53
TABELA 6 ó CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS CORPOS-DE-PROVA E VALORES DE FORÇA MÁXIMA RESULTANTES DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	60
TABELA 7 ó CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS CORPOS-DE-PROVA E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	63
TABELA 8 ó ENSAIO DE ARRANCAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE FORÇA MÁXIMA E PADRÕES DE RUPTURA	65
TABELA 9 ó ESTIMATIVA DE VALORES DE FORÇA MÁXIMA CONSIDERANDO HIPÓTESE 1 ..	77
TABELA 10 ó ESTIMATIVA DE VALORES DE FORÇA MÁXIMA CONSIDERANDO HIPÓTESE 2	77
TABELA 11 ó ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA FORÇA MÁXIMA PARA DIFERENTES D	84
TABELA 12 ó ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA FORÇA MÁXIMA PARA DIFERENTES P	84
TABELA 13 ó ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA FORÇA MÁXIMA PARA DIFERENTES D	84
TABELA 14 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA CONSIDERANDO AS 3 VARIÁVEIS INDEPENDENTES D, D, P	85
TABELA 15 ó SIGNIFICÂNCIA DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS	85
TABELA 16 ó CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS	86
TABELA 17 ó SIGNIFICÂNCIA DA EXPLICAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS PELAS VARIÁVEIS P, D, D	88
TABELA 18 ó TESTE DE EFEITO DAS VARIÁVEIS P, D, D	88
TABELA 19 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	89
TABELA 20 ó SIGNIFICÂNCIA DA EXPLICAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS PELAS VARIÁVEIS D, P, D	91
TABELA 21 ó SIGNIFICÂNCIA DA EXPLICAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS PELAS VARIÁVEIS D, P, D	91
TABELA 22 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	92
TABELA 23 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	93
TABELA 24 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA	94
TABELA 25 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	96
TABELA 26 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA	96
TABELA 27 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	99
TABELA 28 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA	99
TABELA 29 ó ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	101
TABELA 30 ó ANÁLISE DE VARIÂNCIA	101
TABELA 31 ó TESTE T E INTERVALO DE CONFIANÇA	102
TABELA 32 ó RESULTADOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL 1	110
TABELA 33 ó RESULTADOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL 2	112

TABELA 34 ó RESULTADOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL 3.....	114
TABELA 35 ó RESULTADOS INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL 4.....	117

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	16
1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Plantios florestais de Eucalyptus	20
2.2 Aplicação da madeira roliça.....	23
2.3 Propriedades físicas e anatômicas da madeira roliça de pequeno diâmetro.....	27
2.4 Propriedades mecânicas da madeira roliça.....	30
CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENO DIÂMETRO.....	33
1 INTRODUÇÃO	33
2 REFERENCIAL TEÓRICO	35
3 MATERIAL E MÉTODO.....	35
3.1 Umidade (U) e densidade aparente ()	37
3.1.1 Resultados e Discussão.....	37
3.2 Módulo de elasticidade na flexão.....	38
3.2.1 Procedimentos normativos	38
3.2.2 Programa experimental.....	41
3.2.3 Resultados e discussão.....	42
3.2.4 Considerações.....	44
3.3 Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})	45
3.3.1 Resultados e discussão.....	47
3.4 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})	49
3.4.1 Resultados e discussão.....	50
3.5 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).....	51
3.5.1 Resultados e discussão.....	53
4 CONCLUSÃO	53
CAPÍTULO 2 - LIGAÇÕES MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	55

1	INTRODUÇÃO	55
2	REFERENCIAL TEÓRICO	56
3	MATERIAL E MÉTODO.....	58
3.1	Ligação mecânica - Barra rosqueada / tubo galvanizado / madeira - Furação transversal redonda	58
3.1.1	Resultados e discussão.....	59
3.1.2	Considerações.....	62
3.2	Ligação mecânica - Barra rosqueada / tubo galvanizado / madeira - Furação transversal quadrada	62
3.2.1	Resultados e discussão.....	63
4	CONCLUSÃO	67
CAPÍTULO 3 - LIGAÇÕES ADESIVAS		69
1	INTRODUÇÃO	69
2	REFERENCIAL TEÓRICO	70
3	MATERIAL E MÉTODOS	73
3.1	Programa experimental.....	73
3.2	Procedimentos de ensaio	80
3.3	Resultados e discussão.....	82
3.3.1	Análise estatística - Regressão linear simples.....	84
3.3.2	Análise estatística - Regressão multivariada.....	87
3.3.3	Análise estatística - Regressão multivariada não considerando CPs com barras metálicas rompidas.....	90
3.3.3.1	Análise estatística - relação entre resistência ao cisalhamento e força máxima de ruptura.....	93
3.3.3.2	Análise estatística ó relação entre f_{v0} e F Máx, estabelecida a partir da norma europeia prEN 1995-2 - Eurocode 5 (ECS,1995).....	98
4	CONCLUSÃO	103
CAPÍTULO 4 - SECAGEM LOCALIZADA DA MADEIRA.....		105
1	INTRODUÇÃO	105

2	REFERENCIAL TEÓRICO	105
3	MATERIAL E MÉTODOS	108
3.1	Programa experimental 1	109
3.1.2	Resultados e discussão.....	110
3.1.3	Considerações.....	111
3.2	Programa experimental 2.....	111
3.2.1	Resultados e discussão.....	112
3.2.2	Considerações.....	113
3.3	Programa experimental 3.....	114
3.3.1	Resultados e discussão.....	114
3.3.2	Considerações.....	115
3.4	Programa experimental 4.....	116
3.4.1	Resultados e discussão.....	117
3.4.2	Considerações.....	117
4	CONCLUSÃO	118
	CONCLUSÃO GERAL.....	119
	REFERÊNCIAS	121

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

Experimenta-se, atualmente, uma aplicação crescente da madeira no campo da construção civil. Este fenômeno relaciona-se com o desenvolvimento tecnológico atual (novos produtos e técnicas, tratamentos preservativos etc.), com a valorização de técnicas tradicionais de construir, com o progressivo desenvolvimento do setor de base florestal no país e, também, com a preocupação com a sustentabilidade no consumo de recursos naturais por parte da atividade de construção. A madeira, principalmente por sua natureza renovável, baixo custo energético para produção (inferior ao concreto e ao aço), capacidade de reter CO₂, tem baixo impacto ambiental. Se originária de plantios florestais, ainda alivia a pressão sobre as florestas nativas.

A tradição de se construir com madeira remonta, no país, ao período colonial. Contudo, não se tem uma linha evolutiva que estabeleça, na atualidade, níveis mais elaborados de prática construtiva (industrialização, racionalidade, componentes industriais, acessórios, entre outros) (Wisnik, 2005). São necessárias, ainda, pesquisas que incrementem e renovem a prática de construção em madeira, acrescentando informação sobre o material e disponibilizando critérios de projeto aos arquitetos e engenheiros.

A madeira de reflorestamento de *Eucalyptus*, roliça e de pequeno diâmetro, tem potencial para aplicação ampla na construção civil, pois é subutilizada. Isto ocorre tanto no Brasil quanto nos demais países produtores de madeira. Sua comercialização, aqui, se dá na forma de moirões (infraestrutura rural, brinquedos infantis), seguida por caibros (escoras/coberturas) e esteios (infraestrutura rural/coberturas), o que demonstra restrita aceitação do produto.

Como o potencial construtivo da madeira está, também, associado à conectividade dos componentes estruturais, as soluções de conexões tornam-se fundamentais para difusão do emprego de madeira roliça de pequeno diâmetro ó elas expandem as possibilidades construtivas e lhes garantem mais eficiência e confiabilidade.

O objetivo desta pesquisa foi, portanto, desenvolver e avaliar, experimentalmente, uma solução de ligação mecânica para a madeira roliça de pequeno diâmetro (MRPD), considerando que os entraves à sua aplicação como elemento estrutural relacionam-se à pouca investigação de soluções de conexão ó simples e de uso universal ó, ausência de classificação sistemática do material e desconhecimento prático de soluções estruturais específicas.

A partir da caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira e da avaliação experimental do desempenho estrutural da ligação, foi indicada a aplicabilidade do elemento estrutural desenvolvido em estruturas espaciais (também denominadas treliças espaciais ou tridimensionais). Tais estruturas compõem-se de barras dispostas, tridimensionalmente, em um sistema com juntas articuladas (nós) e constituem mecanismos que mudam as direções das forças, transmitindo cargas a longas distâncias sem apoios intermediários; devido à sua uniformidade modular, é apta à pré-fabricação.

Os objetivos específicos foram:

- desenvolvimento e avaliação experimental de ligação mecânica madeira/madeira com elemento metálico;
- caracterização das propriedades físicas, de resistência e rigidez da madeira roliça de pequeno diâmetro de *Eucalyptus*.

Incrementar técnicas de construir com peças roliças de pequeno diâmetro, para uso na construção civil, contribui para menor consumo de energia nos processos produtivos se comparado à produção de madeira serrada, pois se eliminam as etapas de desdobro, aparelhamento e aplainamento. Reduzem-se o

desperdício, a produção de resíduos e o impacto ambiental relacionados ao processamento da matéria-prima.

A madeira roliça adequa-se a diversos sistemas estruturais e construtivos, e possibilita desmontagem e aproveitamento dos resíduos no processo de transformação.

Esta matéria-prima é comum em edificações rurais como elemento de cobertura, guarda-corpos, postes, moirões, etc. Estruturalmente, apenas quando são empregadas árvores de maiores diâmetros. Para ampliar sua aplicação é necessário que se modifique não só a atitude do usuário/consumidor, mas também que se investiguem novas possibilidades construtivas, aliando tradição e inovação. Sistemas construtivos leves, como as estruturas espaciais, são adequados para ao emprego da MRPD; são capazes de atender às mais diversas demandas: estruturas residenciais, comerciais, industriais, sejam urbanas ou rurais.

Em face do conhecimento insuficiente dos sistemas construtivos em madeira e de sua associação a soluções tradicionais, não inovadoras, esta pesquisa pretende incentivar e contribuir, para renovar as técnicas de construção com madeira roliça, ampliando as possibilidades de utilização desta matéria-prima ao mesmo tempo em que lhe agrega valor. Contribuirá, também, para o uso múltiplo da floresta, para o incremento dos mecanismos de desenvolvimento limpos e, para potencializar o uso da madeira na construção civil como material estrutural.

É apresentada, a seguir, a estrutura de organização da tese.

A **Introdução Geral** expõe o tema da pesquisa, seus objetivos e justificativas. Aborda o referencial teórico correlato ao tema ó plantios florestais de *Eucalyptus*; aplicabilidade da madeira roliça; propriedades físicas e anatômicas da madeira roliça de pequeno diâmetro; propriedades mecânicas da madeira roliça.

O **Capítulo 1** trata das propriedades físicas, de resistência e rigidez da MRPD empregada na pesquisa. São determinadas a umidade (U), a densidade aparente (ρ_a), o módulo de elasticidade na flexão ($E_{m,0}$), o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0}$), a resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$). Face à inexistência de normas brasileiras para a caracterização da madeira roliça mediante corpos-de-prova de dimensões estruturais, empregou-se uma metodologia híbrida orientada pelas normas EN 14251:2003 ó Structural Round Timber - Test Methods e NBR 7190:1997 ó Projeto de Estruturas de Madeira. Conclui pela possibilidade dos procedimentos de ensaios adotados na pesquisa subsidiarem futuros documentos normativos oficiais.

O **Capítulo 2** trata das ligações mecânicas em estruturas de madeira. Apresenta os experimentos preliminares da pesquisa, baseados na revisão bibliográfica efetuada. Conclui pela possibilidade de seu aprimoramento e pela necessidade de se buscar solução mais simples, pois o modelo avaliado experimentalmente encontrou dificuldades operacionais.

O **Capítulo 3** trata da avaliação experimental de modelo de ligação adesiva, considerando os parâmetros geométricos ó diâmetro da barra de madeira (D), diâmetro da barra metálica (d), profundidade de ancoragem da barra metálica na madeira (p) ó e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira ($f_{v,0}$), como as variáveis determinantes do seu desempenho. Conclui que os parâmetros geométricos adotados são significativos estatisticamente e que a propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras estabelece relação linear com os valores de resistência ao arrancamento.

O **Capítulo 4** apresenta uma investigação sobre a possibilidade de secagem da madeira, com efeitos localizados na superfície de adesão. São relatados quatro experimentos, que objetivam estabelecer uma metodologia.

Conclui-se pela potencialidade do método e recomenda-se a sequência das investigações, considerando-se sua praticidade e eficácia.

A **Conclusão Geral** sintetiza os principais pontos investigados na pesquisa e as conclusões estabelecidas. Conclui que as ligações adesivas do tipo investigado são adequadas à aplicação em madeira roliça de pequeno diâmetro de *Eucalyptus*, comenta a possibilidade de aplicação estrutural para a ligação e o potencial de continuidade da pesquisa decorrente dessa investigação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Plantios florestais de *Eucalyptus*

A madeira roliça de eucalipto é proveniente de florestas plantadas, as quais constituem atividade econômica com oferta de bens e serviços à sociedade. Desempenham papel fundamental em relação às questões climáticas: (1) contribuem, atualmente, com cerca de 1/6 das emissões globais de carbono, quando desmatadas ou utilizadas de modo não sustentável; (2) se manejadas de modo sustentável, produzem madeira para suprimento de matérias-primas limpas e energia renovável ó como uma alternativa à queima de combustíveis fósseis ou à queima de biomassa não-renovável; (3) têm potencial de absorver e armazenar em sua biomassa, no solo e nos produtos florestais (através do processo natural de fixação do carbono na estrutura da madeira) cerca de 1/10 das emissões globais de carbono previstas para a primeira metade deste século. Esta estocagem pode ser mantida durante sua vida útil, o que justifica o emprego dos produtos florestais madeireiros, como produtos de madeira sólida (Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, 2010).

A área de florestas com *Eucalyptus* está em expansão na maioria dos estados brasileiros com tradição nesta silvicultura, com crescimento médio, no país, de 7,1% ao ano, entre 2004 e 2009. Houve expansão de mais de 1 milhão

de hectares na área plantada nos últimos 5 anos (crescimento acumulado de 41,1% no período). As expansões no segmento de celulose e papel (C&P), principalmente, têm impulsionado o crescimento nas áreas plantadas com eucalipto, conforme Figura 1.

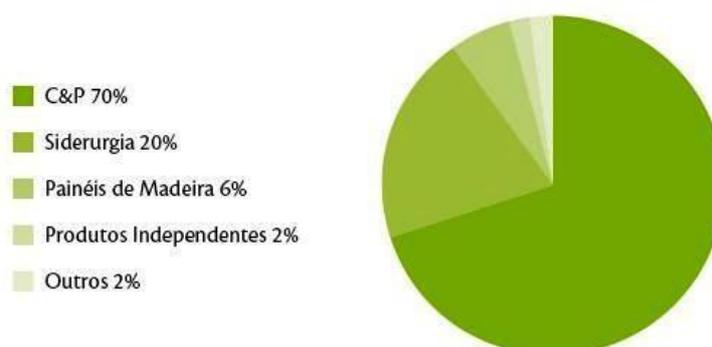


Figura 1 ó Distribuição, por segmento industrial, de área de florestas plantadas com *Eucalyptus*, nas empresas associadas à ABRAF em 2009. Total: 2.445.070 ha. Fonte: ABRAF (2010).

As florestas plantadas precisam ser desbastadas para otimizar seu crescimento. Os produtos decorrentes desta operação têm baixo valor de mercado. Pretende-se, ao se investigar novas aplicações para a madeira roliça de pequeno diâmetro, agregar valor a estes produtos subutilizados, ao mesmo tempo em que se incentivam operações necessárias ao incremento do plantio remanescente. Mesmo para as florestas nativas, sujeitas ao manejo sustentável, os indivíduos com menor diâmetro podem ser seletivamente abatidos, o que fortalece a saúde da floresta.

O Brasil consome, internamente, toda sua produção de madeira em tora proveniente de florestas plantadas. As importações ou exportações são praticamente nulas. Essa matéria-prima é destinada ao processamento industrial de diversos segmentos do mercado doméstico. As cadeias de alto consumo de madeira em tora são, pela ordem, as dos produtores de celulose e papel, a

siderurgia a carvão vegetal, os segmentos de madeira serrada, compensados, painéis de madeira industrializada e móveis, conforme Figura 2.

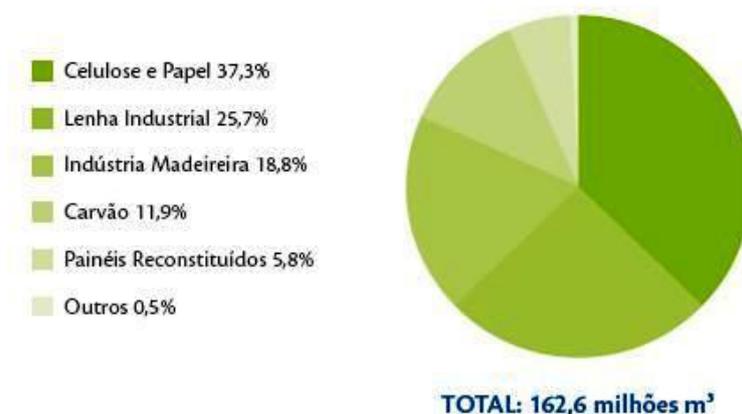


Figura 2 Participação do consumo de madeira em tora de florestas plantadas, por segmento, em 2009.

Fonte: ABRAF (2010).

Em 2009 foram consumidos estimados 162,6 milhões m³ de toras de florestas plantadas. Desse total, 68,4% referem-se ao consumo de eucalipto e 31,6% de *Pinus*. O segmento de celulose e papel foi o principal consumidor, absorvendo 37,3% das toras produzidas; a lenha industrial 25,7%, a indústria madeireira 18,8%; o setor siderúrgico consumiu 11,9% (carvão vegetal); painéis reconstituídos 5,8% (ABRAF, 2010).

A madeira roliça de pequeno diâmetro, originária de plantios florestais, é objeto de pesquisa em diversos países, como alternativa para atender a demanda por estruturas de madeira, principalmente, de pequeno e médio porte. Embora seja grande produtor de madeira de reflorestamento, o Brasil (Minas Gerais, em particular) tem a maior parte de sua produção voltada para os setores industriais de papel, celulose e carvão vegetal. Para emprego estrutural, a produção é incipiente, com as espécies nativas preponderando sobre as plantadas.

Minas Gerais permanece o estado com maior área plantada, embora as taxas de crescimento de alguns estados o tenham superado. MG apresentou, em 2009, 1.440.000 ha de floresta plantada, em um total de 6.310.450 ha no país (ABRAF, 2010).

Os números referentes a Minas Gerais, principalmente, indicam que a disponibilidade da madeira proveniente de desbastes é significativa, pois o estado tem a maior representatividade no negócio florestal brasileiro.

2.2 Aplicação da madeira roliça

No Brasil, a abordagem do uso estrutural da MRPD relaciona-se, principalmente, com a possibilidade de uso dos produtos residuais das várias etapas de manejo dos plantios florestais de *Eucalyptus*. O material proveniente de desbastes suscita investigações na cadeia produtiva da indústria madeireira com vistas a melhor desempenho de mercado. O material também é avaliado como alternativa construtiva para o segmento da habitação de interesse social.

Ino (1992) sistematiza, em dois grupos básicos, as soluções construtivas mais comuns em madeira no Brasil: pilar/viga e painéis. Avalia, positivamente, o emprego de madeira roliça (*Eucalyptus*) na construção civil, devido ao atual estágio tecnológico das atividades de reflorestamento, o qual permite a obtenção de peças uniformes e retilíneas com algumas espécies. Destaca o uso de peças roliças na construção habitacional em diversos países e aborda o papel fundamental das ligações na junção dos componentes: desde as mais tradicionais, com origem no Japão, até os conectores metálicos da atualidade.

Partel (2006) produziu um levantamento do estágio de industrialização do material e constatou, em São Paulo, maior fornecimento de MRPD em áreas rurais. A demanda, em ordem decrescente, era por moirões, brinquedos infantis e construção civil e, nesta, a maior demanda era por peças utilizadas em escoras,

coberturas e esteios para fins de infra-estrutura rural. Identificou oportunidades de aproveitamento de rejeitos da matéria-prima nas cadeias produtivas do *Eucalyptus* e do *Pinus*, realizadas em pesquisas nas empresas destes segmentos. Ambas apresentaram viabilidade econômica. Desenvolveu, a partir da madeira de *Eucalyptus*, painel estrutural composto de metades de peças roliças com pequeno diâmetro, curtas, justapostas e pregadas em chapas OSB (*oriented strand board*), destinadas a edificações para habitação social.

O mercado nacional de construção pré-fabricada em madeira, voltado para o segmento residencial, emprega a madeira roliça no sistema *log-home*, mas a utiliza em diâmetros maiores em sua estrutura principal ó reserva às peças de menor seção cargas secundárias (César, 2002).

Nos Estados Unidos a MRPD é investigada não só pela justificativa de aproveitamento do produto originário das operações de desbastes nas florestas plantadas, mas também pelo volume desta madeira estocada nas florestas nativas. Resultado de uma política de combate a incêndios que se estendeu desde 1920 a meados de 1980 (Eastin, 2007), as florestas armazenaram considerável estoque de espécies de pequeno diâmetro, o qual se tornou material combustível em potencial. Tal fenômeno vem propiciando incêndios de proporções catastróficas graças à fácil propagação do fogo nas árvores de pequeno diâmetro. Desde então, diversas pesquisas apontam a necessidade de remoção deste material, investigando, para isso, sua viabilidade econômica (Cumbo; Smith; Becker, 2004; Stern, 2001). Le Van-Green & Livingston (2003) identificaram a não viabilidade de uma simples remoção do material, devido ao alto custo envolvido e à incapacidade de processá-lo. Por outro lado, avaliaram que o material originário desta remoção é possível mediante uma hierarquia de usos: agregação de valor pelas comunidades locais, aproveitamento tradicional por serrarias locais e, por fim, o aproveitamento dos resíduos. Os resultados, entre outros, incluiu a utilização estrutural da madeira. As possibilidades seriam as

treliças estruturais planas (tesouras), sistemas construtivos pilar/viga, sistema entramado (*space-frame*) e estacas de fundação para edificações residenciais. Recomendaram a reformulação das normas projetuais, pois estas se originaram de ensaios realizados em função das dimensões das árvores de maior porte, não levando em conta a preponderância de lenho juvenil nas árvores de pequeno diâmetro.

Eckelman & Haviarova (2002) desenvolveram pequenos edifícios-protótipo (além de mobiliário escolar) a partir de madeira de pequeno diâmetro aparelhada. Empregando um sistema de encaixes macho-fêmea, conceberam um sistema construtivo modular, composto por poucos elementos padronizados, capaz de atender a demandas por moradia simples em regiões pouco desenvolvidas ou carentes de recursos tecnológicos. Estruturalmente, concluíram que é inerente ao tipo de construção que faz uso de elementos de pequenas dimensões, que estes sejam empregados em maior número ó para consolidar a construção ó mais do que poucos elementos de dimensões elevadas.

Segundo Slavid (2005), um estudo financiado pela União Européia sobre o uso de madeira roliça concluiu que sua principal aplicação se limitava às zonas rurais, sobretudo àquelas residenciais e de lazer, em forma de cabanas e pontes. A Finlândia, produtora de 1,8 milhão de m³ anuais deste tipo de madeira, com diâmetros entre 8 e 15 cm, destina a maior parte à produção de polpa para a indústria de papel, ou a consome como lenha. A alteração deste quadro passava por mudanças de atitude, mas também por aspectos ligados à colheita e, em se tratando das edificações, de métodos de uniões e tipos de elementos estruturais.

Architectural Association (2009), faculdade de arquitetura inglesa, desenvolve linha de pesquisa baseada no uso de madeira verde proveniente de desbastes em florestas, visando sua aplicação na construção civil. Os objetivos são: agregar valor a produtos madeireiros por intermédio do design; promover retorno comercial para os desbastes florestais; promover a prática do desbaste

florestal como operação necessária ao desempenho do plantio remanescente. Para alcançar resultados no emprego de madeira verde de pequeno diâmetro foram desenvolvidos novos modelos de conexão para as peças e experimentadas formas não convencionais na elaboração dos projetos (Figura 3). Na construção de oficinas em Hooke Park, empregaram-se peças com dimensões nominais variando entre 50 e 150 mm de diâmetro e 6,5 m de comprimento. Complementarmente, empregaram-se peças maiores de 11 m de comprimento e diâmetros de até 25 mm. Este experimento indicou que o modo mais eficiente de sua aplicação foi maximizar a resistência natural própria das árvores, empregando-a sob tensões diversas ou apenas sob compressão. O local tem a finalidade de implementar programas de ensino e pesquisa em sustentabilidade na construção civil.



Figura 3 ó Oficinas da Architectural Association (Dorset, Inglaterra) executada em madeira roliça de pequenos diâmetros.
Fonte: Architectural Association (2010).

Pesquisadores da Finlândia, Áustria, Inglaterra, França e Holanda (Ranta-Maunus, 1999) realizaram, em conjunto, extensa investigação a respeito do emprego da madeira roliça de pequeno diâmetro. Cobriram-se aspectos relacionados à disponibilidade da matéria-prima, dimensões e qualidade de coníferas provenientes de desbastes florestais, custo de colheita e preparação, métodos de secagem, tratamento preservativo, caracterização mecânica, potenciais tipos de estrutura e novas soluções de conexões. O relatório apontou

as principais razões para o emprego incipiente de madeira roliça, que são: a ausência do material nos pontos comerciais, a insuficiência de métodos e sistemas específicos para emprego da madeira roliça ó os quais são desconhecidos por arquitetos e carpinteiros ó, o desconhecimento da caracterização mecânica e a não existência de modelos e padrões para referenciar novos projetos. Avaliam que a madeira retirada no primeiro desbaste, com dimensão aproximada de 70 mm, já é adequada para comercialização.

2.3 Propriedades físicas e anatômicas da madeira roliça de pequeno diâmetro

A idade tem efeitos consideráveis sobre as propriedades físicas da madeira, sendo determinante para sua aplicação. Com o aumento da idade, aumentam o comprimento da fibra, a espessura da parede celular, a porcentagem de madeira madura, o conteúdo de extrativos e a densidade básica. Características anatômicas, como: comprimento de fibra, espessura da parede, diâmetro do lúmen, proporção dos diversos tipos de células e tecidos, como vasos e parênquimas, possuem relação com a densidade da madeira. Como a densidade é uma característica diretamente relacionada à sua porosidade, ela exerce influência na penetração do adesivo na madeira.

Em seus primeiros anos de crescimento a árvore produz madeira juvenil, uma região lenhosa que se estende a partir da medula em direção à casca. A partir deste período inicial de crescimento, as características da madeira produzida ano a ano, em cada sucessivo anel de crescimento, mudam significativamente. Durante um período de transição, variável entre *Eucalyptus* e coníferas, as características da madeira produzida gradualmente alteram-se até se tornarem relativamente constantes. Este material é considerado a madeira madura (United States Department of Agriculture - USDA, 1998). A Figura 4

mostra o comportamento das principais características e propriedades na região de ocorrência de lenho juvenil.



Figura 4 ó Efeito do lenho juvenil sobre as propriedades físicas e mecânicas: 1) propriedades que incrementam com a passagem do lenho juvenil para o lenho adulto; 2) propriedades que decrescem com a passagem do lenho juvenil para o lenho adulto.

Fonte: Adaptado de USDA, 1998.

A formação de madeira juvenil está associada à influência prolongada do meristema apical, sendo que o tempo gasto para a madeira passar por todo o estágio juvenil e atingir a maturidade varia de espécie para espécie. No caso de alguns *Eucalyptus*, pode ser superior a vinte anos. A estimativa da idade exata de formação de madeira adulta é imprecisa devido à transição gradual entre os lenhos formados na idade juvenil e na maturidade (Jankowsky, 1979). Em árvores de crescimento vagaroso, essa zona será pequena em volume, enquanto que nas plantas de rápido desenvolvimento ela será maior.

Esquemáticamente, a madeira com características juvenis forma um cilindro no centro da árvore, estendendo-se desde a base até o topo. Essa forma cilíndrica, em toda a extensão da árvore, decorre do fato de que madeira juvenil é formada, também, no topo de árvores velhas, com características geralmente similares à madeira juvenil formada durante os primeiros anos de desenvolvimento (Figura 5).

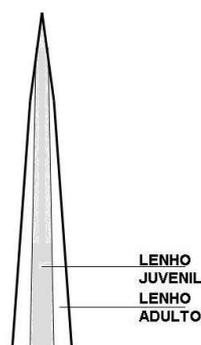


Figura 5 ó Madeira roliça de pequeno diâmetro de eucalipto: diagrama de distribuição do lenho juvenil no tronco da árvore.

Fonte: Adaptado de USDA/FPL,1998.

Árvores cultivadas em plantações manejadas são de rápido crescimento e apresentam maior proporção de madeira juvenil (Larson et al., 2001).

A anatomia da madeira é caracterizada por sua constituição heterogênea e complexa, com seus elementos distribuídos de maneira variada e em proporções distintas ao longo do tronco. Aliada à higroscopicidade, a anatomia exerce influência no processamento da madeira, incluindo a colagem.

A influência da anatomia da madeira no processo de colagem relaciona-se com as dimensões dos elementos celulares, sua disposição e frequência de suas cavidades, as quais estão associadas à porosidade e permeabilidade. Tais características alteram a mobilidade e penetrabilidade do adesivo (Marra, 1992).

Lima et al. (2007), mediante caracterização e mensuração anatômica e avaliação do teor de extrativos totais da madeira de clones de *Eucalyptus*, encontraram correlação com a qualidade de juntas coladas com adesivo uréia-formaldeído. As características anatômicas correlacionadas foram frequência e tamanho de vasos condutores, parênquima radial e teores de extrativos totais.

Albino, Mori e Mendes (2010), avaliando a interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído em madeira de *Eucalyptus*, observaram a penetrabilidade do adesivo na estrutura anatômica ao avaliar a

linha de cola produzida pela ligação entre adesivo resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis*. O adesivo agiu além da interface madeira-adesivo, preenchendo as cavidades celulares adjacentes à linha de cola.

2.4 Propriedades mecânicas da madeira roliça

A madeira, em sua forma roliça, apresenta-se em sua geometria natural e é empregada assim desde tempos remotos. Com a industrialização da floresta a mentalidade prismática reorientou tanto a prática quanto a teoria da construção em madeira. Entretanto, por eliminar processamento adicional, estas peças têm menor consumo de energia se comparadas à produção de madeira serrada, pois se eliminam as etapas de desdobro, aparelhamento e aplainamento. Apresentam, ainda, capacidade de carga superior a qualquer peça prismática serrada que se possa obter do mesmo material (Cook, 2001). Os obstáculos ao seu emprego devem-se ao desconhecimento prático de soluções estruturais específicas. Mesmo no emprego de técnicas tradicionais de construção com madeira é comum o uso inadequado do material (Calil Júnior & Dias, 1997).

Em sua forma original, decorrente do crescimento natural da árvore, a madeira apresenta alta eficiência como componente estrutural a um baixo custo de produção. Seu formato cônico é próprio do crescimento natural da árvore. O corte do tronco pode ocorrer em dimensões variadas, adequando-se às finalidades de projeto. Entretanto, se comparadas aos elementos de seção retangular, as peças de seção circular apresentam maiores vantagens: a máxima dimensão de uma peça retangular obtida de uma peça circular é o diâmetro ϕ , conforme Figura 6:

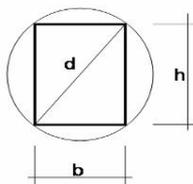


Figura 6 ó Peça de seção retangular obtida de outra de seção circular.
Fonte: Adaptado de Wolfe & Murphy (2005).

Wolfe & Murphy (2005) demonstram que os momentos de inércia (Equações 1 e 2), os quais relacionam-se diretamente com a resistência à flexão, para as peças de seção circular (I_c) e de seção retangular (I_r) são, respectivamente:

$$I_c = d^4 / 64 \quad (1)$$

$$I_r = bh^3 / 12 \quad (2)$$

Para algumas peças com dimensões padronizadas ó dimensões comerciais do American Lumber Standard Committee ó ALSC (1999) obtém-se, para a razão RI entre momentos de inércia ($RI = I_c / I_r$), valores entre 1,8 e 4,2. Uma capacidade de carga superior para a madeira roliça, considerando deslocamentos iguais.

Além de vantagens advindas de sua geometria, a madeira roliça tem resistência superior decorrente da orientação das fibras. Uma comparação entre os dados referentes às propriedades de resistência da madeira roliça e da madeira serrada mostra que variabilidade é cerca de metade a dois terços a favor da madeira roliça, devido à continuidade das fibras na superfície da madeira. Na madeira serrada, as fibras em torno de nós são cortadas e descontínuas, originando concentração de tensões e início da fraturas. Na madeira roliça as fibras fluem, continuamente, em torno dos nós na superfície (Wolfe, 2000).

A madeira roliça é comumente descascada para aplicação estrutural. Entretanto, sua conicidade permanece. De Vries & Gard (2008), no projeto da estrutura espacial da torre de Drenthe, Holanda (Figura 7), alertam que usar a peça para torná-la cilíndrica implica na perda de uma grande parte de sua seção, às vezes até 50%, mas por outro lado facilita operações de conexão e torna a integração da madeira roliça com outros produtos do mercado de construção mais factível. Durante a secagem da madeira roliça, os autores advertem que rachaduras desenvolvem-se ao longo do comprimento da peça, gerando problemas de ordem prática ao se processarem furações, exigindo maiores cuidados nas soluções de conexão.



Figura 7 6 Aplicação de madeira roliça de pequeno diâmetro: torre de Drenthe, Holanda. Fonte: Ranta-Maunus (1999).

Segundo Calil Júnior & Brito (2010), a variabilidade dimensional comum na madeira roliça, provoca a diminuição de 1% a 3%, por metro, da resistência ao momento fletor, ao longo da altura da peça, em razão de sua conicidade. A porção de madeira juvenil aumenta esta relação e a presença de nós amplifica o fenômeno.

CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA ROLIÇA DE PEQUENO DIÂMETRO

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os documentos existentes que tratam de elementos estruturais roliços são direcionados, principalmente, para atender ao mercado de postes utilizados em linhas aéreas de distribuição de energia elétrica. A norma brasileira NBR 7190:1997 ó Projeto de Estruturas de Madeira aborda o emprego dos elementos roliços com finalidades estruturais, mas apenas peças de maiores dimensões. Especifica os postes a partir dos diâmetros de base e de topo, considerando, também, que peças de seção circular, sob ação de solicitações normais ou tangenciais, comportam-se como as de seção quadrada, de área equivalente. A caracterização das propriedades da madeira é estabelecida apenas para madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada e madeira recomposta. Não se menciona a madeira roliça. No Anexo E2 da norma, são apresentados valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras de florestamento (*Eucalyptus*). Tais abordagens não contemplam, de modo específico, o comportamento mecânico da madeira roliça de uso estrutural.

A norma norte-americana ASTM D198:2009 ó Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes especifica ensaios de caracterização mecânica da madeira, para fins estruturais, mas o faz para peças serradas. ANSI O5.1:2008 ó Specifications and Dimensions for Wood Poles apenas estabelece parâmetros a serem considerados para emprego de postes, tais como espécie, métodos de secagem, defeitos, dimensões, preparo da peça, armazenamento, entre outros.

A norma européia EN 14251:2003 ó Structural Round Timber - Test Methods estabelece procedimentos para caracterizar a madeira roliça para fins

estruturais considerando diversas propriedades de rigidez e resistência mecânicas: módulo de elasticidade na flexão paralela à grã ($E_{m,o}$), resistência à flexão paralela à grã ($f_{w,o}$), módulo de elasticidade na compressão paralela à grã ($E_{c,o}$), resistência à compressão paralela à grã ($f_{c,o}$). Com metodologia não dirigida aos processos de controle de qualidade, ela é aplicável à madeira sem casca. Esta norma foi tomada como referência nesta pesquisa.

Green et al. (2006) apontaram os parâmetros conservadores das normas e avaliaram que procedimentos mais precisos de avaliação mecânica promovem o uso mais eficiente do material. Para uma utilização mais ampla por projetistas e construtores, os documentos normativos deveriam contemplar as especificidades da madeira roliça.

Para Stern (2001), madeira roliça (*roundwood*) não é um termo comum no vocabulário do mercado de construção dos Estados Unidos. O termo não se encontra no *Woodhandbook* ou no *National Design Specification for Wood Construction*, publicações de uso amplo no país.

De Vries e Gard (2006) afirmaram existir uma omissão nas diretrizes atuais de projeto para madeira roliça de pequeno diâmetro ó relativas à caracterização mecânica ó com vistas à seleção de matéria-prima. Consideram que enquanto não se estabelecerem classes de resistência para madeira de pequeno diâmetro, o uso do material para aplicação estrutural permanecerá marginal.

Chrisp, Cairns e Gulland (2003) destacaram que a madeira verde, proveniente da árvore recém-abatida, é adequada para ser submetida a esforços de flexão. O desenvolvimento de concepções estruturais-arquitetônicas apropriadas maximizam este efeito e permite a pré-flexão das peças para a produção de perfis estruturais curvos, como adotado no Children's Center (Figura 8).

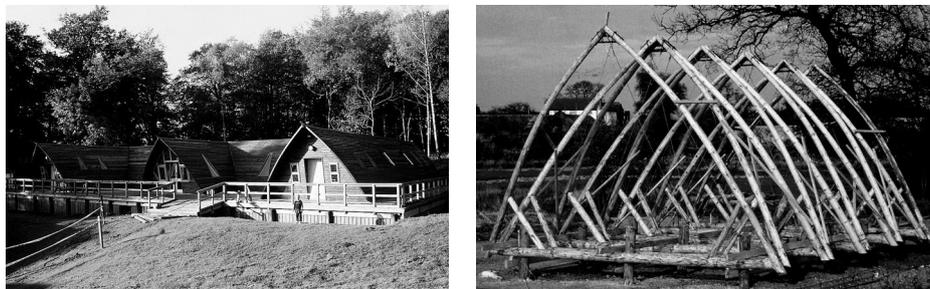


Figura 8 ó Childrens Center, Escócia: estrutura previamente flexionada.
Fonte: Chrisp, Cairns e Gulland (2003).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a caracterização das propriedades de resistência e rigidez das peças estruturais de madeira a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece procedimentos de ensaio baseados em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos que possam influenciar nos resultados obtidos. Orienta, para efeito do cálculo de solicitações em peças roliças, que se empregue uma seção quadrada de área equivalente à de seção circular. A comparação de resultados de ensaios entre peças estruturais roliças e corpos-de-prova de pequenas dimensões isentos de defeitos não apresentam equivalência. Em ensaios com madeira de *Eucalyptus*, Zangiácomo (2007) concluiu que existem diferenças estatísticas significativas (para maior, a favor da madeira roliça) entre valores de módulo de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática ($E_{m,0}$), entre valores de módulo de elasticidade obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras (E_{c0}) e entre valores de resistência obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras (f_{c0}).

3 MATERIAL E MÉTODO

Como a norma brasileira não contempla a caracterização das propriedades mecânicas da madeira roliça de uso estrutural, elaborou-se um programa experimental de metodologia híbrida, que emprega a norma européia

EN 14251 ó Structural Round Timber ó Test Methods (ECS, 2003) e a complementa com procedimentos correntes estabelecidos pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Alguns parâmetros de ensaio, como ciclo de aplicação de cargas e intervalos de obtenção de dados de tensão, deformação e carga, foram referenciados na norma brasileira. As propriedades físicas, de resistência e rigidez foram estabelecidas mediante a caracterização da umidade (U), densidade aparente (ρ), módulo de elasticidade na flexão (E_{m0}), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).

Foram empregadas 10 peças de madeira roliça, com diâmetros entre 60 e 70 mm, provenientes de plantio florestal do município de Belo Oriente, Minas Gerais, de espécie híbrida *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophila*, com idade de 04 anos. Os troncos foram seccionados em segmentos de 1600 mm e foram utilizadas as peças dos topos (com maior ocorrência de lenho juvenil). Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Caracterização Mecânica da Madeira e Novos Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Utilizou-se uma máquina universal de ensaio e uma prensa servo-hidráulica, marca EMIC, modelo DL 30000 (capacidade de 300 kN) e modelo PC200CS (capacidade de 2 MN), eletromecânicas, servocontroladas e com sistemas de aquisição de dados computadorizados.

3.1 Umidade (U) e densidade aparente ()

Para a determinação da umidade e da densidade básica do lote confeccionaram-se 02 discos de 30 mm de espessura, provenientes de cada peça (Figura 9).

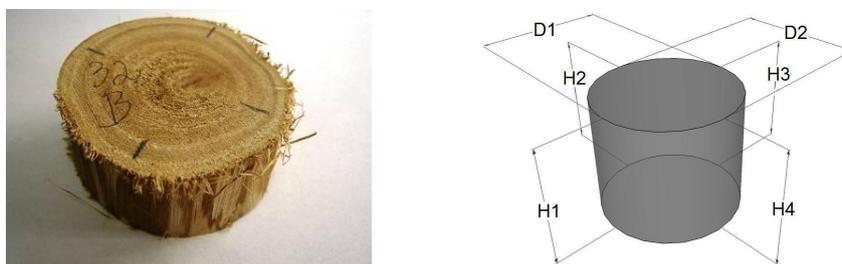


Figura 9 ó Corpo-de-prova para caracterização de umidade e densidade aparente; método de obtenção das dimensões.

A umidade foi obtida mediante a diferença de massa antes e após a secagem em estufa à temperatura de 103 ± 2 °C, até o ponto em que os corpos-de-prova apresentaram diferença de massa inferior a 0,1% em duas pesagens sucessivas. Os procedimentos de laboratório foram realizados em condições ambientais de 21 °C de temperatura e umidade relativa de 68%.

A densidade aparente foi obtida pela razão entre a massa seca e o volume úmido dos corpos-de-prova (CPs). As dimensões de espessura foram tomadas em quatro pontos opostos dos discos e os diâmetros em dois pontos opostos, conforme Figura 9.

3.1.1 Resultados e Discussão

O material apresentou umidade média de 14,2%, em base seca, com desvio padrão de 0,09%.

A densidade aparente apresentou valor médio de 544 kg/m^3 , com desvio padrão de 25 kg/m^3 .

O valor é coerente com os encontrados na literatura, para o mesmo híbrido. Gonçalves et al. (2009) encontraram 490 kg/m^3 ; Santos & Sansígolo (2007) obtiveram 440 kg/m^3 e 510 kg/m^3 ; Almeida (2002) encontrou 550 kg/m^3 e 490 kg/m^3 .

3.2 Módulo de elasticidade na flexão

3.2.1 Procedimentos normativos

Conforme a norma européia EN 14251 (ECS, 2003), o ensaio de flexão estática para obtenção de $E_{m,0}$ prevê a aplicação de duas cargas concentradas, equidistantes dos apoios, e relação entre o comprimento do vão (L) e o diâmetro nominal³ da peça estrutural (d) tal que L/d seja igual a 18. Esta relação visa garantir que os valores de $E_{m,0}$ não sejam afetados pela deformação oriunda de esforços cortantes. A norma especifica que a medida da deformação seja feita no meio do vão, em ambas as faces, com transdutores de deslocamento fixados em um mecanismo de suporte sensível às alterações físicas da peça, como mostra a Figura 10.

³Diâmetro nominal é o maior diâmetro aparente para peças com 5% ou menos de ovalidade, ou maior diâmetro mínimo, para peças com mais de 5% de ovalidade; diâmetro aparente é o diâmetro do círculo com circunferência igual à circunferência tomada no ponto médio do comprimento da peça; ovalidade é o quociente da diferença entre o maior e o menor diâmetro da seção transversal e o menor diâmetro, expresso em porcentagem; diâmetro mínimo é o menor diâmetro aparente tomado na seção transversal; diâmetro máximo é o maior diâmetro aparente tomado na seção transversal.

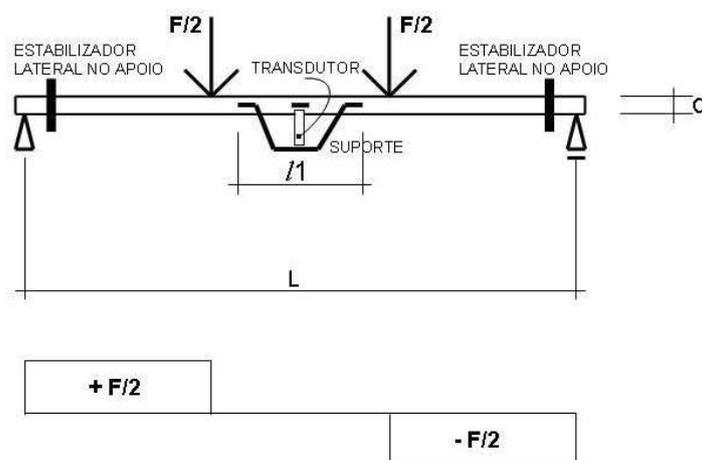


Figura 10 ó Diagrama de ensaio de flexão estática a quatro pontos, conforme EN 14251 (ECS, 2003); gráfico de força cortante.

O cumprimento da prescrição $L/d = 18$ estabelece um comprimento para o corpo-de-prova possível de encontrar obstáculos à sua execução, pois, dependendo do diâmetro da peça de madeira roliça, o equipamento de ensaios não o comportaria. Realizou-se este ensaio com os objetivos de se obterem os valores médios do módulo de elasticidade na flexão e, também, verificar se os valores dos módulos de elasticidade são afetados pela alteração da relação entre o comprimento do vão e o diâmetro dos corpos-de-prova. Tal premissa, se confirmada, permitiria o emprego de peças de comprimentos menores em ensaios de flexão, estabelecendo padrões normativos compatíveis com as dimensões da madeira roliça de pequeno diâmetro.

Considerando que no intervalo entre as cargas aplicadas, o diagrama de força cortante indica a inexistência de tensões cisalhantes, ou força cortante nula (Figura 10), espera-se que os valores de E_{m0} não sejam influenciados por tais tensões. Em tese, os valores de E_{m0} deveriam ser constantes, quaisquer que sejam as relações entre o vão entre apoios (L) e o diâmetro da peça (d), desde

que o deslocamento seja obtido no intervalo entre as cargas (intervalo de obtenção dos dados).

Para determinar o módulo de elasticidade paralelo às fibras, a norma EN 14251 (ECS, 2003) emprega as Equações 3 e 4 para expressão dos resultados:

$$E_{m,0} = \frac{(M_1 - M_2)c^4}{6(w_1 - w_2)I_1} \left[-\frac{1}{(c + l_1/2)^2} - \frac{D}{2} + \frac{1}{c^2} \right] \quad (3)$$

$$c = \frac{l_1 d_1}{(d_2 - d_1)} \quad \text{e} \quad D = \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{(c + l_1)^2} \right) \quad (4)$$

Em que

$E_{m,0}$: Módulo de elasticidade na flexão (N/mm²)

M_1 - M_2 : incremento do momento fletor no trecho linear da curva de deformação (Nmm)

w_1 - w_2 : incremento de deformação (mm)

d_1 : menor diâmetro aparente no intervalo de medição (mm)

d_2 : maior diâmetro aparente no intervalo de medição (mm)

I_1 : menor momento segundo de área no intervalo de medição (mm⁴)

l_1 : intervalo de medição (mm)

Os valores M_1 e M_2 foram definidos a partir dos valores correspondentes a 10% e 50% da carga máxima prevista.

Para a obtenção dos parâmetros estabelecidos pela norma, estabeleceu-se o programa experimental apresentado a seguir.

3.2.2 Programa experimental

O ensaio foi realizado em condições ambientais de 21°C de temperatura e umidade relativa de 68%. O deslocamento foi obtido a partir da média da leitura de 02 transdutores acoplados ao computador de controle da máquina de ensaio, um em cada lado da peça. As peças foram ensaiadas com as relações $L/d = 10$ ($L1$), $L/d = 12$ ($L2$), $L/d = 14$ ($L3$), $L/d = 16$ ($L4$) e $L/d = 18$ ($L5$) (Figura 11 e Figura 12).

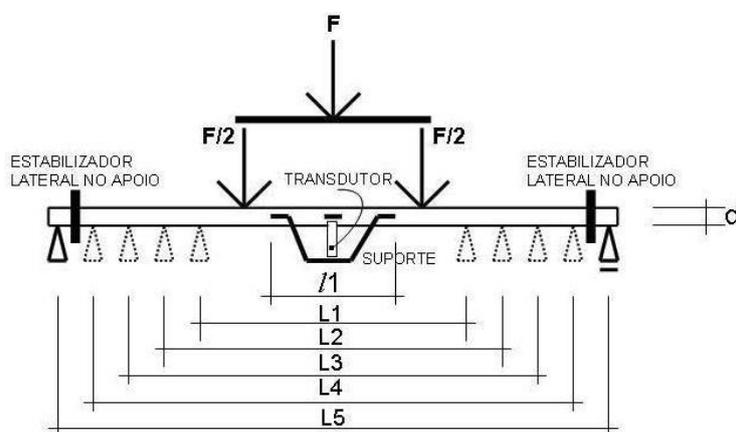


Figura 11 ó Esquema de variação do vão (L) para o ensaio de flexão estática a quatro pontos.

Para estimar a força para rompimento do CP realizou-se, em uma peça, ensaio preliminar de flexão estática a quatro pontos até a ruptura.

As cargas foram aplicadas até o limite do regime elástico para cada relação L/d , partindo-se da situação $L5$ para situação $L1$. No último ensaio de cada peça, correspondente à situação $L1$, atingiu-se a ruptura do CP. Foram registradas as tensões a 10 e 50% e as deformações respectivas.



Figura 12 ó Ensaio de flexão estática e mecanismo de suporte dos transdutores, fixados em ambas as faces dos corpos-de-prova.

3.2.3 Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os valores de E_{m0} , para cada relação L/d , obtidos pela Equação (3).

Tabela 1 - Valores de E_{m0} para diferentes relações entre vão entre apoios e o diâmetro do corpo-de-prova (MPa)

CP	E_{m0} (L/d=10)	E_{m0} (L/d=12)	E_{m0} (L/d=14)	E_{m0} (L/d=16)	E_{m0} (L/d=18)	densidade básica (kg/m ³)	E_{m0} (MPa) média	Desvio Padrão (MPa)	Coefic. Var. %
25	17719	17629	17629	17542	17405	628	17585	402	1,9
29	16882	16471	17002	16351	16517	603	16645	530	3,3
30	16677	17575	18647	18760	17532	596	17838	281	1,7
31	16832	15411	16269	16528	16306	623	16269	868	4,9
32	17383	16512	16327	16559	16013	606	16559	286	1,7
35	18721	19149	17761	17969	17283	614	18177	508	3,1
36	17208	17693	17535	18023	18004	586	17693	118	0,7
37	20141	20911	20448	21110	20940	630	20710	341	1,9
38	17533	17094	17088	16953	17578	576	17249	751	4,1
39	12267	12192	12261	11723	12518	663	12192	290	2,4
E_{m0} (MPa) média	17136	17064	17097	17152	17010				
Desvio Padrão	2005	2291	2088	2374	2086				
Coef. Var. %	11,7	13,4	12,2	13,9	12,3				

O valor médio encontrado foi 17010 MPa, considerando $L/d = 18$. Este valor é coerente com valores encontrados por Scanavaca Júnior & Garcia (2004), para *E. urophylla*, com 19 anos, 17738 MPa; por Lobão et al. (2004), para *Eucalyptus*, 13772 e 16778 MPa; por Zangiácomo (2007), para *Eucalyptus*, com 25 anos, 18627 MPa.

Os coeficientes de variação dos valores de $E_{m,0}$, considerando as relações L/d em um mesmo CP, apresentaram baixos índices, indicando um conjunto bastante homogêneo de dados.

Para a mesma relação L/d em CPs diferentes, o coeficiente de variação se eleva, porém, ainda pode ser considerado baixo. A diferença se explica pelo fato de que, no primeiro caso, os valores de $E_{m,0}$ foram obtidos em uma mesma peça; no segundo caso, em peças distintas, portanto, sujeito a maior variabilidade.

A Análise de Variância (ANOVA), com nível de significância 1%, indica que os valores de $E_{m,0}$ para as diferentes relações L/d , podem ser considerados estatisticamente iguais (Tabela 2). O alto *valor-p* = 0,999 indica não existir diferença nos tratamentos.

Tabela 2 ó Análise de Variância dos dados

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	131185,6806	4	32796,42015	0,006943473	0,9999003	3,767427082
Dentro dos grupos	212550520,9	45	4723344,91			
Total	212681706,6	49				

A Figura 13 mostra, para cada corpo-de-prova, que não existe variação de $E_{m,0}$ para as diferentes relações L/d .

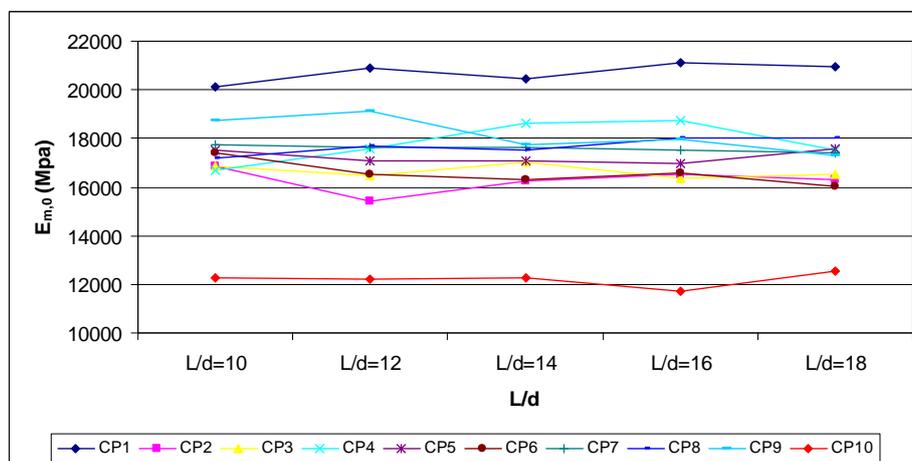


Figura 13 ó Variação do módulo de elasticidade na flexão (E_{m0}) para as diferentes relações L/d .

3.2.4 Considerações

A equivalência estatística apresentada pelos valores de E_{m0} demonstram que uma relação mínima entre o vão entre apoios (L) e o diâmetro da peça (d) não precisa ser obedecida. Os ensaios podem ser feitos com qualquer relação L/d , desde que seja possível realizarem-se as medidas de deslocamento e carga.

As dimensões estruturais de corpos-de-prova confeccionados para se estimarem os valores de E_{m0} em ensaios de flexão estática a quatro pontos podem ser definidas considerando-se as características dimensionais dos equipamentos de ensaios. Este procedimento simplifica e economiza recursos, pois os comprimentos das peças estruturais podem ser reduzidos.

Sendo desnecessário atender a uma relação mínima entre δL_0 e δd_0 , é recomendável a revisão dos procedimentos de ensaio da norma europeia EN 14251 (ECS, 2003).

3.3 Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0}$)

A norma EN 14251 (ECS, 2003) determina que o corpo-de-prova tenha seis vezes o diâmetro nominal (d_{nom}), com as faces extremas paralelas e perpendiculares ao eixo axial da peça. A carga deve ser aplicada por um mecanismo de contato esférico, para se evitar a indução de flexão. A deformação é obtida no intervalo central do comprimento da peça, por dois transdutores colocados em faces opostas (clip-gages), como mostra Figura 14. O intervalo de medição h_0 deve ter quatro vezes o diâmetro nominal, segundo a norma EN 14251 (ECS, 2003).

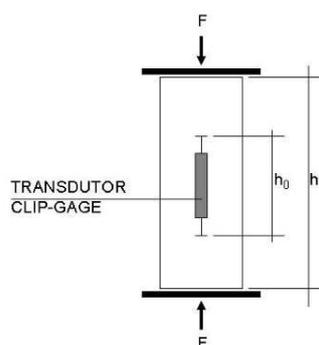


Figura 14 Diagrama de execução do ensaio de compressão paralela às fibras, com clip-gage em ambas as faces do corpo-de-prova.

Os resultados são expressos pela Equação 5, conforme a norma EN 14251 (ECS, 2003):

$$E_{c,0} = \frac{h_0(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (5)$$

Em que

$E_{c,0}$: módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (N/mm^2)

F_2-F_1 : incremento de carga no trecho linear da curva de deformação (N)

w_2-w_1 : incremento médio de deformação no trecho compreendido entre F_2 e F_1 (mm)

h_0 : intervalo de medição (mm)

A : área da seção transversal próxima à região de ruptura (mm^2)

Por se tratar de peças roliças de pequeno diâmetro, com maior propensão a incidência de curvaturas naturais, o comprimento dos CPs foi definido com três vezes o diâmetro nominal.

A norma EN 14251 (ECS, 2003) apenas determina uma região de incremento de carga e deformação, correspondente ao trecho linear da curva tensão x deformação. Adotou-se, para definição desta região, o prescrito pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997), anexo B.8, que estabelece a resistência a 10 e 50% como os pontos de referência para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras, conforme indica o diagrama de carregamento aplicável em dois ciclos de carga e descarga (Figura 15). A norma européia prevê que a carga de deformação seja aplicada à taxa constante e que o valor máximo seja atingido em 300 ± 120 segundos.

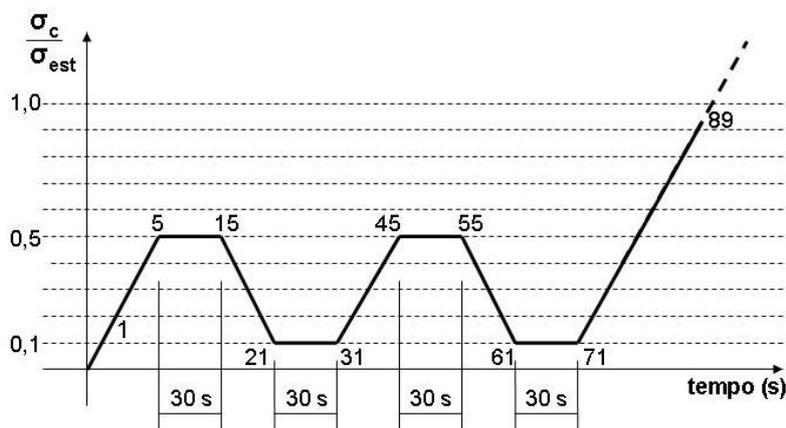


Figura 15 ó Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão, conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) prevê que o módulo de elasticidade na compressão seja obtido pela Equação 6:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (6)$$

Em que

E_{c0} : módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;

$\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$: tensões de compressão normal correspondentes a 10% e 50% da resistência;

$\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$: deformações específicas correspondentes às tensões $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$

3.3.1 Resultados e discussão

A Figura 16 apresenta o padrão de ruptura dos CPs submetidos ao ensaio de compressão paralela às fibras.



Figura 16 ó Corpo-de-prova submetido a ensaio; detalhe do padrão de ruptura.

A Tabela 3 apresenta os valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), conforme Equação 5, e os valores obtidos pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997), conforme Equação 6:

Tabela 3 ó Valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), conforme EN 14251 (1) e NBR 7190 (2).

CP	diâm (mm)	h_0 (mm)	F_1 (N)	F_2 (N)	A_1 (mm ²)	w_1 (mm)	w_2 (mm)	$E_{c,0}$ (MPa) (1)	$E_{c,0}$ (MPa) (2)
25	67,9	100,0	18278,8	83225,0	3621,0	0,05	0,19	12926	12894
29	66,6	100,0	17608,3	80056,4	3483,7	0,03	0,19	11021	11008
30	72,7	100,0	20978,0	95395,1	4151,0	0,05	0,21	11092	11314
31	68,4	100,0	18600,7	84610,4	3674,6	0,03	0,19	11172	11180
32	65,9	100,0	17194,7	78358,7	3410,8	0,04	0,21	10639	10545
35	71,4	100,0	20222,2	92005,3	4003,9	0,03	0,21	10263	10291
36	73,7	100,0	21594,0	98096,5	4266,0	0,02	0,16	12729	12740
37	71,0	100,0	19976,0	91002,0	3959,2	0,03	0,19	11414	11426
38	67,5	100,0	19286,0	87614,8	3578,5	0,02	0,19	11379	11376
39	69,9	100,0	19368,2	88230,8	3837,5	0,04	0,20	11517	11532

Os valores de E_{c0} obtidos pelos procedimentos de ensaio indicados pelas normas europeia e brasileira são bastante próximos. Apresentaram média de 11415 MPa e 11431 MPa, respectivamente; desvios padrão de 835 MPa e 830 MPa e coeficiente de variação de 7,3% e 7,2%. São coeficientes baixos,

indicando homogeneidade do conjunto de dados. O valor médio de E_{co} é coerente com os apontados na NBR 7190 (ABNT, 1997), que indica 12813 e 13166 MPa, para *E. grandis* e *E. urophylla*. Hein et al. (2009) obtiveram valor de 7848 MPa para *E. grandis* e *urophylla* com 6,5 anos.

Devido à proporcionalidade existente entre as tensões e forças correspondentes, e entre deslocamento e deformação, a pequena diferença é decorrente da relação h_o/A . Como h_o é constante, as diferenças explicam-se pela variação da área da seção transversal próxima da região de ruptura dos corpos-de-prova. EN 14251 (ECS, 2003) prescreve que as dimensões sejam obtidas após o ensaio, na região da fratura. NBR 7190 (ABNT, 1997) não determina a região, pois considera o corpo-de-prova geometricamente regular (de pequenas dimensões e isentos de defeitos).

3.4 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

Conforme EN 14251 (ECS, 2003), o valor da resistência à compressão paralela às fibras é obtido a partir de dados do ensaio anterior, empregando a Equação (7):

$$f_{c,0} = \frac{4F_{\max}}{\pi l_2 d_1} \quad (7)$$

Em que

f_{c0} : resistência à compressão paralela às fibras (N/mm²)

F_{\max} : carga máxima (N)

d_1 e d_2 : diâmetros perpendiculares entre si obtidos próximos à fratura (mm)

A NBR 7190 (ABNT, 1997) prevê que a resistência à compressão paralela às fibras seja obtida pela Equação (8):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad (8)$$

Em que:

f_{c0} : resist\ecencia \u00e0 compress\u00e3o paralela \u00e0s fibras (MPa);

$F_{c0,m\acute{a}x}$: m\u00e1xima for\u00e7a de compress\u00e3o aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio (N);

A: \u00e1rea inicial da se\u00e7\u00e3o transversal comprimida (m²)

3.4.1 Resultados e discuss\u00e3o

A Tabela 4 apresenta os valores de resist\ecencia \u00e0 compress\u00e3o paralela \u00e0s fibras (f_{c0}), conforme Equa\u00e7\u00e3o (7), estabelecida pela EN 14251 (ECS, 2003), e os valores obtidos pela Equa\u00e7\u00e3o (8), definida pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 4 \u00f3 Valores de resist\ecencia \u00e0 compress\u00e3o paralela \u00e0s fibras (f_{c0}), conforme EN 14251 (1) e NBR 7190 (2)

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	F _{m\u00e1x} (N)	f _{c0} (MPa) (1)	f _{c0} (MPa) (2)
25	65,6	68,9	183210,0	52	51
29	66,8	68,4	171260,0	48	49
30	70,6	71,8	217350,0	55	52
31	67,7	68,7	184980,0	51	50
32	66,0	67,5	164710,0	47	48
35	69,1	73,4	198470,0	50	50
36	73,2	73,4	220510,0	52	52
37	69,9	71,4	227600,0	58	57
38	69,1	66,0	174580,0	49	49
39	72,7	67,6	197080,0	51	51

Os valores m\u00e9dios de f_{c0} obtidos pela norma de ensaios europ\u00e9ia e brasileira s\u00e3o id\ecnticos, 51 MPa. Apresentaram desvios padr\u00e3o de 3,28 MPa e coeficiente de varia\u00e7\u00e3o de 6,4% e 5,2%. S\u00e3o coeficientes baixos, indicando homogeneidade do conjunto de dados.

Os valores médios apresentados estão próximos dos encontrados por Hein et al. (2009), que obteve 52 MPa para híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* com 6,5 anos; dos apontados pela NBR 7190 (ABNT, 1997), que indica 40 e 46 MPa para *E. grandis* e *E. urophylla*, respectivamente, e dos encontrados por Scanavaca Júnior & Garcia (2004), que obtiveram 64 MPa para *E. urophylla*, com 19 anos.

Os resultados obtidos para f_{co} pelas duas equações são iguais, visto que as equações são idênticas, diferenciando-se apenas pela forma de expressão de suas variáveis.

A pequena diferença de valores explica-se pela metodologia distinta na obtenção dos diâmetros para determinação da seção transversal resistente. EN 14251 (ECS, 2003) prescreve a tomada das dimensões após o ensaio, na região da fratura. NBR 7190 (ABNT, 1997) não determina a região, pois considera o corpo-de-prova geometricamente regular, já que os CPs deveriam ser de pequenas dimensões e isentos de defeitos. Como a geometria da seção transversal da peça estrutural não apresenta ovalidade significativa, os valores são próximos.

3.5 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

A norma EN 14251 (ECS, 2003) não prevê ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, para determinação das propriedades mecânicas da madeira roliça de uso estrutural. Adotaram-se os procedimentos determinados pela NBR 7190 (ABNT, 1997) (que especifica um corpo-de-prova prismático e isento de defeitos) em um corpo-de-prova em tamanho estrutural, com comprimento igual ao diâmetro. A área de aplicação de carga possui largura variável (máximo de 20 mm), com geometria semelhante aos CPs prismáticos (Figura 17).

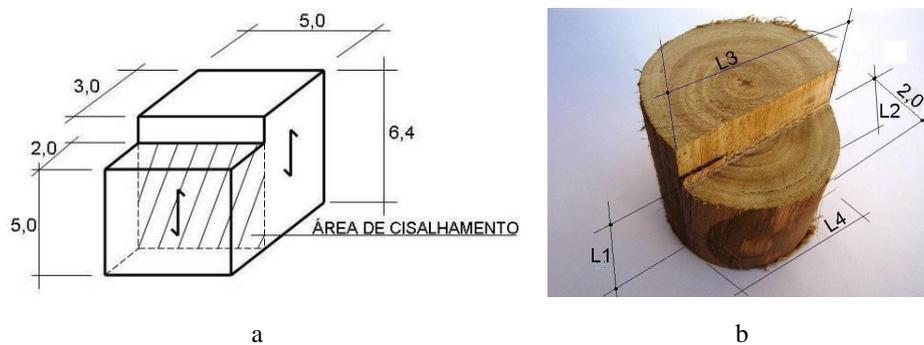


Figura 17 ó Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras: a) conforme NBR 7190; b) adaptado para madeira roliça de pequeno diâmetro.

Os resultados são expressos pela Equação 9:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx.}}{A_{v0}} \quad (9)$$

Em que

f_{v0} : resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)

$F_{v0,máx.}$: força máxima cisalhante aplicada ao CP (N)

A_{v0} : área inicial da seção crítica do CP, em um plano paralelo às fibras (mm²)

As dimensões da área da seção crítica foram tomadas em quatro pontos ($L1$, $L2$, $L3$ e $L4$), considerando a geometria irregular da peça estrutural. A Figura 18 ilustra o padrão de ruptura dos CPs.



Figura 18 ó Padrão de ruptura dos CPs em ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

3.5.1 Resultados e discussão

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Tabela 5 ó Valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, conforme NBR 7190

CP	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	A (mm ²)	f _{v0} (MPa)
25	47,2	63,3	2987,8	10,2
29	50,2	62,3	3127,5	7,8
30	50,0	64,9	3245,0	9,4
31	48,3	61,8	2984,9	7,4
32	52,5	61,3	3218,3	8,6
35	47,2	63,3	2987,8	10,3
36	50,1	68,1	3411,8	8,7
37	50,3	62,2	3128,7	7,8
38	49,8	61,4	3057,7	8,8
39	51,3	63,0	3231,9	6,3

O valor médio obtido para a resistência ao cisalhamento foi 8,5 MPa, com desvio padrão de 1,3 MPa e coeficiente de variação de 14,8%. É um coeficiente considerado baixo, indicando um conjunto de dados homogêneo. O valor médio para a resistência é próximo do apontado pela NBR 7190 (ABNT, 1997), que indica 7,0 e 8,3 MPa para *E. grandis* e *E. urophylla*, respectivamente. Lobão e Gomes (2006) encontraram 8,3 e 12,1 MPa para *Eucalyptus*.

4 CONCLUSÃO

A inexistência de normas brasileiras para a caracterização da madeira roliça de uso estrutural justifica a avaliação dos documentos internacionais. Os procedimentos apresentados, baseado na norma européia EN 14251 (ECS, 2003), e complementados com orientações previstas na NBR 7190 (ABNT, 1997), são de execução simples e similares a outros procedimentos já em uso.

Considerando que os valores das propriedades avaliadas são corroborados por outras fontes de pesquisa que obtiveram resultados equivalentes, julgamos promissoras as sugestões apresentadas para ensaios de determinação das propriedades físicas, de resistência e rigidez da madeira roliça. Destacamos seu potencial para subsidiar a elaboração de uma norma brasileira de caracterização destas propriedades por meio de corpos-de-prova de dimensões estruturais.

CAPÍTULO 2 - LIGAÇÕES MECÂNICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

1 INTRODUÇÃO

A execução das estruturas de madeira requer peças maciças com dimensões dificilmente encontradas. A viabilidade dessas estruturas se dá pela confecção de uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança. As ligações constituem-se no ponto crítico das estruturas de madeira, demandando estudos experimentais que avaliem o seu real comportamento. A normatização brasileira referente à madeira aborda as ligações por meio de pinos metálicos, ligações coladas, cavilhas ou conectores. Os pinos metálicos são constituídos por pregos e parafusos, enquanto conectores podem ser anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados (Oliveira & Dias, 2005).

Conexões desempenham papel decisivo no campo do projeto em madeira: são mais relevantes do que na construção em concreto e mais complexas que nas construções em aço devido à natureza anisotrópica da resistência e rigidez do material. Construções e elementos de madeira consistem da montagem de partes simples ó colunas, vigas, caibros ó ligados por elementos de concepção também simples (Aicher, 2001; Moreira, 1991).

Diferenciam-se dois grupos principais de ligações: ligações com conectores mecânicos e ligações coladas.

Eckelman (2004), com foco em solução simples e econômica, empregou barras metálicas rosqueadas embutidas axialmente nas extremidades de peças de madeira roliça e fixadas, com porca, a tubos também metálicos, colocados transversalmente ao eixo da peça (Figura 19). Nos ensaios de arrancamento, obteve altos resultados de resistência, embora fissuras superficiais e rachaduras

de secagem reduzissem, significativamente, a resistência das juntas e levassem a uma variação da resistência. O efeito de enfraquecimento da maioria das rachaduras de secagem foi reduzido pela orientação do tubo perpendicular ao plano de rachadura. Sua solução apontou para aplicação em treliças planas e espaciais.

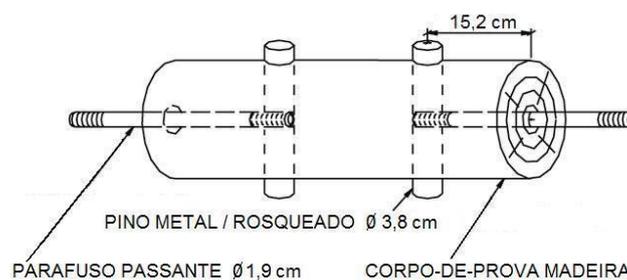


Figura 19 ó Corpo-de-prova de experimento conduzido por Eckelman (2004).

Os experimentos conduzidos por Eckelman (2004) e Eckelman, Haviarova e Erdil (2007), investigando mecanismos de ligação para estruturas de madeira roliça, mostraram-se com potencial para aplicabilidade em diversos sistemas estruturais. A partir de seu modelo, desenvolvemos um protótipo para verificação de seu comportamento mecânico, com vistas a uma avaliação preliminar de modelos de ligação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Forest Products Laboratory - FLP (1999) relaciona os seguintes tipos de ligações mecânicas: pregos, espigas, pinos, grampos, rebites, parafusos diversos, conectores de união (anéis, pratos) simples ou múltiplos, chapas; metálicos ou de outro material com propriedades mecânicas superiores à madeira. Destaca a facilidade com que os elementos estruturais de madeira podem ser conectados. Todavia, para maior rigidez, resistência e desempenho em serviço, cada tipo

requer um projeto adaptado às propriedades de resistência da madeira ó longitudinal e perpendicularmente às fibras ó e às transformações dimensionais decorrentes da alteração de umidade.

Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) distinguiram as ligações em duas vertentes: por encaixe ou entalhes, com transmissão dos esforços por contato direto entre as peças de madeira, e utilização de elementos externos para promover a ligação, pela adesão ou por meio de dispositivos de madeira ou metálicos. Nos casos de ligação por embutimento, os elementos de ligação transmitem as forças de uma peça para outra em uma pequena área, ocasionando convergência de tensões no local. Relacionam os seguintes dispositivos utilizados em ligações de madeira: pinos metálicos (pregos ou parafusos); cavilhas (pinos de madeira torneados) e conectores metálicos (chapas com dentes estampados e anéis metálicos).

Stern (2001) recomendou que as soluções de conexão dos elementos devem ser aprimoradas, antes que a madeira roliça possa ser utilizada de modo mais efetivo. Wolfe (2000) sugeriu que o foco de pesquisas recaísse no desenvolvimento de conexões economicamente viáveis, capazes de lidar com a transferência axial de carga e o momento de flexão atuante.

Em testes para verificação do desempenho de madeiras de pequeno diâmetro (127 mm) em treliças tridimensionais e em entramados estruturais, Wolfe, Gjinolli e King (2000) avaliaram modelo de conexão com emprego de barra metálica rosqueada, colocada longitudinalmente ao eixo da madeira, e fixada em barra lisa perfurada e instalada transversalmente. Concluíram que a usinagem da madeira deve ser feita em condições controladas, após a secagem da madeira em uma temperatura final próxima das condições de serviço. Recomendaram que os furos para receber pinos devem ser orientados em um ângulo superior a 45° em relação ao plano das rachaduras e que a madeira deve ser classificada para minimizar efeitos de desvios de grã e de nós nas regiões das

conexões, e que a resistência das juntas pode ser estimada com base em testes com madeira isenta de defeitos.

De acordo com Kollmann & Côté (1968), a ruptura de corpos-de-prova, em ensaios de tração paralela às fibras, não é totalmente devida às tensões de tração, pois as demais propriedades de resistência mecânica que caracterizam a madeira ó por apresentarem valores característicos inferiores ó manifestam-se antes, levando a uma ruptura diversa daquela do ensaio original.

3 MATERIAL E MÉTODO

Os ensaios mecânicos de arrancamento foram realizados no Laboratório de Caracterização Mecânica da Madeira e Novos Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Utilizou-se uma máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL 300 (capacidade de 300 kN). Os ensaios seguiram a norma brasileira NBR 7190:1997 ó Projeto de Estruturas de Madeira, anexo B.

3.1 Ligação mecânica - Barra rosqueada / tubo galvanizado / madeira - Furação transversal redonda

A partir de peças prismáticas de madeira laminada colada de *Eucalyptus* foram torneados 08 corpos-de-prova, com comprimento L de 400 mm e diâmetros nominais de 50, 75 e 100 mm. Cada corpo-de-prova (CP) recebeu furação longitudinal e transversal. Barras metálicas rosqueadas (diâmetros de 6,4 mm, 9,5 mm e 12,7 mm, aço AC1025) foram fixadas com porcas em tubos galvanizados instalados transversalmente (diâmetros de 12,7 mm, 19,0 mm e 25,4 mm). Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaio de arrancamento, conforme Figuras 20 e 21.

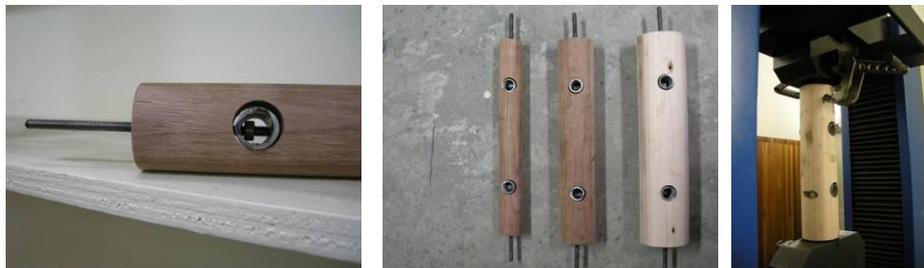


Figura 20 ó Corpos-de-prova com furação transversal redonda e ensaio de arrancamento.

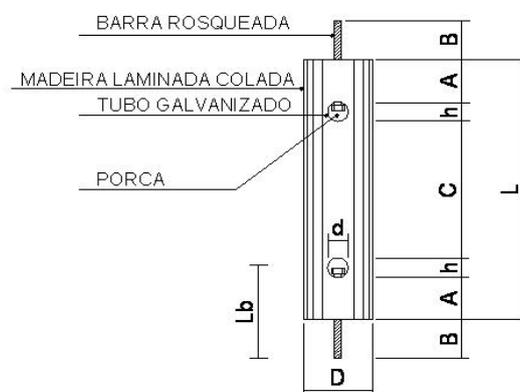


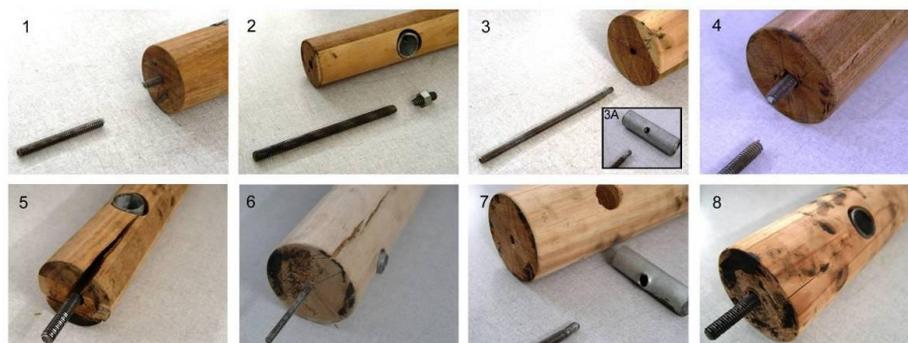
Figura 21 ó Corpo-de-prova: características geométricas.

3.1.1 Resultados e discussão

A ruptura dos CPs ocorreu devido tanto à ruptura dos elementos metálicos quanto à das peças de madeira. No caso destas últimas, por fendilhamento (Figura 22 - fotos 5, 6 e 8; Tabela 6).

Tabela 6 ó Características geométricas dos corpos-de-prova e valores de força máxima resultantes dos ensaios de arrancamento

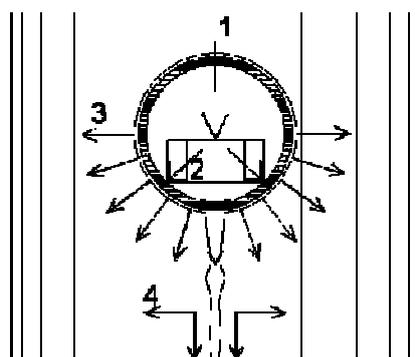
CP	D (mm)	Diâm. Barra (mm)	Diâm. Tubo Transversal (mm)	d (mm)	h (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Lb (mm)	Densid. (kg/m ³)	Força Máx. (kN)
1	50	6,4	12,7	21,5	21,5	50	60	257,0	131,5	890	13,9
2	50	9,5	19,0	26,7	26,7	80	60	186,6	166,7	1030	26,6
3	75	6,4	12,7	21,5	21,5	50	60	257,0	131,5	960	13,1
4	75	9,5	19,0	26,7	26,7	80	60	186,6	166,7	920	30,6
5	75	12,7	25,4	33,8	33,8	100	60	132,4	193,8	750	29,1
6	100	6,4	12,7	21,5	21,5	50	60	257,0	131,5	570	13,4
7	100	9,5	19,0	26,7	26,7	80	60	186,6	166,7	530	30,6
8	100	12,7	25,4	33,8	33,8	100	60	132,4	193,8	530	26,5



1) barra rosqueada (distante da porca de fixação); 2) barra rosqueada (próximo à porca de fixação); 3) barra rosqueada (espanamento da rosca); 3.a) barra rosqueada (detalhe espanamento da rosca); 4) barra rosqueada (distante da porca de fixação); 5) peça de madeira (tração perpendicular às fibras); 6) peça de madeira (tração perpendicular às fibras); 7) barra rosqueada (espanamento da rosca); 8) peça de madeira (tração perpendicular às fibras).
 Figura 22 ó Padrões de ruptura.

A análise das tensões atuantes no modelo de ligação proposto por Eckelman (2004) indicou que as componentes horizontais do esforço axial exercido sobre a superfície curva do furo transversal agem perpendicularmente às fibras, promovendo o fendilhamento (propagação de fratura) do corpo-de-prova (Figura 22 - fotos 5, 6 e 8; Figuras 23 e 24). Consequentemente, a ruptura

se dá por tração normal às fibras. A Figura 23 mostra os diversos esforços que atuam conjuntamente neste modelo de conexão proposto: tração paralela às fibras, cisalhamento e tração normal às fibras. Este último predomina como pode ser observado no padrão de rupturas mostrado na Figura 24.



1) tração paralela às fibras gerada pela barra rosqueada; 2) cisalhamento gerado pela porca; 3) tração normal às fibras gerada pela componente horizontal dos esforços de tração paralela às fibras; 4) fendilhamento surgido pela combinação dos esforços.
Figura 23 ó Conjugação dos esforços atuantes sobre o corpo-de-prova.



Figura 24 ó Ruptura por fendilhamento.

Rupturas ocorreram, também, devido ao colapso dos elementos metálicos de ligação. Tanto o tubo transversal quanto a barra axial rosqueada romperam antes da peça de madeira (Figura 22 ó fotos 1, 2, 3, 3a, 4 e 7), o que

mostra a dimensão inadequada das espessuras/diâmetros das barras metálicas empregadas. Futuros ensaios deveriam empregar barras de maior diâmetro, permitindo a verificação da resistência da madeira.

Foram constatados furos excêntricos nos corpos-de-prova, indicando que os procedimentos de furação devem ser metodologicamente controlados (alinhamento com o eixo longitudinal da peça de madeira e perpendicularidade dos furos transversais e longitudinais). A ação excêntrica dos esforços, em relação ao eixo longitudinal das peças de madeira, compromete o desempenho mecânico do modelo, pois pode favorecer a ocorrência de fraturas paralelas às fibras o que levaria à ruptura por tração perpendicular às fibras.

3.1.2 Considerações

Estes resultados indicaram que o modelo elaborado por Eckelman (2004) é passível de incremento mediante alteração de suas características geométricas e de seus elementos metálicos de ligação. As forças devem agir sobre superfícies planas, de modo a anular ou minimizar a ocorrência de suas componentes horizontais. Tal premissa sugere que o furo transversal deva ser quadrado (ou retangular) e, portanto, deve ser plana a superfície de contato entre a porca e a madeira.

3.2 Ligação mecânica - Barra rosqueada / tubo galvanizado / madeira - Furação transversal quadrada

A geometria dos furos transversais do modelo de ligação estrutural proposto por Eckelman (2004) foi alterada, porém mantendo-se as dimensões das barras metálicas. Foram executados furos retangulares e quadrados e a barra rosqueada foi fixada, transversalmente, a uma porca apoiada em uma barra chata metálica com 6,4 mm de espessura (Figura 25). A furação foi executada em perfuradora de corrente, marca CVL, com guia 08 para corrente 25 x 100 mm.

Foram ensaiados 08 corpos-de-prova de madeira laminada colada de *Eucalyptus*, com dimensões idênticas aos modelos anteriores.



Figura 25 ó Corpos-de-prova (furos quadrados): madeira laminada colada, barra metálica rosqueada, barra chata metálica, porca.

3.2.1 Resultados e discussão

As dimensões dos elementos dos corpos-de-prova e os resultados dos ensaios encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 ó Características geométricas dos corpos-de-prova e resultados dos ensaios de arrancamento

CP	D (mm)	Diâm. Barra (mm)	Larg. Barra Chata (mm)	d (mm)	h (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	L (mm)	Lb (mm)	Densid. (kg/m ³)	Força Máx. (kN)
1	50	6,4	12,7	13,7	18,5	50	60	263,0	400	128,5	880	13,7
2	50	9,5	15,9	16,6	21,3	80	60	197,5	400	161,3	620	25,6
3	75	6,4	12,7	13,7	18,5	50	60	263,0	400	128,5	850	13,5
4	75	9,5	15,9	18,1	21,3	80	60	197,5	400	161,3	850	30,4
5	75	12,7	25,4	26,9	24,1	100	60	151,9	400	184,1	710	50,5
6	100	6,4	12,7	16,1	18,5	50	60	263,0	400	128,5	690	13,5
7	100	9,5	15,9	17,2	21,3	80	60	197,5	400	161,3	720	30,1
8	100	12,7	25,4	26,6	24,1	100	60	151,9	400	184,1	700	49,9

Conforme Figura 26, a ruptura dos corpos-de-prova ocorreu, principalmente, por rompimento das barras metálicas. Uma única barra de madeira rompeu por cisalhamento paralelo às fibras (Tabela 7, CP 2). Não houve ruptura da madeira por tração perpendicular às fibras.



1) barra rosqueada (próximo da porca de fixação); 2) peça de madeira (cisalhamento paralelo às fibras); 3) barra rosqueada (próximo da porca de fixação); 4) barra rosqueada (próximo da porca de fixação); 5) barra rosqueada (distante da porca de fixação); 6) barra rosqueada (próximo da porca de fixação); 7) barra rosqueada (distante da porca de fixação); 8) barra rosqueada (próximo da porca de fixação).

Figura 26 ó Padrões de ruptura.

Ao se compararem os resultados dos dois modelos de ligação (Tabela 8) nota-se que elevação dos valores últimos de carga é constatada apenas nos CPs 5 e 8, os quais tem o maior diâmetro de barra rosqueada (12,7 mm). Não há ganho de resistência para os CPs com barras rosqueadas de diâmetros menores (6,4 e 9,5 mm).

Tabela 8 ó Ensaio de arrancamento: comparação entre valores de força máxima e padrões de ruptura

CP	Diâm. CP (mm)	Diâm. Barra (mm)	Força Máxima Furo Redondo (kN)	Densid. (kg/m ³)	Ruptura	Força Máxima Furo Quadrado (kN)	Densid. (kg/m ³)	Ruptura
1	50	6,4	13,9	890	barra	13,7	880	Barra
2	50	9,5	26,6	1030	barra	25,6	620	madeira / cisalham.
3	75	6,4	13,1	960	barra	13,5	850	Barra
4	75	9,5	30,6	920	barra	30,4	850	Barra
5	75	12,7	29,1	750	madeira/tração normal fibras	50,5	710	Barra
6	100	6,4	13,4	570	madeira/tração normal fibras	13,5	690	Barra
7	100	9,5	30,6	530	barra	30,1	720	Barra
8	100	12,7	26,5	530	madeira/tração normal fibras	49,9	700	Barra

A substituição dos furos redondos por quadrados não alteraram significativamente os valores limites de ruptura para os CPs com barras rosqueadas de menor diâmetro (6,4 e 9,5 mm). As barras rosqueadas continuaram a determinar o limite de resistência.

Para os CPs com barra rosqueada de maior diâmetro (12,7 mm), os valores de carga última elevaram-se no modelo com furos transversais quadrados (Figura 27 e Figura 28). O limite de ruptura foi estabelecido pelas barras rosqueadas. No modelo com furos redondos este limite é estabelecido pela madeira, a qual rompeu por tração normal às fibras ó considerado um padrão inadequado de colapso estrutural.

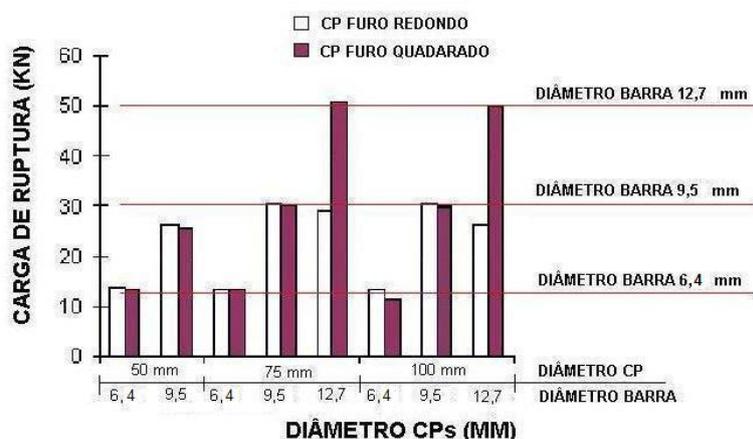


Figura 27 ó Ensaio de tração paralela às fibras: comparação entre valores de força máxima.

É desejável que o limite de ruptura seja estabelecido pelas barras de madeira, mediante ruptura por cisalhamento ou tração paralela às fibras. A possibilidade de ruptura da peça de madeira por tração normal deve ser evitada, pois esta propriedade de resistência mecânica é reconhecidamente de valores baixos. Para efeito de projeto estrutural, a NBR 7190 (ABNT, 1997) considera nula a resistência à tração normal às fibras das peças de madeira.

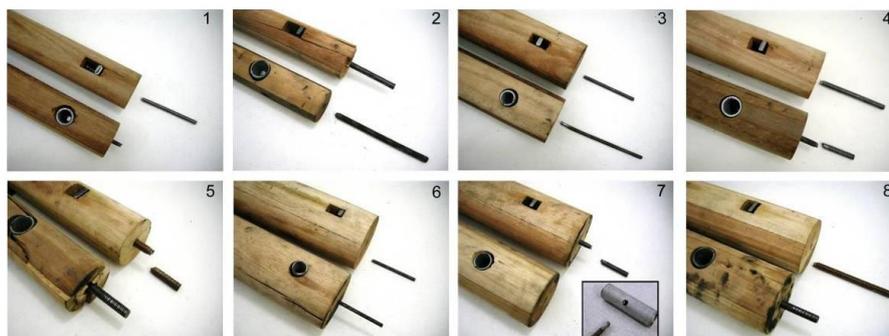


Figura 28 ó Corpos-de-prova (furação quadrada e redonda): comparação entre padrões de ruptura.

A comparação entre os valores de força máxima dos dois modelos de conexão (Tabela 8) confirmou a expectativa de maior adequação da tipologia estrutural com furação quadrada em relação àquela com furação redonda, ao menos para os elementos de conexão de maior diâmetro. O experimento de Eckelman (2004), portanto, é passível de aprimoramento, pois sua solução de conexão é otimizável do ponto de vista da resistência e, portanto, da segurança.

Nesta pesquisa, a execução de furos quadrados apresentou maiores dificuldades operacionais, gerando mais tempo de confecção dos CPs. O equipamento de perfuração por corrente é menos comum no mercado e de custo mais elevado que uma máquina de perfuração convencional de bancada ou horizontal.

4 CONCLUSÃO

A partir da análise comparativa do modelo de ligação estrutural proposto por Eckelman (2004), conclui-se que seu modelo é passível de incremento de resistência à tração perpendicular às fibras, se considerados os seguintes aspectos:

- Os esforços de tração, transferidos à madeira pelos elementos de conexão, devem atuar sobre superfícies planas e ser paralelos às fibras, de modo a não promover o fendilhamento das barras de madeira. O modelo de furação quadrada evita a possibilidade de ruptura por tração perpendicular às fibras, indesejável devido à reconhecida fragilidade mecânica da madeira quando solicitada por tais esforços.
- A alteração da geometria da furação transversal, de circular para quadrada, promove ganho de resistência mecânica para os elementos de ligação com barras rosqueadas de maior diâmetro.

Esta investigação preliminar do potencial de desenvolvimento de uma ligação mecânica com as características descritas (barra rosqueada/porca, barra chata metálica e barra de madeira), apresentou dificuldades operacionais para o aprofundamento das soluções: pouca disponibilidade do equipamento de furação quadrada (perfuradora de corrente) e de pessoal especializado para operação (ficaram comprometidos o tempo de execução e a perpendicularidade das furações ó quadrada, transversalmente, e circular, longitudinalmente). Este último aspecto é necessário para uma furação sem excentricidades ó caso ocorresse, favoreceria o surgimento de tensões que levariam ao fendilhamento da madeira.

Considerou-se, então, a possibilidade de novas tipologias de conexão, de execução simples, conforme sugerido na literatura de referência. Idealizou-se uma ligação adesiva, operacionalmente menos complexa, com uma única furação longitudinal, empregando barras metálicas rosqueadas como elemento de ligação.

CAPÍTULO 3 - LIGAÇÕES ADESIVAS

1 INTRODUÇÃO

Ligações adesivas têm papel essencial no incremento de técnicas de reparo e reabilitação de estruturas de madeira, substituindo ligações mecânicas (Figura 29). Distribuem a carga aplicada em toda a área de adesão com maior distribuição uniforme de tensões, requerem pouco ou nenhum dano ao aderente, acrescentam pouco peso à estrutura e apresentam, em relação a outros tipos de ligação, superior resistência à fadiga. Por outro lado, apresentam limitações à exposição a altas temperaturas, são afetadas pelas condições de serviço e são difíceis de desmontagem para inspeção e reparos (Custódio; Broughton; Cruz, 2009).

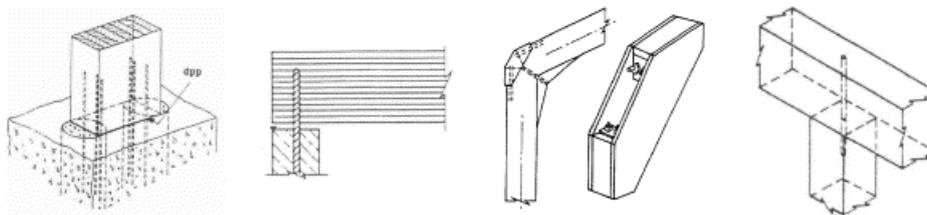


Figura 29 Exemplos de conexões com barras metálicas embutidas na madeira.
Fonte: Bainbridge et al. (2002).

Adesivos estruturais à base de resina epóxi provaram ser eficientes e economicamente competitivos. Não requerem alta pressão durante aplicação e cura e são razoavelmente tolerantes à variação da espessura da linha de cola recomendada. Apresentam forte adesão a vários materiais, pequena ou nenhuma variação durante a cura, estabilidade dimensional após endurecimento, elevada resistência mecânica e à produtos químicos e água (Custódio, Broughton; Cruz, 2009).

Com o objetivo de desenvolver uma solução de ligação adesiva para a madeira roliça de *Eucalyptus* de pequeno diâmetro avaliou-se, experimentalmente, modelo de ligação estrutural, empregando barra de aço rosqueada e adesivo estrutural epóxi.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A resistência axial das ligações coladas depende amplamente dos parâmetros geométricos, como o comprimento de ancoragem, a espessura do adesivo, diâmetro da barra metálica, dimensões da peça de madeira. (Chans, Cimadevila, Gutiérrez, 2008).

Broughton & Hutchinson (2001b), avaliando diversos adesivos para ligações entre barra metálica rosqueada e madeira, destacam que os adesivos de epóxi apresentam boa adesão tanto para o aço quanto para a madeira e têm capacidade de funcionar com espessura de linha de colagem a partir de 0,5 mm.

O fabricante do adesivo estrutural Sikadur 32 (Sika), empregado nesta pesquisa, adverte ser desnecessário empregar espessura superior a 1,5 mm.

Rosignon & Espion (2008) destacam a discrepância entre artigos a respeito dos parâmetros que influenciam o desempenho da ligação e classificam estes parâmetros em dois grupos: geométricos (comprimento de ancoragem, diâmetros da barra metálica e do furo, área da seção transversal da madeira, espessura da linha de cola, entre outros) e mecânicos (classe de resistência da madeira, comportamento reológico do adesivo, umidade, densidade da madeira, entre outros). Ensaíram diversas configurações de ligação adesiva barra-metálica-rosqueada/madeira, empregando epóxi. As variáveis foram o comprimento de ancoragem e o diâmetro da barra. A principal diferença de resultados em relação a ensaios já relatados foram os modos de ruptura. A falha ocorreu, principalmente, pela rachadura do elemento de madeira ao longo da

ancoragem, embora atendesse recomendações para a distância entre as barras e a borda das peças de madeira.

Nas ligações adesivas por embutimento de barras metálicas rosqueadas, a madeira trabalha essencialmente sob cisalhamento, que evolui para tração axial pura próximo do final da barra. De acordo com Gardelle & Morlier (2007) o elemento de madeira é submetido a quatro tipos de tensão:

- tensões longitudinais de cisalhamento,
- tensões de tração radiais,
- tensões de tração tangenciais de tração, as quais apresentam o seu máximo na vizinhança da interface madeira-adesivo;
- tensões de tração axiais, que apresentam seu máximo próximo da extremidade da barra, antes da ligação propriamente dita.

Quando a qualidade da barra de metal e a penetração da cola atingem seu ponto ótimo, a madeira é o material menos resistente e determina a resistência da ligação.

Quatro modos de ruptura são reconhecidos em ligações adesivas com barras metálicas embutidas, segundo Bainbridge et al. (2002): 1) ruptura da barra por escoamento, 2) ruptura por cisalhamento no adesivo, 3) ruptura localizada da madeira em torno da superfície de adesão, 4) ruptura da peça de madeira.

No processo de adesão, a ligação mecânica ocorre, após a cura, pelo preenchimento dos vazios entre as fibras e nas fibras. A criação de um ambiente úmido na superfície da madeira gera a atração do líquido adesivo para a superfície da madeira mediante forças moleculares. As forças de van der Waals proporcionam energia suficiente para uma adesão inicial gerada nas superfícies polarizadas. Formam-se pontes de hidrogênio em decorrência dos grupos hidroxílicos presentes nas moléculas de celulose e no adesivo. Pontes químicas

reais são obtidas com a reação química entre as moléculas de celulose e as do adesivo (Custódio; Broughton; Cruz, 2009).

Para uma adesão físico-química em toda a superfície da madeira e distribuição uniforme de tensões, um dos fatores a ser controlado é a umidade. Sua magnitude e distribuição influenciam a formação e a performance da ligação madeira-adesivo, pois relacionam-se diretamente com as propriedades de resistência e rigidez da madeira (Bodig & Jayne, 1992).

Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2008), avaliando ligações adesivas (epóxi) entre barras metálicas rosqueadas e madeira de alta densidade constataram que os valores de carga de ruptura não são proporcionais ao comprimento da ancoragem nem ao diâmetro da barra; a resistência não é proporcional à área de superfície de contato entre a madeira e o adesivo. Não existe uma relação linear entre a densidade das madeiras empregadas e a força de ruptura. Tais resultados estão em conflito com muitas equações para projeto de juntas coladas, que frequentemente estão associadas a ensaios com madeira de baixa densidade. Recomendam a revisão dos critérios de projeto de juntas coladas, especialmente para madeiras de alta densidade.

Chans et al. (2010), em ensaios com barras metálicas embutidas em madeira, longitudinalmente, registraram que a resistência das ligações não guardaram relação linear com as propriedades mecânicas das espécies empregadas.

Avaliando ligações adesivas (epóxi) entre barras metálicas rosqueadas e madeira de alta densidade, e considerando os parâmetros de profundidade de ancoragem, diâmetro da barra metálica e a espessura da linha de cola, Cimadevila, Rodríguez e Chans (2007) encontraram significativa diferença entre previsões teóricas indicadas no Eurocode e os resultados de ensaio, os quais foram menores que o esperado. Atribuem o fenômeno ao uso de madeira de

baixa densidade empregado no EC5; não identifica, nos resultados, padrão de comportamento explicativo.

Broughton e Hutchinson (2001a), avaliando ligações adesivas madeira/barra metálica rosqueada, indicaram que juntas eficientes e de alta resistência podem ser executadas com resina epóxi; apontaram que o efeito do teor de água até 20%, antes ou após a adesão, tem efeito mínimo sobre a integridade da ligação. A resistência ao arrancamento aumenta linearmente com o aumento da espessura da linha de cola e para comprimentos da superfície de adesão maior que 40 mm. O limite superior de resistência ao arrancamento é determinado pela resistência à tração da barra metálica, caso não ocorra a ruptura da madeira.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Programa experimental

O programa de avaliação experimental das ligações adesivas foi elaborado a partir dos resultados obtidos na avaliação das ligações mecânicas. Eles indicaram que as barras metálicas rosqueadas deveriam ter diâmetro igual ou superior a 12,70 mm. Abaixo desta dimensão, as barras rompem, prematuramente, nos ensaios de arrancamento (escoamento do aço), impedindo a avaliação do comportamento mecânico da madeira.

Os parâmetros geométricos que caracterizam a ligação adesiva são o diâmetro da barra de madeira (D), o diâmetro da barra metálica (d), a profundidade de ancoragem da barra metálica na madeira ou comprimento de ancoragem (p), conforme Figura 30.

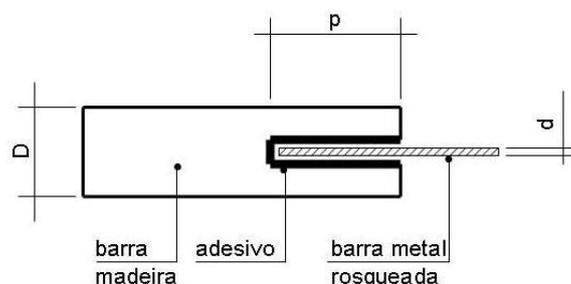


Figura 30 ó Parâmetros geométricos de configuração do corpo-de-prova para ensaio de arrancamento longitudinal às fibras.

Para a definição das dimensões destes parâmetros foram realizados, preliminarmente, ensaios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) da madeira ó pois a ruptura por cisalhamento é o padrão característico de rompimento dos CPs submetidos a ensaios de arrancamento ó e ensaios de resistência ao arrancamento de barras rosqueadas em CPs com diferentes características geométricas.

O valor médio da resistência ao cisalhamento, obtido em ensaios de 10 corpos-de-prova, provenientes de árvores distintas, foi 8,4 MPa (umidade média de 14,2%, em base seca e umidade relativa de 68%).

Os ensaios preliminares de arrancamento indicaram duas hipóteses de ruptura dos corpos-de-prova. Um padrão em que as fibras não estão aderidas simetricamente em torno da barra rosqueada (1) e outro em que o padrão é simétrico (2) (Figura 31).

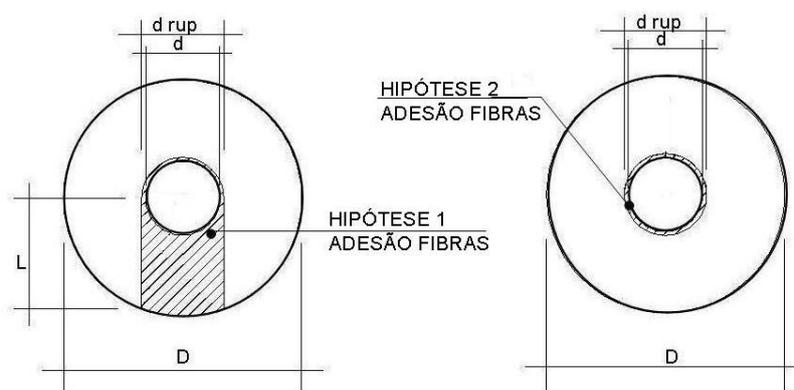


Figura 31 ó Diagrama explicativo para hipóteses de cisalhamento (assimétrico e simétrico).

Estas hipóteses estabelecem duas seções resistentes distintas, correlacionadas com a grandeza das forças máximas para arrancamento. As Equações (10) e (11) definem, respectivamente, as áreas das hipóteses 1 e 2.

$$A = \left(2L + \frac{\pi \cdot d_{rup}}{2}\right) \cdot p \quad \text{sendo} \quad L = \sqrt{\frac{D^2 - d_{rup}^2}{4}} \quad (10)$$

$$A = \pi \cdot d_{rup} \cdot p \quad (11)$$

Em que:

D : diâmetro da barra de madeira

d_{rup} : diâmetro do furo após arrancamento da barra

p : profundidade de ancoragem da barra rosqueada

A partir destes dados, simularam-se, teoricamente, possíveis configurações para os corpos-de-prova, considerando os seguintes parâmetros geométricos: diâmetros das barras de madeira de 50, 60, 70 e 80 mm; diâmetros das barras metálicas de 19,0 mm, 15,9 mm e 12,7 mm; profundidades de ancoragem da barra de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 vezes o diâmetro das barras metálicas. A

força máxima para ruptura da madeira ($FM_{\text{máx, mad}}$) foi estimada para todas estas variáveis e suas combinações, e contemplou-se a possibilidade de ocorrência dos dois padrões de ruptura possíveis. Ver Tabela 9 e Tabela 10.

Considerando a hipótese de ruptura da barra de aço, calculou-se a força máxima correspondente, estabelecida pela Equação 12:

$$T_{rup} = F_{máx} / A \quad (12)$$

Em que

T_{rup} : tensão de ruptura do aço (350 MPa)

$F_{máx}$: força máxima de ruptura

A : área da seção transversal resistente (mm^2)

Considerando os 03 diâmetros de barras metálicas avaliados, foram obtidos 03 valores correspondentes de força máxima para ruptura.

Efetuiu-se uma comparação entre os valores de força máxima da madeira e das barras metálicas. Os CPs que apresentaram valores de força máxima para ruptura da madeira superiores aos do aço ($FM_{\text{máx, mad}} > FM_{\text{máx, aço}}$) foram considerados adequados para submissão aos ensaios de arrancamento. As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores de força máxima calculados. Os valores assinalados nas Tabelas 9 e 10 identificam os CPs, em que a força máxima para ruptura da madeira foi superior ao do aço.

Tabela 9 ó Estimativa de valores de força máxima considerando hipótese 1

HIPÓTESE 1		madeira	madeira	madeira	madeira	madeira	madeira	aço
diâmetro barra madeira D (mm)	diâm barra met. d (mm)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)
50	19,1	4030	5367	6709	8051	9392	10734	7037
	15,9	3223	4292	5365	6439	7512	8585	4646
	12,7	2463	3280	4100	4920	5741	6561	2749
60	19,1	4579	6098	7622	9147	10671	12196	7037
	15,9	3666	4883	6103	7324	8545	9765	4646
	12,7	2809	3741	4676	5612	6547	7482	2749
70	19,1	5108	6802	8503	10203	11904	13604	7037
	15,9	4098	5458	6822	8186	9551	10915	4646
	12,7	3149	4193	5242	6290	7338	8387	2749
80	19,1	5625	7492	9364	11237	13110	14983	7037
	15,9	4523	6024	7529	9035	10541	12047	4646
	12,7	3485	4641	5801	6961	8121	9281	2749
		3d	4d	5d	6d	7d	8d	

Tabela 10 ó Estimativa de valores de força máxima considerando hipótese 2

HIPÓTESE 2		madeira	madeira	madeira	madeira	madeira	madeira	aço
diâmetro barra madeira D (mm)	diâm barra met. d (mm)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)	F máx (kgf)
50	19,1	3839	5118	6398	7677	8957	10236	7037
	15,9	2792	3723	4653	5584	6514	7445	4646
	12,7	1910	2547	3184	3821	4458	5094	2749
60	19,1	3839	5118	6398	7677	8957	10236	7037
	15,9	2792	3723	4653	5584	6514	7445	4646
	12,7	1910	2547	3184	3821	4458	5094	2749
70	19,1	3839	5118	6398	7677	8957	10236	7037
	15,9	2792	3723	4653	5584	6514	7445	4646
	12,7	1910	2547	3184	3821	4458	5094	2749
80	19,1	3839	5118	6398	7677	8957	10236	7037
	15,9	2792	3723	4653	5584	6514	7445	4646
	12,7	1910	2547	3184	3821	4458	5094	2749
		3d	4d	5d	6d	7d	8d	

Analisando-se as duas hipóteses de ruptura, verificou-se que uma ligação com profundidade de ancoragem da barra metálica igual a 4, 5 e 6 vezes seu diâmetro situa-se numa faixa próxima à condição $FMáx_{mad} > FMáx_{aço}$. A profundidade de 3 vezes o diâmetro da barra metálica apresenta, de modo geral, $FMáx_{mad} < FMáx_{aço}$. A partir de 6 vezes, as duas hipóteses apresentam $FMáx_{mad} > FMáx_{aço}$. Para 7 e 8 vezes os valores de $FMáx_{mad}$ são bastante superiores aos de $FMáx_{aço}$, portanto, desnecessários, pois encontram-se muito além da condição estabelecida. Concluiu-se pela adoção de CPs, com profundidade de ancoragem da barra metálica igual a 4, 5 e 6 vezes seu diâmetro para avaliação experimental da ligação adesiva.

O delineamento apresentado na Figura 32 sintetiza a avaliação experimental planejada para as ligações adesivas.

DIAM BARRA MADEIRA D (mm)	DIAM BARRA MET. d (mm)	PROFUND. ANCORAGEM* p (mm)	REPETIÇÕES		ARV 30		ARV 35		ARV 36	
50	19,1	4d	3	D	diam	9	diam	9	diam	TOPO
		5d	3		50	8	50	8	50	D
		6d	3			7		7		
	15,9	4d	3			6		6		
		5d	3			5		5		
		6d	3			4		4		
	12,7	4d	3			3		3		
		5d	3			2		2		
		6d	3			1		1		
60	19,1	4d	3	C	diam	9	diam	9	diam		C
		5d	3		60	8	60	8	60	
		6d	3			7		7		
	15,9	4d	3			6		6		
		5d	3			5		5		
		6d	3			4		4		
	12,7	4d	3			3		3		
		5d	3			2		2		
		6d	3			1		1		
70	19,1	4d	3	B	diam	9	diam	9	diam	B
		5d	3		70	8	70	8	70	
		6d	3			7		7		
	15,9	4d	3			6		6		
		5d	3			5		5		
		6d	3			4		4		
	12,7	4d	3			3		3		
		5d	3			2		2		
		6d	3			1		1		
80	19,1	4d	3	A	diam	9	diam	9	diam	A
		5d	3		80	8	80	8	80	
		6d	3			7		7		
	15,9	4d	3			6		6		
		5d	3			5		5		
		6d	3			4		4		
	12,7	4d	3			3		3		
		5d	3			2		2		
		6d	3			1		1		
* em função do diâmetro da barra					36 CPs			36 CPs		
					36 CPs			36 CPs		

Figura 32 ó Planejamento da avaliação experimental.

3.2 Procedimentos de ensaio

A madeira empregada foi obtida de segmentos de troncos com 1600 mm de comprimento e diâmetros variando entre 65 e 135 mm. Foram utilizadas as peças próximas aos topos.

De cada segmento foram confeccionados 09 CPs, numerados no sentido base-topo. Para cada tratamento, foram realizadas 03 repetições, sendo os CPs retirados de 03 árvores distintas, escolhidas aleatoriamente. As Figuras 33 e 34 ilustram o planejamento de confecção e identificação dos CPs.

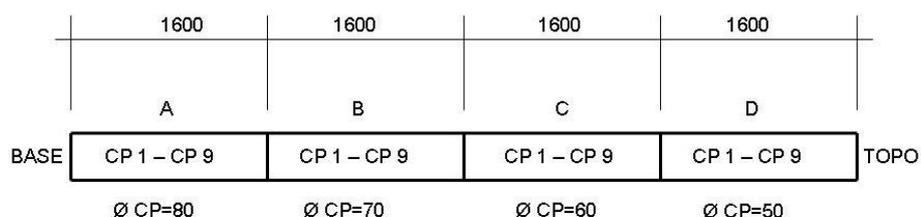


Figura 33 ó Diagrama de retirada dos corpos-de-prova para ensaio de arrancamento.

Foram confeccionados 108 CPs, constituídos de barras cilíndricas de madeira com diâmetros (D) de 50, 60, 70 e 80 mm, barras metálicas rosqueadas com diâmetros (d) de 19,1 mm, 15,9 mm e 12,7 mm e profundidade de perfuração (p) de 4, 5 e 6 vezes o diâmetro das barras. A furação longitudinal foi feita com diâmetros superiores aos das barras utilizadas (22,2 mm, 19,1 mm e 15,9 mm respectivamente), resultando em uma linha de cola com 1,6 mm de espessura, aproximadamente (Figura 34).



Figura 34 ó Confeção dos corpos-de-prova.

Para a confecção da ligação aplicou-se, com espátula, adesivo estrutural de alta resistência de resina epóxi (Sikadur 32) às barras metálicas rosqueadas. Em seguida foram introduzidas nas barras cilíndricas (torneadas) de madeira.

Anterior aos procedimentos de furação, obteve-se a densidade aparente de todos os CPs. Apresentaram densidade aparente média de 572 kgf/m^3 , com desvio padrão de 17 kgf/m^3 e coeficiente de variação de 2,9%.

Posterior aos ensaios de arrancamento extraíram-se das barras de madeira rompidas corpos-de-prova para ensaio de resistência ao cisalhamento. Obteve-se o valor médio de 9,2 MPa, desvio padrão de 1,3 MPa e coeficiente de variação de 14,3%.

Os ensaios de arrancamento foram realizados em uma máquina universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL 30000 (capacidade de 300 kN), eletromecânica, servocontrolada e com sistema de aquisição de dados computadorizado. Os CPs apresentaram umidade média de 14,2%, em base seca, à temperatura ambiente de 21°C e umidade relativa de 68%.

3.3 Resultados e discussão

Os padrões de ruptura apresentados pelos ensaios foram distintos daqueles previstos no modelo teórico. Após os ensaios, constataram-se padrões de adesão parcial, tanto entre madeira e adesivo quanto entre barra metálica e adesivo provocados tanto por falhas do processo de colagem (falha operacional), quanto por defeitos da madeira (regiões com nós não interagem com o adesivo). As falhas de adesão tanto foram pontuais quanto ocorreram em pequenas extensões. Ocorreu ruptura por cisalhamento paralelo às fibras e por cisalhamento precedido por compressão paralela às fibras, com padrões de ruptura assimétricos (volumes distintos de fibras aderidas à superfície de adesão) e simétricos (distribuição uniforme das fibras em torno da linha de cola), e rompimento da barra metálica por tração (Figura 35). Constataram-se arrancamentos acompanhados de rachaduras nas barras de madeira.

Os padrões de ruptura foram coerentes com a classificação feita por Bainbridge et al. (2002), que listou quatro modos identificados a partir de revisão de literatura, à exceção da compressão da madeira anterior à ruptura (Figura 35, foto 6). Este padrão deveu-se ao mecanismo de fixação do CP, que fez com que a barra metálica fosse submetida à tração, e a madeira, à compressão de sua extremidade (Figura 34, última foto). Os modos de ruptura também se relacionaram com o padrão de tensões relatado por Gardelle & Morlier (2007).

O posicionamento vertical aprumado da barra metálica não foi satisfatório. Possivelmente isso contribuiu para um desvio dos esforços de arrancamento do eixo longitudinal (induziu o surgimento de componentes horizontais no esforço aplicado axialmente), favorecendo o surgimento de padrões de ruptura assimétricos. Este padrão assimétrico pode estar associado, também, ao comportamento anisotrópico da madeira.



1) cisalhamento paralelo às fibras; 2) falha de adesão (pontual) à madeira; 3) falha de adesão (extensa) à madeira; 4) falha de adesão (extensa) à barra de aço; 5) falha de adesão (ponto) à barra de aço; 6) ocorrência de compressão paralela às fibras, anterior ao cisalhamento; 7) ruptura da barra de aço; 8) seção transversal resistente assimétrica; 9) falha de adesão devido à ocorrência de nós.

Figura 35 ó Padrões de ruptura.

Regiões com presença de nós na superfície de adesão não propiciaram adesão adequada. Aproximadamente um terço dos CPs apresentou pontos de adesão incompleta (pontual) devido à sua ocorrência. Os CPs provenientes da árvore 30, 35 e 36 apresentaram, respectivamente, 43,3%, 25,7% e 27,8% de falhas pontuais devido aos nós. Sua interferência nos resultados não foi possível de se determinar, pois foram observadas outras falhas concomitantes.

3.3.1 Análise estatística - Regressão linear simples

A análise de regressão linear simples indicou que a configuração de variáveis que apresentou maiores média e mediana para a força máxima foi $D = 60$ mm, $d = 19,1$ mm e $p = 6$. d . (Tabelas 11, 12 e 13).

Tabela 11 ó Estatísticas descritivas da força máxima para diferentes D

D	Mean	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum
50	4737,8215	5049,4900	1403,90621	2159,93	7058,71
60	5437,0974	6053,6000	2213,16221	1287,58	9234,61
70	5485,6726	5944,8100	2395,27907	1194,75	10501,23
80	5374,8096	5377,8800	2225,56402	1624,94	9698,74

Tabela 12 ó Estatísticas descritivas da força máxima para diferentes p

p	Mean	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum
4	4498,6142	5087,4200	2052,11484	1194,75	7738,43
5	5407,2944	5709,7500	1857,06665	2016,20	8416,16
6	5870,6422	6125,4700	2160,14510	2682,95	10501,23

Tabela 13 ó Estatísticas descritivas da força máxima para diferentes d

d	Mean	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum
19,1	7209,4844	7050,2250	1253,8125	5171,32	10501,23
15,9	5727,1633	5695,2800	981,11380	3113,14	7361,14
12,7	2839,9031	2950,9450	797,39129	1194,75	4502,52

O modelo estatístico ajustado com as variáveis D , d e p explicam melhor a variabilidade da variável independente força máxima (FMáx), conforme Tabela 14. O modelo ajustado foi significativo para as 03 variáveis.

Tabela 14 ó Análise de variância considerando as 3 variáveis independentes *D, d, p*

ANOVA ^d						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	343678347,254	1	343678347,254	296,638	,000 ^a
	Residual	122809330,913	106	1158578,594		
	Total	466487678,167	107			
2	Regression	377562644,988	2	188781322,494	222,907	,000 ^b
	Residual	88925033,179	105	846905,078		
	Total	466487678,167	107			
3	Regression	382746368,995	3	127582122,998	158,447	,000 ^c
	Residual	83741309,173	104	805204,896		
	Total	466487678,167	107			

a. Predictors: (Constant), d

b. Predictors: (Constant), d, p

c. Predictors: (Constant), d, p, D

d. Dependent Variable: Força

Todas as variáveis explicativas foram significativas para 95% de confiança nos 3 modelos (Tabela 15).

Tabela 15 ó Significância das variáveis explicativas

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		95,0% Confidence Interval for B		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-5665,103	642,660		-8,815	,000	-6939,239	-4390,967
	d	17478,326	1014,814	,858	17,223	,000	15466,358	19490,293
2	(Constant)	-9095,173	771,991		-11,781	,000	-10625,889	-7564,458
	d	17478,326	867,643	,858	20,145	,000	15757,950	19198,702
	p	686,014	108,455	,270	6,325	,000	470,967	901,061
3	(Constant)	-10368,874	904,779		-11,460	,000	-12163,085	-8574,663
	d	17478,326	846,013	,858	20,660	,000	15800,650	19156,001
	p	686,014	105,752	,270	6,487	,000	476,305	895,723
	D	195,954	77,230	,105	2,537	,013	42,804	349,104

a. Dependent Variable: Força

O modelo ajustado com as variáveis D , d e p explica melhor a variabilidade da força máxima. Verifica-se que 82,0% de sua variação, obtida por meio dos ensaios de arrancamento, pode ser explicada pelas variáveis D , d e p . O índice é elevado e comprova estas variáveis como boas estimadoras de valores de força máxima (Tabela 16).

Tabela 16 ó Correlação entre variáveis

Model Summary ^d									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,858 ^a	,737	,734	1076,37289	,737	296,638	1,000	106,000	,000
2	,900 ^b	,809	,806	920,27446	,073	40,010	1,000	105,000	,000
3	,906 ^c	,820	,815	897,33210	,011	6,438	1,000	104,000	,013

a. Predictors: (Constant), d
b. Predictors: (Constant), d, p
c. Predictors: (Constant), d, p, D
d. Dependent Variable: Força

A análise de regressão simples indicou a linearidade da regressão (a relação entre as variáveis independentes e a dependente é linear) com distribuição normal dos valores da variável dependente (força máxima). Os resíduos apresentaram independência e distribuição normal, conforme Figura 36, confirmando que o modelo ajustado com as variáveis D , d e p explica melhor a variabilidade da força.

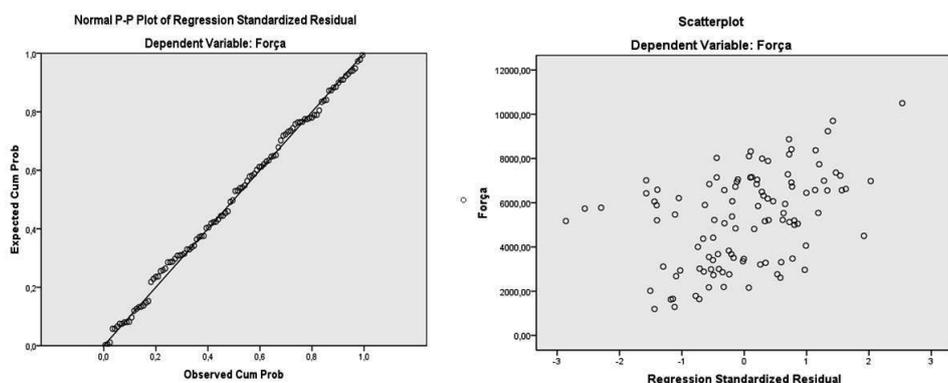


Figura 36 ó Análise de regressão da variável dependente e distribuição dos resíduos.

3.3.2 Análise estatística - Regressão multivariada

Os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento foram interpretados, também, com auxílio de análise de regressão multivariada, capaz de avaliar a contribuição específica de cada variável em um processo multicausal com uma única variável resposta (força máxima). As variáveis independentes foram os diâmetros das barras cilíndricas de madeira (D , 4 níveis), os diâmetros das barras metálicas rosqueadas (d , 3 níveis) e a profundidade de ancoragem da barra metálica (p , 3 níveis). A variável dependente foi a força máxima ($f_{máx}$) necessária para romper o corpo-de-prova.

Os valores de força máxima obtidos apresentaram média de 5259 kgf, com desvio padrão de 2088 kgf e coeficiente de variação de 39,7%. O alto índice do coeficiente de variação identifica um conjunto heterogêneo de dados obtidos e indica que as diferenças entre os valores de força máxima são grandes.

O modelo de análise estatística ajustado foi significativo, pois a variância explicada no conjunto de dados é significativamente maior que a variância não explicada (Tabela 17).

Tabela 17 ó Significância da explicação do conjunto de dados pelas variáveis p, d, D

Omnibus Test ^a		
Likelihood Ratio Chi-Square	df	Sig.
211,280	7	,000

Dependent Variable: Força

Model: (Intercept), p, d, D

a. Compares the fitted model against the intercept-only model.

As 3 variáveis explicativas são significantes: o diâmetro da barra de madeira, o diâmetro da barra metálica e a profundidade de ancoragem da barra metálica estão correlacionados com os resultados de força máxima obtidos (Tabela 18).

Tabela 18 ó Teste de efeito das variáveis p, d, D

Tests of Model Effects			
Source	Type III		
	Wald Chi-Square	df	Sig.
(Intercept)	4891,020	1	,000
p	57,436	2	,000
d	582,184	2	,000
D	16,277	3	,001

Dependent Variable: Força

Model: (Intercept), Profundidade, Barra, CP

A estimativa que considera os maiores valores dos parâmetros avaliados (Tabela 19) ó maior diâmetro para barra de madeira e para barra metálica, e maior profundidade de ancoragem da barra metálica ó indica que as demais configurações continuam significativas, porém, com diferença pouco significativa se é empregado diâmetro da barra de madeira com 60 ou 70 mm: empregar barras de madeira com 60 ou 70 mm de diâmetro não produz diferença significativa na força máxima. Em vez de empregar barras de madeira com 80 mm, poderiam ser empregadas barras de 60 mm (menor diâmetro, menor

consumo de madeira), pois não existe diferença significativa entre os valores de força máxima correspondentes.

Para a configuração $D = 80$ mm, $d = 19,1$ mm e $p = 6.d$ a força máxima estimada é 6628 kgf.

Tabela 19 ó Estimativa dos parâmetros

Parameter	Parameter Estimates					
	B	Std. Error	95% Wald Confidence Interval		Hypothesis Test	
			Lower	Upper	Wald Chi-Square	df Sig.
(Intercept)	7937,236	212,6846	7520,382	8354,090	1392,728	1 ,000
[p=4.d]	-1372,028	184,1903	-1733,034	-1011,022	55,487	1 ,000
[p=5.d]	-463,348	184,1903	-824,354	-102,341	6,328	1 ,012
[p=6.d]	0	.	.	.	.	.
[d=12,70]	-4369,581	184,1903	-4730,588	-4008,575	562,790	1 ,000
[d=15,88]	-1482,321	184,1903	-1843,327	-1121,315	64,767	1 ,000
[d=19,05]	0	.	.	.	.	.
[D=50]	-636,988	212,6846	-1053,842	-220,134	8,970	1 ,003
[D=60]	62,288	212,6846	-354,566	479,142	,086	1 ,770
[D=70]	110,863	212,6846	-305,991	527,717	,272	1 ,602
[D=80]	0	.	.	.	.	.
(Scale)	610669,048	83101,5316	467705,040	797333,050		

Dependent Variable: Força
Model: (Intercept), p, d, D

a. Set to zero because this parameter is redundant.
b. Maximum likelihood estimate.

As características geométricas dos CPs são, portanto, estatisticamente significativas, pois as diferenças entre os valores encontrados para a força máxima não são atribuídas ao acaso.

A Equação 15 estima os valores de força máxima, considerando as variáveis avaliadas. As variáveis $p1$, $p2$, $d1$, $d2$, $D1$, $D2$ e $D3$ assumem valor igual a 1 ou 0, conforme a configuração desejada.

$$Y=7937,236 - 1372,028p1 - 463,348p2 - 4369,58d1 - 1482,321d2 - 636,988D1 + 62,288D2 + 110,863D3$$

(13)

Os resultados obtidos quanto à significância dos parâmetros geométricos estão em acordo com diversos autores (Broughton & Hutchinson, 2001a, 2001b; Cimadevila; Rodríguez; Chans, 2007; Rosignon & Espion, 2008). Estão em contradição com Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2008), que constataram que os valores de carga de ruptura não são proporcionais ao comprimento da ancoragem nem ao diâmetro da barra.

3.3.3 Análise estatística - Regressão multivariada não considerando CPs com barras metálicas rompidas

Ocorreram rupturas de 11 barras metálicas, em vez de ruptura na linha de cola da ligação. Em sua maioria foram barras de diâmetros menores e com profundidades maiores de ancoragem. Caso não tivessem ocorrido, seriam registrados maiores valores de força máxima que aqueles efetivamente registrados, pois apresentariam maior resistência ao arrancamento.

Uma segunda análise multivariada de regressão foi efetuada, desconsiderando-se os CPs, que apresentaram rompimento das barras metálicas. Os valores de força máxima obtidos apresentaram média de 5429 kgf, com desvio padrão de 2107 kgf e coeficiente de variação de 38,8%. O índice do coeficiente de variação permaneceu elevado, identificando um conjunto heterogêneo de dados obtidos e indicando que as diferenças entre os valores de força máxima são grandes.

O modelo de análise estatística ajustado ainda foi significativo, pois a variância explicada no conjunto de dados foi significativamente maior que a variância não explicada (Tabela 20).

Tabela 20 ó Significância da explicação do conjunto de dados pelas variáveis *D, p, d*

Omnibus Test ^a		
Likelihood Ratio Chi-Square	df	Sig.
192,37	7	,000

Dependent Variable: Força
 Model: (Intercept),D, p, d
 a. Compares the fitted model against the intercept-only model.

As 3 variáveis explicativas permaneceram significantes: o diâmetro da barra de madeira, o diâmetro da barra metálica e a profundidade de ancoragem da barra metálica estão correlacionados com os resultados de força máxima obtidos (Tabela 21).

Tabela 21 ó Significância da explicação do conjunto de dados pelas variáveis *D, p, d*

Tests of Model Effects			
Source	Type III		
	Wald Chi-Square	df	Sig.
(Intercept)	4143,201	1	,000
D	21,943	3	,000
p	46,842	2	,000
d	486,822	2	,000

Dependent Variable: Força
 Model: (Intercept), D, p, d

As características geométricas dos CPs permaneceram significativas, pois as diferenças entre os valores encontrados para a força máxima permaneceram não atribuíveis ao acaso. A não inclusão dos CPs com ruptura das barras de aço alterou a intensidade da significância, mas não invalidou o modelo proposto.

A estimativa que considera os maiores valores dos parâmetros avaliados (Tabela 22) ó maior diâmetro para barra de madeira e para barra metálica, e maior profundidade de ancoragem da barra metálica ó permanece indicando que

as demais configurações continuam significativas, porém com diferença pouco significativa se é empregado diâmetro da barra de madeira com 60 ou 70 mm. Em vez de empregar barras de madeira com 80 mm, poderiam ser empregadas barras de 60 mm (menor diâmetro, menor consumo de madeira), pois não existe diferença significativa entre os valores de força máxima correspondentes. Para a configuração $D = 80$ mm, $d = 19,1$ mm e $p = 6.d$ a força máxima estimada é 5143 kgf.

A Equação 16 estima os valores de força máxima, considerando as variáveis avaliadas:

$$Y = 7979,125 - 801,461 D1 + 105,062 D2 + 135,445 D - 1347,451 p1 - 540,755 p2 - 4484,138 d - 1494,326 d2 \quad (14)$$

As características geométricas dos CPs são, ainda, estatisticamente significativas, pois as diferenças entre os valores encontrados para a força máxima não são atribuídas ao acaso.

Tabela 22 ó Estimativa dos parâmetros

Parameter	Parameter Estimates					
	B	Std. Error	95% Wald Confidence Interval		Hypothesis Test	
			Lower	Upper	Wald Chi-Square	df Sig.
(Intercept)	7979,125	221,6425	7544,714	8413,536	1295,999	1 ,000
[D=50]	-801,461	229,2475	-1250,778	-352,144	12,222	1 ,000
[D=60]	105,062	220,3682	-326,852	536,976	,227	1 ,634
[D=70]	135,445	220,3682	-296,469	567,359	,378	1 ,539
[D=80]	0	.	.	.	.	.
[p=4.d]	-1347,451	201,2671	-1741,927	-952,975	44,821	1 ,000
[p=5.d]	-540,755	202,4641	-937,577	-143,933	7,134	1 ,008
[p=6.d]	0	.	.	.	.	.
[d=12,7]	-4484,138	204,0508	-4884,070	-4084,206	482,927	1 ,000
[d=15,9]	-1494,326	184,8904	-1856,705	-1131,948	65,322	1 ,000
[d=19,1]	0	.	.	.	.	.
(Scale)	606186,283	87043,2775	457489,032	803214,469		

Dependent Variable: Força
 Model: (Intercept), D, p, d
 a. Set to zero because this parameter is redundant.
 b. Maximum likelihood estimate.

3.3.3.1 Análise estatística - relação entre resistência ao cisalhamento e força máxima de ruptura

Para estabelecer um modelo teórico capaz de prever o comportamento da ligação proposta, realizou-se regressão multivariada das características geométricas da ligação d , p e D e da propriedade de resistência ao cisalhamento (f_{v0}) sobre os resultados das cargas aplicadas para ruptura da ligação. A resistência ao cisalhamento influencia a resistência à ruptura da ligação e é sujeita à estimativa através da determinação da densidade da madeira. A propriedade física densidade está fortemente correlacionada com as propriedades de resistência e rigidez da madeira (Kollmann & Côté, 1968) e reflete o somatório de inúmeras variáveis que determinam sua qualidade e aplicabilidade.

A regressão estabeleceu a Equação 15:

$$\log F = 2,46 + 1,65 \log d + 0,372 \log p - 0,297 \log \frac{d}{D} + 0,201 \log d \times p \times f_{v0} \quad (15)$$

A relação observada entre a variável resposta e as variáveis independentes (preditoras) é estatisticamente significativa, pois o valor de P é menor que 0,05 (Tabela 23).

O valor do coeficiente de determinação R^2 (ou R-cuad) indica que 84,1% dos resultados de FMáx são explicados pelas variáveis independentes (Tabela 23).

Tabela 23 é Estimativa dos parâmetros

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Constante	2,4597	0,1375	17,88	0,000	
$\log d$	1,6523	0,2178	7,59	0,000	4,835
$\log p$	0,3721	0,1280	2,91	0,005	3,087
$\log d/D$	-0,29690	0,09281	-3,20	0,002	1,887
$\log d.p.fv,0$	0,2011	0,1026	1,96	0,053	6,008

S=0,0684482; R-cuad.=84,1%; Rcuad.(ajustado)=83,4%; PRESS=0,483491; R-cuad.(pred)=82,52%

O valor de P menor que 0,05 indica que ao menos um dos coeficientes de regressão é significativamente diferente de zero (Tabela 24).

Tabela 24 ó Análise de variância

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	4	2,32580	0,58145	124,10	0,000
Error residual	94	0,44040	0,00469		
Total	98	2,76621			

Os gráficos de resíduos para $\log F$ indicam que o modelo estabelecido é adequado (Figura 37).

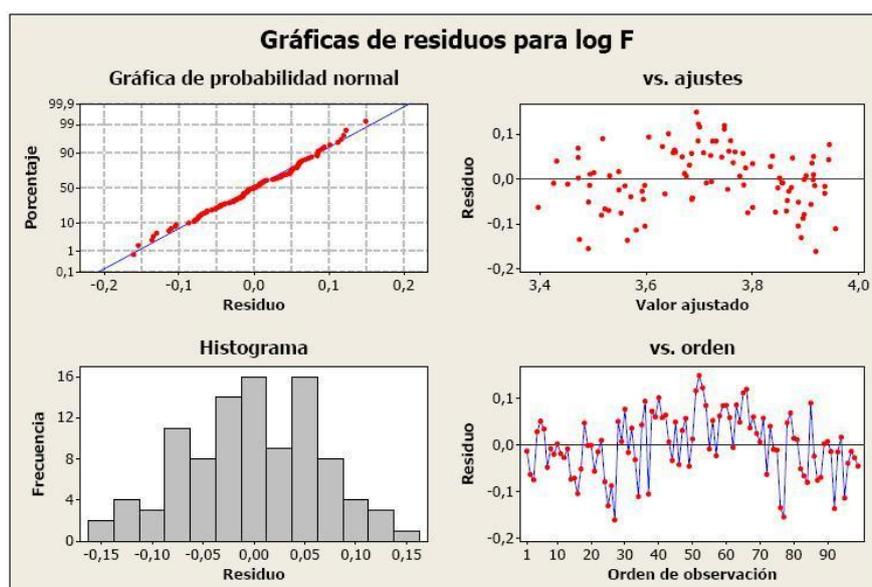


Figura 37 ó Gráficos de resíduos para $\log F$.

O gráfico de probabilidade normal representa os resíduos versus seus valores esperados. Os resíduos seguem uma linha reta, sem evidência de não normalidade, valores atípicos ou variáveis não identificadas.

No gráfico de resíduos versus os valores ajustados os pontos apresentam-se dispersos aleatoriamente ao redor de zero, sem tendências, indicando uma variância constante dos erros, portanto, com ajuste adequado do modelo.

O histograma de resíduos mostra a distribuição dos resíduos para todas as observações. Não apresenta evidências de tendência ou valores atípicos.

O gráfico de resíduos versus ordem de observação indica se a ordem da amostragem influi nos resultados (falta de independência dos erros). Como os pontos flutuam ao redor da linha central em um padrão aleatório, não existe evidência de que as condições de erro estejam correlacionadas.

A Equação logarítmica 15 equivale à sua equação inversa antilogarítmica (Equação 16):

$$F = 343 \cdot d \sqrt{d \cdot p(D \cdot f_{v0})^{0,5}} \quad (16)$$

A regressão dos valores dos resultados da Equação 16 sobre a Força Máxima estabelece a equação:

$$FMáx = 0,996Fcalc \quad (17)$$

Em que:

FMáx: Força Máxima de ruptura (kgf)

Fcalc: Força Máxima estimada a partir da Equação 16 (kgf)

com R-cuad. (ajustado) = 80,2%

A relação observada entre a variável resposta e a variável independente (preditora) é estatisticamente significativa, pois o valor de P é menor que 0,05 (Tabela 25).

Tabela 25 ó Estimativa dos parâmetros

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Noconstant					
Fcalc	0,99567	0,01479	67,33	0,000	1,000
S=855,292 PRESS=73591247					

O valor obtido para o coeficiente de determinação R^2 (ou R-cuad) indica que 80,2% dos resultados de $FMáx$ são explicados pelas variáveis independentes.

O valor P menor que 0,05 rejeita a probabilidade da correlação ter ocorrido devido ao acaso (Tabela 26). A correlação é estatisticamente significativa, pois apresenta 95% de probabilidade de não ser fortuita.

Tabela 26 ó Análise de variância

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	3316153568	3316153568	4533,21	0,000
Error residual	98	71689364	731524		
Total	99	3387842931			

A reta de tendência a partir da distribuição dos pares $FMáx$ e $Fcalc$ descreve uma correlação linear positiva entre as duas variáveis, indicando que as duas variáveis tendem a aumentar ou diminuir simultaneamente (Figura 38).

O valor do coeficiente de determinação R^2 ajustado indica que 80,2% dos resultados de $FMáx$ são explicados pela variável $Fcalc$.

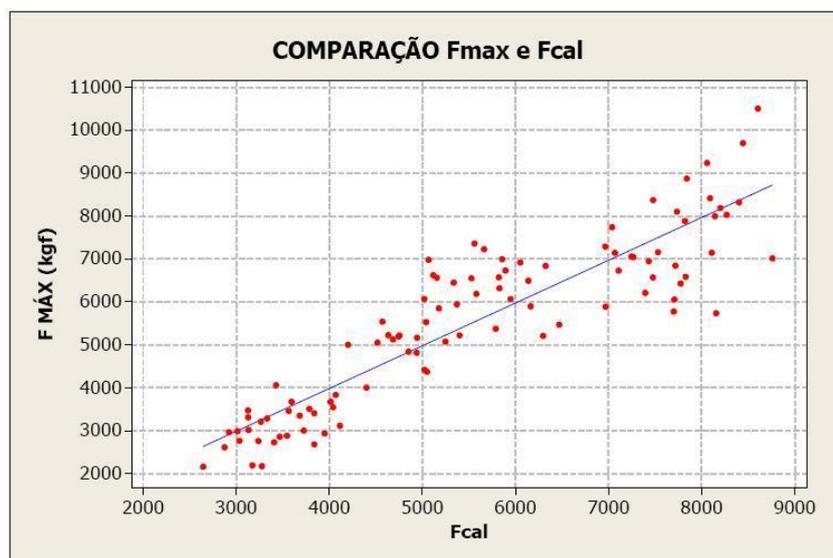


Figura 38 ó Regressão de Fcalc sobre FMáx.

Os gráficos de resíduos para $FMáx$ indicam que o modelo estabelecido é adequado (Figura 39).

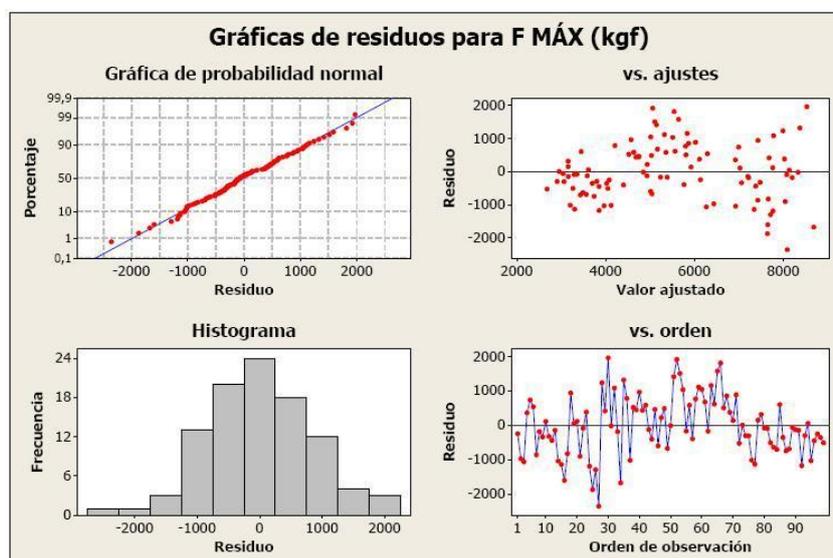


Figura 39 ó Gráfico de resíduos.

O gráfico de probabilidade normal indica que os resíduos seguem uma linha reta, sem evidência de não normalidade, valores atípicos ou variáveis não identificadas.

No gráfico de resíduos versus os valores ajustados os pontos apresentam-se dispersos aleatoriamente ao redor de zero, sem tendências, indicando uma variância constante dos erros, portanto, com ajuste adequado do modelo.

O histograma de resíduos mostra a distribuição dos resíduos para todas as observações. Não apresenta evidências de tendência ou valores atípicos.

No gráfico de resíduos versus ordem de observação os pontos flutuam ao redor da linha central em um padrão aleatório, não apontando que as condições de erro estejam correlacionadas.

As Equações 16 e 17 estimam, com confiança de 95%, que os parâmetros geométricos d , p , D e f_{v0} guardam relação linear com a força máxima para ruptura da ligação.

3.3.3.2 Análise estatística ó relação entre f_{v0} e F Máx, estabelecida a partir da norma europeia prEN 1995-2 - Eurocode 5 (ECS,1995)

A norma brasileira não prevê parâmetros de cálculo estrutural para ligações adesivas, em madeira que empreguem conexões de barras metálicas rosqueadas. A norma europeia prEN 1995-2 Eurocode 5 ó Design of timber structures / Part 2: Bridges / Anexo C (Adesão em barras de aço) estabelece tais parâmetros através da Equação 18, considerando, entre eles, a resistência ao cisalhamento:

$$F_{ax,Rk} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{v,k} \quad (18)$$

Em que:

$F_{ax,Rk}$: Resistência axial característica relativa ao cisalhamento na madeira (N)

d_{eq} : Diâmetro equivalente (igual ao diâmetro do furo) (mm)

l_a : Comprimento de ancoragem (mm)

$f_{v,k}$: Resistência característica ao cisalhamento em torno do furo (N/mm²)

Visando confirmar a relação linear existente entre a resistência ao cisalhamento da madeira e a força máxima de ruptura ($FMáx$) na ligação proposta, realizou-se regressão dos valores obtidos através da Equação 18 sobre os valores de $FMáx$ obtidos nos ensaios. Obteve-se a Equação 19:

$$FMáx = 925 + 1,22\pi \cdot d \cdot p \cdot f_{v0} \quad (19)$$

O valor do coeficiente de determinação R^2 (ou R-cuad.) indica que 68,8% dos resultados de $FMáx$ são explicados por suas variáveis independentes, confirmando uma influência linear da tensão de cisalhamento sobre os valores de $FMáx$ (Tabela 27).

Tabela 27 ó Estimativa dos parâmetros

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Constante	924,6	333,3	2,77	0,007	
$.d.p.f_{v0}$	1,22094	0,08357	14,61	0,000	1,000

S=1083,90; R-cuad.=68,80%; R-cuad.(ajustado)=68,40%; PRESS=118937984; R-cuad.(pred)=67,39%

O valor P menor que 0,05 rejeita a probabilidade da correlação ter ocorrido devido ao acaso (Tabela 28). A correlação é estatisticamente significativa, pois apresenta 95% de probabilidade de não ser fortuita.

Tabela 28 ó Análise de variância

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	250763380	250763380	213,45	0,000
Error residual	97	113958574	1174831		
Total	98	364721954			

Os gráficos de resíduos para $FMáx$ indicam que o modelo estabelecido é adequado (Figura 40).

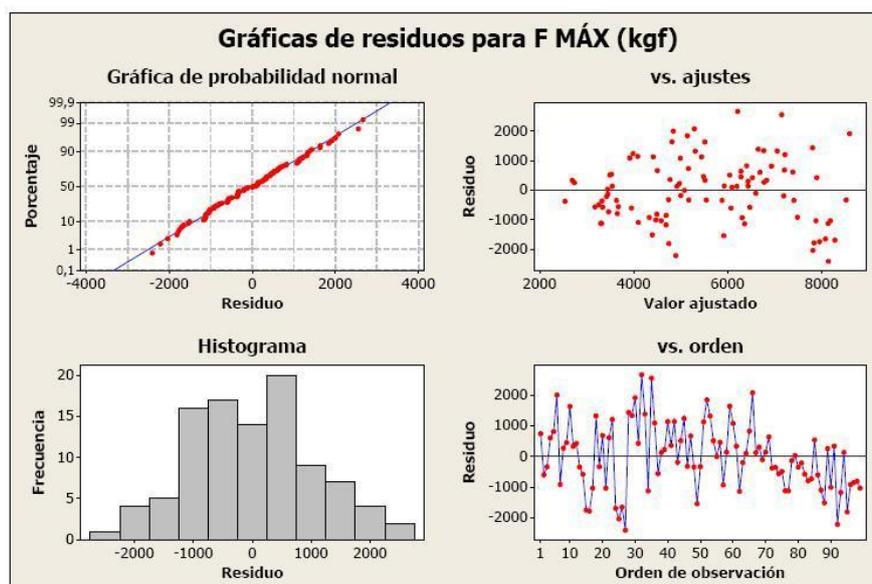


Figura 40 ó Gráfico de resíduos da regressão da Equação 20 sobre valores de $FMáx$.

O gráfico de probabilidade normal indica que os resíduos seguem uma linha reta, sem evidência de não normalidade, valores atípicos ou variáveis não identificadas. No gráfico de resíduos versus os valores ajustados, os pontos apresentam-se dispersos aleatoriamente ao redor de zero, sem tendências, indicando uma variância constante dos erros, portanto, com ajuste adequado do modelo. O histograma de resíduos apresenta distribuição dos resíduos para todas as observações. Não apresenta evidências de tendência ou valores atípicos. No gráfico de resíduos versus ordem de observação os pontos flutuam ao redor da linha central em um padrão aleatório, não apontando que as condições de erro estejam correlacionadas.

Uma nova regressão, obrigando a reta de tendência a passar pela origem, calibrou a equação com valores experimentais (Equação 20). A calibração linear (ou regressão inversa) é uma forma de predição inversa. Estimam-se os valores da Equação 20 por meio dos valores conhecidos de $FMáx$ obtidos nos ensaios:

$$FMáx = 1,44\pi \cdot d \cdot p \cdot f_{v0} \quad (20)$$

A relação observada entre a variável resposta e a variável independente (preditora) é estatisticamente significativa, pois o valor de P é menor que 0,05 (Tabela 29).

Tabela 29 ó Estimativa dos parâmetros

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Noconstant					
$.d.p.f_{v0}$	1,44005	0,02824	51,00	0,000	1,000

A correlação é estatisticamente significativa, pois o valor P menor que 0,05 rejeita a probabilidade ter ocorrido devido ao acaso (Tabela 30).

Tabela 30 ó Análise de variância

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	3264842121	3264842121	2601,24	0,000
Error residual	98	123000810	1255110		
Total	99	3387842931			

Efetuuou-se teste de intervalo de confiança para confirmar a confiabilidade da Equação 20 em estimar os valores de ruptura da ligação (Tabela 31 e Figura 41). A hipótese de diferença nula entre as Equações 18 e 20 indica que elas podem ser consideradas estatisticamente iguais ó são capazes de estimar $FMáx$ com a mesma confiabilidade ó pois o intervalo de confiança contém o valor zero.

Tabela 31 ó Teste T e Intervalo de Confiança

FMáx	N	Media	Desv. Est.	Media del Error estándar
1,44 .d.p.f.v ₀	99	5526	1929	194
	99	5427	1887	190
Diferencia= $\mu(\text{FMáx}) - \mu(1,44 \text{ .d.p.f.v}_0)$				
Estimado de la diferencia: 99				
IC de 95% para la diferencia: (-436; 634)				
Prueba T de diferencia = 0 (vs. no =): Valor T = 0,37; Valor P = 0,715; GL = 195				

As barras verticais do gráfico da Figura 41 denotam intervalo de confiança de 95%.

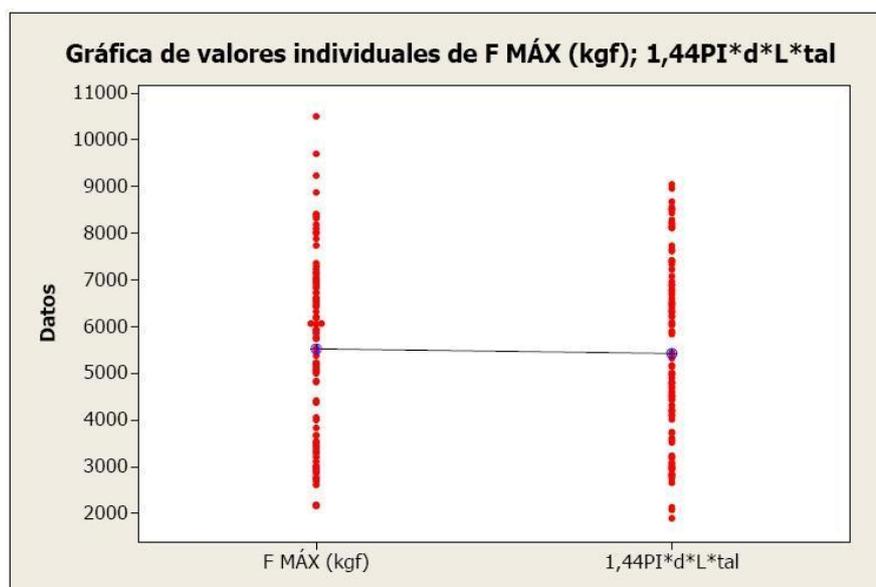


Figura 41 ó Teste de intervalo de confiança.

As análises estatísticas indicam que a propriedade de resistência ao cisalhamento da madeira tem relação linear com a força máxima necessária para ruptura da ligação.

Estes resultados estão em acordo com Custódio, Broughton e Cruz (2009) que apontam, apoiados por extensa revisão de literatura, que a rigidez é

fator chave no desenvolvimento e magnitude das concentrações de tensões presentes em ligações desta natureza, e que ela é fortemente correlacionada com a densidade e com as demais propriedades mecânicas da madeira.

Estão em acordo com Cimadevila, Rodríguez e Chans (2007), que confirmam a significância destes parâmetros, embora tenham obtido resultados experimentais distintos dos previsto na norma europeia (Eurocode).

4 CONCLUSÃO

Os padrões de ruptura observados em ensaios de arrancamento de ligações adesivas com barras metálicas fixadas longitudinalmente em peças de madeira roliça seguem quatro padrões comuns: ruptura da barra por escoamento, ruptura por cisalhamento no adesivo, ruptura localizada da madeira em torno da superfície de adesão, ruptura da peça de madeira.

Os parâmetros geométricos diâmetro da peça de madeira (D), diâmetro da barra rosqueada metálica (d) e profundidade de ancoragem (p) adotados para a configuração da ligação adesiva são significativos para explicar os resultados obtidos para resistência ao arrancamento.

As propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento (e densidade) da madeira apresentam relação linear com os valores de resistência ao arrancamento.

Valores de resistência ao arrancamento, em ligações adesivas como as descritas são possíveis de se estimar mediante emprego de modelo teórico. As Equações 19 e 20 são capazes de prever, com confiança de 95%, os valores estimados para resistência ao arrancamento das ligações propostas, considerando os parâmetros geométricos D , d e p e a propriedade mecânica de resistência ao cisalhamento f_{v0} .

Ligações adesivas do tipo relatado são adequadas para aplicação em madeira roliça de pequeno diâmetro de eucalipto. Tais ligações podem viabilizar estruturas leves, como treliças espaciais ou tridimensionais.

Futuras pesquisas podem avaliar, experimentalmente, a aplicabilidade da ligação proposta, verificando o desempenho de um módulo estrutural em treliças espaciais (treliças tridimensionais).

Para aperfeiçoar as operações de embutimento é necessário desenvolver dispositivo para centralizar e aprumar a barra metálica no furo da madeira o que deve incrementar os resultados apresentados.

CAPÍTULO 4 - SECAGEM LOCALIZADA DA MADEIRA

1 INTRODUÇÃO

No processo de transformação da madeira em produto manufaturado, a secagem é uma fase fundamental que agrega valor ao produto final e torna o material o mais estável possível, facilitando acabamentos mecânicos de superfície, aplicação de adesivos e preservativos.

O emprego imediato da madeira, após o abate da árvore, é impedido pelo elevado teor de água em sua estrutura interna. É necessário que a umidade seja reduzida a níveis de equilíbrio com o ambiente para estar em serviço. Sua secagem, por se tratar de material higroscópico e poroso, envolve a retirada da água líquida em suas fibras e água adsorvida junto aos componentes da parede celular, com consumo elevado de energia. Os processos de secagem demandam tempo e recursos significativos, sendo comum as pesquisas que se dedicam à otimização dos métodos (Mendes, 2010; Calegari et al., 2007; Martins; Gouveia; Martinez, 2001; Severo, 2000; Silva; Kummer-Wenzel; Trugilho, 1997).

Para uma aplicação em grande escala da MRPD é necessária a disponibilização da matéria-prima em condições de uso imediato. A investigação de um procedimento de secagem da madeira com efeitos localizados na superfície de adesão, com consumo de energia reduzido, potencializa o uso da ligação estrutural adesiva como solução simples e eficaz.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A resistência da madeira está relacionada ao volume de água presente na parede celular da fibra. Acima do ponto de saturação das fibras (PSF) a água se acumula nas cavidades celulares como água livre, e não se verifica efeito

sensível sobre a resistência da madeira, relacionado à variação da umidade, a partir deste ponto. Para teores de água entre 0% (madeira seca em estufa) até o PSF a água está presente nas paredes das células como água de impregnação, e afeta sensivelmente a resistência da madeira.

Bodig & Jayne (1992), em ensaios de compressão normal às fibras, relacionam a influência da umidade com as propriedades mecânicas da madeira (Figura 42). Na representação das curvas tensão x deformação, obtidas para teores diferentes de água, verifica-se a variação no módulo de elasticidade, resistência, energia de deformação e fragilidade. A ordenada máxima de cada curva mostra alterações na resistência. A inclinação de cada gráfico mostra as variações no módulo de elasticidade; a energia de deformação é obtida pela área sob cada curva; a fragilidade está expressa nas características das curvas na região de ruptura. As propriedades mecânicas da madeira, inclusive a fragilidade, tendem a aumentar para baixos teores de umidade.

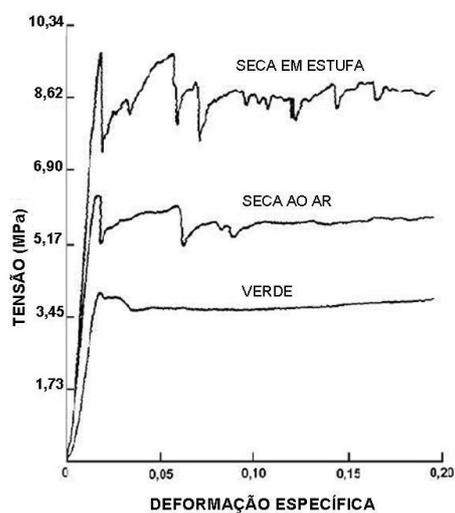


Figura 42 ó Curvas tensão x deformação obtidas em ensaios de compressão normal às fibras, com diferentes teores de umidade.

Fonte: Bodig & Jayne (1992).

A umidade da madeira afeta suas propriedades físico-mecânicas e sua adequação a diversos processamentos. Sua higroscopicidade é basicamente ocasionada por grupos hidroxílicos (OH) que atraem e retêm moléculas de água através de pontes de hidrogênio. As ligações químicas ocorrem por meio de atração eletrostática entre os átomos (Galvão & Jankowsky, 1985). A água desloca-se das regiões de alto para as de baixo teor de água. Na forma líquida e como vapor, ela se movimenta pelas aberturas naturais da madeira e através das paredes celulares. A secagem consiste, basicamente, na remoção da umidade da superfície, ao mesmo tempo em que ocorre o movimento da água do interior para o exterior. Influi na facilidade ou rapidez de secagem da água higroscópica a direção estrutural considerada. O coeficiente de difusão longitudinal é superior ao sentido transversal. A densidade está inversamente relacionada com o coeficiente de difusão da madeira.

Jankowsky, Santos e Andrade (2000) apontam que a permeabilidade reduzida do gênero *Eucalyptus* implica na necessidade de uma secagem lenta. Essa característica contribui para que as superfícies das peças rapidamente alcancem baixos teores de umidade, enquanto a parte central ainda permanece úmida, ou quase que saturada, surgindo, daí, tensões internas geradas devido ao acentuado gradiente de umidade. Como resultado, tem-se a ocorrência do colapso (devido à baixa permeabilidade) e das rachaduras de topo e de superfície (devido ao gradiente de umidade). Estes defeitos tendem a aumentar com o aumento da temperatura de secagem. Essa é a razão fundamental para que o *Eucalyptus* seja conhecido como madeira de secagem lenta e difícil, e com alta propensão a defeitos como colapso e rachaduras. Se a madeira é proveniente de plantios de rápido crescimento, as tensões de crescimento agravam o problema.

Para uma adesão físico-química em toda a superfície da madeira e distribuição uniforme de tensões, um dos fatores a ser controlado é a umidade. Seu teor e distribuição influenciam a formação e a performance da ligação

madeira-adesivo, pois relaciona-se diretamente com as propriedades de resistência e rigidez da madeira (Bodig & Jayne, 1992).

Broughton & Hutchinson (2001a) avaliaram, mediante ensaios de arrancamento, a influencia da variação da umidade em corpos-de-prova de madeira (carvalho e freixo), nos quais foram coladas, axialmente, barras de aço e de plástico reforçado com fibras de vidro (FRP), empregando diversos adesivos e teores de água (10%, 22% e 38%). Aqueles colados com adesivo epóxi apresentaram redução linear da resistência com incrementos de umidade de 10%. Acima de 22% de umidade, os corpos-de-prova apresentaram redução de resistência ao arrancamento, independente do adesivo empregado. Com 30% de umidade, ou acima, obtiveram redução de resistência em torno de 65%. Desde que se procedam ajustes dos valores de resistência, os autores consideram a possibilidade de emprego de madeira verde, com teor de água caracterizado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia consistiu em colar, com adesivo estrutural de resina epóxi, barras metálicas rosqueadas em barras cilíndricas de madeira de *Eucalyptus* sob 3 situações: 1) barras de madeira saturadas em água, 2) barras de madeira saturadas em água e posteriormente secas com mecanismo de efeito localizado de secagem e 3) barras de madeira em umidade de equilíbrio com o ambiente (média de 14,2%). Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de arrancamento e os resultados de resistência obtidos (força máxima) foram comparados (Figura 43).



Figura 43 ó Corpos-de-prova e ensaio típico de resistência ao arrancamento.

Empregou-se madeira de *Eucalyptus* (espécie híbrida de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), proveniente de plantio florestal do município de Belo Oriente, Minas Gerais, com idade de 04 anos. Foram utilizadas as peças da extremidade do topo dos troncos (peças de diâmetros menores). O adesivo estrutural à base de resina epóxi empregado foi Sikadur 32, fluido, bicomponente (resina epóxi e endurecedor). A espessura da linha de cola foi 1,3 mm aproximadamente.

3.1 Programa experimental 1

Foram submetidos a ensaios de arrancamento 12 corpos-de-prova (CPs) constituídos de barra cilíndrica de madeira (comprimento de 180 mm, perfurada axialmente com profundidade de 80 mm), barra metálica rosqueada (diâmetro igual a 12,7 mm) e adesivo epóxi. Após a perfuração, quatro barras de madeira foram saturadas em água (S1, S2, S3, S4), quatro apresentavam umidade em equilíbrio com o ambiente (E1, E2, E3, E4) (média de 14,2% de teor de água) e quatro foram saturadas em água e posteriormente secadas (F1, F2, F3, F4) com barra metálica aquecida, em chama de gás, à temperatura aproximada de 120 °C. A temperatura foi obtida com termômetro de medição por laser. A barra metálica foi introduzida no furo longitudinal da madeira e permaneceu até atingir a temperatura aproximada de 40 °C. Esta operação foi realizada duas

vezes. Foi introduzido o adesivo epóxi e, em seguida, a barra metálica rosqueada (Figura 44 e Tabela 32).



Figura 44 ó Corpos-de-prova e introdução da resina epóxi na peça de madeira perfurada.

3.1.2 Resultados e discussão

Os valores de força máxima (Tabela 32) apresentaram valor médio de 4301 kgf, desvio padrão de 333 kgf e coeficiente de variação de 7,8%. Este índice baixo indica um conjunto homogêneo de dados, consequência do rompimento da barra de aço ocorrido com todos os CPs, com exceção dos CPs S2 e S4.

Tabela 32 ó Resultados investigação experimental 1.

CP	Diâm. barra metálica (mm)	Profundidade furo (mm)	Força Máx. (kgf)	F Máx Média (kgf)	Observações
E1	12,7	80	4928	4350	rompimento da barra
E2	12,7	80	3901		rompimento da barra
E3	12,7	80	4407		rompimento da barra
E4	12,7	80	4164		rompimento da barra
F1	12,7	80	4314	4108	rompimento da barra
F2	12,7	80	4337		rompimento da barra
F3	12,7	80	4218		rompimento da barra
F4	12,7	80	3565		rompimento da barra
S1	12,7	80	4405	4444	rompimento da barra
S2	12,7	80	4440		rompimento madeira
S3	12,7	80	4468		rompimento da barra
S4	12,7	80	4466		rompimento madeira

3.1.3 Considerações

Como ocorreu ruptura da barra de aço por escoamento, concluiu-se pela necessidade de novos ensaios com barra metálica com diâmetro superior ao empregado. Os CPs S2 e S4, previamente saturados em água, apresentaram ruptura na linha de cola, sem aderência entre o adesivo e a madeira. A temperatura da barra metálica reduziu em contato com a madeira saturada.

3.2 Programa experimental 2

Foram submetidos a ensaios de arrancamento 06 corpos-de-prova constituídos de barra cilíndrica de madeira (comprimento de 180 mm, perfurada axialmente, com profundidade de 80 mm), barra metálica rosqueada (diâmetro igual a 19,1 mm) e adesivo epóxi. Após perfuração, duas barras de madeira foram saturadas em água (S1, S2), duas apresentavam umidade em equilíbrio com o ambiente (E1, E2, média de 14,2% de teor de água) e duas foram saturadas em água e posteriormente secadas (F1, F2) com barra metálica aquecida em chama de gás, até atingir a temperatura aproximada de 120 °C. A temperatura foi obtida com termômetro de medição por laser. A barra metálica foi introduzida no furo longitudinal da madeira e permaneceu até atingir a temperatura aproximada de 40 °C. Esta operação foi realizada duas vezes. Foi introduzido o adesivo epóxi e, em seguida, a barra metálica rosqueada (Figura 45 e Tabela 33).



Figura 45 ó Secagem e obtenção de temperatura por laser.

3.2.1 Resultados e discussão

Comparando-se os valores de força máxima, os CPs secados pelo método de secagem localizada (F1 e F2) e aqueles com umidade saturada (S1 e S2) apresentaram, respectivamente, 56,6% e 38,7% da capacidade de carga dos CPs em umidade de equilíbrio. Comparando-se os valores dos CPs, que receberam secagem localizada com os CPs saturados, houve um incremento da força máxima de 68,4% (Tabela 33).

Tabela 33 ó Resultados investigação experimental 2

CP	Diâmetro barra metálica (mm)	Profundidade furo (mm)	Força Máxima (kgf)	F Máx Média (kgf)
E1	19,1	80	6621	7186
E2	19,1	80	7751	
F1	19,1	80	4276	4068
F2	19,1	80	3859	
S1	19,1	80	2979	2782
S2	19,1	80	2585	

Os padrões de ruptura apresentaram adesão completa para CPs em umidade de equilíbrio (E), adesão parcial/incompleta para CPs que receberam

secagem localizada (F) e adesão insuficiente para CPs saturados em água (S) (Figura 46).



Figura 46 ó Padrões de ruptura da ligação adesiva.

3.2.2 Considerações

A secagem localizada ocorreu pela introdução de barra metálica aquecida na extremidade perfurada, realizada duas vezes. Os CPs com secagem localizada não recuperaram a capacidade de carga de uma ligação com a madeira seca. Concluiu-se pela necessidade de novo experimento, em que fosse possível avaliar, precisamente, o número de vezes que a barra aquecida deveria ser introduzida na madeira, visando obter maior eficácia do mecanismo de secagem e a elevação dos valores de força máxima.

3.3 Programa experimental 3

Foram submetidos a ensaios de arrancamento 06 corpos-de-prova (CPs) com as mesmas características geométricas dos anteriores. Um CP apresentava umidade de equilíbrio com o ambiente (CP E1, média de 14,2% de teor de água) e seis foram saturados em água e posteriormente secados com barra metálica aquecida (CPs F1 a F6) em chama de gás, até atingir a temperatura aproximada de 120 °C. A temperatura foi obtida com termômetro de medição por laser. A barra metálica foi introduzida no furo longitudinal da madeira, até atingir a temperatura aproximada de 60 °C. Esta operação foi realizada, para o CP F1, 02 vezes; para o CP F2, 03 vezes; CP F3, 04 vezes, CP F4, 05 vezes e CP F5, 06 vezes. Foi introduzido o adesivo epóxi e, em seguida, a barra metálica rosqueada.

3.3.1 Resultados e discussão

Constatamos, em relação ao experimento anterior, um incremento nos resultados de força máxima, evidenciando os efeitos da secagem localizada (Tabela 34).

Tabela 34 ó Resultados investigação experimental 3

CP	Introduções da barra aquecida	Diâmetro barra metálica (mm)	Profundidade furo (mm)	Força Máxima (kgf)	Relação Força Máx F/E (%)
E1	0	19,1	80	6727	100,0
F1	2x	19,1	80	5415	80,5
F2	3x	19,1	80	5406	80,4
F3	4x	19,1	80	6566	97,6
F4	5x	19,1	80	6990	103,9
F5	6x	19,1	80	5897	87,7

Conforme Figura 47, acima de ou igual a 3 introduções da barra aquecida na madeira perfurada, obtiveram-se resultados mais significativos. Entretanto, a amostragem foi insuficiente para conclusões definitivas.

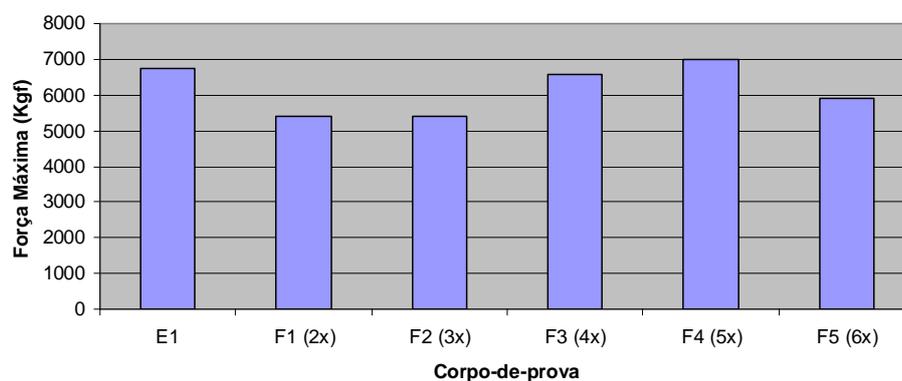


Figura 47 é Variação da Força Máxima, em relação número de vezes de introdução da barra aquecida na madeira perfurada.

Comparando-se os valores de força máxima (resistência ao arrancamento), os CPs secados pelo método de secagem localizada (F1 a F6) apresentaram média de 90,0% da resistência do CP em umidade de equilíbrio (E1). Os CPs secados apresentaram rachaduras a partir de 3 introduções da barra metálica.

3.3.2 Considerações

Os experimentos anteriores não permitiam um controle da variável tempo de secagem, pois se operaram apenas com os parâmetros de controle da temperatura (inicial e final) e o número de vezes de introdução da barra. O mecanismo de secagem e o processo de aquisição de calor também foram considerados pouco eficientes. O modelo de aquecimento da barra metálica,

submetida à exposição em chama de gás, proporcionou tempo curto de manutenção da temperatura inicial.

3.4 Programa experimental 4

Visando o controle do tempo de secagem e maior eficiência do método, empregou-se um artefato constituído de resistência elétrica protegida por invólucro metálico (350 W, 230 V). A resistência operou ligada a um equipamento variador de tensão, com a finalidade de se adequar a intensidade de corrente à temperatura pretendida (Figura 48).



Figura 48 ó Artefato para secagem localizada da madeira: resistência elétrica.

Um ensaio preliminar apontou para a necessidade de temperatura inicial da resistência elétrica mais elevada, com o objetivo de evitar uma redução significativa no momento do contato com a madeira úmida. Foram submetidos a ensaios de arrancamento 06 corpos-de-prova, com as mesmas características geométricas dos anteriores. Cinco CPs foram saturados em água e, posteriormente, secados com a resistência elétrica à temperatura aproximada de 250 °C, conectada à tensão de 110 V. Um CP apresentava umidade de 14,2%. A temperatura foi obtida com termômetro de medição por laser. A resistência

elétrica permaneceu no furo longitudinal da madeira por tempos crescentes, visando obter tempo ideal de secagem (Tabela 35).

3.4.1 Resultados e discussão

A relação entre força máxima de ruptura para CPs submetidos à secagem localizada e CPs em umidade de equilíbrio (relação F/E) apresentou média superior no programa experimental 4. Média de 103% no experimento 4, contra média de 90,0% no experimento 3 (Tabela 35).

Tabela 35 ó Resultados investigação experimental 4

CP	Diâmetro barra metálica (mm)	Profundidade furo (mm)	Tempo (min) (permanência da resistência elétrica na madeira)	Força Máxima (kgf)	Relação Força Máx F/E (%)
E1	19,1	80	-	5170	100,0
F1	19,1	80	1,0	4083	79,0
F2	19,1	80	1,5	5113	98,9
F3	19,1	80	2,0	5084	98,4
F4	19,1	80	2,5	5361	103,7
F5	19,1	80	3,0	6928	134,0

Os resultados de Força Máxima não são comparáveis com literatura pesquisada, pois os experimentos lidam com parâmetros geométricos e espécies distintos.

3.4.2 Considerações

Os valores de força máxima obtidos indicam que para tempo igual ou superior a 1,5 min atinge-se um nível de redução de umidade suficiente para uma adesão equivalente a de um corpo-de-prova com umidade em equilíbrio

com o ambiente, considerada a condição de serviço de uma estrutura de madeira. É necessário, considerando-se o baixo número de corpos-de-prova avaliados, refazer o experimento com número maior de amostras para sua validação estatística e confirmar um intervalo de tempo ideal para uma secagem eficaz. Intervalos de tempo de secagem superiores demandariam consumo de energia desnecessário.

4 CONCLUSÃO

Método de secagem localizada da madeira, com artefato emissor de calor por resistência elétrica, proporciona resultados de resistência mecânica ao arrancamento equivalente ao da madeira em umidade de equilíbrio.

Métodos de secagem localizada da madeira são econômicos e eficazes para adesão físico-química.

A indústria pode se valer de processos automatizados de secagem localizada, aplicáveis em soluções estruturais de madeira, com ganhos de produtividade.

Estruturas espaciais de madeira (treliças tridimensionais) são adequadas para receber secagem localizada, pois demandam a redução da umidade apenas na região de adesão.

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados da pesquisa de desenvolvimento e avaliação experimental de ligação mecânica para a madeira roliça de pequeno diâmetro (MRPD) ó considerando que os entraves à sua aplicação como elemento estrutural relacionam-se a pouca investigação de soluções de conexão ó promovem o potencial construtivo do material.

A caracterização das propriedades físicas, de resistência e rigidez mediante a metodologia híbrida empregada ó em razão da inexistência de normas brasileiras para a caracterização da madeira roliça de uso estrutural ó é de execução simples e similar a outros procedimentos já em uso. Consideram-se promissoras as sugestões apresentadas para subsidiar a elaboração de uma norma brasileira de caracterização das propriedades mecânicas da madeira roliça por meio de corpos-de-prova de dimensões estruturais.

A avaliação experimental do modelo de ligação correspondeu aos padrões previstos pela literatura. Os parâmetros geométricos ó diâmetro da peça de madeira (D), diâmetro da barra rosqueada metálica (d) e profundidade de ancoragem (p) ó adotados para a configuração da ligação adesiva são significativos para explicar os resultados obtidos para resistência ao arrancamento. A propriedade mecânica de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira apresenta relação linear com estes resultados. Eles são estimáveis mediante emprego de modelo teórico: as Equações 19 e 20 predizem, com confiança de 95%, os valores estimados para a resistência ao arrancamento, considerando os parâmetros geométricos D , d e p e a propriedade mecânica de resistência ao cisalhamento f_{v0} .

A adequação da umidade da madeira à condição de serviço pode ser alcançada mediante método de secagem localizada, empregando artefato emissor de calor por resistência elétrica. Ele proporciona resultados de resistência

mecânica ao arrancamento, equivalente ao da madeira em umidade de equilíbrio, é econômico e eficaz para adesão físico-química. A indústria pode se valer de processos automatizados de secagem localizada, com ganhos de produtividade.

Ligações adesivas do tipo relatado são adequadas para aplicação em madeira roliça de pequeno diâmetro de eucalipto. Elas viabilizam estruturas leves, como treliças espaciais ou tridimensionais. Futuras pesquisas podem avaliar, experimentalmente, o desempenho de um módulo estrutural em treliças espaciais.

REFERÊNCIAS

AICHER, S. Joints in timber structures. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON JOINTS IN TIMBER STRUCTURES, 22., 2001, Stuttgart. **Proceedings** Stuttgart: RILEM, 2001. 1 CD-ROM.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.

ALMEIDA, R. R. **Potencial da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para a produção de lâminas e manufatura de painéis compensados**. 2002. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura ãLuiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

AMERICAN LUMBER STANDARD COMMITTEE. **American softwood lumber standard**. Germantown, 1999. 1 CD-ROM.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI O5.1: wood poles: specifications and dimensions**. Washington, 2008. 49 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198: standard methods of static tests of timbers in structural sizes**. Philadelphia, 2009. 26 p.

ARCHITECTURAL ASSOCIATION. **AA Inter 3 2006-7**. Disponível em: <<http://www.aainter3.net/superwall>>. Acesso em: 10 jul. 2010.

_____. **Hooke park**. Disponível em: <<http://www.aaschool.ac.uk/AALIFE/HOOKEPARK/hooke.php>>. Acesso em: 3 out. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7190: projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF ano base 2009**. Brasília, 2010. 140 p.

BAINBRIDGE, R. et al. Bonded-in rod connections for timber structures: development of design methods and test observations. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 22, n. 1, p. 47-59, Jan. 2002.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: V. N. Reinhold, 1992. 712 p.

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Adhesive systems for structural connections in timber. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 21, n. 3, p. 177-186, Mar. 2001a.

_____. Effect of timber moisture content on bonded-in rods. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 15, n. 1, p. 7-25, Feb. 2001b.

CALEGARI, L. et al. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 399-408, jul./ago. 2007.

CALIL JÚNIOR, C.; BRITO, L. B. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos: EESC/USP, 2010. 332 p.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 71-77, 1997.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.

CÉSAR, S. F. **Chapas de madeira para vedação vertical de edificações produzidas industrialmente**: projeto conceitual. 2002. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Glued joints in hardwood timber. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 28, n. 8, p. 457-463, Dec. 2008.

CHANS, M. D. O. et al. Influence of timber density on the axial strength of joints made with glued-in steel rods: an experimental approach. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 30, n. 5, p. 380-385, July 2010.

CHRISP, T. M.; CAIRNS, J.; GULLAND, C. The development of roundwood timber pole structures for use on rural community technology projects. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 17, n. 4, p. 269-279, June 2003.

CIMADEVILA, J. E.; RODRÍGUEZ, J. A. V.; CHANS, M. D. O. Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 27, n. 2, p. 136-144, Mar. 2007.

COOK, J. **Explorations of roundwood technology: RMRS-P-22**. Disponível em: <http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p022/rmrs_p022_166_170.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2008.

CUMBO, D. W.; SMITH, R. L.; BECKER, C. W. Value analysis of lumber produced from small-diameter timber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 10, p. 29-34, Oct. 2004.

CUSTÓDIO, J.; BROUGHTON, J.; CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, Guildford, v. 29, n. 2, p. 173-185, Mar. 2009.

DE-VRIES, P. A.; GARD, W. F. **Small diameter round wood observation tower**. Disponível em: <<http://www.tudelft.nl/.../doc/Larch%20observation%20tower.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2008.

EASTIN, I. **Innovative fence designs from small diameter timber: adding value through design**. Disponível em: <http://www.cintrafor.org/RESEARCH_TAB/research_pubs_fence.htm>. Acesso em: 3 abr. 2007.

ECKELMAN, C. A. Exploratory study of high-strength, low-cost through-bolt with cross-pipe and nut connections for square and roundwood timber frame construction. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 12, p. 29-37, Dec. 2004.

ECKELMAN, C. A.; HAVIAROVA, E. Buildings and furniture constructed with round mortise and tenon joints from salvage materials and small diameter timber. In: SMALL DIAMETER TIMBER RESOURCE MANAGEMENT, MANUFACTURING AND MARKETS, 2., 2002, Spokane. **Proceedings** Spokane: University Purdue, 2002. Disponível em: <<http://www.agriculture.purdue.edu/fnr/faculty/Eckelman/documents/d200202a.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2007.

ECKELMAN, C. A.; HAVIAROVA, E.; ERDIL, Y. Exploratory study of small timber trusses constructed with through-bolt and cross-pipe heel connectors. **Forest Products Journal**, Madison, v. 57, n. 3, p. 39-46, Mar. 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN14251**: structural round timber: test methods. Bruxelas, 2003. 12 p.

_____. **PrEN1995-2**: second Draft, Eurocode 5: design of timber structures. Bruxelas, 1995. 39 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: USDA, 1999. 463 p.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112 p.

GARDELLE, V.; MORLIER, P. Geometric parameters which affect the short term resistance of an axially loaded glued-in rod. **Materials and Structures**, New York, v. 40, n. 1, p. 127-138, Jan. 2007.

GONÇALVES, G. F. et al. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 501-509, maio/jun. 2009.

GREEN, D. W. et al. Mechanical grading of round timber beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 18, n. 1, p. 1-10, Jan./Feb. 2006.

HEIN, P. R. G. et al. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.

INO, A. Sistema estrutural modular em eucalipto roliço para habitação: concepção e desenvolvimento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM

MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4., 1992, São Carlos.
Anais... São Carlos: EBRAMEM, 1992. 1 CD-ROM.

JANKOWSKY, I. P. **Madeira juvenil**: formação e aproveitamento industrial. Piracicaba: IPEF, 1979. 32 p. (Circular Técnica, 81).

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. In: JORNADAS FLORESTALES DE ENTRE RIOS, 15., 2000, Concordia. **Anales...** Concordia: Universidad del Concordia, 2000. 1 CD-ROM.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

LARSON, P. R. et al. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines**: a synopsis. Davis: USDA, 2001. 220 p. (General Technical Report FPL GTR, 129).

LEVAN-GREEN, S. L.; LIVINGSTON, J. M. Uses for small-diameter and low-value forest thinnings. **Ecological Restoration**, Madison, v. 21, n. 1, p. 34-38, Mar. 2003.

LIMA, C. K. P. et al. Características anatômicas e químicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, abr./jun. 2007.

LOBÃO, M. S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 889-894, nov./dez. 2004.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 194-200, abr./jun. 2006.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**: principles and practice. New York: V. N. Reinhold, 1992. 454 p.

MARTINS, V. A.; GOUVEIA, F. N.; MARTINEZ, S. Secagem convencional de madeira de eucalipto parte 1: *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *E. grandis* Hill ex Maiden e *E. pilularis* Sm. **Brasil Florestal**, Curitiba, n. 70, p. 42-47, 2001.

MENDES, A. S. **Utilização de coletor solar parabólico na secagem da madeira**. 2010. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MOREIRA, L. E. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. 1991. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

OLIVEIRA, M. A. M.; DIAS, A. A. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 26, p. 33-64, 2005.

PARTEL, P. M. P. **Painéis estruturais utilizando madeira roliça de pequeno diâmetro para habitação: desenvolvimento do produto**. 2006. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RANTA-MAUNUS, A. **Round small-diameter timber for construction: final report of project FAIR CT 95-0091**. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1999. 210 p. Disponível em:
<<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P383.pdf>>. Acesso em: 6 jul. 2008.

ROSSIGNON, A.; ESPION, B. Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 66, n. 6, p. 419-432, Dec. 2008.

SANTOS, S. R.; SANSÍGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p. 53-63, jan./fev. 2007.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 120-129, 2004.

SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 109-124, jan./fev. 2000.

SILVA, J. R. M.; KUMMER-WENZEL, M.; TRUGILHO, P. F. Secagem ao ar livre da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de móveis. **Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 1-16, jan./jun. 1997.

SLAVID, R. **Arquitectura en madera**. Barcelona: Blume, 2005. 239 p.

STERN, E. G. Construction with small-diameter roundwood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 4, p. 71-82, Apr. 2001.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Forest Service. Forest Products Laboratory. **Properties and use of wood, composites and fiber products**: techline VI-7. Washington, 1998. 112 p.

WISNIK, G. Industrialização e flexibilidade: arquitetura em São Paulo a partir de componentes em madeira. In: AFLALO, M. (Ed.). **Madeira como estrutura: a história da ITA = wood as structure: the story of ITA**. São Paulo: Parallaxe, 2005. p. 34-57.

WOLFE, R. W. Research challenges for structural use of small-diameter round timbers. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 21-29, Feb. 2000.

WOLFE, R. W.; GJINOLLI, A. E.; KING, J. R. Space-frame connection for small-diameter round timber. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 20., 2000, British Columbia. **Proceedings...** British Columbia: FPL, 2000. Disponível em:
<<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/wolfe00c.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2008.

WOLFE, R. W.; MURPHY, J. Strength of small-diameter round and tapered bending members. **Forest Products Journal**, Madison, v. 55, n. 3, p. 50-55, 2005.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**. 2007. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.