

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MASSAYUKI MARIO HARA

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DE MADEIRAS
MEDIANTE ESFORÇO INDUZIDO POR PUNÇIONAMENTO DO
CORPO DE PROVA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2011

MASSAYUKI MARIO HARA

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DE MADEIRAS
MEDIANTE ESFORÇO INDUZIDO POR PUNÇIONAMENTO DO
CORPO DE PROVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de Concentração: Materiais.

Orientador: Prof.Dr. Adalberto Matoski

Co-orientador: Prof.Dr.Cláudio Magajewski

CURITIBA

2011



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Ensino e Pesquisa – Campus Curitiba
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º 008

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DE MADEIRAS MEDIANTE ESFORÇO INDUZIDO
POR PUNCIONAMENTO DO CORPO DE PROVA.**

POR

MASSAYUKI MARIO HARA

Esta dissertação foi apresentada às 14,00h do dia 22 de agosto de 2011, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de construção civil, Linha de pesquisa Materiais e Sistemas Estruturais, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado
(aprovado / reprovado)

Prof. Dr. Adalberto Matoski
(Orientador - UTFPR)

Prof. Dr. Cláudio Magajewski
(Coorientador - UTFPR)

Prof. Dr. Adnauer Tarquínio Daltro
(UFMT)

Prof. Dr. Graciela Inês Bolzon Muniz
(UFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai
Coordenador do PPGEC

Avenida Sete de Setembro, 3165
Curitiba/PR - CEP 80230-901
Fone: (41) 3310-4801
<http://www.ppgec.dacoc.ct.utfpr.edu.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento Acadêmico de Construção Civil por colocar a infra-estrutura a disposição, como os Laboratórios de materiais e Processos Construtivos para a realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), por seu espírito dedicado e empreendedor, talvez sem esta dedicação, este programa não existiria.

Ao corpo docente do PPGEC, por proporcionar novos conhecimentos, novos horizontes.

Ao Prof. Dr. Adalberto Matoski, pela orientação, pelas disciplinas ministradas e participação comissão examinadora.

Ao Prof. Dr. Cláudio Magajewski, pela maneira peculiar de incentivar, pelos conhecimentos transmitidos de forma paciente e dedicada, que me fez terminar esta dissertação.

Ao Prof. Dr. Adnauer Tarquínio Daltro, que gentilmente aceitou participar da banca examinadora.

À Prof^a. Dr^a. Graciela Inês Bolzon Muniz que compartilhou os conhecimentos de Anatomia da Madeira de maneira peculiar e aceitou participar da banca examinadora.

Aos Colegas de curso que incentivaram nos momentos difíceis e também compartilharam os momentos de alegria.

Meus agradecimentos àqueles que indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse concluído.

RESUMO

HARA, Massayuki Mário. Proposta de método de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de madeiras mediante esforço induzido por puncionamento do corpo de prova. 2011. ___ f. Dissertação (Área de Concentração: Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Esta pesquisa tem por objetivo analisar os procedimentos e os resultados de métodos de ensaios propostos para a identificação da resistência ao cisalhamento de madeiras no sentido paralelo as fibras. Almeja-se observar as imperfeições dos métodos existentes, com intuito de propor um novo método de ensaio em que algum dos problemas apresentados possam ser minimizados ou reduzidos. O método proposto pela norma NBR 7190/97 utiliza um corpo de prova prismático retangular com um dente para impedir sua rotação, causada pela assimetria na aplicação da força que promove o cisalhamento. O método proposto por SANTOS NETO (1999) utiliza também um corpo de provas prismático longelíneo com interrupções parciais alternadas nas seções transversais, as quais promovem solicitações de cisalhamento em regiões pré-escolhidas. Como alternativa, o presente estudo apresenta dois métodos: o primeiro método de ensaio sugerido é análogo ao ensaio da norma, porém aplicando a carga simetricamente a duas seções cisalhantes, de modo a evitar a rotação do corpo. Esse método evidenciou problemas ocorridos em razão das proporções entre as tensões de cisalhamento e tensões de esmagamento por compressão na superfície de aplicação das cargas e da antecipação da ruptura de cisalhamento por ruptura de tração na face inferior do corpo de provas. Um segundo procedimento é proposto, induzindo o esforço de cisalhamento através de puncionamento de um corpo de prova prismático simples e sem recortes, com distribuição da seção cisalhantes simetricamente em relação a um ponto. Para tanto, desenvolve-se uma ferramenta de macho e fêmea adaptado a uma prensa universal de ensaios para aplicação dos esforços. Verificada a validade do método, realiza-se um conjunto de ensaios com três espécies de madeiras, diferenciadas entre si pelas suas resistências mecânicas e, valendo-se dos métodos propostos pela norma NBR 7190/97, por SANTOS NETO (1999) e o cisalhamento por puncionamento, analisa-se e discute-se o desempenho dos três processos.

Palavras-chave: Ensaio mecânico de resistência da madeira, Cisalhamento paralelo às fibras da madeira, Resistência ao Cisalhamento de madeiras por punção.

ABSTRACT

HARA, Massayuki Mario. Proposal for a test method for determining the shear strength of parallel wood fibers by stress-induced punching of body of evidence. 2011. ___ f. Dissertation (Area of Concentration: Materials) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2011.

This research aims to examine the procedures and results of test methods proposed for the identification of the shear strength of wood fibers in parallel direction. Aims to observe the imperfections of existing methods, aiming to propose a new test method in which some of the problems shown can be minimized or reduced. The method proposed by NBR 7190/97 uses a rectangular prismatic body of evidence with a tooth to prevent its rotation caused by asymmetry in the application of force that causes the shear. The method proposed by SANTOS NETO (1999) also uses a prismatic body of evidence with alternating partial interruptions in cross sections, which provide requests shear at pre-selected regions. Alternatively, the paper presents two methods: the first test method suggested is analogous to the standard test, but applying the load symmetrically to shear two sections so as to prevent rotation of the body. This method revealed problems that occurred because of the proportions between the shear stresses and strains of crushing by compression on the surface of application of loads and the anticipation of breaking the shear rupture of traction on the underside of the body of evidence. A second procedure is proposed, leading to shear stress by punching a simple prismatic body of evidence and without cutouts, with the distribution of shearing section symmetrical about a point. To this end, it develops a tool of male and female adapted to press a universal test for application of effort. Verified the validity of the method, takes place a series of tests on three wood species, differentiated from each other by their mechanical strength, and, drawing on the methods proposed by NBR 7190/97, and by SANTOS NETO (1999) and by punching shear, analyzes and discusses the performance of the three cases.

Keywords: Mechanical testing of wood strength, Shear parallel to the fibers of the wood, Shear wood by punching.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	DESENHO ESQUEMÁTICO DA ANATOMIA DO TRONCO DE UMA FOLHOSA – CORTE TRANSVERSAL	21
FIGURA 2	DESENHO ESQUEMÁTICO DA ANATOMIA DE UMA CONÍFERA	22
FIGURA 3	DESENHO ESQUEMÁTICO DA ANATOMIA DE UMA FOLHOSA	23
FIGURA 4	UMIDADE NA MADEIRA	25
FIGURA 5	TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA EM VÁRIOS AMBIENTES	26
FIGURA 6	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA COM O GRAU DE UMIDADE	27
FIGURA 7	DIAGRAMA DE KOLLMANN (KOLLMANN E COTE 1984)	29
FIGURA 8	RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA	30
FIGURA 9	DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UM CUBO DE MADEIRA SOB CARGA SIMETRICAMENTE DISTRIBUÍDA	33
FIGURA 10	EFEITO DO TEOR DE UMIDADE SOBRE A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	34
FIGURA 11	DETALHE DO ENSAIO ADOTADO PELO MÉTODO BRASILEIRO MB-26/40	36
FIGURA 12	DETALHE DO ENSAIO PARA CISALHAMENTO EM DOIS PLANOS	36
FIGURA 13	MODELOS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM DOIS PLANOS	37
FIGURA 14	CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM UM PLANO	37
FIGURA 15	DISPOSITIVO PROPOSTO PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO	38
FIGURA 16	RUPTURA DO S CORPOS DE PROVA (A) RUPTURA POR CISALHAMENTO; (B) RUPTURA NA REGIÃO DO APOIO E (C) RUPTURA AO LONGO DA DA SEÇÃO DE	39

	CISALHAMENTO, COMA FISSURA ABRINDO DE CIMA PARA BAIXO	
FIGURA 17	CORPO DE PROVA PROPOSTO PARA O ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	40
FIGURA 18	ARRANJO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	40
FIGURA 19	FORMA E DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (MM)	41
FIGURA 20	ESFORÇO NA SEÇÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO	42
FIGURA 21	FOTOS DA FERRAMENTA PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MADEIRAS	44
FIGURA 22	ENSAIO DE CISALHAMENTO SIMÉTRICO COM DOIS PLANOS DE CISALHAMENTO	46
FIGURA 23	PLATAFORMA MECÂNICA PARA MONTAGEM DE FERRAMENTAS COM O CONJUNTO DE MACHO E FÊMEA DO PUNÇÃO	48
FIGURA 24	FERRAMENTA DE ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA INDUZIDOS POR PUNÇIONAMENTO, MONTADO NA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS	51
FIGURA 25	OBTENÇÃO NORMATIVA DA AMOSTRA PARA CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA DE MADEIRAS	53
FIGURA 26	CORPO DE PROVA PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE	55
FIGURA 27	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO DA NBR 7190/97	56
FIGURA 28	FOTO DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO – NBR 7190/97	57
FIGURA 29	FOTO DO CORPO DE PROVA – SANTOS NETO	58
FIGURA 30	FOTO DA MONTAGEM DE UM ENSAIO SANTOS NETO (1999)	59
FIGURA 31	FOTO DO CORPO DE PROVA PARA O MÉTODO DO PUNÇIONAMENTO PROPOSTO PELA DISSERTAÇÃO	61

FIGURA 32	ARRANJO DO ENSAIO POR PUNÇIONAMENTO	62
FIGURA 33	FOTO DA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO, EMIC, MODELO DL 10.000	64
FIGURA 34	FERRAMENTA PARA O ENSAIO DE CISALHAMENTO NORMATIZADO – NBR 7190/97	65
FIGURA 35	FOTO DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	COMPOSIÇÃO ORGÂNICA DA MADEIRA	23
TABELA 2	CLASSES DE UMIDADE DA MADEIRA	27
TABELA 3	SELEÇÃO DAS ESPÉCIES	52
TABELA 4	CARACTERÍSTICAS DAS MADEIRAS: PINUS SP, CEDRINHO E ITAÚBA	54
TABELA 5	ESPÉCIES, DIMENSÕES E ESPESSURAS DOS CORPOS DE PROVAS	60
TABELA 6	RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DO PINUS	67
TABELA 7	RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DO CEDRINHO	68
TABELA 8	RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DO ITAÚBA	69
TABELA 9	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRAS DE <i>PINUS SP</i> , OBTIDOS DOS TRÊS MÉTODOS PROPOSTOS	70
TABELA 10	COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA NORMA NBR7190/97 E MÉTODO DE PUNIONAMENTO DA MADEIRA DE <i>PINUS</i>	71
TABELA 11	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRAS DE CEDRINHO, OBTIDOS DOS TRÊS MÉTODOS PROPOSTOS	72
TABELA 12	COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA NORMA NBR 7190/97 E MÉTODO DE PUNIONAMENTO DA MADEIRA DE CEDRINHO	73
TABELA 13	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRAS DE ITAÚBA, OBTIDOS DOS TRÊS MÉTODOS PROPOSTOS	73

TABELA 14 COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO
ENSAIO DA NORMA NBR
7190/97 E MÉTODO DE PUNÇONAMENTO DA MADEIRA
DE ITAÚBA

74

LISTA DE SIGLAS

DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
F	Força
f_v	Tensão de cisalhamento paralelo às fibras
f_{v12}	Tensão de cisalhamento paralelo às Fibras, na umidade de 12%
FSC	Forest Stewardship Council
FUNTEF-Pr	Fundação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
PSF	Ponto de saturação das fibras
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ρ_{bas}	Densidade Básica
ρ_{ap}	Densidade Aparente

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	OBJETIVO	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.3.1	O Problema	16
1.3.2	Hipóteses	16
1.4	MÉTODO	17
1.5	RECURSOS FINANCEIROS	18
1.6	CONTRAPARTIDAS DA UTFPR/PPGEC/DACOC	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ANATOMIA DA MADEIRA	20
2.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA	23
2.3	PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	24
2.3.1	Umidade	24
2.3.2	Densidade	26
2.3.3	Contração e inchamento	30
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	31
2.5	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	32
2.6	ENSAIOS DE CISALHAMENTO	34
2.6.1	Metodologia de Ensaio de MENDES (1984)	35
2.6.2	Metodologia de Ensaio de FERREIRA E FUSCO (1994)	38
2.6.3	Metodologia de Ensaio de SANTOS NETO (1999)	41
3	DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA ENSAIO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA INDUZIDO POR PUNÇIONAMENTO	43
3.1	HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA	43
3.2	IMPERFEIÇÕES OBSERVADAS	44
3.3	PRIMEIRA PROPOSTA DE SOLUÇÃO	45
3.4	DETERMINAÇÃO DA RESISTENCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA POR PUNÇIONAMENTO	47

3.4.1	Origem do Método	47
3.4.2	Projeto da Ferramenta de Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeiras, Induzido por Puncionamento	49
4	SELEÇÃO DAS AMOSTRAS E OS MÉTODOS PARA OS ENSAIOS	52
4.1	SELEÇÃO DAS ESPÉCIES	52
4.2	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	52
4.3	CORPOS DE PROVA PARA PROPRIEDADES FÍSICAS	55
4.4	CORPOS DE PROVAS PARA CISALHAMENTO	55
4.4.1	NBR 7190/97	56
4.4.2	Santos Neto	57
4.4.3	Puncionamento	60
4.5	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍTICA	62
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
4.7	EQUIPAMENTOS	63
4.7.1	Equipamento para Aplicação de forças	63
4.7.2	Paquímetro Analógico	64
4.7.3	Balança Analíticas	64
4.7.4	Estufas para Secagem	64
4.7.5	Ferramenta para Ensaio de Cisalhamento (NBR7190/97)	65
4.7.6	Ferramenta de Puncionamento	65
5	RESULTADOS DOS ENSAIOS	67
5.1	DENSIDADE BÁSICA E APARENTE	67
5.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA	69
5.2.1	Ensaio de <i>Pinus sp</i>	70
5.2.2	Ensaio de Cedrinho	71
5.2.3	Ensaio de Itaúba	73
6	CONCLUSÕES	75
7	RECOMENDAÇÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXOS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

As estruturas de madeira são amplamente utilizadas na engenharia civil principalmente pela abundância da madeira na natureza, pela simplicidade das ferramentas e processos para seu beneficiamento.

O bom desempenho da madeira como material de construção requer o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Existem muitas espécies disponíveis no mercado com propriedades muito diferenciadas permitindo inúmeros campos de aplicação. As propriedades físicas e mecânicas para aplicação em engenharia civil são normalizadas. A NBR 7190/97 estabelece os procedimentos para obtenção da resistência mecânica da madeira para diferentes tipos de esforços.

O ensaio de cisalhamento paralelo as fibras merece especial atenção neste estudo pela importância de seus resultados para dimensionamento de elementos estruturais onde o uso de valores equivocados pode causar danos materiais e outros de conseqüências irreparáveis.

Neste ensaio similar a uma guilhotina agem forças de compressão sobre um corpo de prova padrão para causar cisalhamento em uma seção estudada. Muitos pesquisadores já observaram que durante a realização deste ensaio aparecem distorções que vem sendo estudadas e analisadas com propostas de novas metodologias visando amenizar os possíveis desvios.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é propor um método de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeiras mediante esforço induzido por puncionamento do corpo de prova.

1.2.2 Objetivos Específicos:

1. Desenvolver uma ferramenta capaz de impor ao corpo de prova um puncionamento através de um sistema de macho e fêmea, proporcionando

- esforço de cisalhamento paralelo às fibras, extraindo-se deste uma amostra cilíndrica. Esta ferramenta deve ser acoplada a máquina universal de ensaios;
2. Promover a compra de uma ferramenta de ensaio de cisalhamento, conforme especificação da NBR 7190/97, para realizar os ensaios da presente pesquisa e fazer parte do elenco de equipamentos do laboratório de materiais da UTFPR;
 3. Realizar ensaios pelos métodos propostos pela Norma, por Santos Neto e pelo método proposto nesta pesquisa e;
 4. estabelecer confronto entre os resultados e realizando uma discussão sobre os valores e os métodos.

1.3 JUSTIFICATIVAS

1.3.1 O Problema

O ensaio de cisalhamento proposto pela NBR 7190/97, especifica que um corpo prismático seja cisalhado aplicando-se sobre este uma carga de compressão através de uma haste aplicada na face superior do corpo, gerando uma superfície de aplicação. Esta carga é transmitida para o apoio do corpo na base inferior que está posicionada antimetricamente em relação a superfície de aplicação, ou seja a superfície de aplicação da carga esta em lado oposto da superfície de apoio gerando entre as duas um plano de cisalhamento que transmite a carga do topo para a base causando um efeito de tesoura, que é o desejado para cisalhar o corpo.

Ao realizar o ensaio o corpo gira o que evidencia a presença de momento. Para solucionar o problema foi adicionado à ferramenta um parafuso para impedir a rotação do corpo de prova. O procedimento descrito impõe ao ensaio um esforço transversal, tornando o ensaio suspeito a distorções no resultado.

1.3.2 Hipóteses

1ª Hipótese: Realizar o ensaio de maneira simétrica para evitar o giro do corpo, com este procedimento o ensaio torna-se estável e elimina o momento gerado pela excentricidade da aplicação da carga. Nesta proposta teremos duas seções de cisalhamento, dobrando o valor da carga a ser aplicada para a ruptura do

corpo de prova, o que pode gerar outras consequências decorrentes da proporção entre as cargas de compressão e as de cisalhamento.

2ª Hipótese: Realizar o ensaio multisimetricamente em relação a um eixo, ou seja produzir um plano de cisalhamento radialmente distribuído em relação a um eixo central promovendo a extração de um corpo cilíndrico similar a uma rolha de garrafa. A este procedimento denomina-se puncionamento, conhecido na indústria metal mecânica para realização de furos em chapas metálicas. O processo consiste em um conjunto de macho e fêmea cilíndricos que se sobrepõe com a inserção do macho para dentro da cavidade da fêmea. Inserindo-se um corpo entre o conjunto, ocorrerá a separação deste corpo por cisalhamento simples, gerando um corpo com um furo e outro corpo com formato de um cilindro. O processo é eficiente para metais e por hipótese deve funcionar também com a madeira no sentido paralelo as fibras.

1.4 MÉTODO

Realização das disciplinas teóricas do programa de mestrado em engenharia civil da UTFPR compatíveis com o desenvolvimento do tema e também de disciplinas ofertadas no programa de pós-graduação em Engenharia Florestal da UFPR, específicas para compreensão das propriedades das madeiras;

Revisão bibliográfica, sobre os principais métodos de ensaio de cisalhamento de madeiras paralelo as fibras e propriedades das madeiras;

Aquisição de uma ferramenta para realizar os ensaios de cisalhamento paralelo a fibras, seguindo as recomendações da NBR 7190/97, adaptada para utilização em conjunto com a prensa universal de ensaios disponível no laboratório de materiais da UTFPR;

Projeto da ferramenta para o ensaio de cisalhamento de madeiras por puncionamento;

Aquisição de materiais para elaboração da mesma;

Contratação de serviços mecânicos de usinagem, montagem e tempera da ferramenta;

Adaptação da ferramenta a prensa universal de ensaios;

Validação do funcionamento da ferramenta desenvolvida e também da ferramenta comprada;

Calibração e certificação da prensa universal de ensaios e demais equipamentos utilizados em medidas e pesagens;

Definição do número de ensaios com o método da NBR 7190/97, método de SANTOS NETO e método proposto nesta pesquisa e definição de três tipos de madeira com propriedades mecânicas distintas para verificar possíveis distorções na amplitude dos métodos empregados, esperando com isso responder sobre o comportamento dos métodos frente a madeira de alta, media e baixa resistência.

Seleção e aquisição das amostras de madeira para extração dos corpos de prova para realização dos ensaios;

Elaboração dos corpos de prova, tratamento e conservação até a realização dos ensaios;

Realização dos ensaios, aquisição dos dados e ordenação de planilhas,

Análise dos resultados e discussão dos métodos estudados;

Conclusão e sugestões;

Elaboração da redação e montagem da dissertação e;

Defesa da dissertação.

1.5 RECURSOS FINANCEIROS

Recurso para compra da ferramenta de ensaio da NBR 7190/97 (R\$ 7500,00, sete mil e quinhentos reais).

Recursos para materiais e mão de obra para fabricação da ferramenta proposta pelo estudo;

Recursos para aquisição das amostras de madeira para elaboração dos corpos de prova;

Recursos para calibração e certificação dos equipamentos do laboratório de materiais;

Recursos para despesas de viagens e hotéis e demais despesas com a banca avaliadora do trabalho.

1.6 CONTRAPARTIDAS DA UTFPR/PPGEC/DACOC

Laboratórios de materiais, estruturas e técnicas construtivas;

Matriz de puncionar e perfurar, suporte da ferramenta de cisalhamento por puncionamento, disponível no laboratório de estruturas;

Ferramentas para elaboração dos corpos de provas;

Salas e hardware disponíveis para elaboração do trabalho;

Obtenção de uma ferramenta destinada a fazer ensaio de cisalhamento segundo NBR 7190/97, por compra através de verba da UTFPR, mantenedora do programa de pós-graduação em Engenharia Civil;

Obtenção de materiais e ferramentas para execução da ferramenta de funcionamento, montado na matriz de puncionar e perfurar, adaptado a uma prensa universal de ensaios;

Obtenção de amostras de madeira, sendo de três espécies com características diferentes em relação a sua resistência á compressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é um material orgânico, produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas pertencentes à divisão das fanerógamas, que se subdividem em angiosperma e gimnosperma. Material resistente e leve, sendo frequentemente utilizado para fins estruturais em construções. Caracteriza-se por absorver água facilmente, trocando umidade com o meio ambiente (higroscopia) e também por apresentar propriedades físicas e mecânicas conforme a orientação espacial (ortotropia). (FERREIRA MARTINS & FILHOS, 2008)

Gonzaga (2006) destaca as coníferas como a representante mais importantes das gimnosperma, cujas sementes têm formato cônico e suas folhas são aciculadas. No Brasil há duas famílias nativas de coníferas: Araucariaceae e Podocarpaceae, tendo a *Araucaria angustifolia* como espécie de maior importância econômica, que ocorre na região sul e sudeste do país. Devido a exploração desenfreada, hoje está bastante escassa, sendo permitido a exploração, somente de árvores oriundas de reflorestamentos.

Dentre as coníferas exóticas, destacam os *pinus*, cujas espécies mais representativas é o *elliotti*, *taeda* e *caribaea*, plantadas principalmente na região sul e sudeste que é a base da indústria madeireira nestas regiões. Estas espécies encontraram solos e climas adequados e o crescimento anual supera as regiões de origens, produzindo madeira em tempo recorde.

As angiosperma são plantas denominadas de folhosas, tendo várias famílias com importância comercial, tais como: Leguminosae, Meliaceae, Bignoneaceae, Lauraceae, moraceae e apocynaceae. Dentre as folhosas exóticas, destacam-se os *Eucalyptus*.

2.1 ANATOMIA DA MADEIRA

Gonzaga (2006) descreve simplificadamente o tronco de uma árvore, como uma pilha de cone superpostos. Quando este tronco é cortado transversalmente, apresentam anéis circulares que representam os anéis de crescimento. Há diferença de espessura e textura nestes anéis, esta diferenciação é formada pelos lenho inicial mais largo e brando (primaveril) e lenho tardio mais compacto e rijo (outonal).

A figura 1 apresenta a anatomia do tronco de uma folhosa e destaca as camadas macroscópica:

- Casca: tem função protetora;
- Floema: a função principal é de transporte da seiva elaborada;
- Cambio: função de crescimento diametral do tronco;
- Xilema: é a madeira propriamente dita, compõe-se de alburno, cerne e medula.

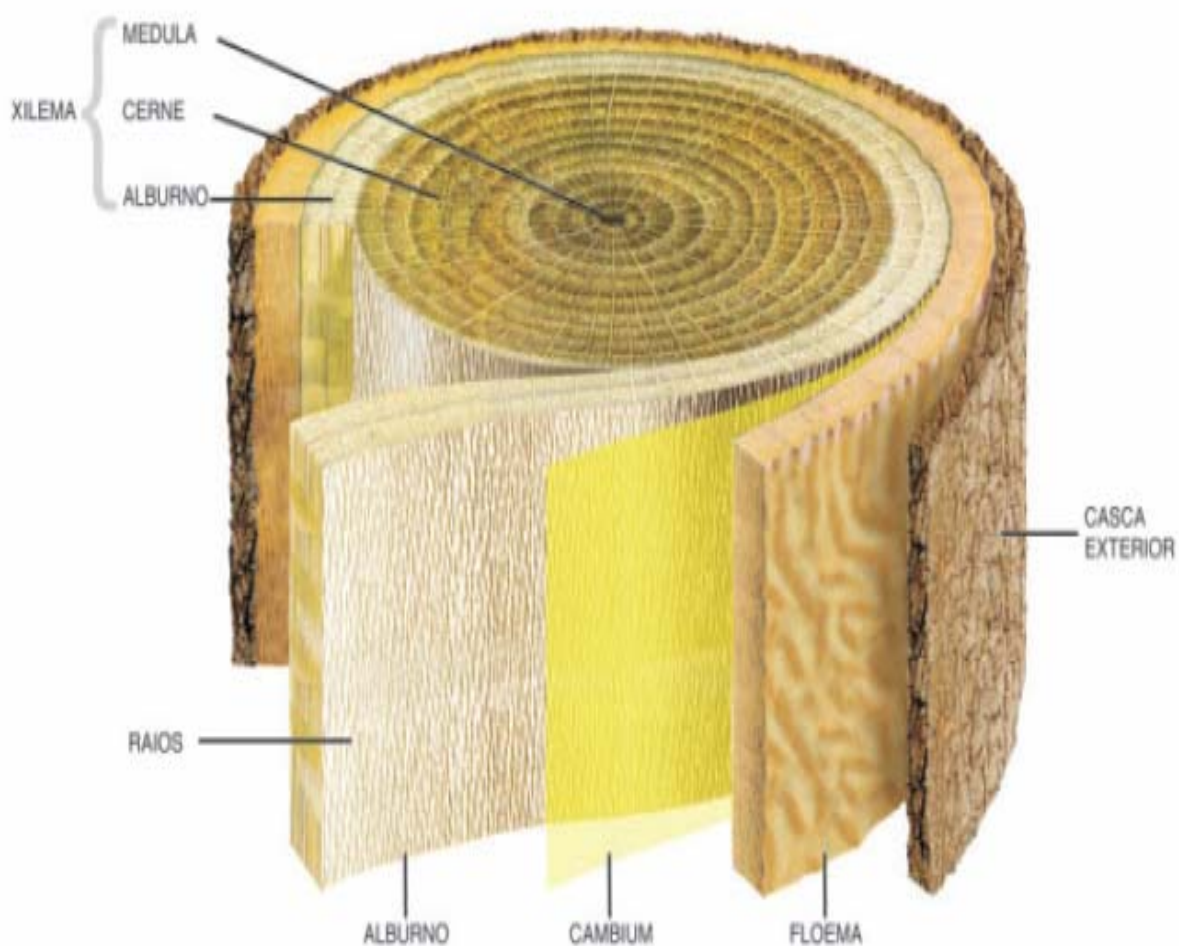


Figura 1 – Desenho Esquemático da Anatomia do Tronco de uma Folhosa – Corte Transversal

Fonte: Gonzaga (2006)

A maior parte da estrutura celular das Coníferas, figura 2 é formada pelos traqueídeos e pelos parênquimas. Os parênquimas não possuem função relevante para a função estrutural, já os traqueídeos possuem função estrutural e de transporte de seiva.

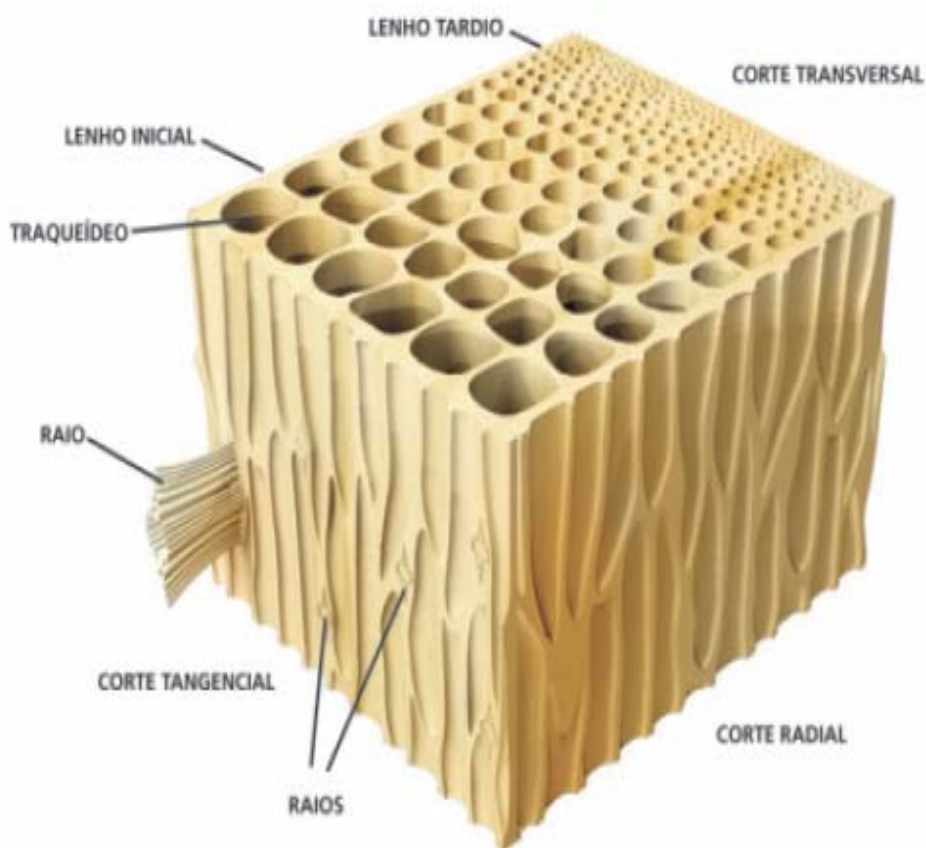


Figura 2 – Desenho Esquemático da Anatomia de uma Conífera

Fonte: Gonzaga (2006)

Na figura 3, o desenho esquemático da anatomia microscópica de uma folhosa, mostra que não há diferença entre os lenhos inicial e tardio.

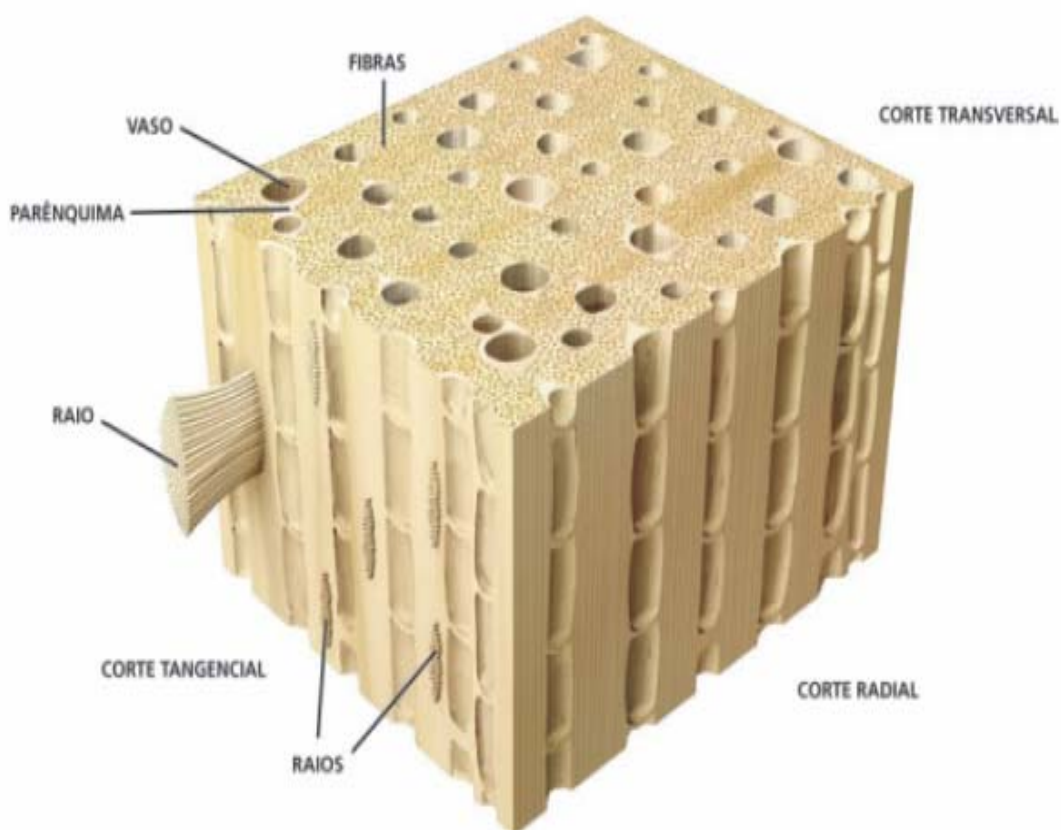


Figura 3 – Desenho Esquemático da Anatomia de uma Folhosa

Fonte: Gonzaga (2006)

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A composição orgânica é complexa, onde predomina a celulose, hemicelulose e lignina, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Composição Orgânica da Madeira

Substância	coníferas	dicotiledôneas
Celulose	48% a 56%	46% a 48%
Hemicelulose	23% a 26%	19% a 28%
Lignina	26% a 30%	26% a 35%

Fonte: Hellmeister (1983)

Gonzaga (2006) define a celulose como um polímero constituído por centenas de glicoses, formando cadeias estáveis. Cada molécula de celulose tem três hidroxilas que adsorvem as moléculas de água, esta característica define o valor do ponto de saturação das fibras que é de 30%. As hemiceluloses diferem das celulosas por terem baixa polimerização, são solúveis em álcalis e sofre ataque dos ácidos, portanto instáveis. A lignina é o elemento químico que dá a característica de dureza e resistência, faz a ligação adesiva entre os diversos tecidos da madeira, sofre influência da temperatura.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

O conhecimento da influência das propriedades físicas sobre as propriedades mecânicas da madeira possibilita o uso racional da madeira e ajuda no entendimento das variações das propriedades mecânicas. (DIAS E LAHR, 2004).

A Norma Brasileira NBR 7190 (1997) especifica os ensaios físicos da madeira que são:

- Umidade;
- Densidade e;
- contração e inchamento.

2.3.1 Umidade

A determinação da umidade madeira é importante para o ajuste das propriedades mecânicas da madeira. O teor de umidade corresponde à relação entre a massa da água contida nela e a massa da madeira seca, dado por:

$$U(\%) = \frac{(m_i - m_s) \times 100}{m_s} \quad (1)$$

onde:

m_i : é a massa inicial da madeira, em gramas do corpo-de-prova (g);

m_s : é a massa da madeira seca, em gramas do corpo-de-prova (g);

A umidade na madeira apresenta-se de duas formas:

- água livre: é a água contida nas cavidades das células (lumens) e;

- água impregnada: é a água contida nas paredes das células.

Após o corte da árvore, há uma tendência muito grande de perder a água livre contida no seu interior para a atmosfera e depois perde-se a água impregnada lentamente. Esta perda da umidade tende a um equilíbrio, em função da temperatura e da umidade ambiente. (figura 4).

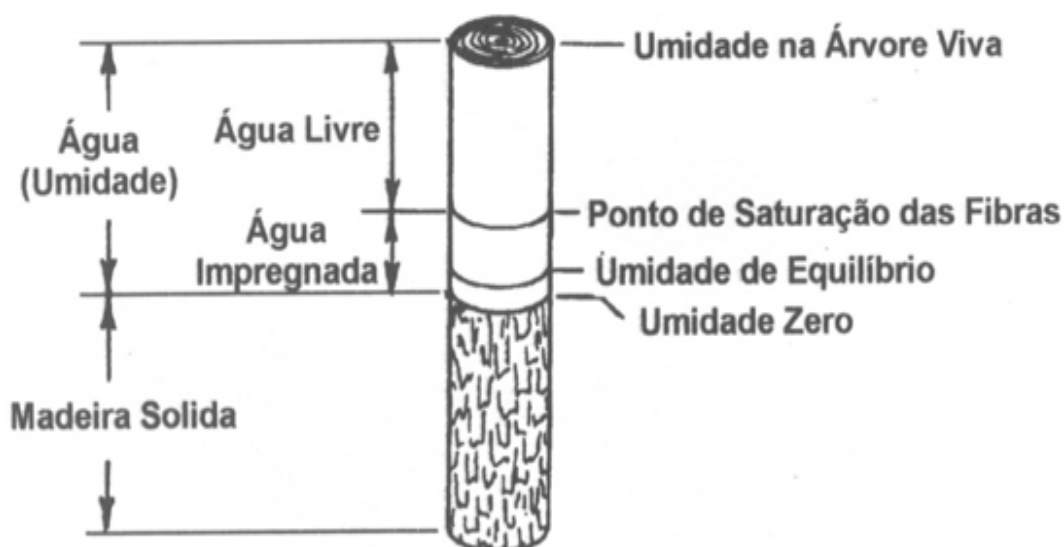


Figura 4 - Umidade na Madeira

Fonte: Calil *apud* Ritter (1990).

O ponto de saturação das fibras (PSF) é o limite da umidade entre a água livre e a água impregnada. Normalmente para as madeiras brasileiras esta umidade é em torno de 25%. A perda da umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é acompanhada pela retração, densidade e modificações das propriedades mecânicas.

A figura 5 mostra o teor de umidade de equilíbrio da madeira em diversos ambientes, em locais onde esta madeira foi aplicada. Esta figura varia um pouco com a espécie e também com a umidade relativa do ambiente (DINWOODIE, 1981).

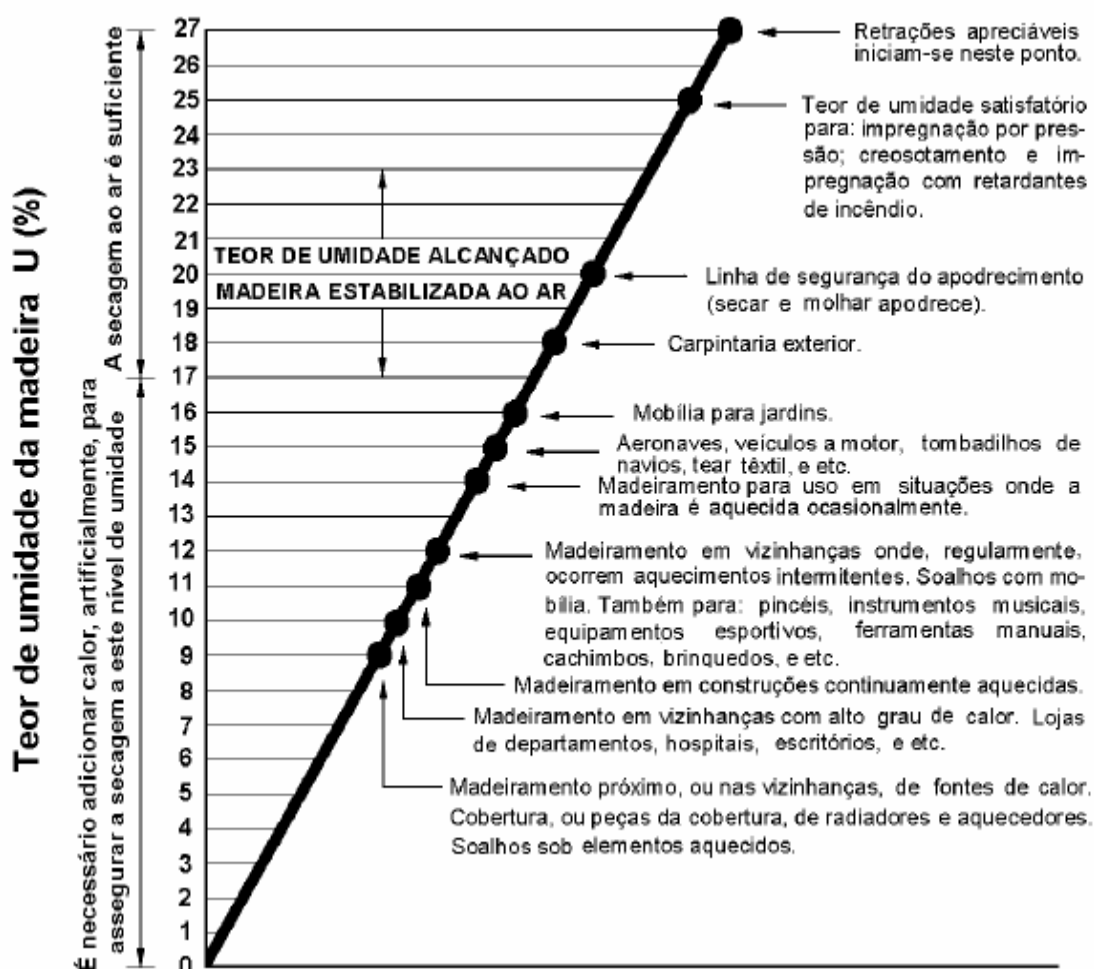


Figura 5 - Teor de Umidade de Equilíbrio da Madeira em Vários Ambientes.

Fonte: Dinwoodie (1981)

Pfeil (2003) apresenta a figura 6 que mostra a variação da resistência da madeira em função da sua umidade. A partir do ponto de saturação das fibras (PSF) não há variação da resistência da madeira mesmo que haja um aumento da umidade.

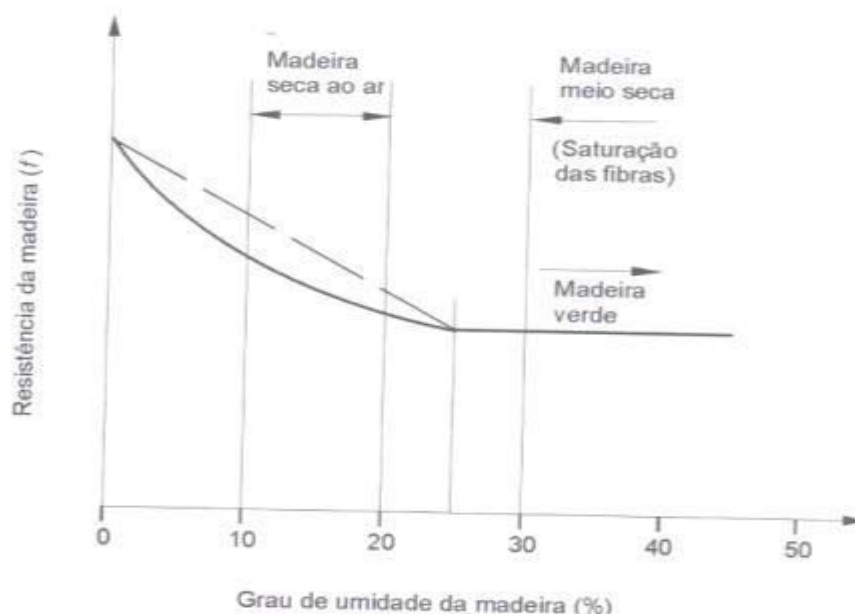


Figura 6 - Variação da Resistência da Madeira com o Grau de Umidade

Fonte: Pfeil (2003)

As classes de umidade da norma NBR 7190/07, apresentada na tabela 2, têm por finalidade ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira, para o projeto estrutural, em função das condições ambientais onde as estruturas serão executadas.

Tabela 2– Classes de Umidade da Madeira

Classes de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} \geq 85\%$ durante longo período	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190/97

A norma brasileira especifica a umidade de 12% para a classificação das espécies, quanto as propriedades físicas e mecânicas. Os ensaios realizados para

caracterizar as propriedades mecânicas da madeiras devem ser corrigidas para a umidade de 12%. (SZÜCS, 2006).

2.3.2 Densidade

São caracterizadas duas densidades: a básica e a aparente..

A densidade básica é definida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado, dado pela expressão:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2)$$

onde:

m_s : é a massa seca em quilogramas do corpo-de-prova (kg);

V_{sat} : volume da madeira saturada, em metros cúbicos (m^3).

A massa seca é determinada com corpo de prova mantido em estufa a $100^\circ C$ durante 48 horas. Para a obtenção do volume saturado, o corpo de prova é submerso em água até atingirem peso constante.

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

$$\rho_{ap} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad (3)$$

onde:

m_{12} : é a massa a 12% de umidade, em quilogramas do corpo-de-prova (kg);

V_{12} : volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos (m^3).

Kollmann e Côtê (1984) apresentou o diagrama de Kollmann, que representa a variação da densidade aparente da madeira em relação ao teor de umidade (figura 7). Analisando o diagrama de Kollmann, conclue-se que a variação da densidade aparente da madeira é muito maior na madeira de baixa densidade do que na madeira de alta densidade.

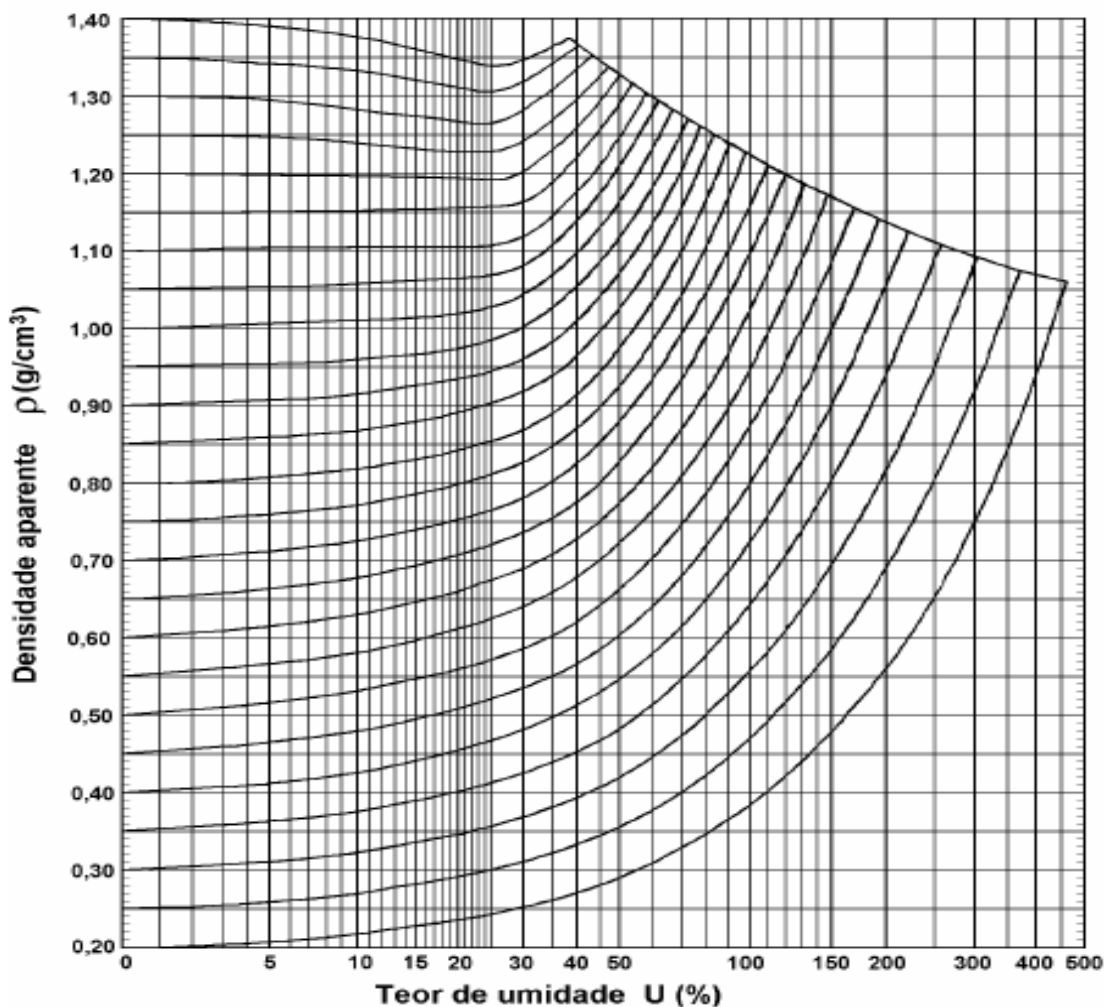


Figura 7 – Diagrama de Kollmann

Fonte: Kollmann e Cote (1984)

Shimoyama e Barrichello (1981) estudando Eucalipto, reconhece que a densidade básica da madeira é uma das propriedades físicas mais importantes, pela facilidade na determinação e estar relacionadas com outras propriedades mecânicas da madeira.

Mady (2000) criou os gráficos que são apresentados na figura 8, onde se relaciona a densidade e algumas características da madeira,

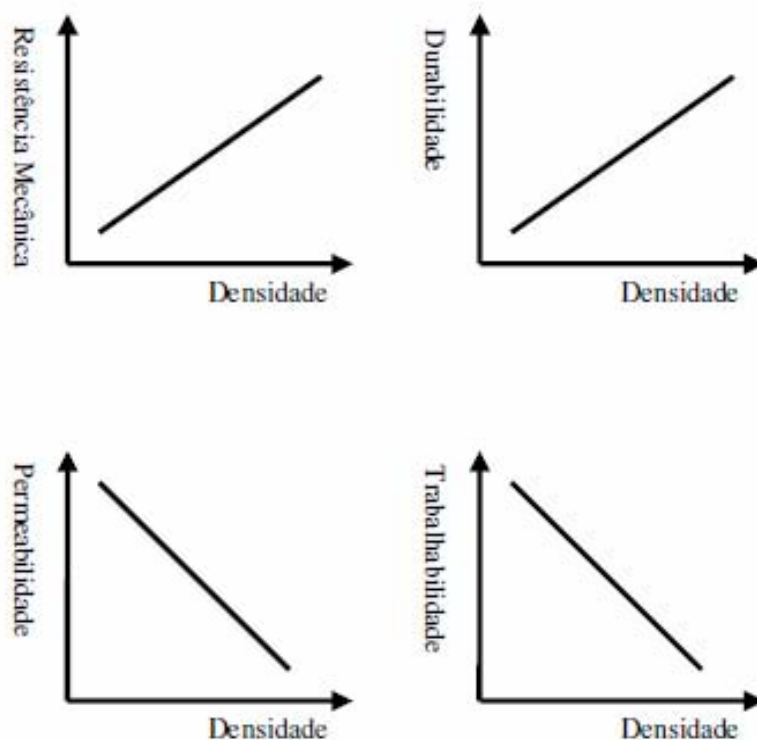


Figura 8 – Relação entre a densidade e algumas características da madeira

Fonte: Mady (2000)

A densidade é resultante das características químicas e anatômicas, tais como as dimensões das fibras, o teor de lignina, holoceluloses e extrativos, os percentuais de lenho inicial e tardio, e teor de madeira juvenil e adulta. (SHIMOYAMA, 1990)

A densidade da madeira está relacionada ao seu teor de umidade, portanto, para a determinação desta propriedade física, é necessário conhecer as características da contração e inchamento da madeira. A retratibilidade total da madeira aumenta com sua densidade básica. (KOLLMAN E COTÉ, 1968)

2.3.3 Contração e Inchamento

As madeiras são higroscópicas, apresentam contração quando o seu teor de umidade, a partir do ponto de saturação das fibras (PSF), é reduzido até a condição de umidade zero ou anidra. A entrada de água entre as microfibras de

celulose da parede celular provoca afastamento das mesmas e como consequência ocorre o inchamento (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

A retratibilidade varia no comprimento, largura e espessura de uma peça de madeira, assim como no material proveniente de uma mesma espécie e também de uma mesma árvore. As folhosas retraem mais do que as coníferas, e normalmente as espécies com alta densidade retraem mais do que aquelas de baixa densidade e espécies com alto teor de extrativos possuem retratibilidade baixa (SIMPSON, 1991).

A magnitude das variações dimensionais depende de inúmeros fatores, tais como:

- teor de umidade;
- direção estrutural: radial, tangencial ou longitudinal;
- a posição dentro da árvore;
- a densidade da madeira;
- a temperatura;
- o grau de estresse de secagem gerado pelo gradiente de umidade.

As mudanças dimensionais observadas na madeira são diferentes ao longo das três direções estruturais, isto é devido a característica anisotrópica da madeira (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

A retratibilidade na direção tangencial é aproximadamente o dobro de retratibilidade na direção radial, tanto que se pode assumir que dois terços da retratibilidade volumétrica são ocasionados pela retratibilidade tangencial e um terço pela radial. Na direção longitudinal, para a maioria da madeira, pode ser considerada desprezível, variando de 0,10% e 0,30% (SIAU, 1984).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

O interesse pela determinação das propriedades mecânicas da madeira é justificado pelo fato de que, na maioria das situações de utilização, os esforços a que a madeira está submetida devem ser conhecidos, possibilitando assim, o correto

dimensionamento dos vários elementos que formam o conjunto estrutural como um todo.

A norma NBR 7190/07 define os ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas da madeira. Os ensaios são os seguintes:

- Resistência à compressão paralela às fibras;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras;
- Resistência à tração paralela às fibras;
- Resistência à flexão e;
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

As propriedades mecânicas da madeira são influenciadas pela massa específica, da proporção do lenho juvenil, da espessura dos anéis-de-crescimento, do ângulo das microfibrilas, da inclinação da grã, da quantidade de extrativos, do teor de umidade, da intensidade do ataque de xilófagos, do tipo e da localização e quantidade de nós (EVANS et al.,2000).

2.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

A propriedade da madeira, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, é de grande importância em madeiras cavilhadas, roletes, calandras, polias e tesouras. O cisalhamento consiste na separação das fibras por um esforço paralelo às mesmas. O ensaio consiste na aplicação e mensuração do esforço no sentido das fibras, para provocar o deslizamento entre as fibras.

A resistência ao cisalhamento da madeira é diretamente proporcional à sua densidade, mas depende principalmente do sentido em que o esforço é aplicado em relação aos anéis de crescimento (normalmente a ruptura se determina no plano tangencial ou radial). No plano tangencial há uma grande influência da diferença entre os lenhos inicial e tardio, no plano radial há grande influência dos raios da madeira. No plano radial há grande influência dos raios da madeira, sendo que madeiras com raios largos apresentam baixas resistências ao cisalhamento, em relação às com anéis de crescimento mais estreitos. No plano tangencial há uma grande influência do crescimento da árvore, ou da diferença de resistência entre os lenhos inicial e tardio

A resistência da madeira está relacionada à quantidade de água na parede da célula da fibra. Acima do ponto de saturação das fibras a água se acumula nas cavidades das células da madeira (água livre), e não se verifica efeito sensível sobre a resistência da madeira associado à variação do teor de umidade neste intervalo.

Para teores de umidade entre 0% (madeira seca em estufa) até o ponto de saturação das fibras (PSF) a água se acumula nas paredes das células da madeira (água de impregnação), e afeta sensivelmente a resistência da madeira, pois o aumento da quantidade de água reduz as ligações por pontes de hidrogênio, entre os polímeros orgânicos das paredes das células, diminuindo a resistência da madeira (WIANDY & ROWELL, 1984).

A resistência ao cisalhamento é inversamente proporcional ao teor de umidade (0%U - PSF), mas que o incremento médio de resistência desta propriedade com o decréscimo em teor de umidade é menor ao observado para as resistências à flexão e à compressão (KEYLWERTH, 1945).

Coker e Coleman (1930) Apud Mendes (1984), utilizando a técnica da fotoelasticidade, demonstraram a distribuição das tensões normais e de cisalhamento num corpo de prova prismático, que foi carregado simetricamente (figura 9).

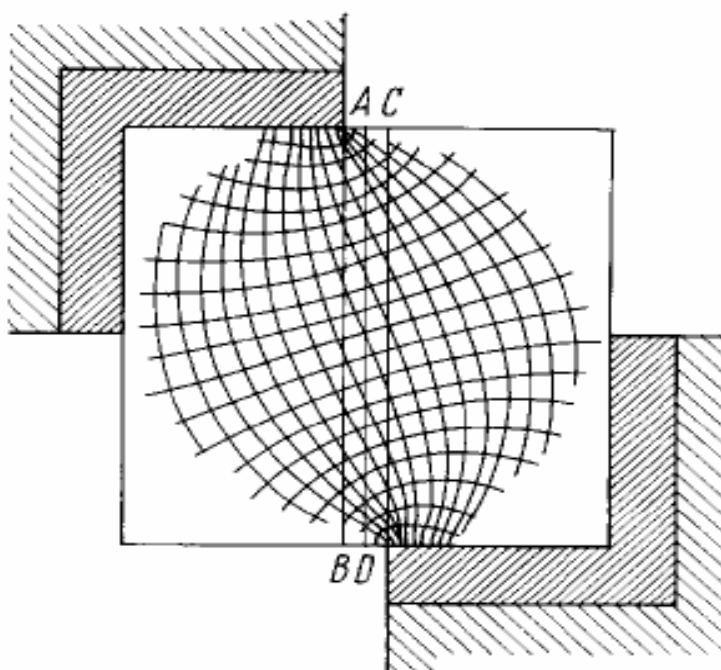


Figura 9 - Distribuição de tensões em um cubo de madeira sob carga simetricamente distribuída

Fonte: COKER e COLEMAN (1930)

A tensão vertical é distribuída uniformemente nos planos AB e CD, mas ocorrem consideráveis desvios perto dos apoios.

Nos ensaios de cisalhamento há uma preocupação com o efeito da flexão devido à excentricidade do carregamento.

O aumento médio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, no intervalo higroscópico, para uma diminuição do teor de umidade é menor que o que ocorre na flexão ou compressão paralela. Por outro lado, a orientação entre o plano de ruptura e as forças transversais é de suma importância. Para algumas orientações das fibras praticamente não existe efeito do teor de umidade sobre a resistência ao cisalhamento (KOLLMANN & COTÉ, 1984). Na figura 10 é apresentada a influência do teor de umidade sobre a resistência ao cisalhamento para diversas orientações das fibras.

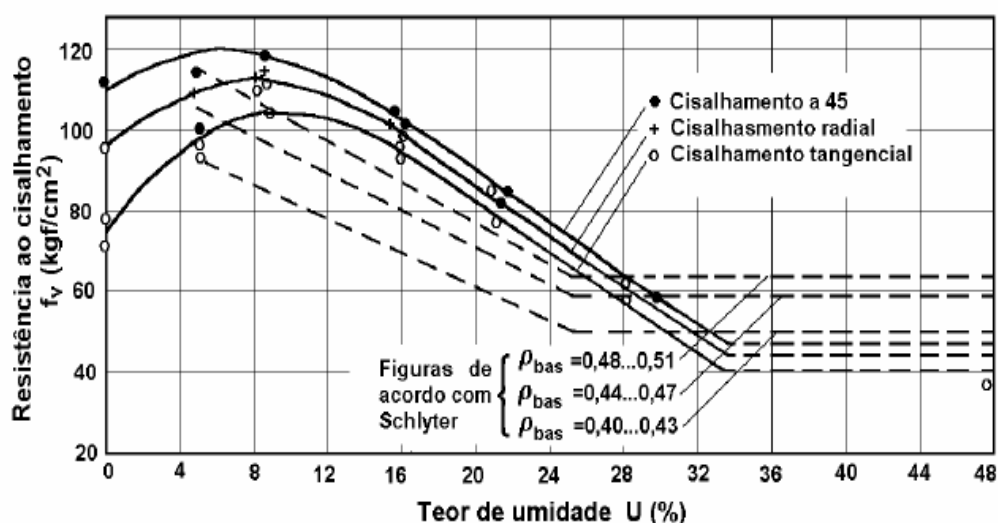


Figura 10 – Efeito do Teor de Umidade sobre a resistência ao Cisalhamento

Fonte: KOLLMANN & COTÉ (1984)

2.6 ENSAIOS DE CISALHAMENTO

O ensaio de cisalhamento da madeira é problemático devido às concentrações de tensões, superposição de tensões, principalmente como as de

flexão, tensões de compressão, desenvolvimento de fissuras que mascaram o fenômeno do cisalhamento, tornando os resultados questionáveis.

Há vários estudos sobre a metodologia para a realização do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira que são citados por SANTOS NETO (1999):

- Estudo de BROTERO (1935);
- Estudo de Vieira (1940);
- Estudo de RADCLIFFE e SUDDARTH (1955);
- Estudo de NORRIS (1957);
- Estudo de BENDTSEN e PORTER (1978);
- Estudo de MENDES (1984);
- Estudo de KOLLMANN e CÔTÉ (1984);
- Estudo de GUITARD (1987);
- Estudo de FERREIRA (1994);
- Estudo de LANG (1997);
- Estudo de HECK et al. (1998);
- Estudo de MOREIRA e FASSONI (1998) e;
- Estudo de SANTOS NETO (1999).

2.6.1 Metodologia de Ensaio de MENDES (1984)

O estudo de Mendes consiste nos ensaios comparativos entre o corpo de prova do MB-26/40 e os corpos de prova desenvolvido pelo autor.

O primeiro ensaio comparativo foi efetuado entre a o corpo de prova do MB-26/40, apresentado na figura 11, com os corpos de prova para cisalhamento em dois planos, da figura 12.

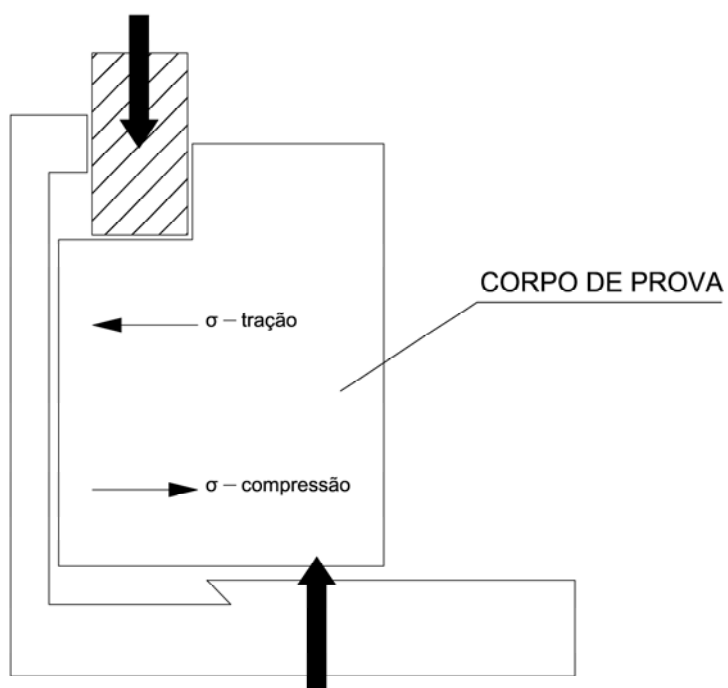


Figura 11 – Detalhe do ensaio adotado pelo Método Brasileiro MB-26/40

Fonte: MENDES (1984)

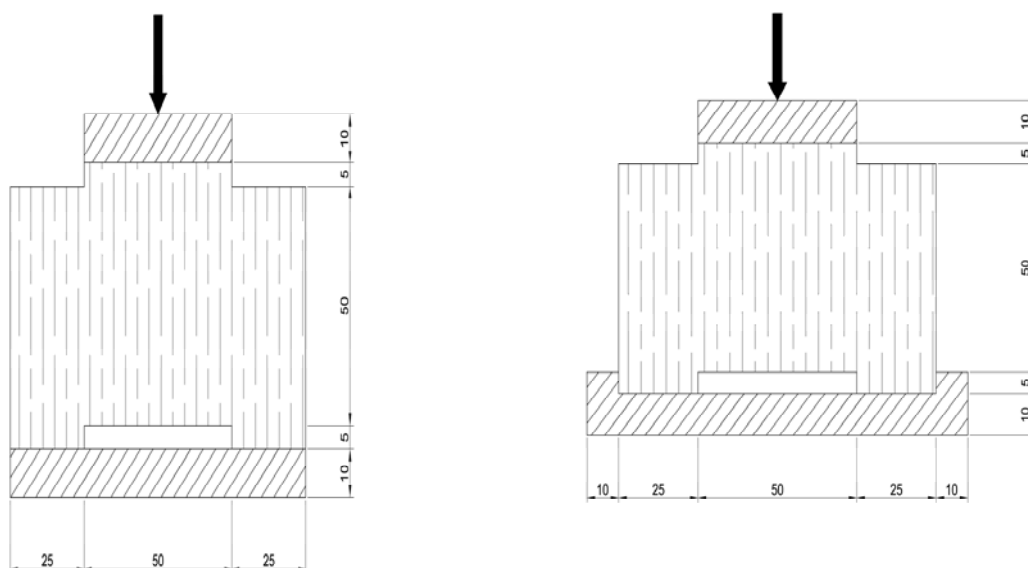


Figura 12 – Detalhe do ensaio para cisalhamento em dois planos

Fonte: MENDES (1984)

Os corpos de prova foram retirados de uma barra homogênea da madeira Pinho do Paraná, seca ao ar, sendo quatro para cada modelo. A ruptura do modelo ocorreu sistematicamente de um lado, típica de cisalhamento associada à tração normal e os resultados obtidos não tiveram diferenças significativas.

No segundo ensaio comparativo, foi utilizado o modelo modificado de cisalhamento em dois planos (figura 13) e o modelo para ensaio de cisalhamento em um plano (figura 14).

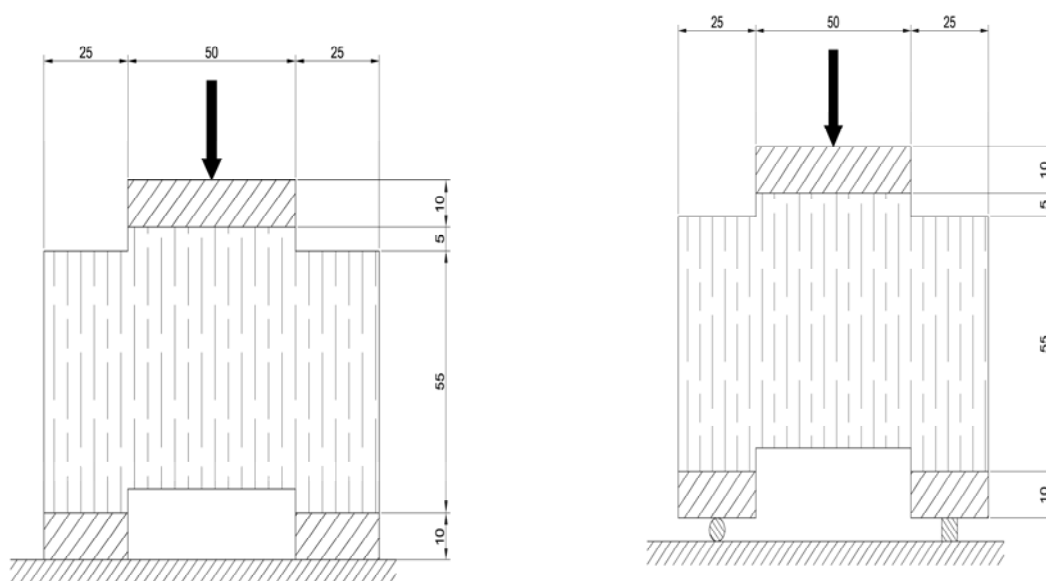


Figura 13 – Modelos para ensaio de cisalhamento em dois planos

Fonte: MENDES (1984)

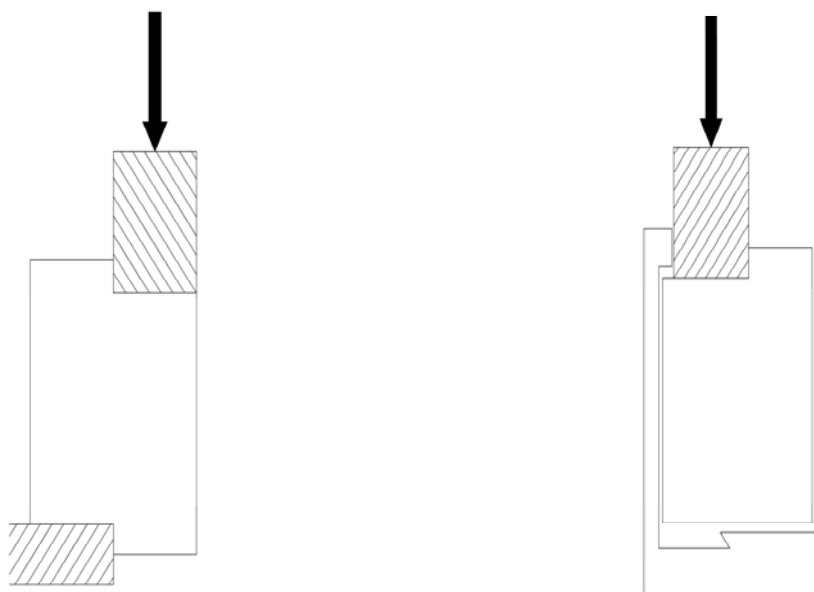


Figura 14 – corpo de prova para ensaio de cisalhamento em um plano

Fonte: MENDES (1984)

Neste experimento, foram utilizados madeira seca ao ar e também a madeira verde. A análise da ruptura dos corpos de prova para cisalhamento em dois planos mostrou claramente a ruptura por tração normal às fibras, indicando a existência de flexão normal às fibras.

No terceiro ensaio comparativo, foi utilizado o corpo de prova do MB-26/40, apresentado na figura 11, e o dispositivo proposto por MENDES (1984) para o ensaio de cisalhamento. (figura (15)). No desenvolvimento deste dispositivo, há uma tentativa de eliminar a flexão, pois a flexão induz no aparecimento de tensões de tração normal e de compressão normal, prejudicial à ocorrência de cisalhamento puro.

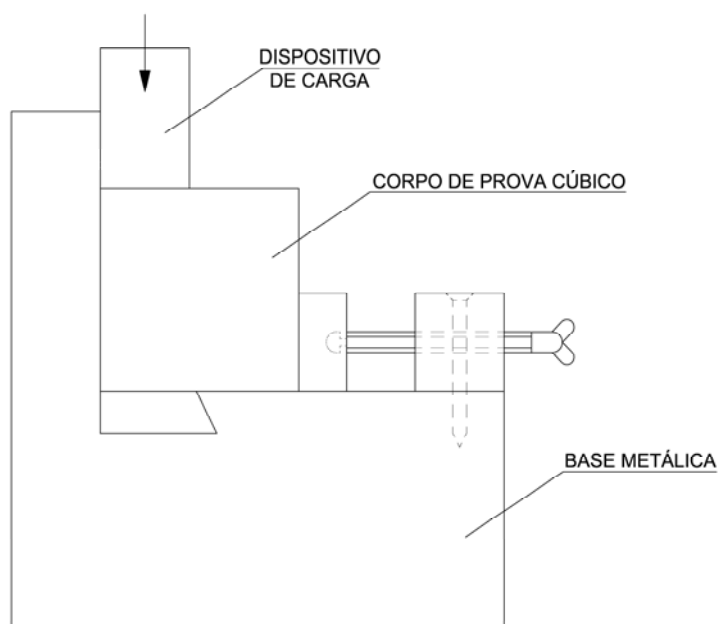


Figura 15 – Dispositivo proposto por MENDES (1984) para ensaio de cisalhamento

Fonte: MENDES (1984)

Comparando os resultados obtidos, o modelo proposto tem os resultados mais elevados, esta diferença confirma a hipótese de que a eliminação dos esforços de tração normal leva à ruptura dos corpos de prova com tensões de cisalhamento mais elevadas.

2.6.2 Metodologia de Ensaio de FERREIRA E FUSCO (1994)

Os autores realizaram ensaios utilizando 21 corpos de prova de jatobá que foram preparados de acordo com a MB-26/40. Os resultados não foram satisfatórios:

- 14% dos corpos de prova romperam por cisalhamento (figura 16a);
- 38% dos corpos de prova se romperam no apoio (figura 16b) e;
- 48% romperam ao longo da descontinuidade (figura 16c).

Na Figura 16 apresenta-se as formas que os corpos de prova se romperam.

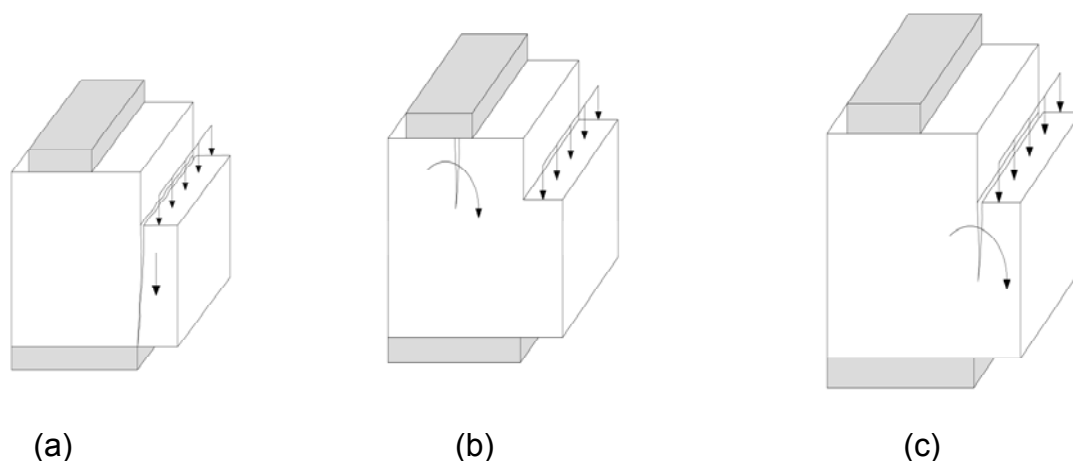


Figura 16 - Ruptura do s corpos de prova (a) ruptura por cisalhamento; (b) ruptura na região do apoio e (c) ruptura ao longo da da seção de cisalhamento, coma fissura abrindo de cima para baixo

Fonte: FERREIRA E FUSCO (1994)

Devido aos resultados insatisfatórios, os autores buscaram desenvolver nova metodologia para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, objetivando eliminar os efeitos decorrentes do surgimento de tensões normais e buscar a ruptura do corpo de prova somente por esforço de cisalhamento.

Na figura 17 apresenta-se a proposta do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

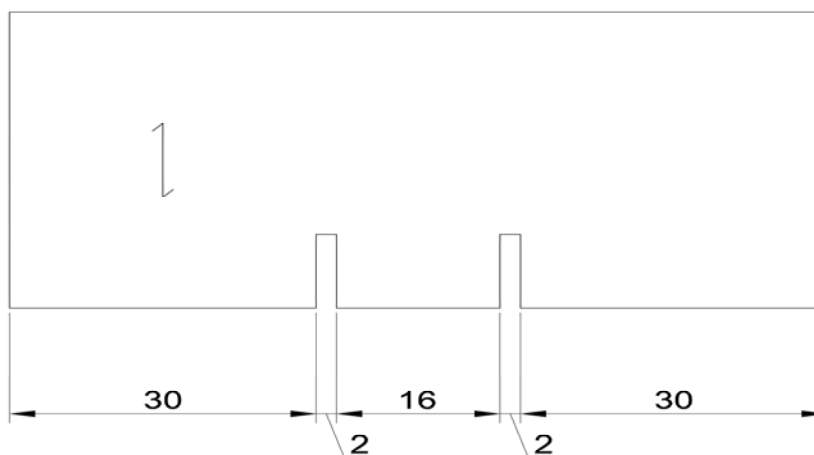


Figura 17 – Corpo de prova proposto para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Fonte: FERREIRA E FUSCO (1994)

A adoção de corpo de prova com pequena espessura e a redução da área sob esforço cisalhante, efetuando-se fendas no plano de cisalhamento, tem como finalidade eliminar outros esforços de ruptura, senão a de cisalhamento. A manutenção da região entre as fendas contribui na resistência do corpo de prova à tração normal, facilitando a ruptura por cisalhamento.

O arranjo do ensaio é apresentado na figura 18, sendo bastante simples. A base com um rebaixo, as fendas no plano de cisalhamento e o bloco para o carregamento deve estar alinhadas, para que não haja outros tipos de esforços.

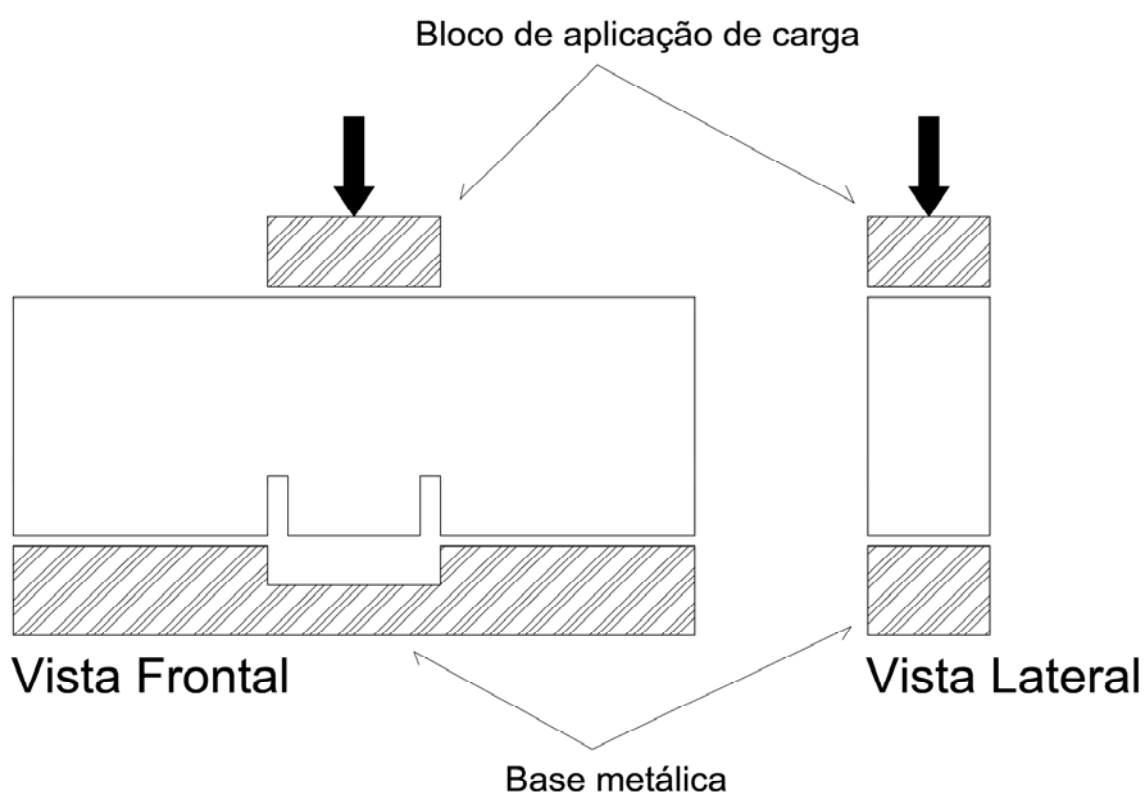


Figura 18 – Arranjo do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Fonte: Ferreira e Fusco (1994)

Nos ensaios realizados pelos autores, a ruptura dos corpos de prova ocorreu preferencialmente em uma das superfícies, mas considerou-se para o cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras o somatório das áreas das duas superfícies sob tensão cisalhante.

As conclusões foram:

- Há uma maior facilidade na confecção do corpo de prova;

- O arranjo permite a visualização do ensaio, facilitando o acompanhamento durante todo o carregamento;
- Todos os corpos de prova ensaiados romperam por cisalhamento.;
- Os resultados têm um coeficiente de variação de 7,1% para o pinho e 9,6% para o ipê.

2.6.3 Metodologia de Ensaio de SANTOS NETO

A metodologia de SANTOS NETO (1999) propôs a modificação do corpo de prova, conforme a figura 19. No corpo de prova de pequena espessura, 20mm, é executado três fendas, com o objetivo de se obter dois planos que favoreça o surgimento das tensões de cisalhamento.

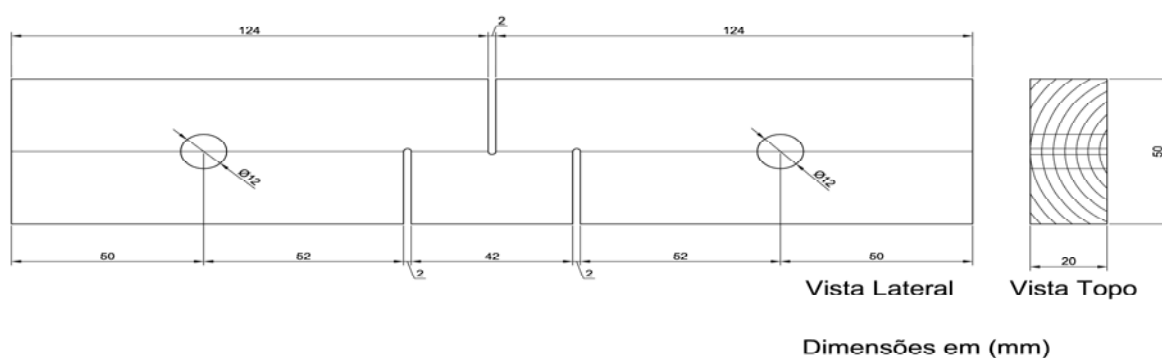


Figura 19 –Forma e dimensões do corpo de prova (mm).

Fonte: SANTOS NETO (1999)

A realização do ensaio é através da aplicação de um esforço de tração no corpo de prova, figura 20, que possibilita o surgimento de duas seções de cisalhamento e o rompimento na seção crítica.

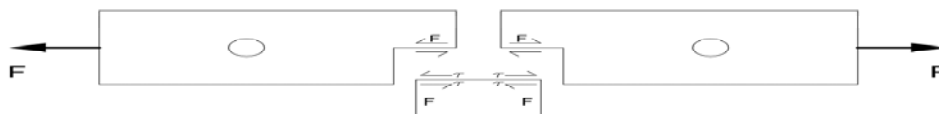


Figura 20 – Esforço na seção crítica de cisalhamento.

Fonte: SANTOS NETO (1999)

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento é considerada a carga de ruptura aplicada e a área onde houve a ruptura do corpo de prova.

O autor concluiu que:

- A totalidade do corpo de prova romperam na área reduzida e exclusivamente por cisalhamento paralelo às fibras;
- Os resultados experimentais foram satisfatórios;
- Na análise numérica mostra que a ruptura na região enfraquecida do corpo de prova proposto não se dá por cisalhamento puro, mas apresenta uma combinação de tensões de cisalhamento e tração e;
- A concentração elevada de tensões normais na região enfraquecida pode ser reduzida se as extremidades dos rasgos, na região enfraquecida, forem arredondadas.

3 Desenvolvimento da ferramenta para ensaio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira induzido por puncionamento

3.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

O desenvolvimento da ferramenta para ensaio da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira induzido por puncionamento, de modo a extrair do corpo de prova uma amostra cilíndrica separada do corpo principal similar a uma rolha de garrafa exigiu um histórico de testes, observações e procedimentos corretivos e ganhos de experiência até a comprovação de resultados.

O processo ocorreu com a necessidade dos laboratórios do DACOC de possuírem um conjunto de ferramentas que permitissem caracterizar as madeiras utilizadas em construção civil, seguindo as recomendações das NBR 7190/97, com suas principais resistências mecânicas, propriedades físicas e químicas, utilizadas em projetos de engenharia civil. As dificuldades financeiras comuns às universidades e também a falta de fornecedores que ofertassem conjuntos completos e facilmente adaptáveis às máquinas de ensaio universal disponíveis (prensas universais), motivaram a optar por projetos de desenvolvimento e construção das ferramentas de ensaios.

A maioria dos ensaios de caracterização de madeira é simples e as ferramentas para sua realização são clássicas e facilmente adaptáveis às prensas universais de ensaios, desta forma a maioria dos ensaios de caracterização das resistências das madeiras, foram projetados e construídos por alunos de iniciação científica.

O ensaio de cisalhamento paralelo as fibras teve sua ferramenta desenvolvida e adaptada para utilização. No decorrer dos ensaios apareceram problemas e foi possível observar uma série de imperfeições que poderiam influenciar nos resultados. Motivados por solucionar os problemas formularam-se algumas alternativas que geraram resultados nem sempre satisfatórios, mas que permitiram evoluir com cada passo dado até a formulação do presente método de ensaio.

3.2 IMPERFEIÇÕES OBSERVADAS

No modelo proposto pela norma NBR 7190/97, o esforço é aplicado no corpo de prova através de uma placa metálica, denominada faca com espessura definida, que ao contato com o corpo de prova, transfere o esforço de compressão para este. O corpo de prova sugerido pela norma é prismático retangular, em formato cúbico. A força de compressão aplicada no topo do corpo de prova, transfere-se para a placa de apoio que fica no topo inferior do corpo de prova. A face da placa de apoio coincide com o plano formado pela face interna da faca. Este modelo proporciona um plano de cisalhamento no corpo de prova, conforme fotos da figura 21, criando uma tesoura entre a placa superior e a placa do apoio e uma área cisalhada entre estas, no corpo de prova.



Figura 21- Fotos da Ferramenta para Determinação da Resistência ao Cisalhamento de Madeiras

Pode-se observar que o contato da faca com o corpo de prova necessita de uma área de contato com dimensões suficientes para que não ocorra ruptura por esmagamento devido a compressão da madeira, anterior a ruptura por cisalhamento. Como o corpo de prova possui dimensões definidas pela norma, então a faca deverá possuir espessura adequada para proporcionar a área comprimida suficiente. O centro de aplicação da força até o plano de cisalhamento

do corpo de provas será metade da espessura da faca. Analogamente ocorre na placa inferior de apoio resultando em uma excentricidade entre a força aplicada no topo superior do corpo de prova e no topo inferior de valor igual a espessura da faca. Como temos uma força de ação e uma de reação, paralelas e de sinal contrário, separadas por um braço, que neste caso é a excentricidade, temos um momento gerado pelo binário de forças. Este momento é causador da rotação que ocorre no ensaio de cisalhamento. Esta é uma imperfeição significativa cuja solução pode inserir no corpo de provas, campos de tração e ou compressão simultaneamente ao cisalhamento, tornando o resultado discutível.

O ensaio normalizado prevê um encaixe no sentido vertical e parafuso na parte superior que fixa o corpo de prova por compressão, impedindo a rotação deste, figura 21. Esta solução é aceita, mas não resolve o problema de esforços secundários.

Entre os principais pontos observados podemos afirmar que para realizar uma ruptura por cisalhamento devemos estar atentos com as proporções entre o esforço de cisalhamento necessário e o esforço aplicado no corpo para provocar o cisalhamento, que deve ser um esforço normal de compressão ou tração, e que estes podem causar ruptura anterior ou ainda criar flexão no corpo de provas, que induzirá ao aparecimento de campos de tração e compressão que podem distorcer os resultados.

No capítulo de revisão bibliográfica, apresentaram-se alguns pesquisadores que propuseram soluções alternativas, enaltecendo a importância do tema e dificuldade para encontrar a solução adequada.

3.3 PRIMEIRA PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A primeira proposta de solução foi a realização de ensaio simétrico com dois planos de cisalhamento.

O aparecimento de um binário de forças devido ao ponto de aplicação da ação e da reação, é associado ao fato do ensaio da norma ser assimétrico. A observação induziu a pesquisa para o desenvolvimento de um ensaio simétrico em

relação a o ponto de aplicação das cargas. Desenvolveu-se um modelo com aplicação da carga através de uma placa (faca) e dois apoios como uma viga.

Neste modelo, conforme figura 22, ocorrem dois planos de cisalhamento. As equações de equilíbrio alteraram imediatamente, resultando no dobro da superfície a ser cisalhada e conseqüentemente, desequilibrando as proporções entre as forças cisalhantes e forças de compressão.

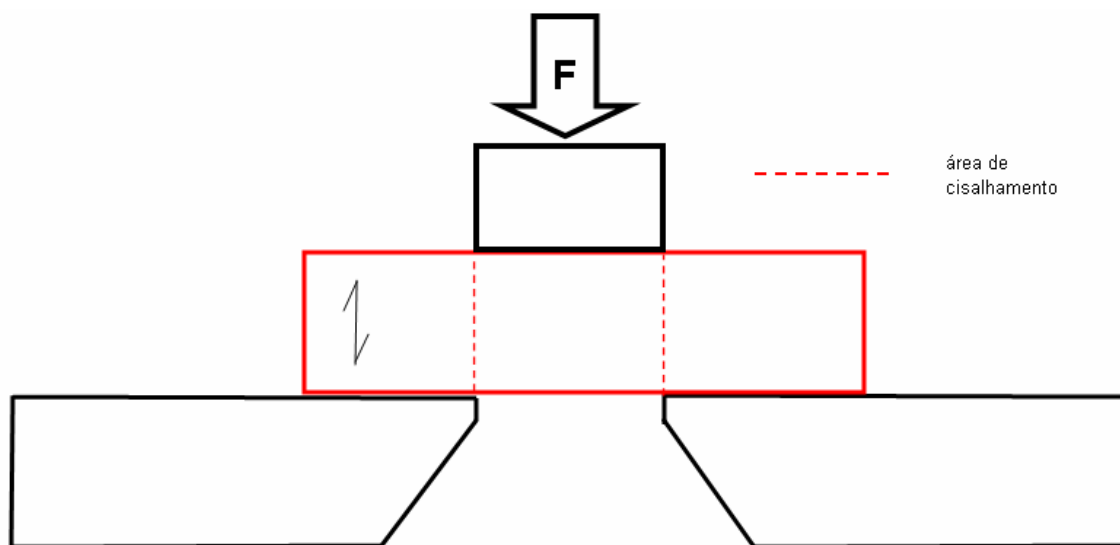


Figura 22 - Ensaio de Cisalhamento Simétrico com Dois Planos de Cisalhamento

Algumas tentativas para resolver o problema foram testadas e embora confirmassem que o modelo não era o mais adequado evidenciaram mais algumas variáveis importantes deste problema.

A primeira observação ao realizar o ensaio é que o corpo de prova ficou muito resistente ao cisalhamento e a ruptura ocorria por esmagamento devido a compressão.

Testou-se modificar o corpo de prova para reduzir a área de cisalhamento reduzindo a altura deste, e observou-se o aparecimento de ruptura na parte inferior do corpo causada por tração, originada pelo efeito de viga a que fica sujeito o corpo de provas. Este passou a se comportar como uma viga bi apoiada. Vários testes foram simulados para tentar encontrar equilíbrio para a situação porque o ensaio executado desta forma seria muito simples e o corpo de prova também.

Neste modelo aprendeu-se que o corpo romperia ou por compressão ou por tração devido o efeito de viga.

Durante a revisão bibliográfica notamos que o modelo era muito similar já estudado por Ferreira e Fusco na USP em 1994. Este estudo propôs diminuir a área cisalhada serrando o corpo de provas sob o apoio, pois nesta seção o momento é zero e a força cortante é máxima.

Deste modelo resultaram os cuidados que devem ser dados aos problemas de proporção entre as resistência ao cisalhamento paralela as fibras e a tensão de compressão.

Esta observação é muito relevante em projeto de ligação por entalhes onde dedica-se maior preocupação com a área de cisalhamento e descuida-se da área comprimida destas ligações.

3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTENCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA POR PUNÇIONAMENTO

3.4.1 Origem do Método

Os problemas observados nos ensaios anteriores levaram a uma perda na motivação pela falta de uma solução satisfatória. Por algum tempo o problema ficou sem novas propostas, porém não esquecido.

Analisando-se os processos utilizados na indústria metal mecânica para fazer furações em peças metálicas observou-se que o puncionamento é o método mais utilizado e econômico, vastamente empregado com prensas e máquinas de controle numérico. O processo consiste no conjunto de peças metálicas denominadas macho e fêmea, normalmente cilíndricos para furações circulares, podendo ter variantes. Este conjunto é fixado a uma maquina indutora de força, normalmente uma prensa hidráulica. O conjunto é montado de tal forma que a ação do macho insere-se dentro da fêmea, podendo ser penetrada em poucos mm ou transpassando-a. O macho é fixo a parte da máquina que realiza o movimento da subida e descida da ferramenta e também transmite a força gerada pela máquina. A fêmea é fixa à base da máquina. O conjunto deve ser montado de maneira que o movimento do macho seja rigoroso, ao longo de um eixo vertical longitudinal

passando pelo centro do cilindro do macho (figura 23). Quaisquer desvios devido a imperfeições no movimento podem levar ao choque entre macho e fêmea danificando a ferramenta.



Figura 23 - Plataforma Mecânica para Montagem de Ferramentas com o Conjunto de Macho e Fêmea do punção

Para fazer a furação em uma chapa, basta introduzi-la entre o macho e a fêmea, na posição desejada, estando o centro do furo coincidente com o eixo vertical central do macho e acionar a ferramenta. O macho irá transpassar a fêmea levando consigo o corpo estranho que estiver em seu percurso. O processo descrito é conhecido há muito tempo na indústria mecânica como puncionamento.

Este processo resolve os principais problemas descritos anteriormente, como a proporção entre os esforços de compressão e cisalhamento. O fato decorre

puramente da geometria do processo onde a compressão irá atuar em uma área circular igual a seção transversal do macho, e esta possui relação com o quadrado do raio da seção. A área de cisalhamento do corpo de prova terá relação linear com o raio da seção transversal do macho. Com esta característica fica viável a definição de um raio adequado que impeça a ruptura do corpo fora da ordem esperada.

Outra solução importante é a estabilidade do ensaio, pois este será multissimétrico em relação ao eixo longitudinal do macho ao qual denominaremos eixo diretor do ensaio. Com esta característica sabemos que não irá ocorrer rotação do corpo de prova.

3.4.2 Projeto da Ferramenta de Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Paralelo as Fibras da Madeiras, Induzido por Puncionamento.

Equacionado os dois dos principais problemas do ensaio depara-se com a viabilização da ferramenta para executá-lo.

A ferramenta deve atender algumas diretrizes técnicas como:

- Proporcionar forças por pressão hidráulica com dupla ação, ou seja, movimentos de ida e de retorno;
- O sistema de aplicação das forças deve ter capacidade de regulagem e ajuste da velocidade, para impedir distorções dinâmicas durante a utilização;
- Deve haver instrumentação e sistemas de aquisição de dados adequados para obter e registrar as forças durante o histórico do ensaio;
- Deve ser garantida a geometria do ensaio de modo que não ocorra desvios no eixo diretor do ensaio;
- O corpo de prova deve ser simples e de fácil elaboração;
- Os custos da ferramenta devem ser viáveis para que o ensaio possa ser realizado em outros laboratórios de ensino e pesquisa.

Estabelecidos os parâmetros para o projeto, verifica-se que entre os equipamentos disponíveis nos laboratórios do DACOC-UTFPR, a prensa universal de ensaios poderia ser a plataforma principal para a ferramenta, pois possui a capacidade de induzir forças com avanço e retorno, com regulagem de velocidade e com sistema de aquisição de dados adequados. A dificuldade seria na adaptação

direta dos punções sobre a prensa universal e garantir a geometria do ensaio sem alterar o eixo diretor do ensaio. Consultando profissionais da engenharia mecânica da UTFPR, manual mecânico Protec e livros de ferramentaria, optou-se pelo uso de uma plataforma composta por quatro colunas cilíndricas acopladas a duas placas metálicas de aço paralelas entre si, através de buchas lubrificáveis, conforme foto da figura 24. Esta plataforma serve de base para uma série de ferramentas desenvolvidas para indústria e seu uso é clássico. Embora seja uma ferramenta composta de vários itens elaborados com precisão, acabamento de qualidade e pontos com engraxadeiras para diminuir o atrito entre as peças esta peça possui preços baixos comparados a uma ferramenta única pois são produzidas em série, resultado em ferramentas econômicas. Com a adoção desta peça também ficou garantido a geometria do ensaio e a fácil adaptação da ferramenta na prensa universal.

Os punções conjunto de macho e fêmea foram usinados em uma indústria mecânica. Para a definição das medidas do diâmetro do macho, folga entre macho e fêmea, espessura do corpo de prova seriam necessários vários experimentos com diversas variações de medidas.

Para iniciar o processo sugeriu-se o uso de um corpo de provas com área de cisalhamento igual ao corpo de prova da NBR 7190/97, estabeleceu-se o diâmetro do punção macho igual a 40 mm e uma folga entre macho e fêmea de 1mm, resultando uma espessura de 20mm para o corpo de provas.

$$\text{Área comprimida} : 40 \times 40 \times 3.141516 / 4 = 1.256,61 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área cisalhada} : 3,141516 \times 40 \times 20 = 2.513,21 \text{ mm}^2:$$

$$\text{Area cisalhada do corpo de provas da norma} : 50 \times 50 = 2.500 \text{ mm}^2.$$

Os parâmetros iniciais sugeridos produziram ensaios perfeitos e medidas diretas para comparação com os valores gerados pelo método da norma, motivos suficientes para não promover novas tentativas e evitar novos custos. A adaptação dos punções a plataforma mecânica foram feita na mesma oficina mecânica e posteriormente fez-se o acoplamento do conjunto na prensa universal de ensaios.

Realizam-se vários testes com corpos de prova de madeiras com resistências de amplitudes bem diferentes e a ferramenta comportou-se adequadamente. Com a

validação da ferramenta pode-se então realizar as séries de ensaios definidos no método da pesquisa.



Figura 24 - Ferramenta de Ensaio de Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira Induzidos por Puncionamento, Montado na Máquina Universal de Ensaios

4 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS E OS MÉTODOS PARA OS ENSAIOS

O objetivo do trabalho é desenvolver a ferramenta para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras por puncionamento e validar o seu desempenho em diferentes tipos de madeiras com características de resistência mecânica extremas.

4.1 SELEÇÃO DAS ESPÉCIES

A NBR 7190/97 classifica a madeira, quanto a resistência, em sete classes de resistência, três classes (C20, C25, C30) nas coníferas e quatro classes (C20, C30, C40, C60) nas dicotiledôneas. Destas, três espécies de madeiras foram selecionadas, de modo a representar as sete classes de resistências (tabela 3).

Tabela 3 - Seleção das Espécies

Nome Comum	Nome Científico	Classe de resistência	Classificação da Madeira
Pinus	<i>Pinus sp</i>	C20	Conífera exótica
cedrinho	<i>Erisma uncinatum</i>	C40	Dicotiledônea nativa
itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>	C60	Dicotiledônea nativa

Fonte: Adaptado da NBR 7190/97

Como as resistências das três classes escolhidas representam os valores mínimo, médio e máximo, validando-se o funcionamento da ferramenta, nestes domínio de resistências.

4.2 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Uma vez estabelecidas as espécies de madeira, procurou-se obter a madeira no comércio de Curitiba e foram adquiridas barras, de seção 7,5 cm x 10,0 cm, com comprimento de 2,50 m.

As barras de madeira foram selecionadas em função de sua disponibilidade, buscando atender a orientação normativa para a obtenção de amostra para os ensaios, conforme figura 25.

A posição ideal destas barras, em relação a orientação dos anéis de crescimento é o plano radial, para que o plano de cisalhamento fique em um plano paralelo aos anéis de crescimento.

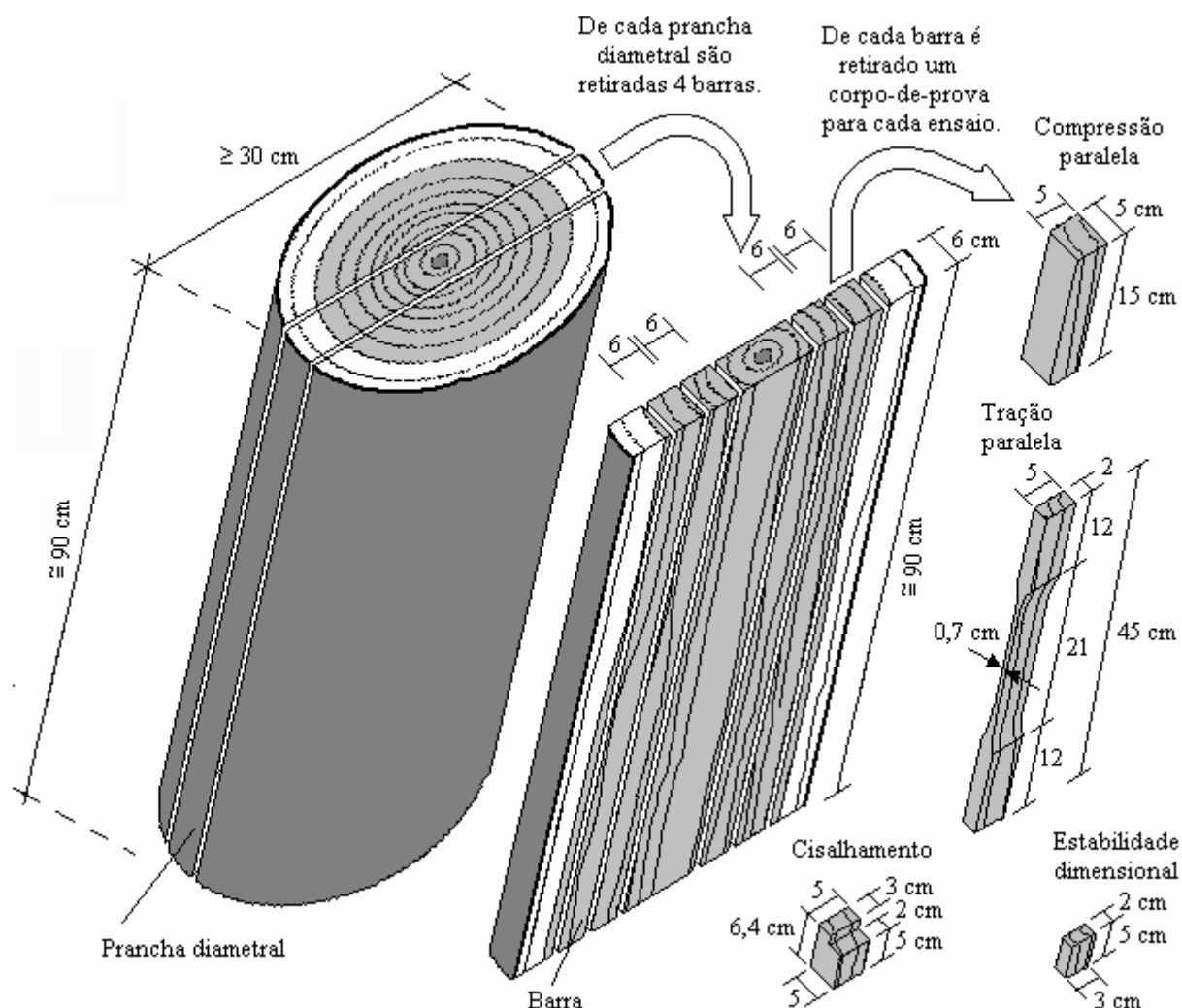


Figura 25 - Obtenção Normativa da Amostra para Caracterização de Resistência de Madeiras

Fonte: Longsdon (2007)

No mercado, não foi possível encontrar estas barras, com a orientação ideal, entretanto todos os corpos de prova da amostra adquirida possuem origem na mesma barra de madeira e atendem ao objetivo do estudo de comparar os métodos de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras com a mesma amostra.

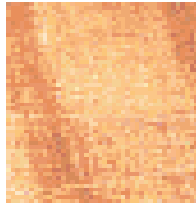

As madeiras disponíveis para compra não possuem a certificação FSC (Forest Stewardship Council), garantia que o produto é oriundo de um processo produtivo manejado de forma correta. A certificação é uma garantia de origem que

assegura a não degradação do meio ambiente e contribui para o desenvolvimento social e econômico das comunidades florestais.

A madeira usada na pesquisa foi adquirida de uma empresa formalmente constituída, com nota fiscal, desta forma a mesma está legalizada.

Na tabela 4, apresenta-se as características das madeiras escolhidas para realizar os ensaios de cisalhamento.

Tabela 4 - Características das madeiras: pinus sp, cedrinho e itaúba

Características	Pinus sp	Cedrinho	Itaúba
Gerais	Cerne e alburno indistintos pela cor; branco amarelado; brilho moderado; densidade baixa; macia ao corte grã direita, textura fina	Cerne e alburno distintos pela cor; cerne castanho avermelhado, sem brilho, grã direita e reversa; textura média e grossa	Cerne castanho-esverdeado; densidade alta; grã ondulada ou reversa; textura média
trabalhabilidade	Fácil de ser trabalhada; bom acabamento	Fácil de trabalhar, mas apresenta superfície felpuda	Difícil de ser trabalhada, presença de sílica, bom acabamento
Densidade básica (kg/m³)	420	480	800
Densidade aparente (kg/m³)	480	590	960
Resistência ao cisalhamento (MPa)	5,8	7,5	10,0
Usos	Fôrmas; forros; compensados	Estrutura de madeira; esquadrias; forros	Estrutura de madeira; esquadrias; assoalhos
Vista transversal			
Vista longitudinal			

4.3 CORPOS DE PROVA PARA PROPRIEDADES FÍSICAS

Os corpos de provas para a determinação da umidade e densidade básica e aparente têm seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 x 3,0cm e 5,0 cm de comprimento conforme figura 26. Se a distância radial entre os anéis de crescimento for maior que 4mm, a seção transversal do corpo de prova deve ser aumentada para abranger pelo menos cinco anéis de crescimento.

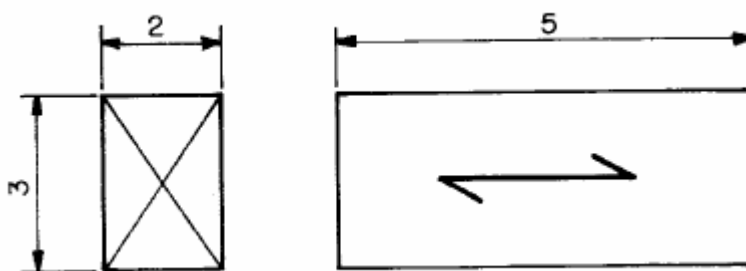


Figura 26 - Corpo de Prova para Determinação da Umidade e Densidade

Fonte: NBR7190/97

Na determinação da umidade, a massa do corpo de prova foi obtida com uma balança de precisão de 0,01g. A secagem do corpo de prova, efetua-se em estufa de secagem com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Durante o processo de secagem, a massa é medida a cada 6h, até que ocorra uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida.

Para a determinação da densidade básica e aparente, obtém-se o volume através da medição dos lados da seção transversal e do comprimento com paquímetro que tenha precisão mínima de 0,1mm.

4.4 CORPOS DE PROVAS PARA CISALHAMENTO

Nesta pesquisa foram utilizados três métodos de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira: NBR 7190/97, SANTOS NETO (1999) e por puncionamento..

O objetivo é comparar os resultados dos três métodos de ensaios de cisalhamento utilizando a mesma amostra para os três e verificar o desempenho relativo ao método de puncionamento.

Para a determinação da resistência ao cisalhamento, as medidas dos lados dos corpos de prova devem ser feitas com precisão mínima de 0,1mm e o carregamento deve ser monotônico crescente, com uma taxa de 2,5 MPa/min.

Após os ensaios de cisalhamento, deve-se retirar do corpo de prova ensaiado, material para determinar a umidade, com a finalidade de corrigir a resistência ao cisalhamento para umidade de 12%.

Para a caracterização mínima da resistência ao cisalhamento, especificada pela NBR 7190/97, ensaiam-se no mínimo de 12 corpos de prova de cada espécie de madeira.

4.4.1 NBR 7190/97

O corpo de prova definido pela NBR 7190/97 é prismático e a área de cisalhamento é de 5,0 x 5,0 cm, totalizando uma área de 25,0cm² (figura 27).

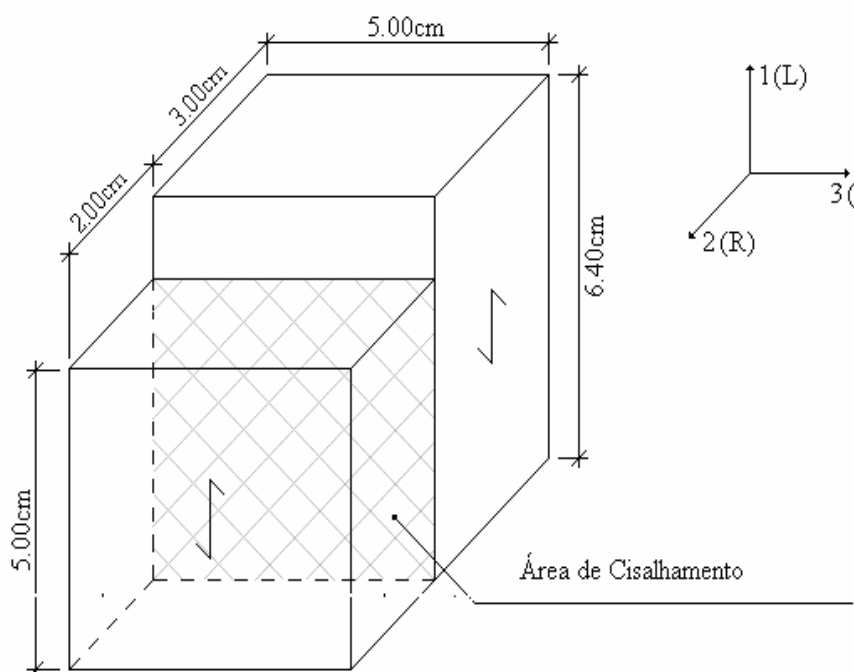


Figura 27 - Dimensões do Corpo de Prova de Cisalhamento da NBR 7190/97

Fonte: NBR 7190/97

A figura 28 é a foto do arranjo do ensaio do corpo de prova da NBR 7190/97, a madeira que se visualiza é o pinus sp.

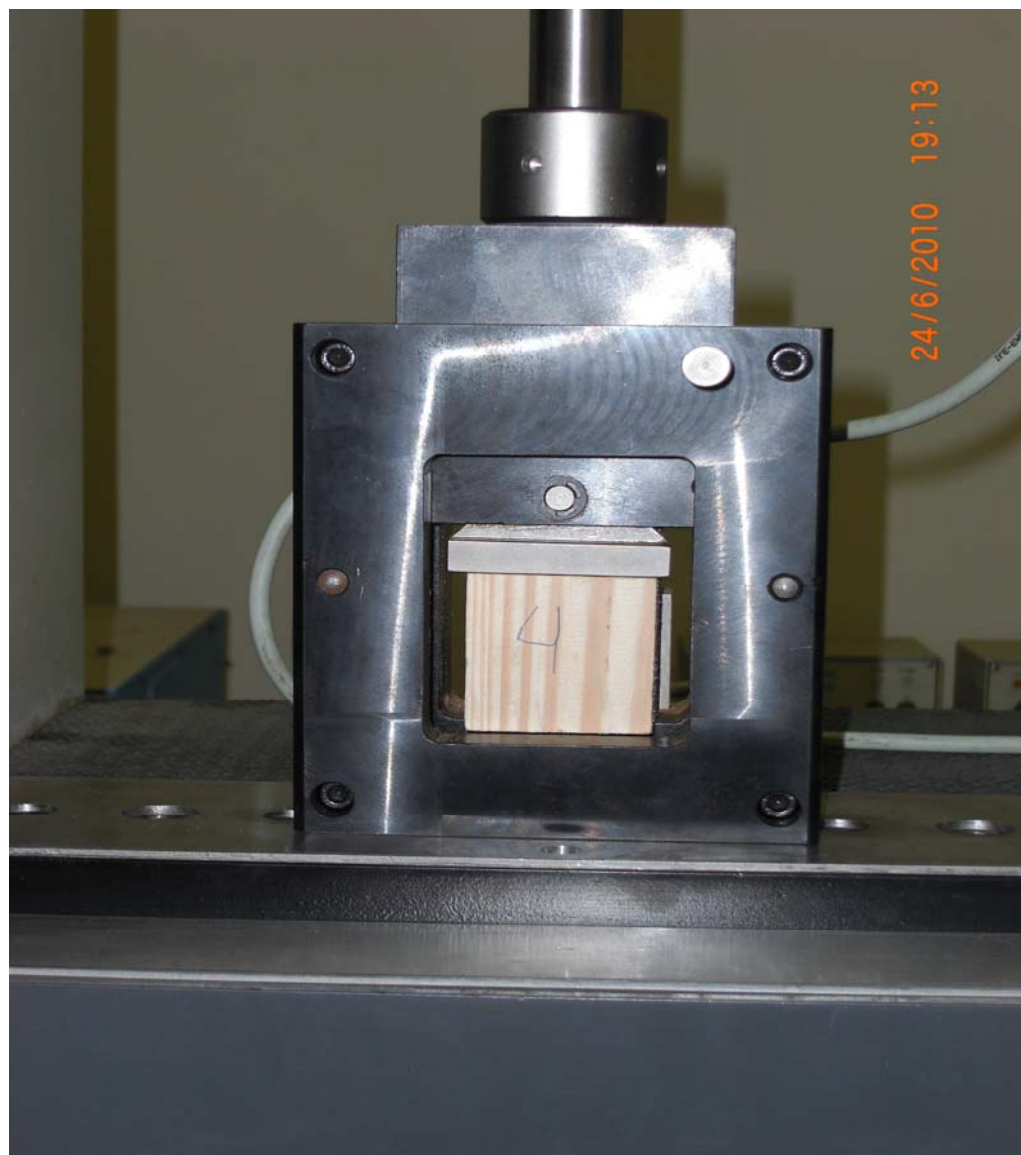


Figura 28 - Foto do Equipamento para Ensaio de Cisalhamento – NBR 7190/97

4.4.2 Santos Neto

A configuração geométrica do corpo de prova proposto por Santos Neto, figura 29, tende a reduzir os problemas causados pela rotação do corpo de prova, adotado pela NBR 7190/97.

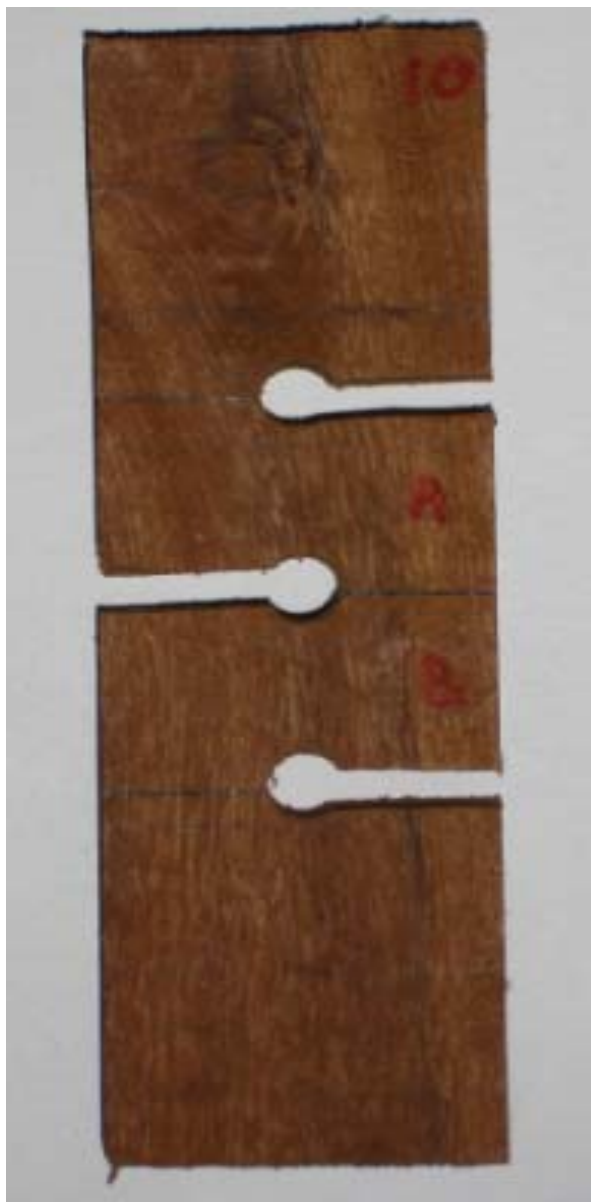


Figura 29 - Foto do Corpo de Prova – Santos Neto

O corpo de prova têm a seção retangular, com dimensão de 2,00 x 5,00 cm e comprimento de 17,50 cm, com furo de 10mm na extremidade das três fendas, para reduzir a concentração de tensões normais, na região enfraquecida.

Entre as três fendas formam-se dois planos de cisalhamento, com área de 2,00cm x 2,00 cm. Na aplicação de uma carga, as duas áreas estarão sujeitas as tensões, mas, no decorrer da atuação, que provocará a tensão de ruptura surge uma convergência de tensões para uma das áreas, causando a ruptura em uma delas. Portanto a área de cisalhamento a ser adotado para o cálculo da resistência ao cisalhamento é de 4,00 cm².

Na aplicação da carga, Santos Neto utilizou forças de tração no corpo de prova, mas nos ensaios realizados nesta pesquisa, aplicou-se a carga de compressão, pois o arranjo para a aplicação da carga de compressão é mais simples. Esta modificação, na aplicação da carga, mecanicamente produz o mesmo esforço de cisalhamento nas seções estudadas.

A figura 30, mostra o detalhe da aplicação de carga sobre o corpos de provas do método proposto por Santos Neto (1999).



Figura 30 - Foto da montagem de um ensaio Santos Neto (1999)

4.4.3 Puncionamento

Após a validação da ferramenta de puncionamento realizaram-se vários ensaios estudando uma proposta para as dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.

A seção transversal da punção é circular, com diâmetro de 4,0 cm, portanto o corpo de prova deve circunscrever o furo ocasionado pelo ensaio e deixar uma área de sobra suficiente para suportar a compressão do ensaio, atendendo o princípio de facilidade de execução. conforme a figura 31.

Para a definição da dimensão do corpo de prova, preparou-se corpos de provas com as três espécies de madeiras, variadas dimensões e espessuras (tabela 5).

Tabela 5 - Espécies, Dimensões e Espessuras dos Corpos de Provas

Espécie de madeira	Dimensão (cm)	Espessura (cm)
pinus	5,0 x 5,0	1,0
	7,5 x 7,5	1,5
	10,0 x 10,0	2,0
		3,0
cedrinho	5,0 x 5,0	1,0
	7,5 x 7,5	1,5
	10,0 x 10,0	2,0
		3,0
itaúba	5,0 x 5,0	1,0
	7,5 x 7,5	1,5
	10,0 x 10,0	2,0
		3,0

Após os ensaios corpos de prova, concluiu-se que a melhor dimensão do corpo de prova é de 7,5 x 7,5 cm, com espessura de 2,0 cm (figura 31). A adoção da espessura de 2,0 cm corresponde a uma área de cisalhamento de 25,13 cm², área equivalente ao método da NBR 7190/97, que permite o confronto direto dos resultados.



Figura 31- Foto do Corpo de Prova para o Método do Puncionamento proposto pela dissertação

O corpo de prova é obtido, partindo-se de uma barra de madeira de seção 7,5 X 7,5 cm, cortando-se transversalmente com espessura igual a 2,00cm, facilmente obtidos com a serra circular ou serra fita que disponham de um batente definindo a espessura de corte. O acabamento final da superfície onde será aplicada a carga depende da serra utilizada, podendo ser acabado com lixa fina, com cuidados para não diminuir a área desejada.

O corpo sem acabamento facilita a aplicação homogênea da carga de compressão, na medida que a irregularidade permite o amassamento dos pontos mais altos e distribuindo uniformemente as tensões de compressão.

A figura 32, apresenta-se o arranjo do ensaio por puncionamento.



Figura 32 - Arranjo do Ensaio por Puncionamento

4.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA

Após os ensaios de cisalhamento, foram realizados ensaios de umidade com os corpos-de-prova proveniente dos ensaios de cisalhamento. Adotando-se este procedimento, cada corpo-de-prova de cisalhado terá o teor de umidade correspondente.

O objetivo é corrigir as resistências ao cisalhamento com diversos teores de umidade, para a umidade padrão de 12%. A expressão (x.x) é definida pela norma NBR 7190/97.

$$f_{V12} = f_{V U\%} \cdot 1 + \frac{3 \times (U\% - 12)}{100} \quad (4)$$

Onde:

f_{V12} = resistência ao cisalhamento para a umidade padrão de 12%;

$f_{V U\%}$ = resistência ao cisalhamento para a umidade do corpo-de-prova;

$U\%$ = umidade do corpo-de-prova.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística efetuada nos resultados dos ensaios foram o cálculo da média, o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação.

LEVINE et All (1998) afirma que quando se excluem os valores fora da faixa da média aritmética ± 1 desvio padrão, 67% dos dados estão nesta faixa. Quando se adota a faixa de média aritmética ± 2 desvios padrões, 90 a 95% dos resultados estão incluídas.

Os resultados dos ensaios foram saneados, retirando-se os valores fora da faixa de média aritmética ± 2 desvio padrão. Com os dados saneados, calculou-se novamente a média, o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação.

4.7 EQUIPAMENTOS

Nesta pesquisa foram utilizados os instrumentos de aplicação de força indutores, de medição, de secagem, ferramenta para ensaio de cisalhamento (NBR7190/97) e ferramenta de puncionamento,

4.7.1 Equipamento para Aplicação de forças

A aplicação de forças em corpos de provas ocorreu através da Máquina Universal de Ensaio, com objetivo de determinar as propriedades mecânicas de cisalhamento.

O equipamento é da marca EMIC, DL-10.000, com capacidade máxima de 100kN, equipada com célula de carga de 100kN, controlada por um software específico que garante a velocidade/carga constantes e aquisição de dados de cargas e deformações dos ensaios, detalhes que podem ser observados na figura 33.

Este equipamento foi calibrado em 06 de abril de 2010, conforme o certificado de calibração nº 218/10, nos anexos da dissertação.



Figura 33 - Foto da Máquina Universal de Ensaio, EMIC, Modelo DL 10.000

4.7.2 Paquímetro Analógico

O paquímetro utilizado é da marca Pantec, com precisão de 0,05 mm e o curso máximo de 300mm. O equipamento têm como finalidade principal a obtenção das medidas das dimensões dos corpos de prova.

4.7.3 Balança Analíticas

A balança digital utilizada para a determinação da massa dos corpos de prova é da marca Marte, modelo AUW220D, com sensibilidade de 0,001gramas.

4.7.4 Estufas para Secagem

A estufa empregada na pesquisa é um equipamento com controle de temperatura de 50°C a 300°C, da marca Quimis, modelo Q-317B, que foi ajustada

na temperatura de 103°C, com a finalidade de secar os corpos de prova, na determinação do teor de umidade.

4.7.5 Ferramenta para Ensaio de Cisalhamento (NBR7190/97)

A ferramenta para o ensaio de cisalhamento é um acessório fabricado pela EMIC, necessário para a realização dos ensaios normatizado de cisalhamento paralelo às fibras (figura 34). A ferramenta foi adquirida para realização da pesquisa e para equipar o laboratório de materiais, do DACOC/UTFPR. O custo do equipamento foi de R\$7.500,00 (sete mil e quinhentos reais) com verbas da FUNTEF-Pr.



Figura 34 - Ferramenta para o Ensaio de Cisalhamento Normatizado – NBR7190/97

4.7.6 Ferramenta de Puncionamento

A ferramenta de puncionamento, é acoplada a máquina universal de ensaio, para a realização do ensaio por puncionamento.

A montagem da ferramenta de puncionamento na máquina universal de ensaio pode ser observada na figura 35 e seu desenvolvimento foi descrito no capítulo 3.



Figura 35 - Foto da Montagem do Equipamento para Ensaio de Puncionamento

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 DENSIDADE BÁSICA E APARENTE

Como estudo preliminar de caracterização são elaborados os ensaios de densidade básica e aparente para as três espécies de madeiras.

Para a obtenção dos corpos de prova, para os ensaios de densidade, obedeceu a recomendação da Norma Brasileira (NBR7190/97), extraindo-se seis corpos-de-prova, de cada espécie florestal, definida no método ou seja pinus, cedrinho e itaúba.

Na tabela 6, apresenta-se os resultados relativos ao *Pinus sp*, o resultado médio da densidade básica é 363,50 kg/m³ e da densidade aparente é 434,52 kg/m³. Os resultados estão dentro do esperado, comparativamente aos valores da tabela 4.

TABELA 6 – Resultados obtidos para os ensaios de densidade básica e aparente do *Pinus sp*.

AMOSTRA	ρ_{bas} (kg/m ³)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	364,83	430,02
2	372,44	455,32
3	359,57	431,96
4	363,87	422,38
5	354,18	425,27
6	366,09	442,19
Média	363,50	434,52
Desvio padrão	6,18	12,26
Coefficiente de Variação (%)	1,70	2,82

Os resultados obtidos para os ensaios de densidade básica e aparente para a madeira cedrinho está apresentada na tabela 7.

Na literatura encontrou-se os valores de 480kg/m³ para a densidade básica e 590 kg/m³ para a densidade aparente, conforme a tabela 4, e os resultados obtidos nos ensaios de densidade estão muito próximos portanto define-se a madeira de cedrinho.

TABELA 7 – Resultados obtidos para os ensaios de densidade básica e aparente do cedrinho

AMOSTRA	ρ_{bas} (kg/m³)	ρ_{ap} (kg/m³)
1	488,13	533,46
2	493,04	546,22
3	485,53	572,57
4	496,63	571,71
5	510,60	589,02
6	482,34	570,06
Média	492,71	563,84
Desvio padrão	10,15	20,22
Coefficiente de Variação (%)	2,06%	3,59

Na tabela 8, estão tabulados os resultados relativos a itaúba, o resultado médio da densidade básica e da densidade aparente são os maiores comparativamente entre as três espécies de madeira, resultados já esperado.

Os resultados encontrado na literatura para a densidade básica é em torno de 800kg/m³ e 960kg/m³ para a densidade aparente. Obteve-se valores médios de 705,73 kg/m³ para a densidade básica e 795,79 kg/m³ para a densidade aparente nos ensaios efetuados na madeira de itaúba. Há vários fatores que podem influenciar nestes resultados, mas as principais são a idade da planta e a posição da amostra no tronco.

Esta densidade menor da madeira de itaúba poderá resultar em menor resistência ao cisalhamento paralela às fibras da madeira.

TABELA 8 – Resultados obtidos para os ensaios de densidade básica e aparente do itaúba.

AMOSTRA	ρ_{bas} (kg/m³)	ρ_{ap} (kg/m³)
1	689,90	787,64
2	721,16	821,13
3	707,97	780,07
4	694,67	778,77
5	710,84	805,97
6	709,84	801,14
Média	705,73	795,79
Desvio padrão	11,48	16,60
Coefficiente de Variação (%)	1,63	2,09

5.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira é definida como o valor médio da tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo-de-prova prismática (NBR 7190/97). Este resultado é obtido pela razão entre a carga de ruptura pela área da seção cisalhada.

Realizou-se os ensaios de cisalhamento nas três metodologias: norma NBR 7190/97, SANTOS NETO (1999) e o proposto pela dissertação.

Os ensaios foram realizados em madeiras de três espécies e os corpos-de-prova foram retirados de uma única barra, com a finalidade de haver homogeneidade entre os corpos-de-prova para os três ensaios.

Após a realização dos ensaios de cisalhamento, foram realizados ensaios de umidade com mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento. Com estes valores da umidade, corrigiu-se os valores das tensões de cisalhamento paralelo às fibras da madeira para a umidade de 12%, como recomenda a norma NBR7190/97.

5.2.1 Ensaio de *Pinus sp*

No quadro 9 apresenta-se os resultados dos ensaios de cisalhamento, nas três metodologias, para a madeira de *Pinus sp*.

Os resultados dos ensaios proposto por SANTOS NETO (1999), não foram o esperado, portanto não haverá comparação estatística com os resultados dos ensaios da norma NBR7190/97.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira de *Pinus sp*, obtidos dos três métodos propostos

nº	NBR 7190/97			SANTOS NETO			Puncionamento		
	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)
1	16,04	6,29	7,05	15,48	36,89	40,74	14,23	6,92	7,38
2	16,45	1,34	1,52	15,03	38,86	42,39	14,69	7,20	7,78
3	16,60	5,77	6,57	16,01	44,92	50,32	14,81	7,06	7,66
4	17,97	6,20	7,30	15,73	35,42	39,39	14,59	7,25	7,82
5	17,09	5,99	6,91	15,45	46,26	51,05	14,93	7,18	7,81
6	16,77	6,77	7,74	15,75	39,54	43,99	15,34	7,03	7,74
7	16,70	7,43	8,48	16,19	37,95	42,72	14,80	6,29	6,82
8	16,19	7,35	8,27	15,47	32,34	35,71	13,52	7,62	7,97
9	17,09	6,37	7,34	15,55	37,88	41,91	13,95	5,42	5,74
10	15,66	7,81	8,67	15,10	38,52	42,10	13,96	6,80	7,20
11	13,38	6,37	6,63	15,83	38,11	42,49	14,31	6,46	6,91
12	14,99	6,01	6,55	16,04	34,17	38,31	14,49	6,63	7,12
13	15,82	5,93	6,61	15,49	38,58	42,62	14,25	7,18	7,67
14	13,24	5,88	6,10	15,04	29,27	31,94	15,47	7,22	7,97
15	15,80	6,15	6,85	15,36	37,80	41,61	12,45	7,11	7,20

A partir dos resultados tabulados na tabela 9, calculou-se a média, desvio padrão, coeficiente de variação e variância para o método da norma NBR7190/97 e método de puncionamento.

Na etapa seguinte de cálculo, retirou-se os valores expúrios (valores que estão fora da faixa de média menos duas vezes o desvio padrão e média mais duas vezes o desvio padrão), recalculando a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a variância, os resultados está na tabela 10.

A faixa considerada no método da NBR7190/97 está entre os valores 3,52 e 10,16 Mpa e foi retirada a amostra nº 12 e para o método do puncionamento a faixa está entre os valores de 6,21 e 8,57 Mpa e desconsiderou-se a amostra nº 9.

Tabela 10 – Comparação estatística dos resultados do ensaio da Norma NBR7190/97 e Método de puncionamento da madeira de *pinus*

Parâmetros	NBR 7190/97		Puncionamento	
	bruto	Saneado	bruto	Saneado
Média (MPa)	6,84	7,22	7,39	7,50
Desvio padrão (MPa)	1,66	0,79	0,59	0,39
Coefficiente de Variação (%)	24,25	10,99	7,99	5,20
Variância (MPa)	2,76	0,63	0,35	0,15

Analisando os resultados dos ensaios da madeira de pinus, pode-se concluir que:

- a média da resistência ao cisalhamento é maior no método de puncionamento;
- o desvio padrão e o coeficiente de variação do método de puncionamento é menor, portanto os resultados estão mais agrupados;
- a variância é menor no método de puncionamento.

5.2.2 Ensaio de Cedrinho

Na tabela 11 apresenta-se os resultados dos ensaios de cisalhamento, para a madeira de cedrinho.

Com estes resultados, calculou-se a média, desvio padrão, coeficiente de variação e variância para o método da norma NBR7190/97 e método de puncionamento e são apresentados na tabela 12.

Para o saneamento da amostra, a faixa considerada no método da NBR7190/97 está entre os valores 2,76 e 14,44 Mpa e foi retirada a amostra nº 12 e nº14, para o método do puncionamento a faixa está entre os valores de 5,04 e 9,36 Mpa e desconsiderou-se a amostra nº 2.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira de cedrinho, obtidos dos três métodos propostos

nº	NBR 7190/97			SANTOS NETO			Puncionamento		
	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)
1	19,54	7,66	9,40	17,55	38,21	44,57	17,55	7,44	8,68
2	19,56	8,75	10,73	16,84	43,91	50,28	16,84	4,21	4,82
3	20,06	8,58	10,65	16,69	36,60	41,75	16,69	5,56	6,35
4	19,59	6,45	7,92	17,11	24,79	28,60	17,11	6,07	7,00
5	19,85	7,82	9,67	17,73	47,69	55,89	17,73	6,39	7,49
6	19,81	7,51	9,28	19,25	22,67	27,60	19,25	6,76	8,23
7	19,33	7,49	9,14	19,95	30,77	38,11	19,95	5,87	7,27
8	19,85	8,34	10,31	20,49	30,15	37,83	20,49	6,34	7,96
9	20,87	7,93	10,04	18,03	26,24	30,98	18,03	7,57	8,94
10	20,16	8,35	10,39	16,91	34,67	39,78	16,91	4,85	5,57
11	21,68	7,22	9,31	19,78	29,89	36,87	17,50	6,07	7,07
12	20,32	1,24	1,55	20,39	35,62	44,58	18,07	5,85	6,92
13	19,24	7,80	9,49	20,33	39,50	49,36	18,10	5,90	6,98
14	19,36	1,37	1,68	19,58	33,84	41,53	17,25	6,45	7,47
15	21,24	7,38	9,43	17,91	31,38	36,95	16,95	6,32	7,26

Após a análise estatística dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira de cedrinho, apresentada na tabela 12, pode-se concluir que:

- a média do método de puncionamento é maior no método da NBR7190/97;
- o desvio padrão antes de sanear os dados é maior no método da NBR7190/97 e após o saneamento dos dados, o desvio padrão é maior no método do funcionamento;
- a variância no método do puncionamento é maior;
- apesar dos dados estarem dispersos, o coeficiente de variação no método do puncionamento é de 12,00%

Tabela 12 – Comparação estatística dos resultados do ensaio da Norma NBR7190/97 e Método de puncionamento da madeira de cedrinho

Parâmetros	NBR 7190/97		Puncionamento	
	bruto	Saneado	bruto	Saneado
Média (MPa)	8,60	9,67	7,20	7,37
Desvio padrão (MPa)	2,92	0,76	1,08	0,88
Coefficiente de Variação (%)	33,97	7,86	14,96	12,00
Variância (MPa)	8,53	0,58	1,16	0,78

5.2.3 Ensaio de Itaúba

No quadro 13 apresenta-se os resultados dos ensaios de cisalhamento, para a madeira de *itaúba*.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeira de itaúba, obtidos dos três métodos propostos

nº	NBR 7190/97			SANTOS NETO			Puncionamento		
	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)	Umidade (%)	f _v (Mpa)	f _{v12} (Mpa)
1	15,47	9,22	10,18	14,02	66,93	71,00	15,64	11,46	12,71
2	17,46	8,67	10,09	13,65	60,16	63,13	16,24	8,90	10,03
3	18,41	9,29	11,08	14,97	66,49	72,41	17,35	9,14	10,61
4	17,35	9,44	10,95	14,47	61,11	65,65	17,54	9,72	11,34
5	16,09	9,14	10,26	13,32	55,92	58,14	17,34	10,92	12,67
6	16,78	8,71	9,96	15,04	64,14	69,99	17,72	10,37	12,15
7	16,09	8,55	9,60	14,20	56,28	60,00	15,02	11,21	12,22
8	17,01	8,64	9,93	15,27	59,58	65,42	14,87	10,95	11,89
9	19,16	8,45	10,26	14,82	70,02	75,93	14,29	9,81	10,49
10	17,41	9,45	10,98	12,92	58,90	60,51	17,24	9,34	10,81
11	15,99	8,98	10,06	15,63	60,60	67,19	17,37	10,90	12,65
12	16,09	9,17	10,29	15,52	79,76	88,18	18,02	9,87	11,65
13	14,39	8,26	8,85	15,32	56,79	62,45	19,84	10,18	12,57
14	16,99	8,92	10,25	14,78	73,39	79,51	19,91	8,57	10,60
15	16,62	9,04	10,29	13,80	63,50	66,93	17,02	10,47	12,05

A partir dos resultados tabulados na tabela 13, calculou-se a média, desvio padrão, coeficiente de variação e variância para o método da norma NBR7190/97 e método de puncionamento.

A faixa considerada no método da NBR7190/97 está entre os valores 9,09 e 11,31 Mpa e foi retirada a amostra nº 13 e para o método do puncionamento a faixa está entre os valores de 9,79 e 13,47 Mpa e considerou-se todos os valores.

Tabela 14 – Comparação estatística dos resultados do ensaio da Norma NBR7190/97 e Método de puncionamento da madeira de itaúba

Parâmetros	NBR 7190/97		Puncionamento	
	bruto	Saneado	bruto	Saneado
Média (MPa)	10,20	10,30	11,63	11,63
Desvio padrão (MPa)	0,56	0,43	0,92	0,92
Coeficiente de Variação (%)	5,44	4,14	7,88	7,88
Variância (MPa)	0,31	0,18	0,84	0,84

Analisando os resultados da análise estatística dos ensaios da madeira de itaúba, pode-se concluir que:

- a média da resistência ao cisalhamento é maior no método de puncionamento;
- o desvio padrão e o coeficiente de variação do método de método da NBR7190/97 é menor, portanto os resultados estão mais agrupados;
- a variância é menor no método da NBR7190/97.

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Inicialmente apresentou-se o problema relativo a obtenção da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

O problema é evidenciado pela importância das proporções entre as forças aplicadas para o surgimento das tensões de cisalhamento nas seções induzidas para este fim e o surgimento de tensões de compressão nas seções onde aplicam-se as forças do ensaio.

Na revisão bibliográfica são citados oito trabalhos dedicados ao tema e aos problemas inerentes, todos trazem contribuições mesmo que sejam a negativa do sucesso do método estudado.

Na justificativa desta dissertação, descreve-se os problemas devidos ao aparecimento de esforços secundários provenientes de rotação do corpo, proporção entre as tensões de cisalhamento como motivação para apresentar um método mais preciso.

Para a solução foram levantadas duas hipóteses:

1ª Hipótese: corrigir a rotação do corpo realizando um ensaio simétrico.

Conclui-se que a hipótese não foi confirmada. Resolve-se o problema de rotação do corpo de prova, mas realça o problema de ruína por compressão, em função da proposta de aumentar a área de cisalhamento e em outra tentativa, aumenta-se a espessura da placa de aplicação da carga e surgem rupturas devidas a campos de tração, provenientes do efeito de viga formada pelo duplo apoio com cargas distribuída na face superior do corpo

Confirmada a negativa da hipótese logo no início da pesquisa, esta foi rejeitada.

2ª Hipótese: Induzir a ruptura do corpo de prova por cisalhamento através de puncionamento da amostra por um sistema de macho e fêmea.

Após a realizados 135 ensaios, observando-se o rompimento dos corpos de provas e análise dos resultados, conclui-se que:

O método de ensaio proposto por Santos Neto (1999) apresentou resultados muito diferentes do esperado, com valores de até 600% acima dos demais métodos. Decide-se rejeitar os resultados para a análise. A grande diferença pode ter ocorrida por interpretação e aplicação indevida do método ou o método

pode ser inadequado. Seguindo o objetivo da pesquisa não cabe discutir a validade e quais são os problemas, porém seus valores não servem para suporte de discussão.

Os resultados dos ensaios com os métodos NBR7190/97 e método proposto, apresentaram resultados uniformes, com baixo desvio padrão e resultados da tensão de ruptura ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira muito próximos.

A uniformidade dos resultados e a proximidade dos valores permitem admitir a validade do método proposto.

A 2ª hipótese levantada para a solução dos problemas ocasionadas pelos ensaios de determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira é verdadeira, portanto a hipótese confirma a tese.

O método de puncionamento proporciona vantagens em relação a outros métodos:

- Facilidade na preparação do corpo de prova para o ensaio;
- O arranjo para a realização do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira é mais simples;
- O custo da ferramenta é mais barato em relação, em torno de 25% em relação a ferramenta normatizada e;
- Facilidade na reprodução do método.

7 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se os seguintes estudos para a continuidade da pesquisa:

Realizar a modelagem numérica, por meio de elementos finitos, para estudar melhor a dimensão do corpo de prova e a sua espessura;

Estudar a folga entre o macho e a fêmea do dispositivo de puncionamento e seu efeito nos resultados;

Verificar a influência da velocidade de aplicação da carga nos resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira;

Instrumentar os corpos de prova com strain gage, na parte inferior do corpo de prova, para verificar o surgimento de outros tipos de esforços;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Madeira**. NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997.

BURGER, L. M., RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Editora Nobel, 1991.

CALIL JÚNIOR, C.; BARALDI, L.T.; STAMATO, G. C.; FERREIRA, N. S. S. **Estruturas de madeira**. São Carlos: USP – Departamento de Engenharia de Estruturas, 2000.

DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. **Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente**. Scientia Florestalis, n.65, p.102-113, 2004.

EVANS, J.L.W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. **Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones**. Forest Products Journal, v.50, n.7/8, p.75-87, 2000.

FERREIRA, C. A. T.; FUSCO, P. B. **Considerações a Respeito da Determinação da Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira**. 1994. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. 1994.

FERREIRA Martins & Filhos. **Guia da Madeira**. Braga, 2008.

GONZAGA, Armando Luiz. **Madeira: Uso e Conservação**, Editora Ipham/Monumenta, Brasília, 2006.

KOLLMAN, F.F.P.; CÔTÊ JUNIOR, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin: Springer, 1968-1984.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000.

LOGSDON, N. B. **INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a Madeira: Informações sobre 90 Espécies Comerciais**. Manaus: Sebrae, 2000.

MENDES, A. P. **Resistência da Madeira ao Cisalhamento**, 1984, 157p. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

MORESCHI, J. C. **PROPRIEDADES DA MADEIRA**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 150P. Apostila, UFPR.

OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, J. de C. **Variação radial da retratibilidade e Densidade Básica da Madeira de *Eucalyptus saligna* Sm**, Viçosa – MG: Revista *Árvore*, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6.ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2003.

SANTOS NETO, A. B. S. **Cisalhamento em Corpos de Prova de Madeira**. 1999. 146p. Dissertação – Mestrado em Engenharia /civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da Densidade Básica e Características Anatômicas da Madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SIMPSON, W. T. **Dry Kiln Operator's Manual**. EUA: USDA, 1991.

Szücs C.A. et al **Estruturas de Madeira**,2006, 185p. apostila, UFSC.

WIANDY, J. E.; ROWELL, R. M. **The Chemistry of Wood Strength. In: The Chemistry of Solid Wood.** Washington, D.C. American Chemical Society (1984).