

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Estruturas

VELOCIDADE DE ENSAIO
NA FLEXÃO DE PEÇAS DE MADEIRA

Eng.º Rodrigo Ismael Castro Otto

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.



São Carlos, julho de 1985

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Doutor João Cesar Hellmeister pela dedicação com a qual me orientou.
- Aos meus pais, Ismael e Martha, pelo despreendimento, amor, confiança, paciência e apoio econômico.
- A Maria José pelo carinho e companhia em todos os momentos e a Seus pais Armando e Maria Luiza.
- Ao Professor Doutor Carlito Calil Junior pela atenção, apoio e colaboração no desenvolvimento da parte experimental.
- Ao Professor Doutor Francisco Antonio Rocco Lahr, pelo incentivo nos momentos difíceis e pela contribuição na realização do trabalho.
- À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pela oportunidade para realização desta pesquisa.
- A Neide Goi pela eficiente colaboração na pesquisa bibliográfica.
- Ao José Francisco do Nascimento Filho pela amizade e datilografia.
- Ao Silvio Antonio Ferro, pela colaboração durante o trabalho experimental.
- Ao Arnaldo Floro de Souza e ao Aparecido Galindo pela preparação dos corpos de prova.
- Ao Roberto Galindo pela execução dos desenhos.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na fase de redação desta dissertação.
- A todos os que de uma ou outra forma contribuíram para realização do trabalho.

A meus pais, Ismael e Martha

"No te preocupes si vās despacio, preocupate cuando no consigas avanzar" (Meu pai em uma de suas cartas).

RESUMO

Neste trabalho é estudada a influência da velocidade de ensaio nos parâmetros de resistência e de elasticidade da madeira na flexão.

A ampla revisão bibliográfica contribuiu para estabelecer critérios para o planejamento dos ensaios.

Para a obtenção do Módulo de Elasticidade foram ensaiados corpos de prova de Peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), em diferentes velocidades de ensaio, abaixo do limite de proporcionalidade. Foi também considerada a influência da velocidade de ensaio no valor do limite de proporcionalidade.

Os ensaios, a partir do limite de proporcionalidade e até a ruptura do corpo de prova, foram executados com dois tipos de velocidade: velocidade de carga constante e velocidade de deslocamento constante.

Através dos resultados foi avaliada a validade dos ensaios na máquina classificadora eletro-mecânica e no chamado ensaio de obra para peças estruturais de madeira.

ABSTRACT

In this dissertation the influence of the testing on the parameters of strength and of the elasticity of the wood on bending are studied.

Comprehensive literature review helped to establish criteria for the design of the experiment.

Specimens of Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*) were tested to obtain modulus of elasticity under a few different speeds of testing within the proportional limit. The influence of the speed of testing on the value of the limit of proportionality was also considered.

From the proportional limit until the rupture of the specimen the tests were conducted at two different speeds: at a constant speed of load and at a constant speed of deflection.

Using the results of the tests, the validity of the tests of the "grade Machine" and of the so called "ensaio de obra" for grading structural pieces of wood, was evaluated.

SUMÁRIO

	pag.
INTRODUÇÃO.....	I
1 - Terminologia.....	1
2 - Evolução do Conhecimento Experimental.....	5
3 - Evolução do Estudo da Velocidade de Ensaio.....	20
4 - Situação Atual do Problema Face às Normas Internacionais	39
5 - Materiais, Equipamentos e Ensaios Preliminares.....	57
6 - Velocidade de Ensaio x Módulo de Elasticidade à Flexão.	65
7 - Apresentação e Análise de Resultados.....	71
8 - Velocidade de Carga x Velocidade de Deslocamento. Estu- do Experimental Complementar.....	88
9 - Conclusões e Proposta de Novos Trabalhos.....	97
10 - Referências Bibliográficas.....	100
11 - Bibliografia.....	105

INTRODUÇÃO

As construções de madeira remontam aos mais remotos tempos da vida do homem, tendo através dos tempos acompanhado o desenvolvimento das principais civilizações constituindo-se em testemunhas da cultura e do progresso na arte de construir edificações, influenciando todas as formas arquitetônicas, desde os templos gregos até as construções mulçulmanas.

Efetivamente, durante muitos séculos, as estruturas de madeira fizeram parte dos castelos, dos fortes de defesa, com escadas, pontes-levadiças, vigas, etc.; tudo isto com base num conhecimento empírico e tradicional sobre as características da madeira e seu comportamento nas estruturas.

No final do século XIX, a confiança na construção de madeira alcançou um limite de evolução, imposto pela própria natureza do material, orgânico e anisotrópico. Simultaneamente com o rápido progresso das técnicas de utilização do aço e do concreto armado nas construções, no início do grande desenvolvimento industrial, as construções de madeira, cederam seu lugar para os "novos materiais" e assim, a crise foi se tornando cada vez mais aguda, levando as construções de madeira a um período de decadência.

Nas últimas décadas tem-se conseguido avanços nos conhecimentos das características mecânicas da madeira e na tecnologia de sua aplicação, permitindo novas concepções estruturais, e dimensionamento com base nos princípios da Resistência dos Materiais e da Estática das Estruturas.

Os projetos de estruturas de madeira atuais deverão explorar ao máximo a moderna tecnologia da madeira, sem prejuízo dos conceitos de segurança das estruturas.

O conhecimento das características mecânicas do material depende diretamente dos métodos de ensaio. Existe uma variada gama de métodos de ensaio sendo seguidos nos países onde existem instituições de pesquisa da madeira e das estruturas de madeira. No Brasil é seguido o método da NBR 6230/80, adotado há mais de 50 (cincoenta) anos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e há mais de trinta anos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Um bom e racional aproveitamento da madeira nas estruturas depende, em grande parte, do conhecimento das reais caracterís

ticas mecânicas da madeira, fazendo-se necessária a classificação das peças de madeira a serem utilizadas.

Com o objetivo de conhecer as características mecânicas das peças de madeira, são realizados vários ensaios. Neste trabalho é realizada uma análise experimental da influência da velocidade de de ensaio em alguns parâmetros de resistência e de elasticidade da madeira.

1 - TERMINOLOGIA

1.1 - Introdução

No decorrer deste trabalho é necessária a utilização de termos técnicos da literatura internacional, nem sempre muito comuns, ou eventualmente mal traduzidos para o português.

Para o estabelecimento de uma linguagem comum é necessária a definição dos conceitos de alguns dos termos técnicos usados, estabelecendo-se assim o significado com o qual são empregados neste trabalho.

1.2 - Alguns Termos Usados no Trabalho

1.2.1 - Tensão

É a força interna por unidade de área responsável pela resistência às forças externas, as quais tendem a provocar deformações num corpo. Pode ser expressa em kgf/cm^2 , KN/cm^2 , PSI, etc.

1.2.2 - Deformação

É chamada de deformação a variação do tamanho ou forma de um corpo de prova. As deformações podem ser produzidas de várias maneiras, por cargas, mudanças de temperatura, etc. São usualmente expressas em unidade de comprimento.

1.2.3 - Deformação Específica

É a variação do tamanho, ocorrido num corpo, dividida pelo comprimento na direção da deformação, sendo uma razão entre comprimentos é adimensional.

1.2.4 - Deslocamento

É a mudança de posição de um ponto situado no corpo, em relação a um referencial externo. Os deslocamentos são expressos em unidades de comprimento tais como: m, cm, mm, pol, etc.

1.2.5 - Carga Estática

É chamada de carga estática a carga aplicada gradualmente num corpo de prova.

1.2.6 - Flexão Estática

Flexão estática é a produzida pela atuação de uma carga estática.

1.2.7 - Duração do Esforço

É o tempo durante o qual um esforço é mantido com a mesma intensidade.

1.2.8 - Tempo de Carregamento

É o tempo requerido para completar a aplicação da carga máxima num corpo de prova.

1.2.9 - Limite Elástico

É a maior tensão que o material é capaz de suportar sem deformação permanente após a cessação dos esforços. É expresso em kg/cm^2 , KN/cm^2 , PSI, etc.

1.2.10 - Limite de Proporcionalidade

Também chamado de limite elástico de proporcionalidade, é a maior tensão que o material pode suportar, mantendo a proporcionalidade entre as tensões e as deformações, isto é segundo a lei de Hooke. É expresso em kgf/cm^2 , KN/cm^2 , PSI, etc.

1.2.11 - Resistência Última

É a máxima tensão que o material pode suportar sob aplicação gradual de carga. É expressa em kgf/cm^2 , KN/cm^2 , PSI, etc.

1.2.12 - Módulo de Ruptura

O módulo de ruptura é o valor da resistência última na flexão. É calculado a partir da fórmula da tensão de flexão no regime elástico, usando o máximo momento atuante antes da ruptura. É expresso em kgf/cm^2 , KN/cm^2 , PSI, etc.

1.2.13 - Velocidade de Ensaio

O termo velocidade de ensaio é utilizado para definir a velocidade ou a taxa de aplicação das cargas, das deformações, dos deslocamentos, das flechas, das tensões, das deformações específicas, etc. São sempre expressas por unidade de tempo. Exemplos: KN/min ; kgf/mm/min ; mm/mm/min ; $\text{kgf/cm}^2/\text{min}$, etc.

1.2.14 - Velocidade de Carga

A velocidade de carga é a razão entre a carga aplicada e a unidade de tempo. As unidades mais comuns para velocidade de carga são KN/min , kgf/min , lbf/min .

1.2.15 - Velocidade de Deformação

A razão entre a deformação ocorrida no corpo de prova e a unidade de tempo é chamada de velocidade de deformação, as unidades mais utilizadas são: mm/min , cm/min , pol/min , mm/seg , etc.

1.2.16 - Velocidade de Deslocamento

O termo velocidade de deslocamento é usado para indicar o deslocamento de um ponto situado num lugar qualquer, do corpo de prova ou não, em relação a um referencial externo, num certo período de tempo. As unidades mais frequentes são: mm/min , cm/min , mm/seg , etc.

1.2.17 - Taxa de Tensão

A taxa de tensão é a tensão resultante no corpo de prova por unidade de tempo. É uma medida indireta, pois não é usual me-

dir-se tensão num corpo de prova. Normalmente é avaliada em função da carga aplicada. É expressa em $\text{kgf/cm}^2/\text{min}$; $\text{KN/cm}^2/\text{min}$, PSI/min , etc.

1.2.18 - Taxa de Deformação

O termo taxa de deformação é utilizado para indicar a deformação específica do corpo de prova por unidade de tempo. A taxa de deformação pode ser designada como velocidade de deformação específica, as unidades nas quais comumente é expressa, são: mm/mm/min , cm/cm/min , pol/pol/min , etc.

2 - EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 - Introdução

A ciência dos materiais tem evoluído rapidamente, procurando sempre encontrar soluções novas e alternativas que de alguma forma preencham satisfatoriamente as necessidades sempre crescentes das mais diversas áreas em desenvolvimento tecnológico.

A construção civil tem utilizado, através dos séculos, vários materiais, com os quais tem alcançado rápido desenvolvimento. Durante muito tempo a madeira ocupou um lugar de privilégio, este fato não tem se repetido neste último século, caracterizado por uma luta técnico-científica que visa a melhor e mais racional utilização dos materiais de construção.

Para atingir o nível de conhecimento atual sobre as propriedades físicas e mecânicas dos materiais foram necessários vários séculos, ao longo dos quais, os cientistas, através do desenvolvimento da experimentação e estudos teóricos, foram fornecendo aos construtores precisas informações acerca dos materiais a serem empregados numa dada estrutura. No cálculo de uma estrutura, o engenheiro usa seus conhecimentos de Teoria das Estruturas para determinar as tensões e deslocamentos que ocorrerão nos vários elementos e os da Resistência dos Materiais para calcular as seções necessárias que resistirão às tensões compatibilizando-as com os deslocamentos. Estes conhecimentos são necessários para o cálculo de uma estrutura segura e eficiente, o que não implica na impossibilidade da construção sem esses conhecimentos, pois, os Egípcios, assim como os Gregos e os Romanos com pequenos conhecimentos, utilizando o método de tentativa e erro, realizaram grandes obras, muitas das quais permanecem até os nossos dias.

A evolução do conhecimento da madeira como material, não deve ser considerado isoladamente, pois, os vários ensaios com este material forneceram dados acerca de sua resistência, dados estes que contribuíram para o desenvolvimento da teoria da elasticidade; razão esta pela qual os ensaios mecânicos de resistência são considerados como o primeiro passo na história.

Na época dos Gregos e Romanos eram os "Escribas" os encarregados de descrever em textos os conhecimentos da época. Com a

queda do Império Romano estes manuscritos se tornaram escassos - razão pela qual as informações técnicas praticamente desapareceram.

O desenvolvimento do Prelo*, na metade do século XV, facilitou muito a divulgação dos conhecimentos técnico-científicos da época, porém, Leonardo da Vinci (1452 - 1519) que seria um grande homem em qualquer época, não imprimiu nenhum dos seus manuscritos os quais, embora tenham sobrevivido, não foram amplamente divulgados. Isto motivou uma espera de quase 100 anos para o aparecimento de novas contribuições na Resistência dos Materiais; o que não significa que após a morte de Leonardo da Vinci, não houve produção de literatura científica, embora a divulgação de avanços nas técnicas construtivas e nos conhecimentos dos materiais de construção tenha sido escassa ou nula. As técnicas construtivas empregadas por arquitetos da época foram divulgadas através de livros de arquitetura de mestres como Palladio (1570) e Serlio (1584) (1).

2.2 - Desenvolvimento Experimental

A ciência dos materiais tem um real avanço a partir do século XVII com os trabalhos desenvolvidos por Galileu Galilei (1561 - 1642); foi o primeiro a apresentar contribuição à Teoria da Elasticidade e à Resistência dos Materiais com seu trabalho intitulado "Duas Novas Ciências", parte do qual trata das propriedades mecânicas da madeira e da resistência das vigas (2).

Para determinar a "Resistência Absoluta à Fratura" Galileu realizou vários ensaios em peças de madeira, na flexão ele realizou ensaios para romper uma viga de madeira em balanço, figura (2.1).

Na maneira da realização do ensaio a ruptura ocorreu por rotação em torno do ponto B. Galileu concluiu, incorretamente haver uma distribuição de tensões na seção A-B por tração uniforme, como representa a figura (2.2).

* Antiga prensa de imprimir, de madeira.

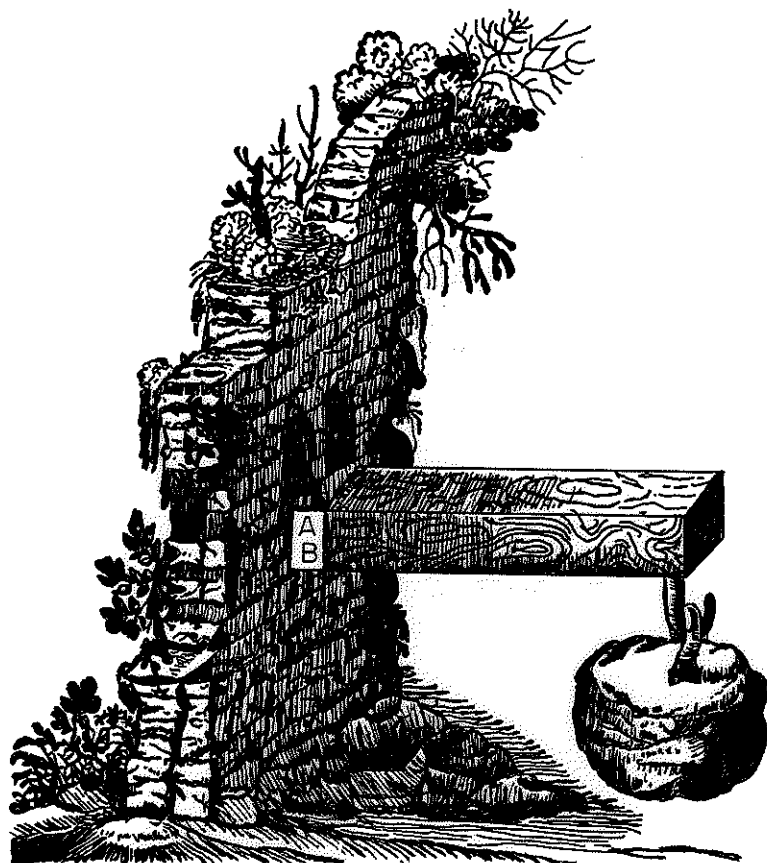


Figura 2.1 - Ensaio de Flexão Realizado por Galileu Galilei

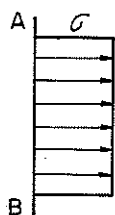


Figura 2.2 - Diagrama de Tensões na Ruptura de uma Viga em Balanço segundo Galileu Galilei

Edmê Mariotte (1620 - 1684) realizou ensaios em peças de madeira para verificar sua teoria do comportamento das vigas. Os resultados de seus ensaios foram publicados em 1680 e traduzidos para o inglês em 1718 sendo a parte dedicada às vigas não muito extensa, porém, sua teoria da flexão de vigas mostrou uma evolução significativa com relação a de Galileu Galilei (3). Mariotte realizou dois tipos de ensaios para verificação da "Teoria da Flexão de Vi-

gas" e apresentou um novo diagrama de Tensões (figura 2.3). Os ensaios realizados foram de flexão e de tração paralela às fibras em corpos de prova cilíndricos. Para o ensaio de flexão o corpo de prova era composto de um cilindro de madeira de 1/4" (0,635 cm) de diâmetro e 4" (10 cm) de comprimento, disposto de forma a ficar em balanço. Na extremidade livre, era, pendurada a massa necessária para causar a flexão na peça, figura 2.4.

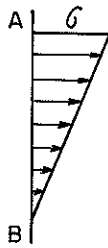


Figura 2.3 - Diagrama de Tensões na Ruptura de uma Viga em Balanço, apresentado por Mariotte

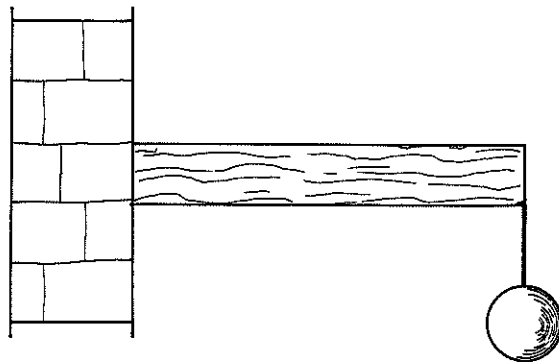


Figura 2.4 - Ensaio de Flexão Realizado por Mariotte

No ensaio de tração utilizou um corpo de prova cilíndrico, esculpido em madeira, apresentando seção central com 1/4" (0,635 cm) de diâmetro, permitindo pendurar a massa necessária para a ruptura, como é apresentado na figura (2.5).

Estes ensaios não chegaram a satisfazer plenamente a Mariotte, o qual atribuiu, a diferença encontrada, ao fator tempo, isto é, ao tempo de atuação da carga. Sendo maior, (o tempo), pensou Mariotte, seria confirmada através do ensaio e considerou o diagrama triangular de tensões, figura 2.3, como válido para a ruptura na flexão no qual, a seção, é suposta como sendo tracionada com tensão máxima no ponto A, decrescente até chegar ao ponto B com tensão nula.

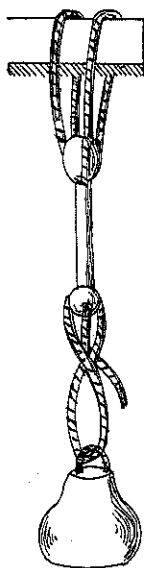


Figura 2.5 - Ensaio de Tração Segundo Mariotte

Na Inglaterra, no ano de 1664, foi realizado um encontro da Sociedade Real onde foram apresentados os primeiros resultados de ensaios realizados para a determinação da resistência da madeira. Na organização destes ensaios estava Robert Hooke (1635 - 1703) que realizou vários ensaios, alguns de flexão, utilizando abeto *abies, sp*, carvalho *Quercus, sp*, freixo *fraxinus, sp*. Os corpos de prova tinham as dimensões: $1/2" \times 1/2" \times 12"$ (1,27 x 1,27 x 30,48) cm^3 ; não foi tirada nenhuma conclusão acerca da relação entre a resistência e as dimensões dos corpos de prova, mas foi proposto o prosseguimento dos ensaios com a sugestão de ser feito o estudo da influência da idade da árvore, dos nós, da "consistência" dos diferentes solos e partes da árvore e dos deslocamentos antes da ruptura.

Aparentemente preocupado com a densidade da madeira e sua relação com a resistência, Hooke realizou mais uma série de ensaios com as mesmas espécies de madeira. Os corpos de prova tinham 1" (2,54 cm) de espessura e 2' (60,96 cm) de comprimento. Para isto os corpos de prova foram pesados, e determinado a seguir, quantas vezes a carga da ruptura foi maior do que o peso do corpo de prova. Entretanto nenhuma informação foi acrescentada. Através de outros ensaios ele determinou a existência da relação linear entre carga e deformação afirmando ainda: "o mesmo será encontrado, se forem realizados ensaios com peças fletidas de madeira seca, se uma das suas extremidades for engastada na posição horizontal e a outra

carregada fazendo a peça fletir"(3).

A relação linear entre carga e deformação, chamada de "Lei de Hooke" é mais conhecida pelo enunciado "as tensões são proporcionais às deformações".

E assim, pouco a pouco, foi crescendo mais e mais o conhecimento da Teoria das Estruturas e Resistência dos Materiais. Um grande impulso foi dado no final do século XVII através dos trabalhos de Parent (1666 - 1766) o qual trabalhando com madeira corrigiu os erros de Mariotte e usando a lei de Hooke, pela primeira vez, chegou à expressão correta da carga de ruptura para vigas fletidas (4).

$$P = \frac{b d^2 \sigma}{6l}$$

Continuando com seu trabalho comparou suas hipóteses teóricas com os resultados experimentais de Mariotte e encontrou ainda diferença entre elas. L.G. Booth (5) atribuiu esta discrepância ao fato de Mariotte ter feito ensaios com carga de ruptura e tração muito baixa e ter considerado a distribuição de tensões linear até à ruptura. Tendo chegado ao diagrama correto, Parent não conseguiu exprimir sua teoria, pois não era um escritor de fácil expressão (6), assim sendo, os cientistas, continuaram usando a teoria de Mariotte. Em 1707 Parent divulgou os resultados de seus ensaios de flexão nos quais variou as condições de apoio; as vigas eram dispostas em três situações: em balanço, simplesmente apoiadas e bi-engastadas. A viga em balanço tinha a metade do vão das outras e Parent encontrou a relação 7:12:18, para a resistência das vigas ensaiadas.

Petrus van Musschenbroek (1692-1761) realizou uma grande quantidade de ensaios com várias espécies de madeira, relacionando a resistência à tração paralela com as várias partes da árvore e, realizando ensaios de flexão com sua máquina de ensaios (fig. 2.6) determinou a relação entre a carga de ruptura de uma viga bi-apoiada e uma engastada, dependendo da localização da seção da qual ocorre a ruptura. Os valores encontrados por Musschenbroek, sendo P = a carga de ruptura da viga simplesmente apoiada são:

a)- $2P$, para a viga bi-engastada, com ruptura no meio do vão.

b)- Quando a ruptura, na viga bi-engastada, ocorre no meio do vão e no engaste, a carga será $2,5P$.

c)- A carga necessária, quando a ruptura ocorrer nas duas extremidades engastadas e no meio da viga, será $3P$.

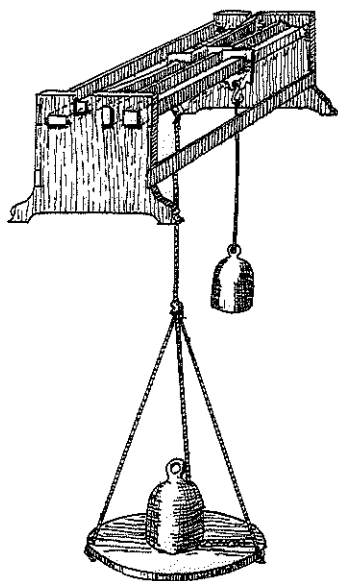


Figura 2.6 - Máquina de Ensaio de Flexão de Musschenbroek

Segundo L.G. Booth (8), esta é provavelmente, a primeira descrição da ocorrência de uma redistribuição de esforços numa estrutura.

Uma publicação de Bernard de Forrest Belidor (1693-1761) divulga os resultados de vários ensaios de flexão feitos com madeiras, obtidas no estudo experimental, para a confirmação do fato da resistência das vigas de seção retangular ser proporcional a bd^2 . Ele realizou vários ensaios repetindo cada um três vezes e fez a avaliação através das médias. Os corpos de prova tinham diferentes dimensões e, em todos os casos, a carga foi aplicada no meio do vão.

Os problemas de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas, até então tratados, na sua maioria, experimentalmente, começaram com Jacob Bernoulli (1654-1705) e Leonard Euler (1707 - 1783) a ser analisados teoricamente.

Examinando o comportamento de uma viga em balanço, Bernoulli encontrou a proporcionalidade entre a curvatura da elástica e o momento atuante, mas enganou-se na consideração da posição da linha neutra e isto conduziu ao cálculo incorreto da viga.

Coube a Euler, através do cálculo variacional derivar a equação diferencial da elástica de uma viga em balanço e encontrar a equação para o cálculo da flecha correta da extremidade em balanço.

$$f = \frac{P \ell^3}{3C}$$

sendo:

$$C = E I$$

assim o trabalho de Euler constitui um importante avanço no desenvolvimento teórico da ciência dos materiais.

Paralelamente e como consequência de aprimoramento na parte experimental, Georges Louis Le Clerc, Conde de Buffon (1707-1788) divulgou, nos seus livros, os resultados de suas experiências no estudo da madeira. Os primeiros resultados e conclusões apresentadas por Buffon trataram da influência da densidade da madeira na resistência. Ele comparou a resistência de vigas de Carvalho provenientes de várias árvores, algumas das quais descascadas na primavera e cortadas no Outono seguinte, com a suposição de aumentar sua densidade, ensaiando vigas de 14' (426 cm) de comprimento e seção transversal quadrada de 6 pol (15 cm), carregadas no meio do vão. Segundo Buffon, a experiência mostrou que as quatro vigas provenientes das árvores descascadas eram mais pesadas e mais resistentes, embora todas as árvores tivessem a mesma idade e dimensões.

No segundo e terceiro livros de Buffon é apresentada grande quantidade de informações relacionadas com os ensaios de flexão realizados em corpos de prova de várias dimensões. Através destes ensaios, constatou também a influência da posição dos anéis de crescimento na resistência final da viga. As vigas com anéis de crescimento na vertical são mais resistentes quando comparadas com outras nas quais os anéis estejam na posição horizontal.

Preocupado em dar condições de igualdade aos corpos de prova adotou a seguinte metodologia para preparação: no primeiro dia era cortada a árvore, no segundo, preparado o corpo de prova e ensaiado no terceiro. Assim foram ensaiadas as mais de 100 vigas até a ruptura, vigas estas com seções e comprimentos diferentes, conforme a Tabela I.

SEÇÃO TRANSVERSAL		COMPRIMENTO	
em Pol.	(cm)	em Pés	(cm)
4 x 4	(10,16 x 10,16)	7 a 12	(213,36 a 365,76)
5 x 5	(12,70 x 12,70)	7 a 18	(213,36 a 548,64)
6 x 6	(15,24 x 15,24)	7 a 20	(213,36 a 609,60)
7 x 7	(17,78 x 17,78)	7 a 20	(213,36 a 609,60)
8 x 8	(20,32 x 20,32)	10 a 20	(304,80 a 609,60)

TABELA I - Vigas Ensaçadas por Buffon

As cargas de ruptura variaram de 1750 lb (6,9 KN) a 27.800 lb (126,0 KN), Buffon apresenta uma variedade importantíssima de informações em suas tabelas de resultados contendo entre outros dados: velocidade de carregamento (primeira citação na história), cargas, flechas, tipo de ruptura e tempo desde o primeiro estalo até a ruptura total. Alguns destes dados podem ser observados na tabela II correspondente aos ensaios de Buffon e apresentada por L.G. Booth (11).

Analisando os resultados experimentais Buffon concluiu que os corpos de prova mais curtos apresentavam maior resistência.

Como uma extensão de seu trabalho apresentou um estudo relativo à duração do carregamento e sua influência na resistência das vigas de madeira, recomendando que as cargas permanentes não ultrapassem 50% da carga de ruptura, em ensaios rápidos; em estruturas para andaimes e pontes do exército, não permanentes, a redução não é necessária.

Henri Louis Duhamel du Monceau (1708 - 1782) em suas primeiras memórias relata seu trabalho experimental com o objetivo de provar que a seção de uma viga fletida sofre tração e compressão. Realizou vários ensaios com uma série de pequenas vigas de Salgueiro *Salix*, sp de 3' x 1,5" x 1,5" (90 x 3,8 x 3,8) cm³. Duhamel rompeu as primeiras seis com carga aplicada no meio do vão obtendo uma carga média de 525 lb (2,4 KN).

COMPRIMENTO DA PEÇAS	PESO DAS PEÇAS	CARGAS	TEMPO DECORRIDO ENTRE O 1º ESTA DO E A RUPTURA	FLECHAS	
				POLEGADAS	LINHAS
PÉS	LIBRAS	LIBRAS	MINUTOS		
7	94	11775	58	2	6
	98 1/2	11275	53	2	6
8	104	9900	40	2	8
	102	9675	39	2	11
9	118	8400	28	3	3
	116	8325	28	3	
	115	8200	26	3	
10	132	7225	21	3	2
	130	7050	20	3	
	128 1/2	7100	18	4	
12	156	6050	30	5	6
	154	6100	..	5	
14	178	5400	21	8	3
	176	5200	18	8	
16	209	4425	17	8	1
	205	4275	15	8	
18	232	3750	11	8	2
	231	3650	10	8	
20	263	3275	10	8	10
	259	3175	8	10	
22	281	2975	18	11	3
24	310	2200	16	11	3
	307	2125	15	13	
26					
28	364	1800	17	18	
	360	1750	17	22	

TABELA II - Resultados de Ensaio de Flexão Realizado por Buffon

Em outras duas realizou um corte no plano da seção transversal, no meio do vão, com uma profundidade de 1/3 da altura a partir da borda comprimida, preenchendo-o com uma lâmina de carvalho e obtendo uma carga de ruptura de 551 lb (2,5 KN). Em duas outras vigas cortadas até a metade da altura de sua seção transversal h, no momento da ruptura a carga atingiu 542 lb (2,45 KN). Uma série final de seis vigas, com corte de 3/4 de sua altura atingiu no momento da ruptura a média de 530 lb (2,4 KN). A partir desses resultados Duhamel concluiu, corretamente, existir nas vigas fletidas uma parte da seção transversal comprimida e uma parte tracionada. Duhamel explicou o fato da resistência das vigas cortadas ser

maior do que a das inteiras devido à introdução forçada da lâmina de carvalho no corte. Sendo a lâmina um pouco maior, cria-se uma compressão nas fibras abaixo da lâmina e esta causa um aumento da carga necessária para provocar a ruptura final por tração, nas fibras inferiores (12).

Segundo L.G. Booth esta pode ser a primeira menção da vantagem de uma viga de madeira ser protendida (13).

Duhamel, na quinta seção do seu livro "Do Transporte, da Conservação e da Força das Madeiras" apresentou importantes ensaios realizados com o objetivo de comparar a resistência da madeira verde com a da madeira seca. Os corpos de prova foram tirados de cinco zonas radiais de uma árvore de pinho *Araucaria, sp.* De outra árvore semelhante e simultaneamente, foram tirados outros corpos de prova idênticos aos anteriores, porém deixados para secar, por 20 meses antes dos ensaios. Duhamel concluiu erroneamente que as vigas de madeira seca tem 85% da resistência das vigas de madeira verde. A ausência de informações mais detalhadas impedem uma análise das causas deste comportamento anormal.

O equipamento para a realização dos ensaios de flexão utilizado por Duhamel, figura 2.7, permite um controle bem mais eficiente do carregamento em comparação com o controle permitido pelo equipamento de Muschenbroek.

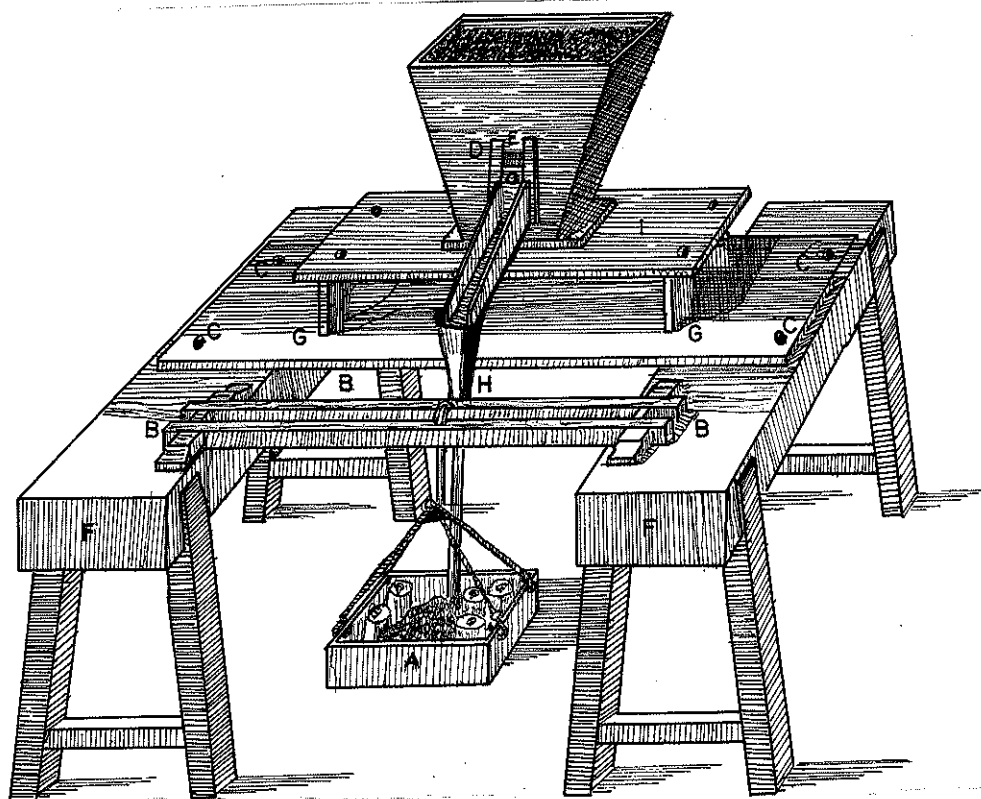


Figura 2.7 - Equipamento para Ensaio de Flexão Utilizado por Henry L. Duhamel

A escassa e lenta divulgação dos resultados de ensaios foi causa comum de repetição de estudos como o de Emerson, o qual após longo período de experiências, concluiu que as peças de madeira resistem a cargas elevadas por certo período de tempo rompendo com carregamento menores, de longa duração. Isto foi divulgado em 1758, embora já constatado por Buffon em 1740. Emerson constatou em tretanto: "a madeira verde é mais fraca do que a madeira seca", contrariando as afirmações de Buffon. Talvez a mais importante contribuição de Emerson seja o seu estudo sobre o efeito da inclinação das fibras na resistência da madeira (14).

Os trabalhos experimentais continuaram sendo, motivados pela necessidade da comprovação das mais variadas teorias. Assim Pierre Simon Girard (1765 - 1836) foi levado a realizar vários ensaios cujos resultados foram publicados no seu livro "Tratado Analítico da Resistência dos Sólidos" em 1798, sendo considerado como o primeiro livro dedicado inteiramente à Resistência dos Materiais (15). Entre outros objetivos, Girard procurava, através do ensaio de uma série de vigas de carvalho e abeto, determinar, experimentalmente o valor de C (equivalente ao produto E I) da equação da flecha (f) de uma viga bi-apoiada com carga (P) no meio do vão (l).

$$f = \frac{P l^3}{48C}$$

Na experimentação Girard registrava o tempo, a carga, a flecha e a ruptura sofrida pelos corpos de prova, de tamanho estrutural. Dada a magnitude das forças envolvidas nestes ensaios, a máquina utilizada deveria permitir carregamentos elevados, pois segundo os dados divulgados, a carga máxima utilizada foi de 522,7 KN e o maior corpo de prova tinha 2,6 metros de comprimento e seção transversal (16 x 13) cm², figura 2.8. Pela primeira vez foi empregado o sistema decimal em ensaios de Resistência da Madeira (16).

No século XIX, com a fundação da Escola Politécnica de Paris, o estudo da Ciência dos Materiais recebeu um grande impulso. Fundada por Monge, a Escola Politécnica permitiu uma maior divulgação de conhecimentos, unindo esforços e evitando repetição de pesquisas.

Navier (1785 - 1836) publicou em 1826 a primeira edição do seu livro "Resistência dos Materiais" no qual destacou a necessidade de se estabelecer o limite até o qual as peças se comportam

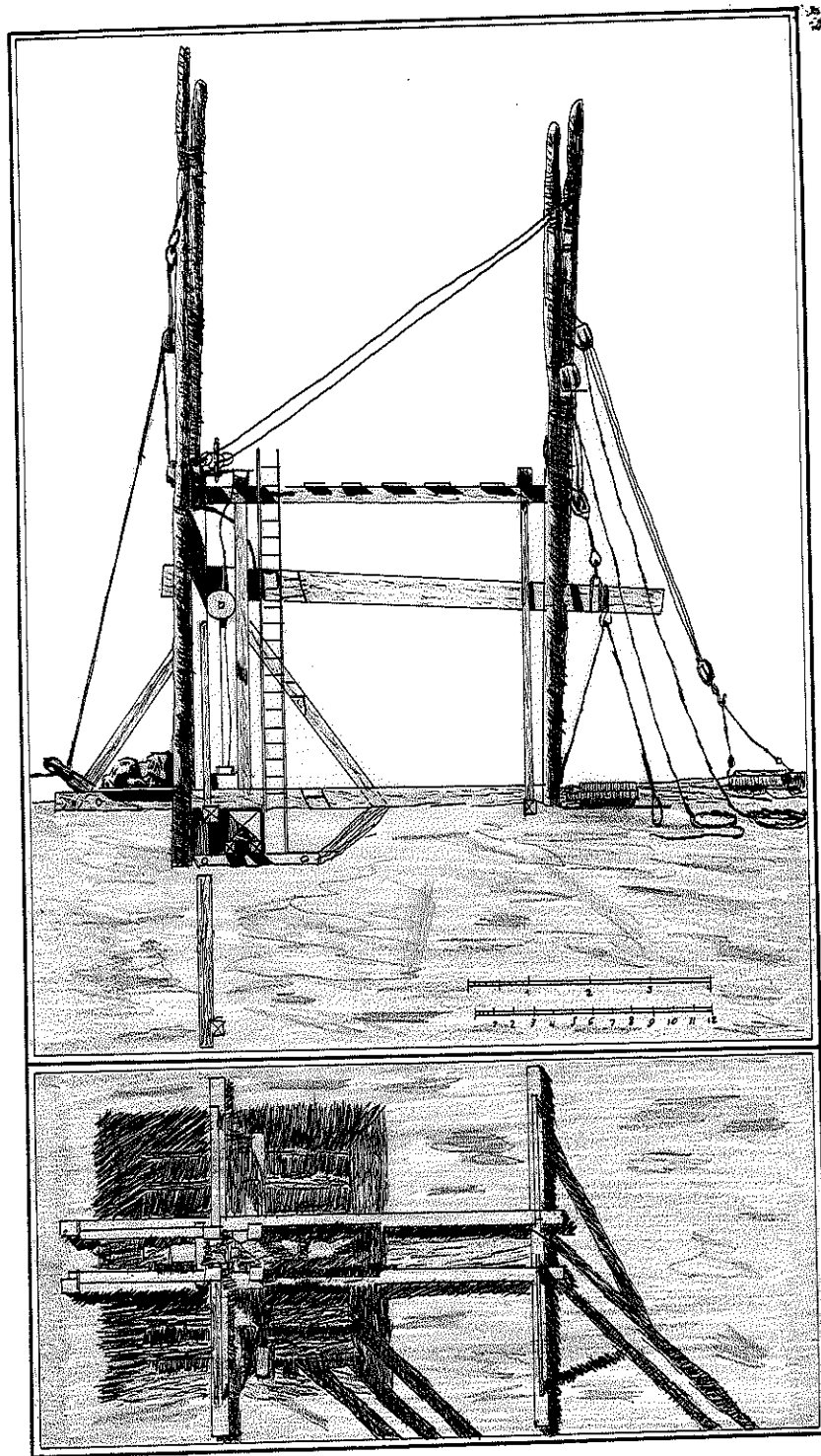


Figura 2.8 - Equipamentos Utilizados por Gerard para realizar os Ensaios de Compressão e Flexão em Peças de Madeira

perfeitamente no regime elástico e não sofrem deformações permanentes (17). Este limite é conhecido como limite de proporcionalidade. Já no século XIX, em grande parte por causa do ensino de matemática, mecânica e física na Escola Politécnica passam a ter interesse científico e tecnológico.

F.P.C. Dupin (1784 - 1873) graduado pela Escola Politécnica, em 1803, ensaiou vigas de madeira e determinou o ponto no qual as flechas deixam de ser proporcionais às cargas e passam a crescer rapidamente, apresentando a relação carga-flecha segundo uma curva parabólica, considerando o limite de proporcionalidade (18).

Ensaando várias espécies de madeira encontrou a dependência entre a resistência à flexão e o peso específico. Na comparação do deslocamento produzido por dois tipos de carregamentos, concentrado e uniformemente distribuído, ambos de mesmo efeito constatou a ocorrência de flecha, no caso de carga uniformemente distribuída, equivalente a $19/30$ ($5/8$ pela teoria) da produzida por uma carga concentrada (19).

Eaton (Hodgkinson (1789 - 1861) realizou vários ensaios em vigas de madeira, determinando experimentalmente a proporcionalidade entre as deformações e as suas distâncias à linha neutra, a qual foi considerada na sua verdadeira posição mostrando a validade da Lei de Hooke dentro do limite elástico (20).

Até esta época a verificação experimental realizou-se por iniciativa individual dos cientistas e pesquisadores.

Julio Weisbach (1806 - 1871) professor de mecânica e máquinas interessado em método de ensino na engenharia, organizou o laboratório da Academy of Mines of Freiberg, Alemanha, com o propósito de permitir aos estudantes a verificação, experimental dos princípios da estática, dinâmica, e resistência dos materiais. Neste laboratório foram realizados, ensaios de flexão em vigas, de modelos de treliças, de torção de eixos e de flexo-torção (21).

No Brasil no limiar do século XX foi criado o Gabinete de Resistência da Escola Politécnica de São Paulo, fundada em 1984. O "Manual de Resistência dos Materiais" editado pelo Gremio Politécnico após ampla experimentação promovida por um grupo de alunos. Sesenta por cento do texto apresenta o resultado de uma minuciosa classificação e determinação experimental das propriedades de madeiras nacionais.

Nas experiências de flexão foram registrados os diagramas carga x flecha, tipo de carga e ruptura (22).

Trata-se do primeiro trabalho experimental realizado no Brasil tendo em vista a aplicação da madeira na construção.

3 - EVOLUÇÃO DO ESTUDO DA VELOCIDADE DE ENSAIO

A necessidade de conhecer melhor o comportamento e as propriedades da madeira exigiu trabalhos cada vez mais específicos com controle rigoroso da interpretação dos resultados. Aumentou a necessidade de uniformizar os critérios de avaliação experimental. Assim em 1908, a American Society for Testing and Materials (ASTM) publicou um trabalho, realizado por H.D. Tiemann, sobre a influência da velocidade de ensaio na resistência da madeira e a padronização da velocidade dos ensaios. Aparentemente trata-se do primeiro trabalho relativo ao assunto (23). A partir de então, vários trabalhos foram surgindo atendendo a necessidade de estabelecer, vários padrões para permitir a comparação dos resultados.

Entre 1915 e 1918 Marcel Monnin, com a colaboração de outros cientistas, realizou um estudo experimental relativo aos ensaios físicos, estáticos e dinâmicos das madeiras alcançando uma contribuição significativa para o conhecimento das propriedades das madeiras. O estudo abrangeu um bom número dos fatores que influenciam nas propriedades de resistência da madeira, avaliados através destes ensaios (24).

O mesmo Monnin entre 1920 e 1931, no trabalho "Leçons sur les bois de construction" (25), estudou as características anatômicas, fisiológicas, botânicas, químicas, patológicas, físicas e mecânicas da madeira. A parte dedicada às características mecânicas é bastante ampla e completa. No estudo da flexão, Monnin apresentou o diagrama da figura 3.1 definindo, através do mesmo, três fases pelas quais passa uma viga solicitada à flexão desde o início da solicitação até à ruptura. A fase elástica, do início do carregamento até o limite de proporcionalidade; a fase não elástica, a partir deste limite até o limite de ruptura; e a partir deste a fase de desfibramento ocasionada pela deformação excessiva por tração.

Entre 1931 e 1935 foram publicados pelo "Laboratório de Ensaio de Materiaes" da Escola Polytécnica de São Paulo" (EPSP) Boletins de autoria do Engenheiro Frederico Abranches Brotero. Dentre estes destacaram-se o Boletim nº 6 "Propriedades Physicas e Mecânicas de Peroba rosa" (26). O Boletim nº 8 "Estudo Idos carâcteres physicos e mecânicos das madeiras" (27); e o Boletim nº 13 "Emprego das madeiras nacionais em aviação" (28).

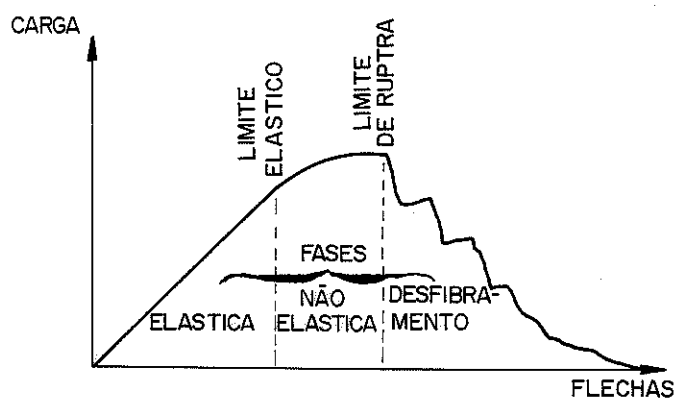


Figura 3.1 - Diagrama Carga x Deslocamento para uma Viga Fletida Apresentado por Monnin

A determinação das propriedades físicas e mecânicas da Pe roba Rosa, apresentadas no Boletim nº 6, foi realizada de acordo com as Normas Francesas, em corpos de prova de $(2 \times 2 \times 30) \text{ cm}^3$ para flexão, aplicando a carga com velocidade que permita a ruptura no mínimo em dois minutos. No caso da determinação do módulo de elasticidade à flexão o corpo de prova de $(5 \times 5 \times 120 \text{ cm}^3)$ era, ensaiado com taxa de tensão de $100 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$.

No Boletim nº 8 segunda edição, editado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) sucessor do "Laboratório de Ensaio de Materiaes", é introduzida uma modificação na determinação do módulo de elasticidade à flexão, tendo sido adotado um corpo de prova de $(6 \times 6 \times 100) \text{ cm}^3$ e a velocidade de carga de 100 kg/min .

Em setembro de 1935 o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos publicou o boletim técnico nº 479 elaborado por L. J. Markwardt e T.R.C. Wilson (29). Este Boletim contém dados relativos à variação da resistência devida à velocidade e método seguido na realização do carregamento. A partir dos resultados obtidos, afirmam ser a resistência da madeira ao impacto o dobro da encontrada nos ensaios de flexão estática, por outro lado, uma viga, permanecendo, carregada por longo tempo, apresentará ruptura com uma carga de valor entre a metade e os três quartos do valor para ruptura, no ensaio de flexão estática. Por este motivo os autores concluíram não serem comparáveis os resultados obtidos por ensaios realizados sob diferentes condições de carregamento e recomendaram, para determi-

nação das tensões admissíveis nas vigas de madeira, o cálculo tomamdo em consideração as cargas de serviço. Acrescentaram serem importantes e determinantes na realização dos ensaios a rapidez da aplicação das cargas e a duração dos esforços.

A figura 3.2 corresponde ao gráfico apresentado por Markwardt e Wilson com base nos dados encontrados na pesquisa sobre a influência da velocidade de carregamento na resistência à flexão de pequenos corpos de prova. O diagrama apresentado é confuso não permitindo a completa avaliação das reais condições nas quais foram realizados os ensaios. Segundo Markwardt e Wilson: a variação de 10 vezes na velocidade de carregamento, tanto aumentando como diminuindo, implica em aumento ou diminuição do valor da resistência à flexão de mais ou menos 10%. Referindo-se ao trabalho de Tiemann (23) afirmaram ser tolerada uma variação de 25% na velocidade de carregamento, para não ultrapassar 1% na variação da resistência.

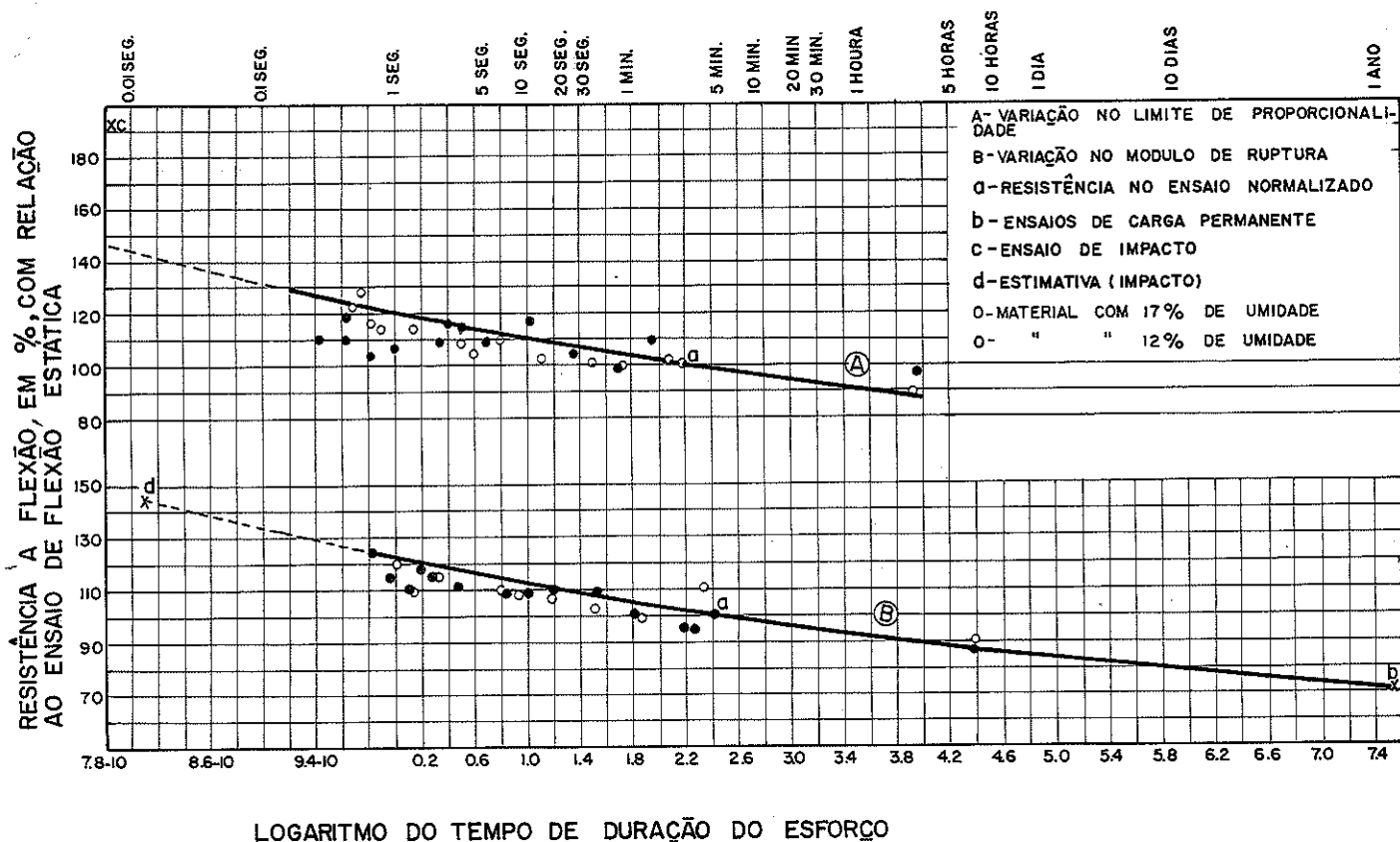


Figura 3.2 - Relação da Tensão Limite de Proporcionalidade e o Módulo de Ruptura na Flexão Estática de Sitka spruce, com a Duração da Tensão. (Tempo entre a Aplicação da Carga e o Limite de Proporcionalidade ou Carga de Ruptura).

Outros trabalhos tem sido realizados, procurando estabelecer critérios para uniformizar os métodos de ensaio como por exemplo o trabalho realizado por Bergt Norén, publicado em 1954 (30). Este trabalho não versa exatamente sobre a influência da velocidade de carregamento na resistência à flexão, mas, representa um importante avanço no estudo da velocidade de carregamento. Define a madeira como um material visco-elástico e afirma ser o propósito de seu trabalho encontrar um método simples de ensaiar madeira, com velocidade constante de deformação em máquinas de ensaio hidráulicas e, estabelecer a influência da velocidade de deformação na resistência. Os ensaios foram realizados nas velocidades: 3, 1, 0,3, 0,1 e 0,03 mm/min. A tabela III apresenta os resultados obtidos.

CORPOS DE PROVA	VELOCIDADE DE DES- LOCAMENTO (mm/Min)	RESISTÊNCIA À COM- PRESSÃO (kg/cm ²)	OBSERVAÇÕES
Nºs 101 a 136	3,0	486,2	Extensômetro Mecânico
Nºs 201 a 236	1,0	476,4	
Nºs 301 a 336	0,3	451,6	
Nºs 801 a 836	0,3	456,7	Extensômetro Elétrico
Nºs 601 a 636	0,3	463,2	
Nºs 401 a 436	0,1	440,7	
Nºs 501 a 536	0,03	421,5	

TABELA III - Valores da Resistência à Compressão e Velocidade de Deslocamento

Na equação 3.1 os valores da tensão de resistência à compressão são apresentados em função do logaritmo da velocidade de deslocamento.

$$\sigma = 473 + 33,1 \log v \dots\dots\dots (3.1)$$

sendo;

$$\sigma = \text{tensão em kgf/cm}^2.$$

v = velocidade de deslocamento em mm/min.

Considerando (σ) como variável dependente, é possível traçar o diagrama de σ x v mostrado na figura 3.3.

Jã nas conclusões Norën cita o fato da resistênciã ã compressão variar com o comprimento do corpo de prova, referindo-se às Normas Britânicas e Americanas, mas, sem se aprofundar no assunto.

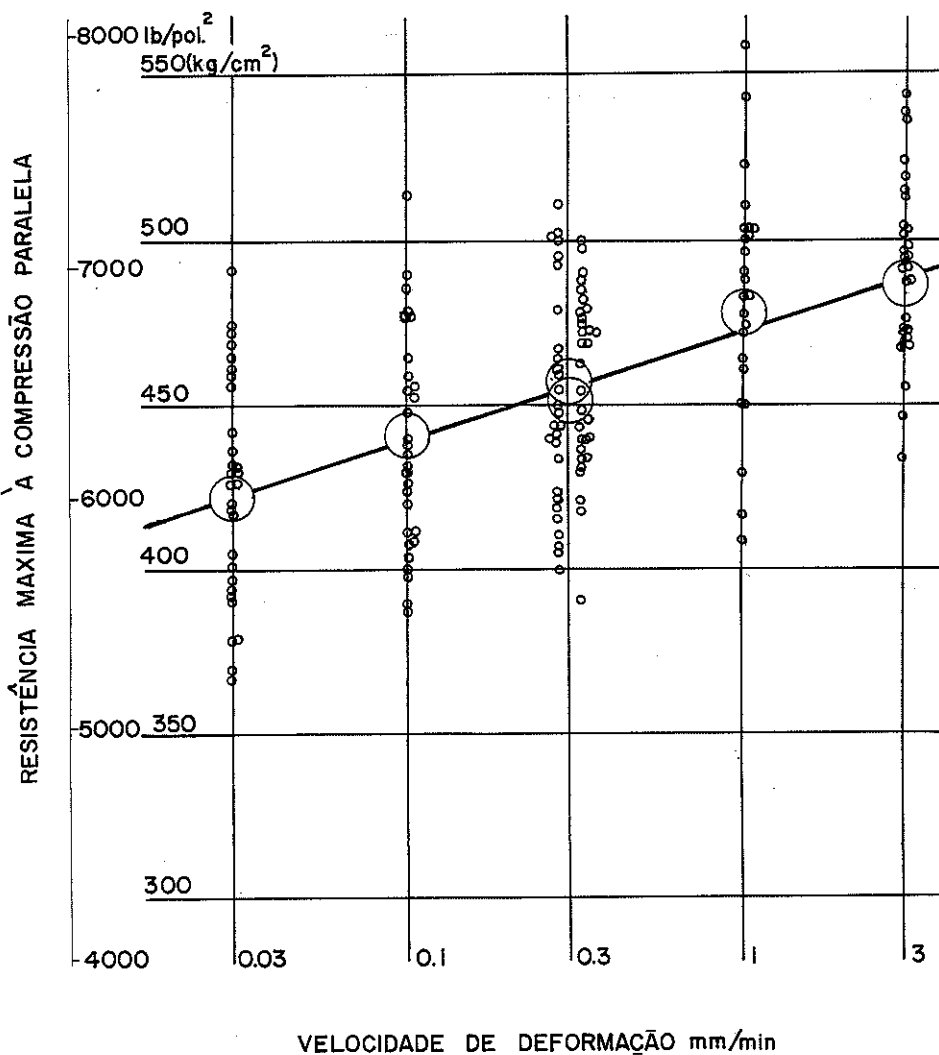


Figura 3.3 - Relação entre a Resistência ã Compressão e a Velocida de de Deformação

Nos Estados Unidos, em 1958, o Forest Products Laboratory em cooperação com a Universidade de Wisconsin apresentou um relatório completo sob o título "Efeito do carregamento rápido e a duração das tensões nas propriedades de resistência de madeiras ensaiadas à compressão e flexão". Realizado por M.P. Brokaw e G.W. Foster nos anos 40, este relatório na parte 2, intitulada "O efeito do carregamento rápido nas propriedades de resistência de vigas de Sitka spruce (*Picea sitchensis*) e Douglas-fir (*Pseudotsuga taxifolia*)" apresenta dados sobre ensaios à flexão em vigas com seção transversal (1 x 2) pol² (2,5 x 5 cm²) e comprimento de 16 pol (40 cm) (31). As velocidades de ensaio consideradas variaram de 0,2 a 18 pol/min (0,5 a 40 cm/min).

Realizando a comparação entre os resultados obtidos em cada velocidade e os resultados obtidos em ensaios de flexão estática com a velocidade normalizada de 0,05 pol/min (0,125 cm/min) apresentaram em dois gráficos, figuras 3.4 e 3.5, as retas ajustadas aos dados obtidos nos ensaios.

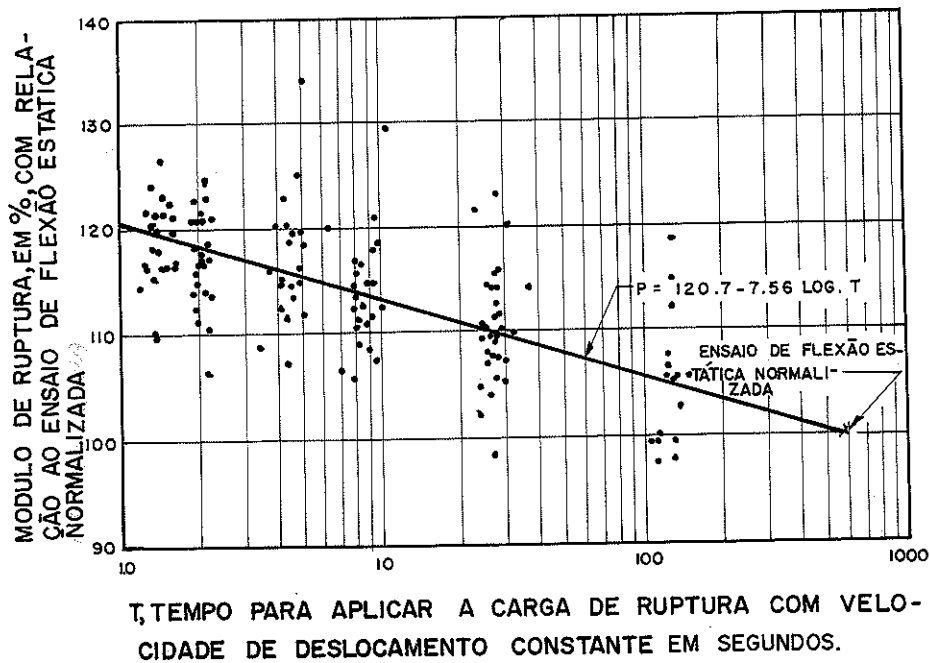


Figura 3.4 - Efeito do Carregamento Rápido no Módulo de Ruptura de Vigas de Sitka Spruce

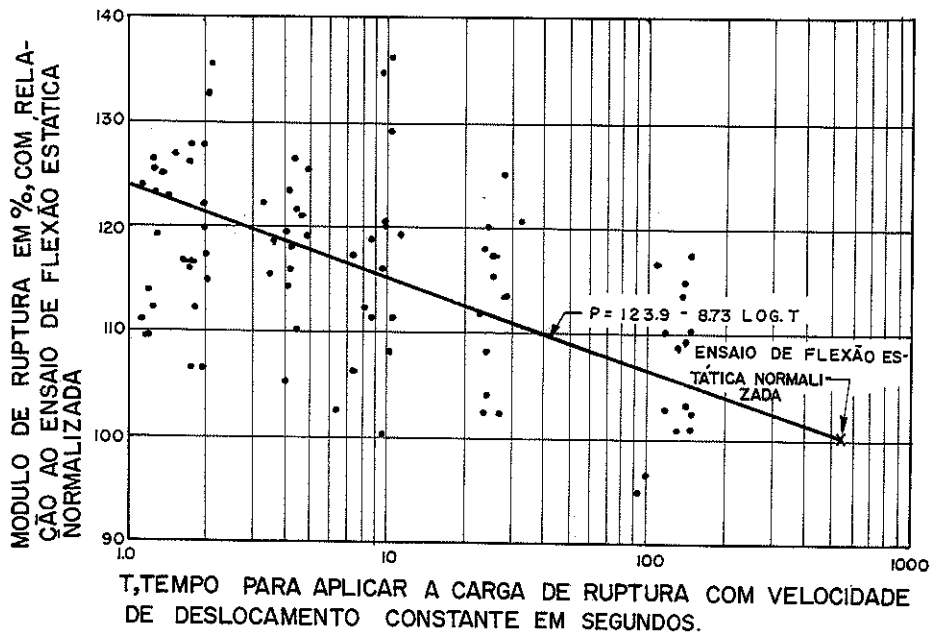


Figura 3.5 - Efeito do Carregamento Rápido no Módulo de Ruptura de Vigas de Douglas-fir

Com base nos resultados os autores afirmaram existir uma relação inversa entre o logarítmo do tempo de carregamento e a relação, em porcentagem, entre o módulo de ruptura e a tensão limite de proporcionalidade e as tensões correspondentes encontradas nos ensaios normalizados de flexão estática. As equações para representar este comportamento são as 3.2 e 3.3.

Para o Sitka spruce:

$$P = 120,7 - 7,56 \log T \dots\dots\dots (3.2)$$

Para o Douglas fir:

$$P = 123,9 - 8,73 \log T \dots\dots\dots (3.3)$$

sendo:

P = Módulo de Ruptura, em %, com Relação ao Ensaio Normalizado de Flexão Estática.

T = tempo de carregamento em segundos.

O módulo de elasticidade apresentou variações entre -3,8% e 3,5%.

A American Society for Testing and Materials em 1956 publicou um trabalho apresentado por L.J. Markwardt e J.A. Liska no Symposium on Speed of Testing com o título "A influência da velocidade de carregamento na resistência da madeira e de materiais derivados". Três fatores são indicados para uma adequada interpretação dos resultados: carga, flechas ou deformações, e o tempo.

Foram ensaiadas peças de duas espécies de coníferas o Douglas-Fir e o Sitka spruce e de duas dicotiledôneas o Birch e o Maple, para determinar o efeito do carregamento rápido nas propriedades de resistência e de elasticidade da madeira.

Os corpos de prova com os quais Markwardt e Liska trabalharam tinham seção transversal de (1×2) pol² ($2,5 \times 5$ cm²) as coníferas, e 1 pol² ($6,25$ cm²) as dicotiledôneas, com um comprimento de 16 pol (40 cm).

No ensaio, o vão entre apoios foi de 14 pol (35 cm) as velocidades de deslocamento da cabeça do pistão foram 0,2; 1; 3; 6; 12, 18 e 80 pol/min (0,5; 2,5; 7,5; 15; 30; 45 e 200 cm/min).

Os resultados encontrados permitiram-lhes concluir não haver mudança significativa no módulo de elasticidade à flexão com o aumento da velocidade de carregamento, ocorre entretanto aumento da tensão limite de proporcionalidade e do módulo de ruptura. Os diagramas apresentados pelos autores são transcritos nas figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11. As figuras 3.12 e 3.13 contêm os diagramas das taxas de variação em %, do módulo de ruptura em função do tempo de carregamento e as retas ajustadas aos pontos. A reta para os pontos do Sitka spruce, é dada pela equação 3.4:

$$P = 121 - 8,5 \log T \dots\dots\dots (3.4)$$

Para o Maple a equação 3.5

$$P = 122 - 8,75 \log T, \dots\dots\dots (3.5)$$

sendo

P = Módulo de Ruptura em %, com relação ao ensaio normalizado de flexão estática.

T = tempo, em segundos, gasto para romper o corpo de prova.

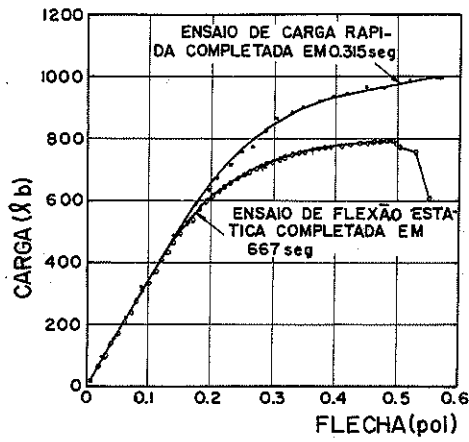


Figura 3.6 - Diagramas de Carga x Flecha para Ensaio de Flexão em Duas Velocidades (Douglas-Fir)

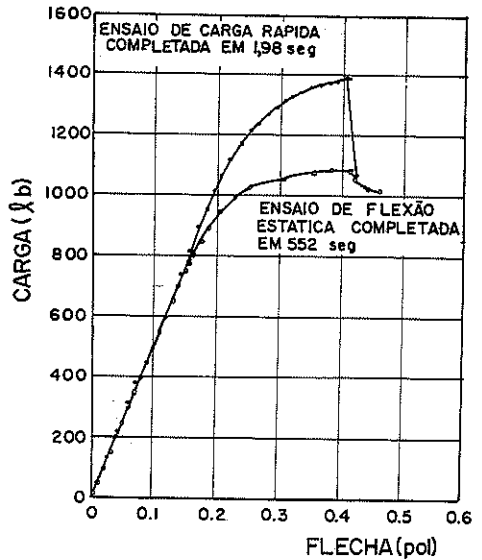


Figura 3.7 - Diagramas de Carga x Flecha para Ensaio de flexão em Duas Velocidades (Birch)

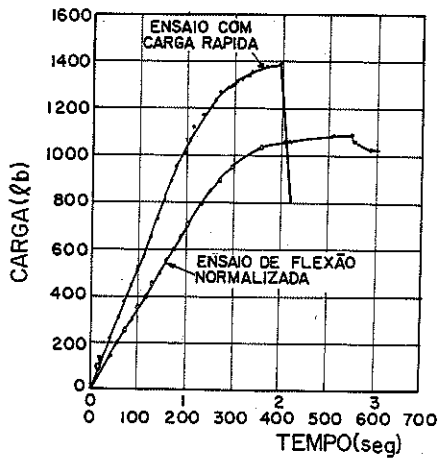


Figura 3.8 - Diagrama Carga x Tempo relativo à figura 3.6

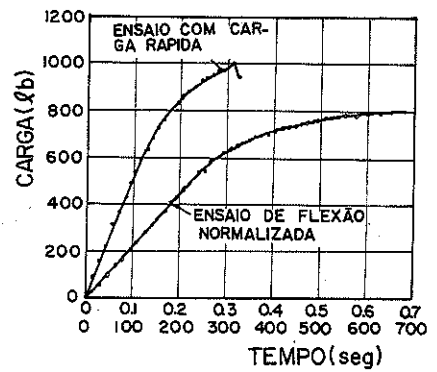


Figura 3.9 - Diagrama Carga x Tempo Relativo à figura 3.7

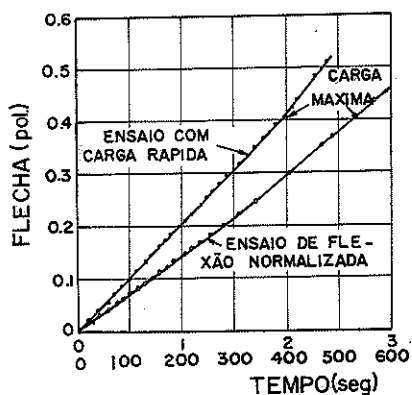


Figura 3.10 - Diagrama Flecha x Tempo Relativo à figura 3.6

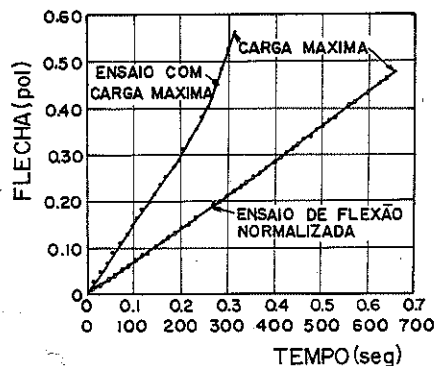


Figura 3.11 - Diagrama Flecha x Tempo relativo à figura 3.7

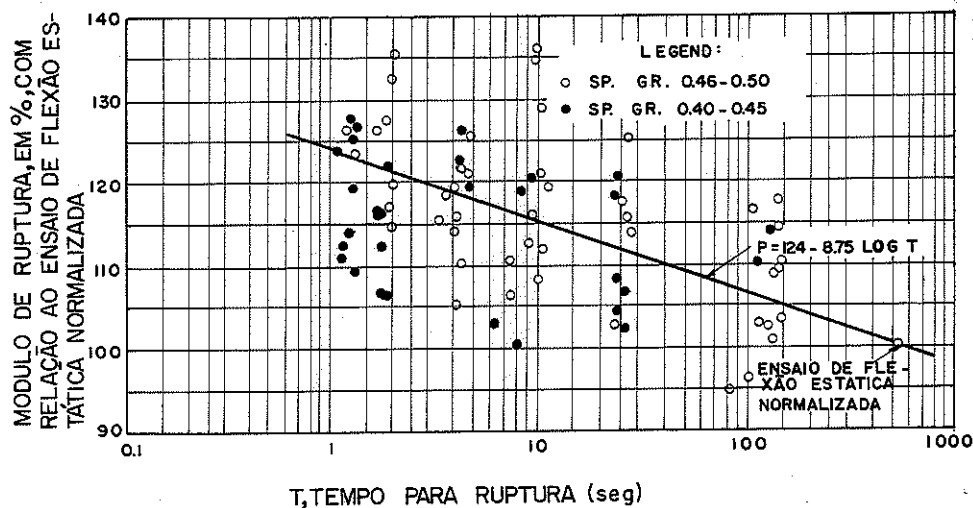


Figura 3.12 - Efeito da Velocidade de Aplicação da Carga no Módulo de Ruptura (Douglas-Fir)

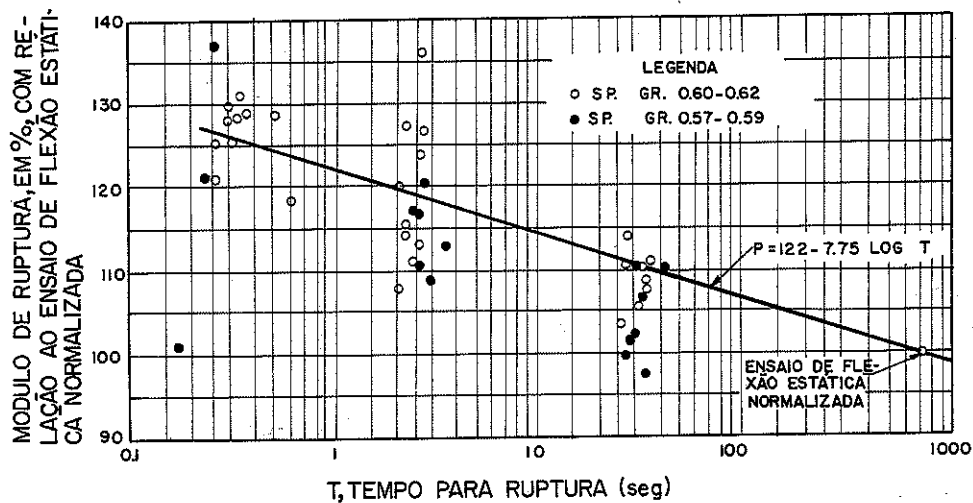


Figura 3.13 - Efeito da Velocidade de Aplicação da Carga no Módulo de Ruptura (Birch)

Um fato interessante é revelado comparando-se as retas encontradas por Brokaw e Foster com as encontradas por Markwardt e Liska, para o Sitka spruce: as duas são praticamente as mesmas, pois Brokaw e Foster acharam a equação 3.2.

$$P = 120,7 - 7,56 \log T$$

Enquanto Markwardt e Liska apresentaram a equação 3.4

$$P = 121 - 8,5 \log T$$

Essa semelhança pode ser atribuída ao fato dos dois trabalhos terem sido realizados no Forest Products Laboratory, pois "Os resultados de um estudo preliminar relativo ao efeito do carregamento rápido realizado por M.P. Brokaw e G.W. Foster no Forest Products Laboratory foram apresentados brevemente por Markwardt e Liska em 1948, no Symposium on Speed of Testing". Este estudo é agora completado com o ensaio de quatro espécies de madeira.

Alguns pesquisadores tem realizado estudos relativos à velocidade de carregamento em corpos de prova de chapas duras de fibras de madeira como é o caso de J. Dobbin Mc... o qual no artigo "Design Stresses for Hardboard" (33) afirma: "O comportamento da chapa-dura sob diferentes condições de carregamento, mostrou-se como sendo muito parecido com o comportamento da madeira sólida".

McNatt adotou 6 velocidades, de 0,01 pol/min (0,025 cm/min) até 6 pol/min (15 cm/min) mantidas constantes durante os ensaios.

Os valores médios do módulo de ruptura, em %, como função do logaritmo do tempo para atingir a ruptura, são apresentados na figura 3.14.

A equação 3.6 representa a curva ajustada aos dados da figura 3.14.

$$\text{Módulo de ruptura} = 120 - 8,2 \log T \dots\dots\dots (3.6)$$

McNatt comparou esta equação com a equação 3.7 achada por Liska para quatro espécies de madeira também em função do tempo.

$$\text{Módulo de ruptura} = 121 - 7,5 \log T \dots\dots\dots (3.7)$$

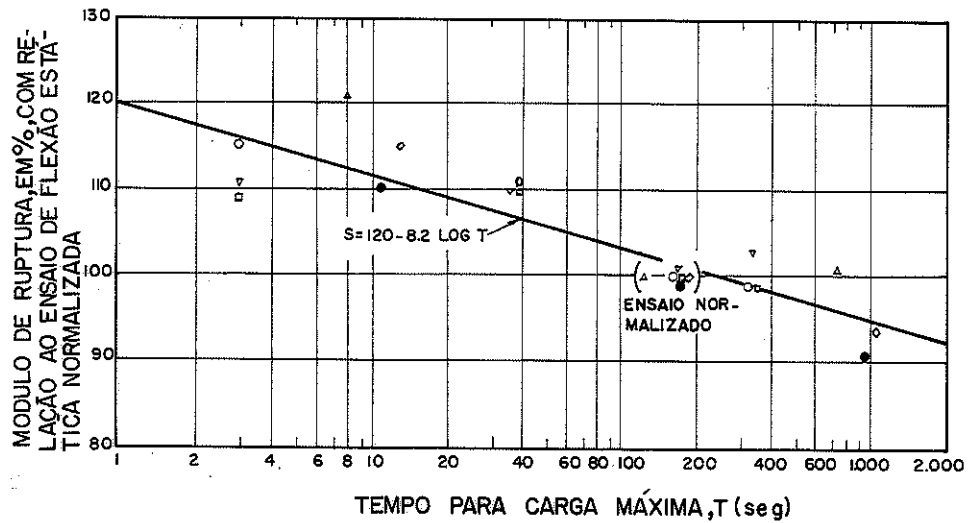


Figura 3.14 - Efeito da Velocidade de Carregamento no Módulo de Ruptura

Finalmente concluiu: o valor da resistência alcançada em diferentes velocidades de carregamento diminui aproximadamente 8% quando o tempo de ensaio é aumentado 10 vezes. O valor encontrado é equivalente ao da madeira sólida.

M.O Struckler e R.F. Pellerin (34) publicaram os resultados de um estudo destinado a determinar a influência da velocidade de carregamento na resistência à tração paralela às fibras, nas coníferas. Os ensaios foram realizados com pequenos corpos de prova isentos de defeitos, tendo fibras retas, de Douglas - fir, submetidos a tração em quatro velocidades de deformação 0,005, 0,050, 0,500 5,000 pol/min (0,0125; 0,125; 1,25; 12,5 cm/min). Segundo estes autores, a velocidade de carregamento afeta o limite de proporcionalidade na tração, mas não afeta significativamente a resistência à tração nem o módulo de elasticidade. Lamentavelmente o artigo citado é omissivo nas informações necessárias para a avaliação destas conclusões.

Na literatura consultada encontrou-se um valioso trabalho de revisão bibliográfica realizada por Charles C. Gerhards (35), o qual reuniu uma série de artigos referentes ao tema em estudo.

Segundo Gerhards, James realizou um trabalho relativo à velocidade de carregamento, no qual foram usadas duas velocidades a primeira igual à velocidade dos ensaios padrão e a segunda com um

valor 10.000 vezes mais rápida. Como era de se esperar, o resultado foi um acréscimo de 47% na resistência devido ao aumento da velocidade, confirmando assim estudos anteriores.

Gerhards cita também o trabalho de Keeton, no qual simplesmente se confirmou o fato da resistência da madeira ser diretamente proporcional à velocidade de carregamento. Okuyama e Asano, também realizaram ensaios para determinar a influência da velocidade de carregamento na resistência da madeira; na compressão paralela às fibras determinaram a existência de uma linearidade entre a resistência a compressão e o logaritmo da velocidade de deformação específica.

Quando Gerhards realizou a comparação dos resultados, encontrou dificuldade para analisá-los, pois nem todos os autores apresentaram os resultados com base nos mesmos parâmetros. Mesmo assim, chegou a apresentar uma expressão matemática para o comportamento na flexão das madeiras estudadas, equação 3.8.

$$USL = 119 - 7,5 \log T \dots\dots\dots (3.8)$$

sendo:

USL = valor último de resistência em %

T = tempo para atingir o USL.

Na figura 3.15 estão contidas as retas representativas dos resultados encontrados pelos autores citados por Gerhards e a reta que, melhor representaria o conjunto de dados:

É interessante observar o diagrama de carga x flecha apresentado por Borislav D Zakic (36) na figura 3.16, resultante dos ensaios de flexão realizados como parte de seu trabalho "Wood Beam Under Impact Load".

O diagrama representa os valores das flechas resultantes de 2 tipos de ensaio sendo o primeiro de resistência estática, realizado com a velocidade normalizada, com tempo de ruptura em torno de 5 minutos e o segundo de resistência ao impacto.

Analisando esta figura pode-se concluir: a velocidade de carregamento, muito maior no ensaio de resistência ao impacto, não exerceu grande influência no módulo de elasticidade à flexão, pois no trecho linear das curvas, isto é, na fase elástica, não há diferenças significativas entre as inclinações das curvas representativas dos dois tipos de ensaio. Observando-se o trecho linear

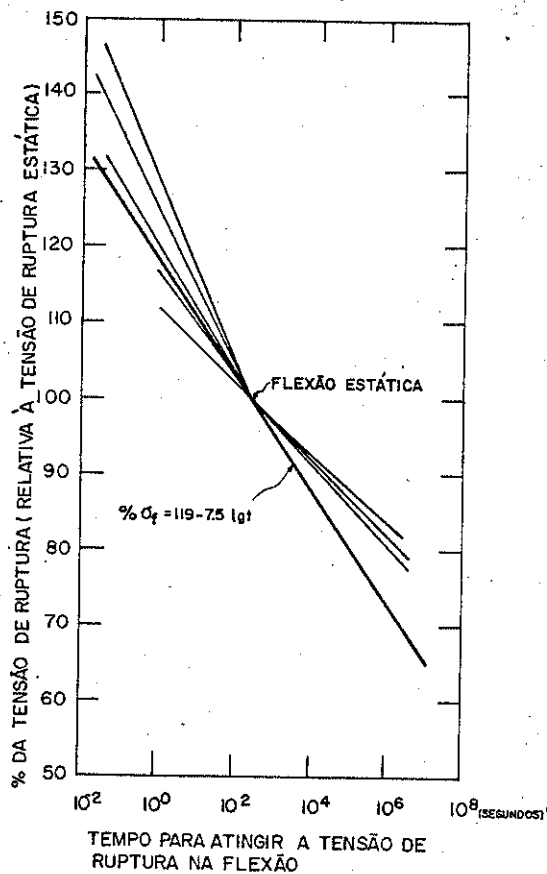


Figura 3.15 - Retas Representativas dos Resultados dos Estudos de Diferentes Autores Citados por Gehards.

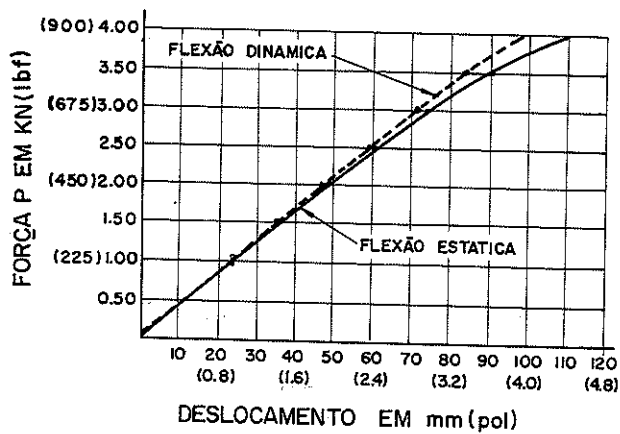


Figura 3.16 - Diagrama Carga - Flecha de Ensaio de Flexão Estática e Flexão Dinâmica

maior na correspondente ao carregamento de impacto, conclue-se: o limite de proporcionalidade aumenta com o acréscimo na velocidade

de carregamento. Quanto à carga de ruptura, nada se pode afirmar, pois não são indicadas as cargas de ruptura.

A velocidade de carregamento foi também motivo de estudo por A. Louis De Bonis, Frank F. Woeste e Thomas E. McLain, os quais publicaram o trabalho "Rate of Loading Influence on Southern Pine 2 by 4's in Bending" (37). Através do ensaio de tábuas de 2 x 4 polegadas, na flexão, com velocidade de deslocamento de 0,2 pol / min e 50 pol/min (0,5 e 15,5 cm/min), concluíram: a velocidade de deslocamento não exerce influência no valor do módulo de elasticidade à flexão nem no módulo de ruptura. Estabeleceram também suas equações representativas da relação entre o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade à flexão. Nas figuras 3.17, 3.18 e 3.19 estão contidas as informações gráficas apresentadas nesse trabalho.

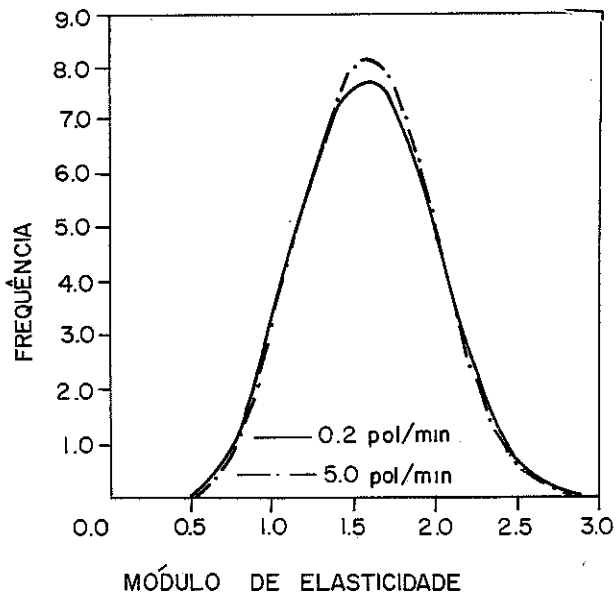


Figura 3.17 - Distribuição de Weibull do módulo de elasticidade

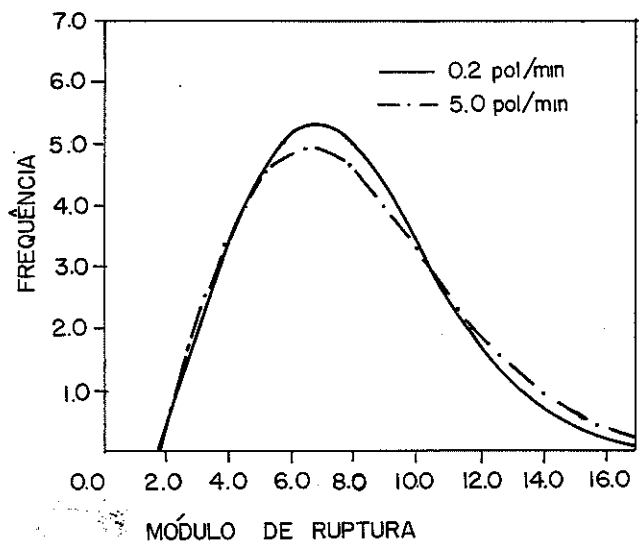


Figura 3.18 - Distribuição de Weibull do Módulo de Ruptura

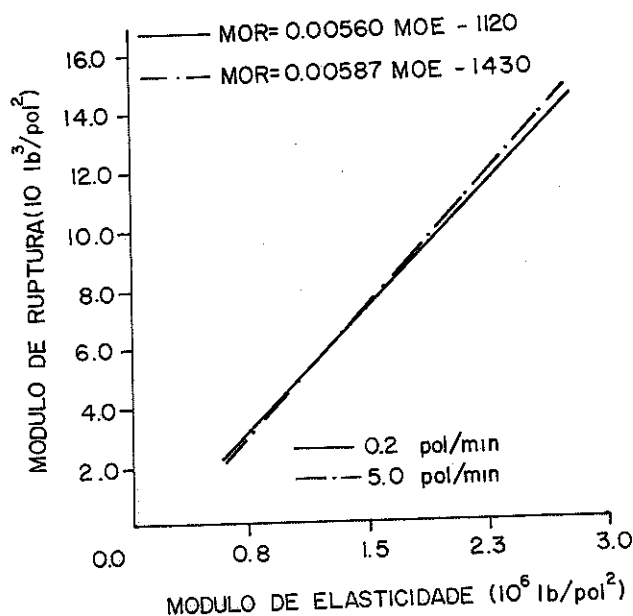


Figura 3.19 - Relação Módulo de Ruptura x Módulo de Elasticidade

Das figuras 3.17 e 3.18 pode-se concluir: as alterações nas distribuições de frequência, uma para cada velocidade, aparentemente não são significativas, tanto para o módulo de elasticidade à flexão como para o módulo de ruptura. Este fato pareceria contrariar a maioria das informações relativas aos fenômenos da influência da velocidade de carregamento. Entretanto não é aconselhável a comparação de estudos realizados utilizando coníferas e dicotiledôneas, pois as coníferas aparentemente apresentam significativa sensibilidade às mudanças na velocidade de carregamento. Da mesma maneira a figura 3.19 não transmite a idéia de grande influência da velocidade de ensaio na relação entre o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade.

O efeito da velocidade de ensaio nas propriedades de resistência da madeira tem sido objeto de estudo sob os mais diversos aspectos; Akio Tomomatsu, Tkuo Asano e Masamitsu Ohta no trabalho "Effect of Deflection Rate on Bending Strength of Wood II" Bending strength and loading history of deflection - rate changing during loading" (38) estudaram o comportamento de algumas espécies de madeiras ensaiadas com várias velocidades de deslocamento e vários tipos de carregamento.

Uma parte do estudo consistiu em adotar uma velocidade de deslocamento constante com interrupção durante certo período de tem-

po, a figura 3.20 representa as curvas obtidas com duas velocidades de deslocamento realizadas com e sem interrupção de um minuto a cada milímetro de flecha.

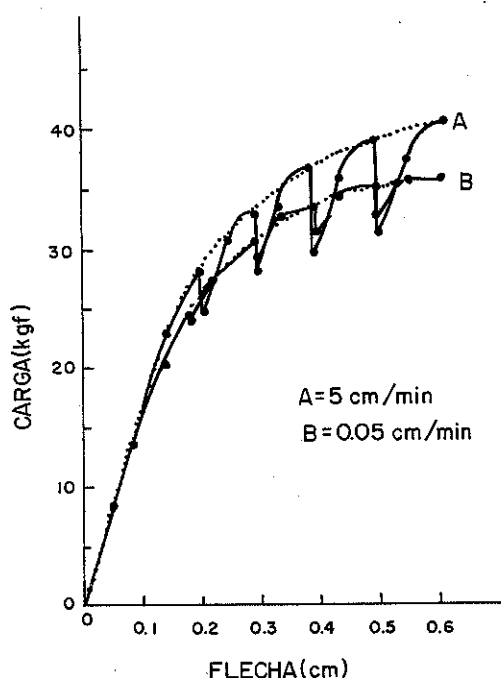


Figura 3.20 - Diagramas Carga X Flecha obtidos com Velocidades de Carregamento Constantes, com e sem Interrupção de um Minuto a cada milímetro de flecha.

Observando o comportamento das curvas pode-se concluir:

a)- A interrupção de um minuto a cada milímetro não afeta a relação carga de ruptura x flecha.

b)- A carga de ruptura é diretamente proporcional à velocidade de deslocamento.

A continuação do estudo, pelos mesmos autores, originou a publicação de outro trabalho "Effect of Deflection Rate on Bending Strength of Wood III - Bending Strength under Controlled Loading - Rate and controlled Deflection - Rate" (39). Durante o estudo trabalharam com seis espécies de madeira, solicitadas sob três tipos de carregamento: (a) velocidade constante de carregamento, (b) aumentando ou diminuindo a velocidade de carregamento, e (c) com velocidade constante de deslocamento. Nos ensaios de flexão com velocidade de carregamento constante, a velocidade de crescimento das flechas aumentou a partir do limite de proporcionalidade, atingindo no fim do ensaio, até 40 vezes a velocidade de deslocamento da fase

elástica. Na figura 3.21 estão concentrados os resultados dos ensaios realizados com velocidades de carregamento e deslocamento constante. As curvas 1 e 3, correspondem às cargas aplicadas e as curvas 2 e 4, aos deslocamentos correspondentes. Comparando-se as curvas 1 e 3 nota-se: a carga de ruptura da curva 1, correspondente à velocidade de carregamento constante, é maior do que a carga da curva 2, a qual representa o carregamento com velocidade de deslocamento constante; sendo possível concluir: o ensaio com velocidade de carregamento constante eleva a carga de ruptura.

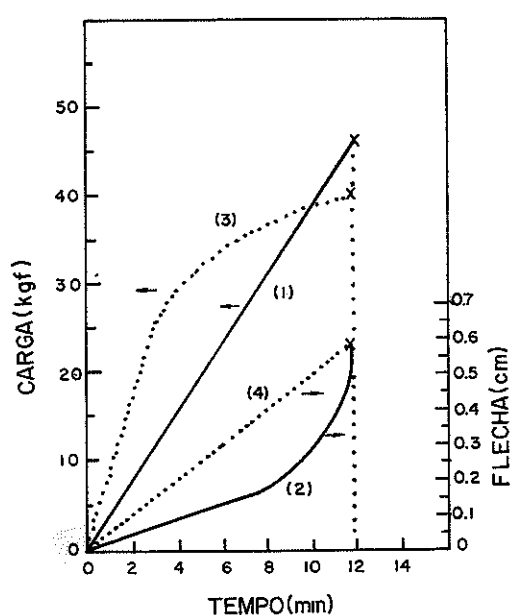


Figura 3.21 - Curvas Correspondentes a Ensaio de Flexão Realizados com Velocidades de Carregamento e de Deslocamentos Constantes

Na figura 3.22 tem-se duas curvas correspondentes à velocidade de carregamento constante e duas às velocidades de deslocamento constante. Estas curvas mostram um acréscimo no valor da resistência da madeira quando são aumentadas as velocidades de carga ou as de deslocamento.

Os valores de carga e deslocamento, determinantes no cálculo do módulo de elasticidade mostram que este não é afetado pela variação da velocidade de carregamento, porém é interessante observar que o limite de proporcionalidade tem seu valor elevado.

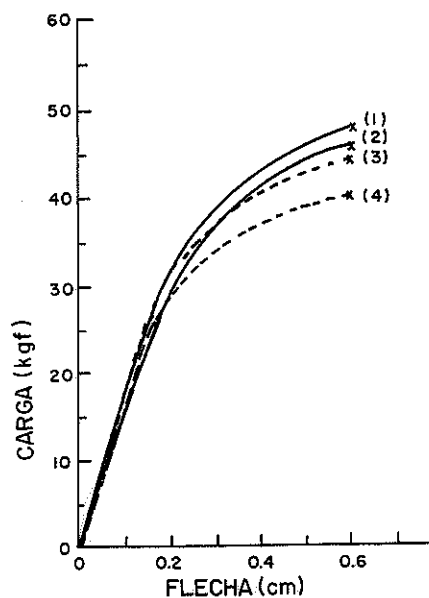


Figura 3.22 - Curvas Carga - Flecha para duas Velocidades de Carregamento e duas Velocidades de Deslocamento.

Os trabalhos encontrados na literatura tinham, na maioria dos casos, abordagens diferentes no estudo da velocidade de ensaio. Como consequência destes enfoques, os resultados apresentados, não admitem uma análise global do comportamento da madeira que permita conhecer com precisão a influência da velocidade de ensaio nos parâmetros de resistência e de elasticidade do material, evidenciando a viabilidade de novos estudos para melhor análise global do problema.

4 - SITUAÇÃO ATUAL DO PROBLEMA FACE ÀS NORMAS INTERNACIONAIS

4.1 - Introdução

A obtenção de resultados compatíveis em estudos experimentais depende, em grande parte, do conhecimento de algumas características básicas do material a ser objeto do estudo, dos equipamentos com os quais serão realizados os ensaios, dos métodos seguidos na execução de trabalho experimental, etc.

4.2 - Máquinas Universais de Ensaio

As máquinas universais de ensaio são equipamentos apropriados para transmissão de carga. São compostos basicamente de duas partes, uma destinada a fazer a aplicação do carregamento ao corpo de prova e outra a medir o carregamento. Estas duas partes podem estar no mesmo conjunto ou separadas, dependendo do projeto da máquina. Acoplados ao conjunto existem também vários acessórios tais como: suportes ou garras para a fixação dos corpos de prova, unidade geradora de potência, indicadores de velocidade, deslocamento e outros.

As primeiras máquinas de ensaio eram simplesmente compostas de um braço que servia para aplicação e medição da carga, semelhante a um sistema de balança. Desde a época de Galileu os equipamentos de ensaio tem sido aperfeiçoados até chegar às sofisticadas máquinas de ensaio da atualidade, com sistema de carregamento hidráulico, mecânico ou composto, e dotadas dos mais variados mecanismos de registro de carga.

4.2.1 - Máquina Universal de Ensaio do Tipo Mecânico

A aplicação do carregamento é realizada através do movimento de uma cabeça móvel ou de uma bandeja devido à rotação de dois ou mais parafusos sem-fim. Contém um motor principal responsável pelo movimento dos parafusos através de um sistema de transmissão o qual por sua vez pode admitir várias relações de transmissão, para permitir diferentes velocidades de ensaio. A medição da

carga aplicada é realizada através de anéis dinamométricos, células de carga, sistemas de pêndulo.

A máquina mecânica permite o controle da velocidade de deslocamento da cabeça móvel ou do travessão, possibilitando assim a aplicação da carga sob controle de deslocamento.

Na figura 4.1 é apresentado um esquema simplificado do funcionamento de uma máquina de ensaio do tipo mecânico.

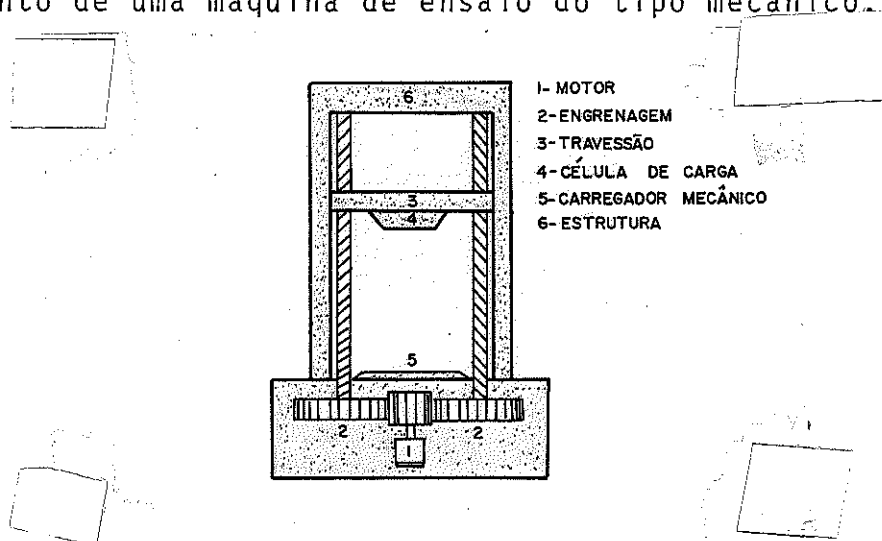


Figura 4.1 - Máquina Universal de Ensaio do Tipo Mecânico

4.2.2 - Máquina Universal de Ensaio do Tipo Hidráulico

É composta basicamente por um reservatório de óleo, uma bomba hidráulica de recalque, um cilindro hidráulico e um sistema medidor da carga aplicada, como pode ser observado na figura 4.2.

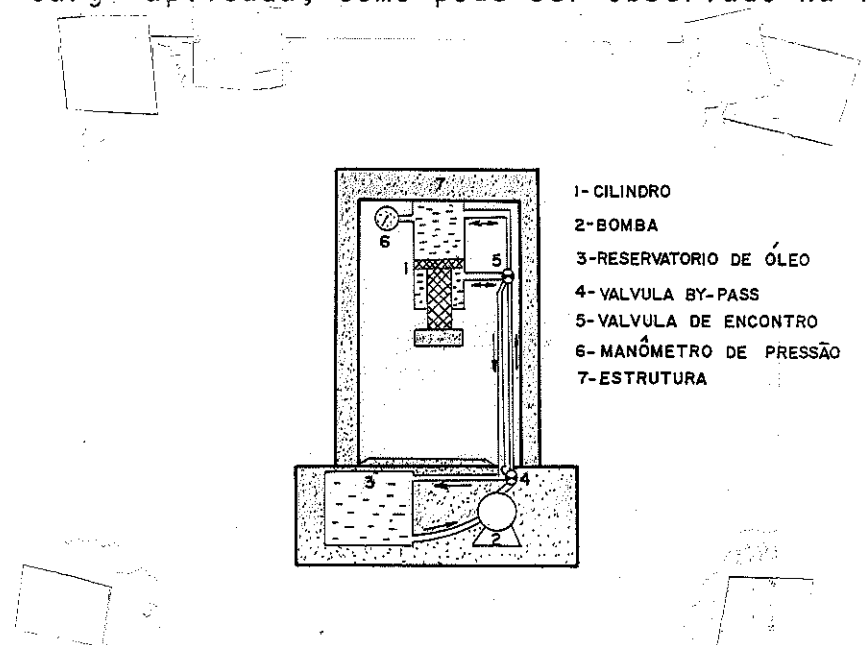


Figura 4.2 - Máquina Universal de Ensaio do Tipo Hidráulico

O funcionamento consiste principalmente no recalque do óleo do reservatório para o cilindro hidráulico. O óleo comprimido pela bomba de recalque pressiona o pistão no cilindro, causando o seu deslocamento.

Quando este deslocamento encontra oposição, aumenta a pressão do óleo até a capacidade máxima da bomba com aplicação de carga no material que está sendo ensaiado.

O avanço tecnológico tem permitido a construção de máquinas cada vez mais versáteis as quais, entre outros recursos podem apresentar a possibilidade de controlar a velocidade do deslocamento da cabeça do pistão através de uma válvula reguladora de vazão, ou a velocidade de aplicação da carga com o auxílio de uma válvula reguladora de pressão.

4.3 - Normas, Métodos de Ensaio e Especificações

As normas são, na atualidade, um elemento natural na sociedade moderna. Através delas é orientado o nosso comportamento. Na realidade a maior parte dos elementos utilizados pelo homem são normalizados desde os símbolos constituintes da linguagem até os materiais utilizados nos mais sofisticados produtos da tecnologia.

As normas em geral, possibilitam a convivência humana em harmonia; sua falta seguramente ocasionaria o caos.

Um dos períodos de maior atividade de normalização técnica foi imediatamente posterior à segunda guerra mundial, quando a indústria Americana entrou na era nuclear e na chamada segunda revolução industrial.

A ASTM (40) define normalização como o processo de formulação e aplicação de regras para recomendar o procedimento em uma atividade específica, com a cooperação de todos e para benefício geral.

Ainda segundo a ASTM, Norma é a linguagem comum que favorece o crescimento dos negócios entre comprador e vendedor garantindo o bem estar e a prosperidade.

Os métodos de ensaio são um conjunto de descrições concisas e ordenadas do procedimento a ser adotado para a determinação, de propriedades ou constituição de um material ou conjunto de materiais. As prescrições para a realização dos ensaios devem incluir todos os detalhes essenciais tais como aparelhos, corpos de prova, procedimentos, e cálculos necessários para obter boa precisão que

permita repetir os ensaios e comparar os resultados.

As especificações são um conjunto de características básicas que um determinado produto, material ou processo deve satisfazer e o procedimento por meio do qual deve-se determinar se as características são satisfatórias.

Os termos norma, método de ensaio e especificação definidos anteriormente estão intimamente ligados, por este motivo não é raro encontrar, ao consultar as normas de alguns países, tais termos, permutados. Na realidade tanto os métodos de ensaio como as especificações são normas e assim serão utilizados neste trabalho.

4.4 - As Normas e a Velocidade de Ensaio

Neste tópico é apresentada uma breve análise das velocidades de ensaio recomendadas por algumas das mais importantes normas relativas às madeiras, para ensaios de flexão.

4.4.1 - ASTM - American Society for Testing and Materials. (41)

O "Comite D-7 sobre Madeira" da ASTM elaborou a Norma para Métodos de Ensaio de Pequenos Corpos de Prova de Madeira a qual recebeu a designação D 143 - 52 e a Norma para Métodos de Ensaio Estáticos de Madeiras em Tamanhos Estruturais com a designação D 198-76.

4.4.1.1 - Norma para Métodos de Ensaio de Pequenos Corpos de Prova de Madeira. D 143 - 52 (42)

A ASTM na Norma D 143-52 no seu item 49 estabelece que "a carga deverá ser aplicada continuamente, durante o ensaio com a velocidade de movimento da cabeça móvel de 0,10 pol (0,25 cm)/min", acrescentando ainda no item 128: "a velocidade da máquina de ensaio usada não deverá variar além de $\pm 25\%$ da especificada para esse ensaio e se não for possível a obtenção dessa velocidade, a velocidade usada deverá ser registrada na folha de dados".

A medição da velocidade da cabeça móvel obedecerá dois critérios, dependendo do tipo da máquina usada no ensaio, isto é mecânica ou hidráulica.

Nas máquinas universais de ensaio do tipo mecânico a velocidade da cabeça móvel deverá ser regulada com deslocamento livre ou seja sem a colocação do corpo de prova.

Nas máquinas universais de ensaio do tipo hidráulico a regulagem deverá ser realizada com aplicação de carga, isto é, com um corpo de prova que oponha resistência ao movimento.

O corpo de prova adotado pela ASTM D 143-52 tem as seguintes dimensões 2 x 2 x 30 pol (5 x 5 x 76)cm³ e deverá ser carregado com uma carga no centro em um vão de 28 pol (70 cm).

4.4.1.2 - Norma para Métodos de Ensaio Estáticos de Madeiras em Tamanho Estrutural D 198 - 76 (43)

Destinada à avaliação de peças estruturais de madeira esta norma estabelece no seu item 7.3 a velocidade de ensaio a ser observada durante a realização do ensaio de flexão. O ensaio deverá ser realizado com aplicação constante de carga de modo a atingir o carregamento máximo num tempo aproximado de 10 min, não podendo ser, o tempo para atingir o carregamento máximo, inferior a 6 minutos ou superior a 20 minutos. A velocidade estipulada deverá permanecer constante de modo a permitir uma deformação de 0,0010 pol/pol/min (0,0010 cm/cm/min) da fibra mais afastada da linha neutra. O cálculo da velocidade de deslocamento da cabeça poderá ser realizado através da seguinte equação: (item 7.2 da D 198-76)

$$N = Z a (3\ell - 4a)/3h$$

onde:

N = velocidade de deslocamento da cabeça móvel

a = distância do apoio à carga mais próxima

ℓ = vão entre os apoios

h = altura do viga

Esta expressão pode ser deduzida a partir de duas equações: a da tensão na fibra mais solicitada, e a da flecha de uma viga submetida a um carregamento simétrico com duas cargas. Considerando a viga da figura 4.3 na qual são aplicadas duas cargas nos terços dos vãos.

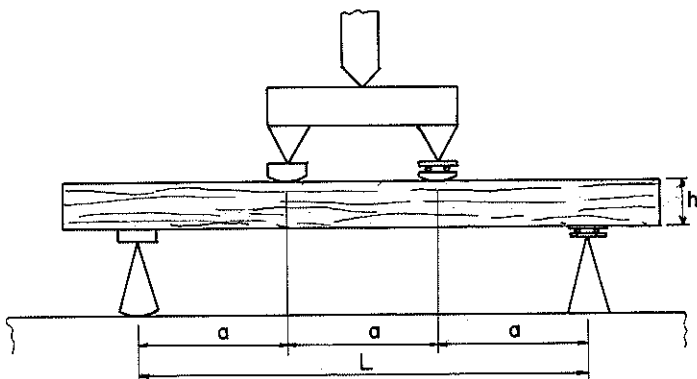


Figura 4.3 - Esquema para Ensaio Segundo a D 198 da ASTM

a tensão (σ) é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{M h/2}{I} \dots\dots\dots (4.1)$$

a flecha pode ser calculada através de:

$$\Delta = \frac{P a^2}{12 E I} (3L - 4a) \dots\dots\dots (4.2)$$

o momento, constante entre as cargas $P/2$ é:

$$M = P/2 \cdot a \dots\dots\dots (4.3)$$

substituindo (4.3) em (4.1) temos:

$$\sigma = \frac{P a h}{4I} \dots\dots\dots (4.4)$$

dividindo ambos os membros da equação (4.4) pelo módulo de elasticidade E , temos.

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{P a h}{4 E I} ; \text{ sabe-se que } \frac{\sigma}{E} = \epsilon$$

então:

$$\epsilon = \frac{P a h}{4 E I} \dots\dots\dots (4.5)$$

e;

$$E = \frac{P a h}{4 \epsilon I} \dots\dots\dots (4.6)$$

Substituindo 4.5 e 4.6 em (4.2) temos a flecha (Δ)

$$\Delta = \frac{a}{3h} \epsilon (3L - 4a)$$

dividindo ambos os membros pelo tempo:

$$\frac{\Delta}{t} = \frac{\epsilon}{t} \cdot \frac{a}{3h} (3L - 4a)$$

fazendo $\frac{\Delta}{t} = N$ (velocidade de deslocamento da cabeça móvel) e $\frac{\epsilon}{t} = Z$ (taxa de deformação), deduz-se a equação recomendada pela norma D 198 - 76 da ASTM no seu item 7.3:

$$N = \frac{Z a}{3h} (3L - 4a)$$

Calculando a velocidade de deslocamento da cabeça móvel e mantendo-a constante será possível aplicar a taxa de deformação de 0,0010 pol/pol/min (0,0010 cm/cm/min) recomendada na Norma D 198 76 da ASTM.

O corpo de prova para ser considerado estrutural deverá ter, seção transversal maior do que 2×2 pol² (5 x 5) cm² o qual será carregado em dois pontos localizados nos terços do vão.

4.4.2 - AFNOR - L'Association Française de Normalisation

4.4.2.1 - Norma Francesa. Madeiras - Métodos de Ensaio

Para execução dos ensaios destinados a determinar a Resistência à flexão e o Módulo de Elasticidade à Flexão segundo as recomendações das Normas Francesas é necessário examinar a NF B 51 002 - Características Físicas e Mecânicas das Madeiras (44) a NF B 51 - 008 - Ensaio de Flexão Estática (45) e o Protocolo de Ensaios de Laboratório de Ensaios e Emprego das Madeiras (46). É recomendado o corpo de prova de seção transversal de (2×2) cm² e um comprimento de 34 cm. A velocidade de deslocamento da cabeça do pistão, para aplicação de carga concentrada no meio do vão de 28 cm, é estipulada em 5 mm/min.

4.4.3 - LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O LNEC é o órgão encarregado da elaboração das Normas em Portugal, dependente do Ministério de Obras Públicas, as quais são chamadas de Especificações.

4.4.3.1 - Madeiras - Ensaio de Flexão Estática E 74-1960 (47)

Esta norma recomenda a aplicação da carga progressivamente a um ritmo constante para atingir a ruptura do corpo de prova ao fim de mais ou menos 3 min. As dimensões do corpo de prova são $(2 \times 2) \text{cm}^2$ de seção transversal e 34 cm de comprimento, serão bi-apoiado com distância entre apoios de 28 cm e a carga aplicada no meio do vão.

A recomendação desta norma em relação à velocidade de ensaio é de difícil análise pois o critério é muito vago dando origem a várias interpretações. A restrição no tempo de realização do ensaio devendo-se manter a velocidade constante incompatibiliza a rigorosa observação destas recomendações.

4.4.4 - BSI - British Standards Institution

A BSI é encarregada na Inglaterra da elaboração das normas. Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira apresenta as normas Britânicas BS 373 e BS 5820.

4.4.4.1 - Norma Britânica - Método de Ensaio de Pequenos Corpos de Prova de Madeira Isentos de Defeitos BS 373 (48).

A Norma Britânica BS 373 recomenda, para a avaliação do Módulo de Elasticidade à Flexão, adotar um corpo de prova de $2 \times 2 \times 40 \text{ pol}^3$ ($5 \times 5 \times 100 \text{ cm}^3$) o qual deve ser bi-apoiado com vão de 36 pol (90 cm), o carregamento aplicado através de duas cargas concentradas a 6 pol (15 cm) dos apoios e a velocidade de deslocamento da cabeça do pistão da máquina, 0,13 pol/min (3,25 mm/min).

No caso da determinação da resistência à flexão a referida norma admite a existência de dois tipos de corpos de prova: um com seção de $2 \times 2 \text{ pol}^2$ ($5 \times 5 \text{ cm}^2$) e comprimento de 30 pol (75 cm),

com vão livre de 28 pol (70 cm) e outro com seção de $(2 \times 2) \text{ cm}^2$ e 30 cm de comprimento com 28 cm entre os apoios. Nos dois casos o carregamento é aplicado através de uma carga concentrada no centro do vão com as velocidades de ensaio de 0,10 pol/min (2,50 mm/min) e 0,26 pol / min (6,50 mm/min), respectivamente

4.4.4.2 - Norma Britânica - Métodos de Ensaio para Determinação das Verdadeiras Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira em Tamanhos Estruturais BS 5820 (49)

Esta norma recomenda dois tipos de ensaios um para determinação do módulo de elasticidade à flexão e outro para determinação da resistência à flexão. O corpo de prova deverá ter uma relação l/h igual a 18, mais 75 mm de acréscimo além de cada apoio. O carregamento deve ser realizado através de 2 cargas concentradas conforme mostra a figura 4.4.

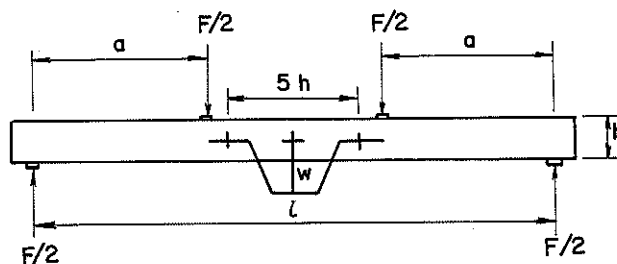


Figura 4.4 - Esquema de Ensaio para Determinar a Resistência à Flexão

a)- Módulo de Elasticidade na Flexão:

No item 12 da norma BS 5820 é recomendada a observação de uma velocidade de movimento da cabeça da máquina não maior do que:

$$R = 5a (3l - 4a) / (3l \cdot 10^5)$$

sendo

R = a velocidade de deslocamento da cabeça da máquina em mm/s.

a = é a distância entre o ponto de carga interior e o apoio mais próximo em mm.

l = \bar{e} o vão entre apoios, em mm.

h = altura da viga, em mm.

Esta equação foi deduzida tendo como base a necessidade de se ter uma taxa de deformação da fibra mais solicitada de 0,003 mm/mm/min.

b)- Resistência à Flexão

O item 14 da BS 5820 recomenda a aplicação da carga com uma velocidade tal que a carga máxima seja atingida em torno de 300 ± 120 seg. Este ensaio é de realização trabalhosa dada a necessidade de compatibilizar velocidade de carga constante e tempo para aplicação do carregamento máximo.

4.4.5 - CIB - Conseil International du Bâtiment

O Comitê de trabalho W 18 "Estruturas de Madeira" do CIB na procura da unificação das normas sobre madeiras elaborou uma Recomendação, na realidade uma norma para Métodos de ensaio de madeira, a CIB - 3TT-3 "Métodos de ensaio para madeiras em tamanho estrutural" (50) nada tem a acrescentar em relação à Norma Britânica BS 5820 pois é similar em todas suas recomendações.

4.4.6 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

A ABNT é o órgão encarregado de elaborar as normas no Brasil, as quais recebem o nome de Normas Brasileiras. Para o caso em estudo, a velocidade do ensaio, é necessário fazer referência à Norma Brasileira NBR 6230/80 (51).

4.4.6.1- Método Brasileiro de Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeira. NBR 6230/80

A NBR 6230/80 faz recomendações diferentes para a determinação da Resistência à Flexão e para o Módulo de Elasticidade à Flexão.

a)- Módulo de elasticidade à flexão:

As dimensões dos corpos de prova segundo a NBR 6230/80 item 11 (a) devem ter (6×6) cm² de seção transversal e 100 cm de com

primento. No item 11 (b) recomenda a aplicação de carga concentrada no meio do vão da peça bi-apoiada com distância entre apoios igual a 84 cm. O item 11(c) contém a recomendação para a velocidade de de ensaio, a que deverá ser de 100 kgf/cm²/min.

b)- Resistência à flexão:

Para o ensaio de resistência à flexão, a NBR 6230/80 recomenda a utilização de corpos de prova com seção transversal de (2 x 2) cm² e comprimento igual a 30 cm.

O carregamento será realizado no corpo de prova bi-apoiado com distância entre apoios igual a 24 cm e a carga deverá ser aplicada no meio do vão de modo a provocar a ruptura num tempo mínimo de dois minutos.

4.4.7- COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas

A COPANT é integrada pelos países das Américas Central e Sul, a Secretaria Técnica do Sub-Comite COPANT sc.30:1 Nomenclatura, Classificação e Ensaio de Madeiras, preparou uma série de Normas, as quais foram aprovadas entre outros países pelo Brasil.

4.4.7.1 - Norma Panamericana COPANT 555 - 1973 - Método de Ensaio de Flexão Estática e Norma Panamericana COPANT 745 - 1975 - Método de Determinação dos Esforços Unitarios Básicos (52) e (53).

De acordo com estas duas normas, o corpo de prova para realização do ensaio de Flexão Estática, visando a determinação do Módulo de Elasticidade à Flexão e da Resistência à flexão deve ter uma seção transversal de (5 x 5) cm² ou eventualmente (2 x 2) cm² e o comprimento igual a 15 vezes a altura do corpo de prova bi-apoiado com distância de 14 vezes a altura entre os apoios.

A velocidade do ensaio recomendada conduz o corpo de prova de (5 x 5) cm² a aumentar sua flecha em 2,5 mm/min ou em 10 mm/min para o corpo de prova com seção transversal de (2 x 2) cm².

4.4.8 - J S A - Japanese Standards Association

No Japão o Comite de Normas Industriais Japones através do Comite Técnico em Métodos de Ensaio para Madeira estabeleceu den

tro das Normas Industriais Japonesas JIS no ano de 1955 uma forma para Ensaio de Madeiras à Flexão.

4.4.8.1 - Método de Ensaio de Flexão para Madeira. JIS Z 2113 (54)

Segundo a JIS Z 2113 o corpo de prova deve ter uma seção transversal quadrada entre 20 e 40 mm, e um comprimento igual ao vão 14 h, acrescido de 2h. A viga será bi-apoiada com distância entre os apoios igual a 14 vezes a altura da seção transversal. O carregamento será realizado através de uma carga concentrada no meio do vão, a velocidade, o ensaio será tal que a taxa de tensão na madeira varie no máximo $150 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$.

4.5 - Comparação das Velocidades de Ensaio

É absolutamente necessário realizar uma comparação entre as velocidades de ensaio recomendadas por algumas das mais importantes normas, para assim, ter-se uma visão mais clara da magnitude do problema. A tentativa de compatibilizar os resultados, obtidos em ensaios de flexão segundo métodos de ensaio de normas diferentes, certamente seria uma tarefa cheia de dificuldades devido às recomendações a serem observadas, nos diferentes métodos de ensaio, não procederem do mesmo critério e terem entre outras diferenças o tamanho do corpo de prova o sistema de aplicação de carga e a velocidade de realização do ensaio.

Para permitir uma melhor avaliação das diferenças foram construídos dois quadros com as equivalências das velocidades de ensaio recomendadas em algumas das mais importantes normas. Para ser possível a elaboração dos quadros foi preciso o pré-estabelecer as características de uma "madeira-padrão" na qual o Módulo de Elasticidade à flexão e a tensão de ruptura são considerados com os seguintes valores:

- Módulo de elasticidade à flexão $E_f = 1000 \text{ kgf/mm}^2$
- Módulo de ruptura na flexão $\sigma_f = 10 \text{ kgf/mm}^2$

4.6 - Procedimento de Cálculo Adotado para Preenchimento dos Quadros Comparativos

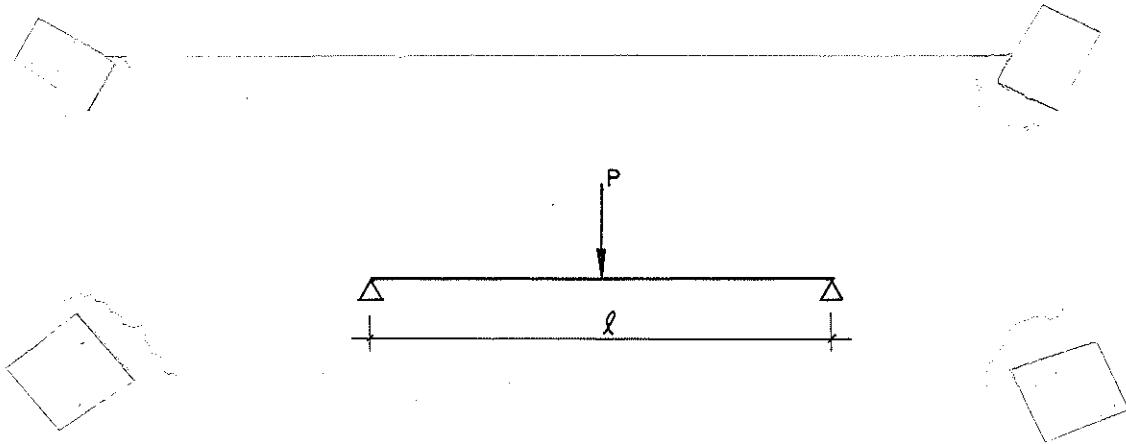
Os valores obtidos, para preenchimento dos quadros comparativos I e II, são resultantes da combinação de algumas fórmulas simples da Resistência dos Materiais, aos quais exprimem o comportamento dos corpos de prova nas condições de carregamento estabelecidas pelas normas.

4.6.1 - Relação entre Taxa de Deformação e Velocidade de Deslocamento

a)- Tensão na fibra mais solicitada:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y$$

a.1)- Para viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão e altura h

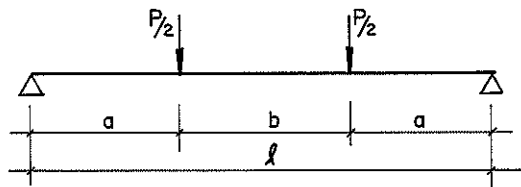


$$\text{Momento máximo } M = \frac{P \cdot l}{4}$$

Tensão na fibra mais solicitada:

$$\sigma = \frac{P \cdot l \cdot h}{8I} \dots\dots\dots (4.7a)$$

a.2)- Para viga bi-apoiada com duas cargas concentradas simétricas



Momento máximo $M = \frac{P a}{2}$

Tensão na fibra mais solicitada:

$$\sigma = \frac{P a h}{4I} \dots\dots\dots (4.7b)$$

b)- Flechã da viga:

b.1) Para viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão:

$$f = \frac{P L^3}{48 E I} \dots\dots\dots (4.8a)$$

b.2) Para viga bi-apoiada com duas cargas concentradas

$$f = \frac{P a^2}{12 E I} (3l - 4a) \dots\dots\dots (4.8b)$$

c)- Deformação específica da fibra mais solicitada:

Dividindo ambos os membros da equação da tensão σ pelo módulo de elasticidade chega-se à expressão da deformação específica ϵ .

c.1) Para viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão e altura h.

$$\epsilon = \frac{P l h}{8 E I} \dots\dots\dots (4.9a)$$

c.2) Para viga bi-apoiada com duas cargas concentradas

$$\epsilon = \frac{P a h}{4 E I} \dots\dots\dots (4.9b)$$

d)- Relação entre a deformação específica da fibra mais solicitada e a flecha da viga:

Esta relação é obtida igualando-se as expressões da deformação específica com as suas correspondentes de flecha através do módulo de rigidez EI.

d.1)- Para viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão e altura h

$$\epsilon = \frac{6 h f}{l^2} \dots\dots\dots (4.10a)$$

d.2)- Para viga bi-apoiada com carga concentrada

$$\epsilon = \frac{3 h f}{a(3L - 4a)} \dots\dots\dots (4.10b)$$

Para relacionar a taxa de deformação com a velocidade de deslocamento, dos dois tipos de carregamentos apresentados basta dividir ambos os membros das equações 4.10a e 4.10b pelo tempo para se ter:

I)- Taxa de deformação:

$$Z = \frac{\epsilon}{t}$$

II)- Velocidade de deslocamento

$$N = \frac{f}{t}$$

então:

A relação entre taxa de deformação e velocidade de deslocamento será dada por:

a)- Para o caso de uma viga bi-apoiada com carga concentrada no meio do vão:

$$Z = \frac{6 h N}{l^2} \dots\dots\dots (4.11a)$$

b)- Para o caso de uma viga bi-apoiada com duas cargas concentradas:

$$Z = \frac{3 h N}{a(3L - 4a)} \dots\dots\dots(4.11b)$$

4.6.2 - Relação entre taxa de deformação e a taxa de tensão:

Conhecendo-se a taxa de deformação determina-se através das fórmulas (4.11a) ou (4.11b) segundo o caso do carregamento, as velocidades de deslocamento correspondentes, as quais, por sua vez multiplicadas por um certo tempo t revelarão a flecha atingida pelo corpo de prova nesse tempo t. O valor da flecha, nas equações (4.8a) ou (4.8b) permitirá conhecer a carga aplicada que, nas equações (4.7a) ou (4.7b), exprime o valor da tensão aplicada no material, a qual dividida pelo tempo t, é a taxa de tensão aplicada ao material.

4.6.3 - Relação entre taxa de deformação e Velocidade de Carga

Uma vez determinada a carga aplicada como no caso anterior, basta dividi-la pelo tempo t, durante o qual se processou o carregamento, para se ter a velocidade de carga.

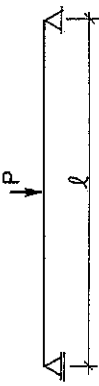
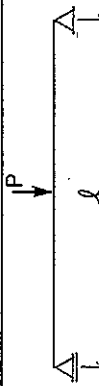
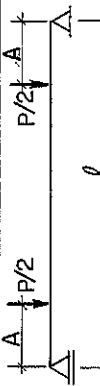

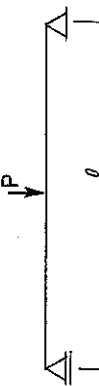
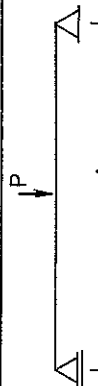
Outras eventuais relações podem ser obtidas de forma análoga, sendo suficiente o auxílio das fórmulas da Resistência dos Materiais anteriormente citadas.

O quadro comparativo I mostra as equivalências entre várias velocidade de taxas resultantes das velocidades de ensaio recomendadas por algumas das mais importantes normas para a determinação do módulo de elasticidade à flexão. As discrepâncias são enormes evidenciando não serem idênticos os critérios adotados na elaboração das normas.

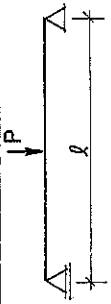
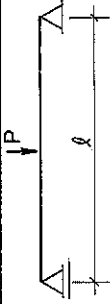
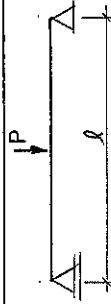
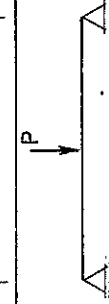

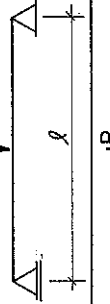
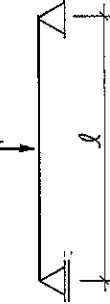
O Quadro Comparativo II com as taxas e velocidades resultantes das velocidades de ensaio de algumas das mais importantes normas para o ensaio destinado a avaliar o Módulo de Ruptura, mostra também, grandes diferenças nos valores das velocidades e taxas.

Não são poucas as organizações, preocupadas com as diferenças existentes entre as normas, procurando unificar critérios que

levem à adoção de normas universais. Na Europa pode-se citar o CIB - Conseil International du Bâtiment e na América a COPANT - (Comissão Panamericana de Normas Técnicas). Em geral, todas as organizações responsáveis pela normalização trabalham com a mesma filosofia de conseguir uniformizar critérios que possam se tornar universais. Enquanto isso não acontece, torna-se muito difícil a comparação dos resultados. Os quadros comparativos mostraram não ser possível encontrar um ponto de convergência entre as velocidades de ensaio das diferentes normas citadas. Por este fato é importante a realização de um estudo experimental para avaliar até que ponto essas diferenças, nas velocidades de ensaio, influenciam os resultados, pois, sem avaliar a magnitude da influência das discrepâncias não é possível iniciar o longo caminho da elaboração de normas universais.

NORMA MÉTODO	ESQUEMA DE CARREGAMENTO	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (mm)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (mm/mm ² /min)	TAXA DE TENSÃO (kgf/mm ² /min)	VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO (mm/min)	VELOCIDADE DE CARGA (kgf/min)
ASTM D 143-52		50 x 50 x 750 l = 700	0.0015	1.5306	2.5000	182.2157
AFNOR B 51-008		20 x 20 x 340 l = 280	0.0077	7.6531	5.0000	145.7726
B S I B5 373		50 x 50 x 1000 l = 900 a = 150	0.0015	1.5476	3.25	43.0000
ABNT NB 12-6230		60 x 60 x 1000 l = 840	0.0021	1.0000	4.0643	171.4286
COPANT 555		50 x 50 x 750 l = 700 20 x 20 x 300 l = 280	0.0015	1.5306	2.5000	182.2857
J I S E 2113		40 x 40 x 640 l = 560 20 x 20 x 320	0.0015	1.5000	1.9600	114.2857
			0.0015		1.9800	28.5714

QUADRO I - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO -- E ≈ 1000 kgf/mm²

ÓRGÃO NORMA	ESQUEMA DE CARRE- GAMENTO	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (mm)	TAXA DE DE- FORMAÇÃO (mm/mm/min)	TAXA DE TEN- SÃO (kgf/cm ² /min)	VELOCIDADE DE DESLOCA- MENTO (mm/min)	TEMPO PARA RUPTURA (min)	VELOCIDADE DE CARGA (kgf/min)
ASTM D 143-52		50 x 50 x 750 ℓ = 700	0,0015	1.5306	2.500	6.50	182.2157
AFNOR B 51.008		20 x 20 x 340 ℓ = 280	0.0077	7.6531	5.000	1.31	145.7721
LNEC E 74-160		20 x 20 x 340 ℓ = 280	0.0033	3.3333	2.156	3.00	63.4921
B S I BS - 373		50 x 50 x 750 ℓ = 700 20 x 20 x 300 ℓ = 280	0.0015	1.5306	2.500	6.50	182.2157
ABNT NB 12-6230		20 x 20 x 300 ℓ = 240	0.0050	5.0000	2.400	2.00	111.1111
COPANT 555		50 x 50 x 750 ℓ = 700 20 x 20 x 300 ℓ = 280	0.0150	1.5306	2.500	6.50	182.2157
J I S Z 2113		40 x 40 x 640 ℓ = 560 20 x 20 x 320	0.0015	1.5000	1.960	6.60	114.2857
			0.0015		1.98	6.60	28.5714

QUADRO II - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA NA FLEXÃO - $\sigma_f = 1000 \text{ kgf/mm}^2$ $\sigma_f = 10 \text{ kgf/mm}^2$

5 - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E ENSAIOS PRELIMINARES

5.1 - Introdução

À vista da revisão bibliográfica apresentada nos capítulos 3 e 4, evidentemente existe uma significativa influência da velocidade de ensaio na determinação da resistência da madeira. Entretanto, as normas internacionais não tendem para um critério comum e menos ainda para um critério universalmente válido na fixação da velocidade de ensaio.

A necessidade de avaliar a influência da velocidade de ensaio, objetivo do presente trabalho, exige a escolha dos materiais e métodos adequados à finalidade da pesquisa experimental.

5.2 - Material em Pesquisa

O trabalho experimental foi realizado em corpos de prova de Peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*). A escolha da Peroba rosa obedeceu principalmente ao fato desta ser uma espécie com ampla utilização nas estruturas de madeira e a facilidade de obtenção de peças de dimensões compatíveis com o objetivo da pesquisa.

5.2.1 - A Peroba rosa e suas Propriedades

5.2.1.1 - Propriedades Organolépticas

A Peroba rosa conhecida também como Amargoso, Peroba mirim, Peroba rajada, Peroba açu, Sobro (55), botanicamente pertence à família das Apocinácias, ao gênero das *Aspidospermas* e à espécie *polyneuron*. Daí resulta o seu nome botânico *Aspidosperma polyneuron*. No exterior é conhecida como Palo rosa.

A Peroba rosa é madeira pesada, tendo peso específico variando entre 0,75 e 0,85 g/cm³, o cerne normalmente apresenta uma coloração vermelho rosado, uniforme ou com veios ou manchas vermelho arrochados mais escuras, sua superfície não apresenta lustro. A Peroba rosa tem cheiro característico, sabor amargo, textura fina.

É encontrada em toda a bacia do alto Paranã, abrangendo os estados de Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paranã.

Pelas suas qualidades vem sendo muito usada nas estruturas de madeira.

5.2.1.2 - Propriedades Mecânicas

Do Boletim nº 31 do IPT (56) foram extraídos algumas características mecânicas, relativas à flexão, da Peroba rosa.

a)- Limite de Resistência à Flexão:

A resistência da Peroba rosa varia entre $7,67 \text{ KN/cm}^2$ para madeira verde e $10,83 \text{ KN/cm}^2$ para madeira em 15% de umidade.

b)- Módulo de Elasticidade à Flexão:

O módulo de elasticidade à flexão da Peroba rosa, madeira verde em torno de $920,00 \text{ KN/cm}^2$.

c)- Limite de Proporcionalidade na Flexão: madeira verde Está situado ao redor dos $3,40 \text{ KN/cm}^2$.

5.2.2 - Origem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova de Peroba rosa, foram extraídos de uma viga de seção quadrada, a qual, pelas suas características físicas permitiu o corte de pequenos corpos de prova semelhantes, de modo a ser possível a comparação dos resultados dentro de uma faixa de variação não muito ampla.

5.2.3 - Dimensões dos Corpos de Prova

5.2.3.1 - Ensaio Preliminar - Viga

A peça da qual foram cortados os pequenos corpos de prova, tinha uma seção transversal de $(16 \times 16) \text{ cm}^2$ e comprimento igual a 400 cm.

5.2.3.2 - Ensaio Principais

As dimensões dos pequenos corpos de prova foram escolhidas de modo a compatibilizar o número de corpos de prova em função da peça original e a facilitar a execução dos ensaios. Os pequenos corpos de prova foram cortados com uma seção transversal de $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ e comprimento de 120 cm.

A seção transversal foi escolhida com $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ para permitir a divisão da seção transversal da viga $(16 \times 16) \text{ cm}^2$ em 9 seções de $(5 \times 5) \text{ cm}^2$, considerando as eventuais perdas na serra circular usada no corte correspondente. O comportamento devia atender a necessidade de realizar ensaios de flexão nos quais o vão máximo tivesse comprimento 21 h.

5.3 - Equipamento de Carga

Antes da realização do ensaio é necessário conhecer a capacidade e as demais características do equipamento de aplicação de carga. O conhecimento das características destes equipamentos é fator determinante para alcançar os objetivos do ensaio.

5.3.1 - Ensaio Preliminares

Na realização dos ensaios preliminares foi utilizado, para a aplicação de carga, um cilindro hidráulico de 10 t com um anel dinamométrico. Este conjunto foi instalado na laje de reação do LaMEM através de um pórtico rígido.

5.3.2 - Ensaio Principais

Todos os ensaios nos corpos de prova de $(5 \times 5 \times 120) \text{ cm}^3$ foram realizados na Máquina de Ensaio, tipo hidráulico, do LaMEM, fabricada por ALFRED J. AMSLER & CO. SHAFFHOUSE (SUISSE) com capacidade de carga de até 25 tf.

Os valores dos deslocamentos foram lidos através de relógios comparadores de 3,0 cm de curso e precisão de Leitura 0,01mm.

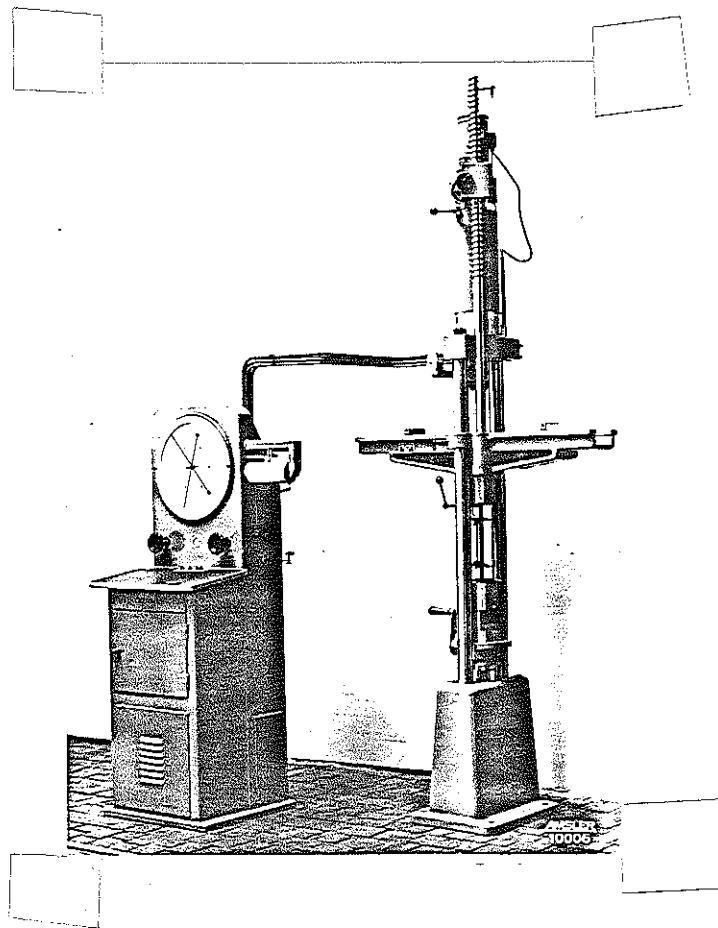


Figura 5.1 - Máquina Universal de Ensaio com Dinamômetro de Pêndulo à Esquerda e o Conjunto de Aplicação do Carregamento à Direita, Construída por Alfred J. Amsler & Co. Schaffhouse (Suisse). Capacidade Máxima de Carga 25tf.

5.3.2.1 - Máquina Universal de Ensaio

O equipamento mostrado na figura 5.1 é chamado Máquina Universal de Ensaio devido à possibilidade de serem realizados vários tipos de ensaio; por exemplo: tração, compressão, flexão, dobramento, cisalhamento, etc. É composto basicamente de duas unidades principais: o Dinamômetro de Pêndulo e o Conjunto de aplicação do carregamento.

5.3.2.2 - Dinamômetro de Pêndulo

É um equipamento de precisão aceitável acionado por pressão hidráulica, encarregado de registrar instantaneamente a força exercida pelo conjunto de aplicação do carregamento, através do manômetro a pistão, ligado a um pêndulo. É possível ainda o traçado automático do diagrama aproximado carga-deslocamento.

5.3.2.3 - Conjunto de Aplicação do Carregamento

O conjunto de aplicação do carregamento é composto basicamente por dois pistões e uma viga de reação colocada dentro de um quadro rígido. Os pistões trabalham isoladamente deslocando as cargas máximas de 2,50 KN até 250,00 KN. A viga de reação pode ser deslocada rapidamente por intermédio de duas hastes helicoidais acionadas por um motor elétrico.

5.3.2.4 - Funcionamento da Máquina Universal - AMSLER

A bomba hidráulica, acionada por um motor elétrico, desloca o óleo do reservatório aos cilindros do conjunto de carga, o óleo ao ser recalcado passa por um regulador de vazão e um registro de admissão, chegando com vazão constante ao conjunto de cilindro, permitindo assim um controle aceitável da velocidade de ensaio.

5.4 - Aparelhos de Medição

A escolha dos relógios comparadores, extensômetros, escalas de ampliação de diagramas e outros aparelhos de medida depende também do conhecimento do valor estimado, do Módulo de Elasticidade. O desconhecimento deste valor dificulta a avaliação das deformações e deslocamentos a ocorrerem durante a realização do ensaio, podendo ocorrer interrupções nas medidas, falta de precisão ou danos nos aparelhos.

Com o propósito de evitar estes problemas, foi realizado um ensaio preliminar para determinação do valor aproximado do Módulo de Elasticidade à Flexão.

5.5 - Ensaio Preliminar

Em trabalhos experimentais, nos quais o número de corpos de prova é reduzido seja pela dificuldade na obtenção, seja pelo desejo de minimizar a variabilidade das características, para atender aos requisitos da pesquisa, é absolutamente necessário um criterioso e cuidadoso planejamento dos ensaios a realizar durante a pesquisa, para assim, evitar perdas de dados ou pior ainda, de corpos de prova. O planejamento dos ensaios depende em grande par

te do conhecimento de valor aproximado do Módulo de Elasticidade das peças a ensaiar, pois com este valor é possível o dimensionamento das capacidades dos equipamentos a utilizar na realização dos ensaios.

5.5.1 - Metodologia

A peça de Peroba rosa de dimensões (16 x 16 x 400) cm³ foi submetida a ensaio de flexão estática, foram realizados 15 carregamentos, variando o espaçamento entre os apoios, correspondendo a uma relação vão/altura (l/h) para cada aplicação de carga. Durante a realização dos carregamentos, por meio de um cilindro hidráulico, a taxa de tensão, na fibra mais solicitada, foi 100,00 kgf/cm² min. O vão livre entre os apoios foi sendo alterado desde 22,5 h até 9,35 h com o objetivo de verificar a influência, no Módulo de Elasticidade à flexão da relação vão/altura (l/h), apresentado por Francisco Antonio Rocco Lahr (57).

A flecha, no centro da viga, foi medida através de um relógio comparador. A velocidade de deslocamento do pistão para permitir a taxa constante de tensão na fibra mais solicitada foi regulada através do painel de controle de um dos sistemas de carregamento do LaMEM e de um cronômetro.

A leitura do valor de carga aplicada foi realizada através do anel dinamométrico fixado na cabeça do pistão do cilindro hidráulico. A montagem geral do ensaio preliminar é ilustrada através da fotografia da figura (5.2).

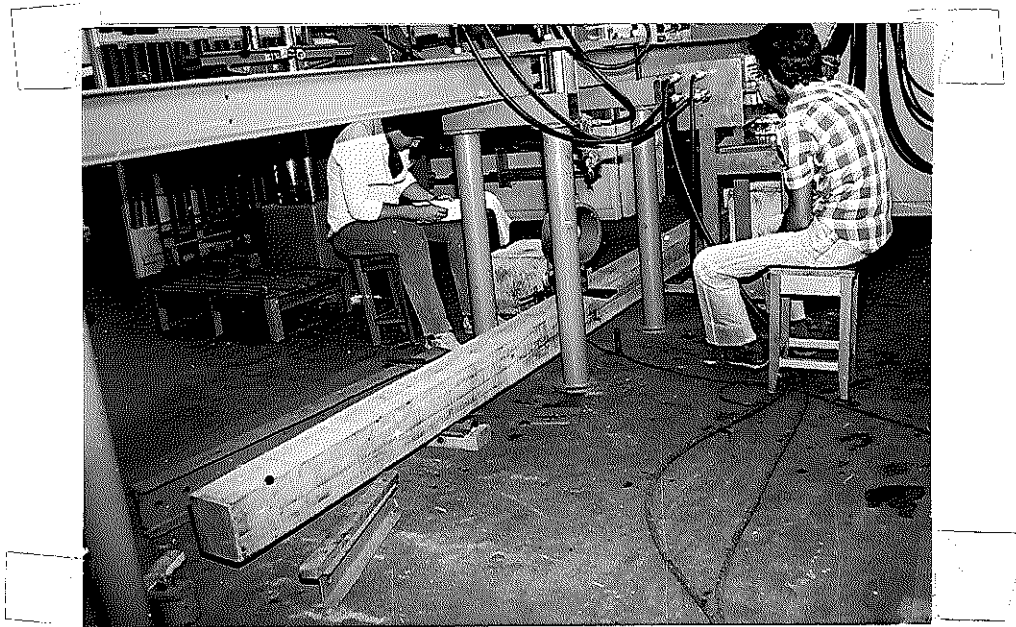


Figura 5.2 - Vista Geral da Montagem do Ensaio Preliminar

5.5.2 - Resultados

Os resultados experimentais preliminares foram submetidos a uma análise de regressão linear, dando origem à equação (5.1).

$$E = 549.703 + 469,635 \log (\ell/h) \dots \dots \dots (5.1)$$

Esta equação é válida para vãos livres entre apoios de até 21 h. Substituindo os valores correspondentes de ℓ/h na equação (5.1) pode-se estimar o valor aproximado do Módulo de Elasticidade à flexão ajustado para cada valor de ℓ/h . Trata-se de estimativa, pois, o ensaio de um corpo de prova, não é suficiente para generalização dos resultados.

A estimativa do Módulo de Elasticidade à flexão foi considerada válida e de grande utilidade para o planejamento da experimentação futura.

A tabela IV contém os valores obtidos do Módulo de Elasticidade à flexão para vários valores de ℓ/h .

ℓ/h	E (KN/cm ²)
21	1170.66
20	1160.71
19	1150.25
18	1139.22
17	1127.56
16	1115.20
15	1102.04
14	1087.96
12	1056.52
10	1019.34

TABELA IV - Valores Aproximados do Módulo de Elasticidade à Flexão

6 - VELOCIDADE DE ENSAIO VS MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO - ESTUDO EXPERIMENTAL

6.1 - Introdução:

Para determinar a possível influência da velocidade de ensaio no valor do Módulo de Elasticidade foram realizados vários ensaios com os corpos de prova extraídos a partir da viga de dimensões $(16 \times 16 \times 400) \text{ cm}^3$.

6.2 - Corpos de Prova

6.2.1 - Dimensões

Os corpos de prova foram cortados de maneira a terem, aproximadamente, seção transversal $(5 \times 5) \text{ cm}^2$ e comprimento de 120 cm.

6.2.2 - Quantidade

Para a realização dos ensaios principais foram confeccionados 18 corpos de prova de dimensões $(5 \times 5 \times 120) \text{ cm}^3$. Na figura 6.1 pode ser observado o esquema de corte dos corpos de prova a partir da viga de $(16 \times 16 \times 400) \text{ cm}^3$.

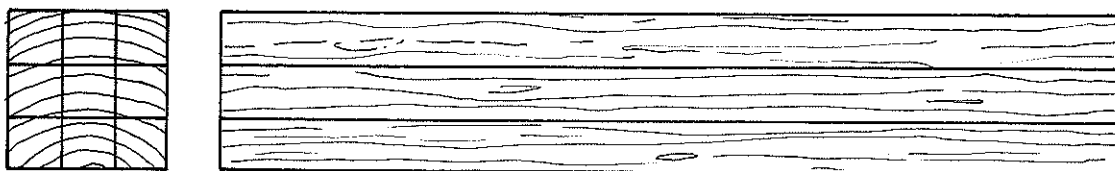


Figura 6.1 - Esquema de Corte para Obtenção dos Corpos de Prova

6.3 - Esquema Estático

O esquema estático adotado para a realização dos ensaios correspondeu ao de uma viga simplesmente apoiada. O carregamento foi aplicado

através de uma carga concentrada no meio do vão livre (ℓ) figura 6.2.

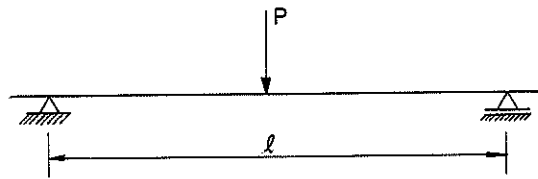


Fig. 6.2 - Esquema Estático dos Ensaio.

6.4 - Relação Vão Livre/Altura (ℓ/h)

A distância entre os apoios, vão livre, para realizar os ensaios de flexão foi escolhida em função da altura do corpo de prova de modo a ter-se 6 relações vão livre/altura (ℓ/h). As seis relações (ℓ/h) foram em média: 10; 12; 14; 16; 18 e 21.

6.5 - Velocidade de Ensaio

Os corpos de prova foram ensaiados com 12 velocidades de carga variando entre 0,25 KN/min e 3,00 KN/min.

De cada velocidade de carga foram extraídas as correspondentes taxas de tensão, deformação e a velocidade de deslocamento. Isto é possível mantendo-se o carregamento dos corpos de prova no regime elástico. Foram elaboradas 18 tabelas contendo as velocidades de carga para cada corpo de prova em função da relação (ℓ/h). O quadro III contém, como ilustração, os valores da tabela elaborada para o corpo de prova nº 1.

ℓ/h	VELOCIDADE DE CARGA EM KN/MINUTO											
10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
12	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
14	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
16	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
18	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
21	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00

Quadro III - Valores das Velocidades para Carregamento do Corpo de Prova 1

6.6 - Metodologia

6.6.1 - Condicionamento dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram mantidos submersos em água para permanecerem saturados até o momento do ensaio, quando eram retirados, enxugados e medida a seção transversal com um paquímetro. Após a realização do ensaio os corpos de prova eram recolocados na água.

6.6.2 - Procedimento de Carga

O corpo de prova colocado na viga de reação da Máquina Universal de Ensaio AMSLER, era disposto de maneira a ter um vão livre (l) pré-determinado e receber a aplicação da carga concentrada no meio do vão.

Esta disposição é ilustrada pela fotografia da figura 6.3.

Instalados os corpos de prova aplica-se-lhes o carregamento necessário. Uma vez atingido este carregamento, o corpo de prova era descarregado, suavemente, até a completa descarga. Descarregado, era deixado em repouso até retornar completamente à posição original, só então iniciado um novo carregamento em outra velocidade, não necessariamente a imediata superior ou inferior. E assim, sucessivamente, ensaiando em 12 velocidades. Completados este ciclo de carregamento, mudava-se a posição dos apoios, para permitir outra relação l/h . Com este procedimento realizaram-se todos os ensaios nos 18 corpos de prova. A relação l/h só era alterada quando completado o ciclo de 12 carregamentos com aquela relação. Este procedimento permite eliminar possível interferência nos resultados de pequenas variações da relação l/h .

6.6.3 - Medição das Flechas

As flechas produzidas pelos carregamentos foram medidas com o auxílio do relógio comparador, fixo a uma haste e encostado numa chapa de metal pregada na face lateral, à altura da linha neutra do corpo de prova, como ilustra a fotografia da figura 6.4.

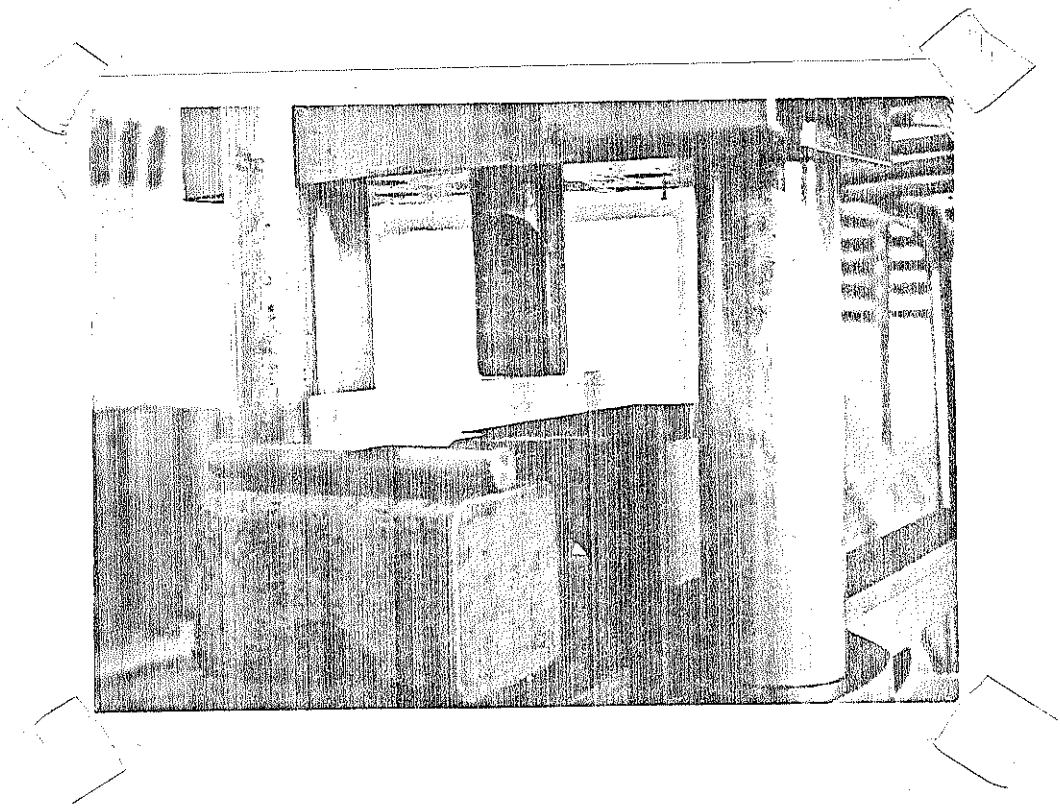


Figura 6.3 - Vista Geral da Montagem do Ensaio na Máquina Universal AMSLER

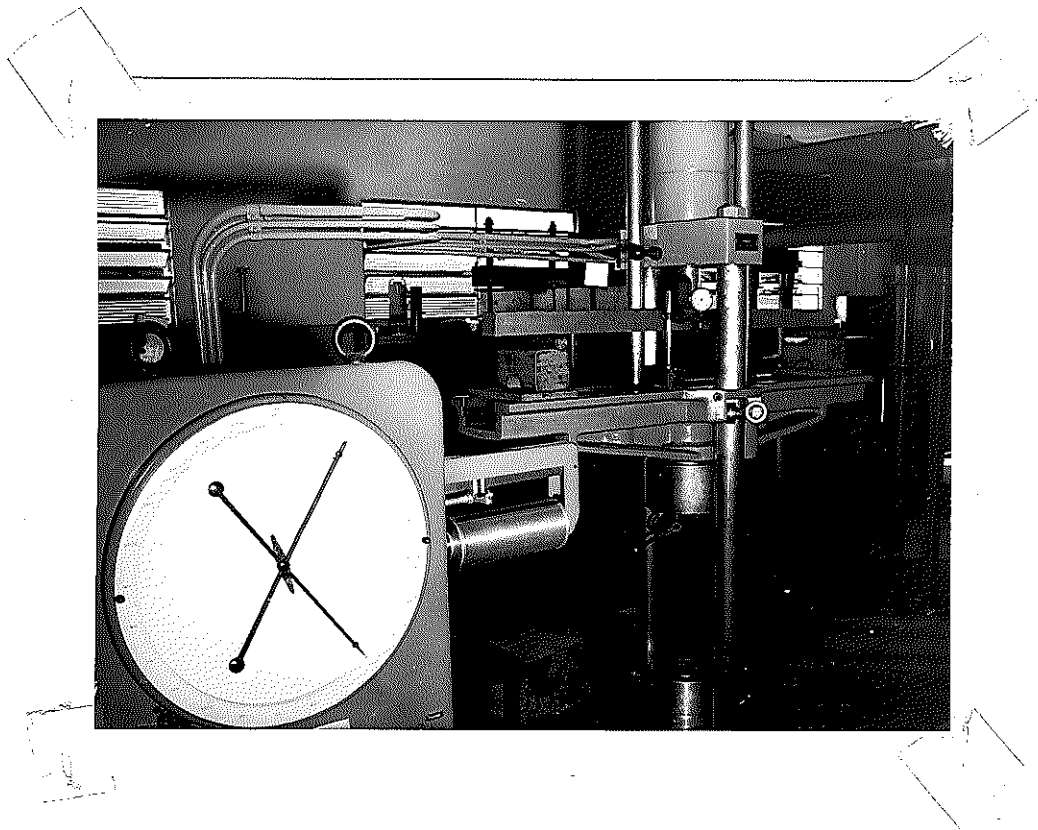


Figura 6.4 - Montagem do Relógio Comparador para Medição da Flecha do C. P.

6.6.4 - Controle da Velocidade

Durante a realização dos ensaios foi observado um rigoroso controle da velocidade, para ser mantida constante do início até o fim do carregamento. O controle do tempo foi realizado com o auxílio de um cronômetro de 10^{-2} segundos de precisão.

O controle eficaz da velocidade de carga depende, em grande parte, da prática na operação do equipamento, principalmente da familiaridade com a sensibilidade das válvulas. Para auxiliar no controle da velocidade de carga foi elaborada a folha de dados apresentada no quadro IV.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS			
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS			
LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (LaMEM)			
Pesquisa:			
Operador:		Data:	
Ensaio	c.p.	ℓ/h	
Velocidade do Ensaio	Dimensões:		
Equipamento de Carga:			
TEMPO	CARGA	FLECHA	OBSERVAÇÕES

QUADRO IV - Folha de Dados

Na coluna correspondente ao Tempo eram anotados os tempos nos quais eram realizadas as leituras das flechas, na coluna Carga, as cargas nas quais eram realizadas as leituras. O controle é simples: basta comparar o valor da carga registrada na folha de dados, correspondente ao tempo marcado pelo cronômetro, com a carga aplicada pelo equipamento. No caso da Máquina Universal de Ensaio AMSLER, quando a carga aplicada é um pouco maior ou menor em relação à da folha de dados é suficiente fechar ou abrir, respectivamente a válvula de carga.

7 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

7.1 - Introdução:

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante o estudo experimental programado para verificar a influência da velocidade de ensaio no Módulo de Elasticidade à Flexão.

Devido ao elevado número de ensaios, os resultados não são apresentados na sua totalidade, mas a quantidade apresentada transmite claramente a idéia do modo como foram manipulados durante a análise correspondente.

7.2 - Diagramas - Carga x Flecha

Durante a realização dos ensaios foram registrados os valores das flechas, apresentadas pelos corpos de prova, correspondentes aos diversos estágios de carregamento de cada ensaio.

Com a finalidade de conhecer o padrão dos diagramas carga x flecha, foram traçados 72 diagramas correspondentes aos ensaios realizados, com 6 relações l/h e 12 velocidades de carga, no corpo de prova nº 1. Os diagramas traçados foram considerados satisfatórios verificando-se não existir necessidade de traçar os diagramas para todos os ensaios. Posteriormente, todos os resultados experimentais, separados por ensaios, foram submetidos à análise de regressão linear. Desta análise resultaram 1296 equações relacionando a carga aplicada com a flecha apresentada pelo corpo de prova.

Nas figuras 7.1 até 7.12 são apresentados apenas 12 dos 72 diagramas carga x flecha com as respectivas equações relacionando a carga com a flecha.

$$\text{FLECHA (MM)} = 0.726 \times \text{CARGA (KN)} - 0.043$$

$$R\text{-QUADRADO} = 99.82 \%$$

CARGA (KN)

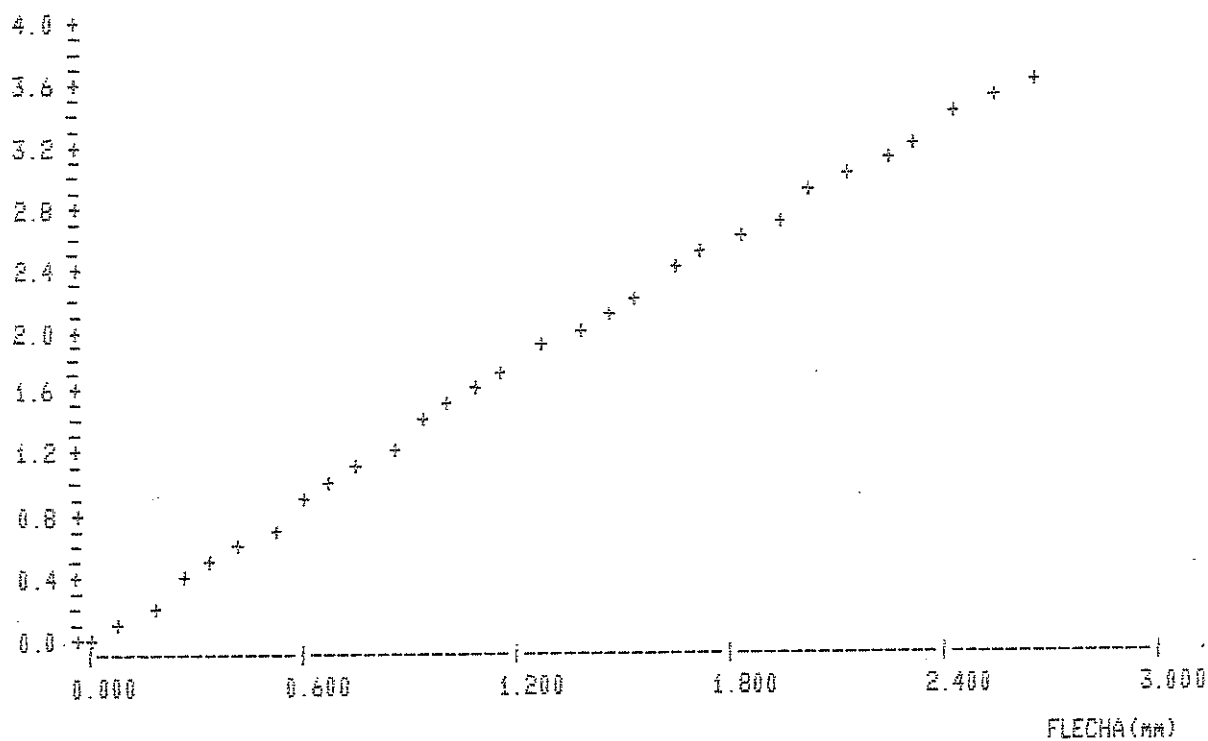


Figura 7.1 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 10$

Velocidade de Ensaio $V_e = 0,25$ KN/min

$$\text{FLECHA(mm)} = 1.208 \times \text{CARGA(KN)} - 0.078$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.87 \%$$

CARGA(KN)

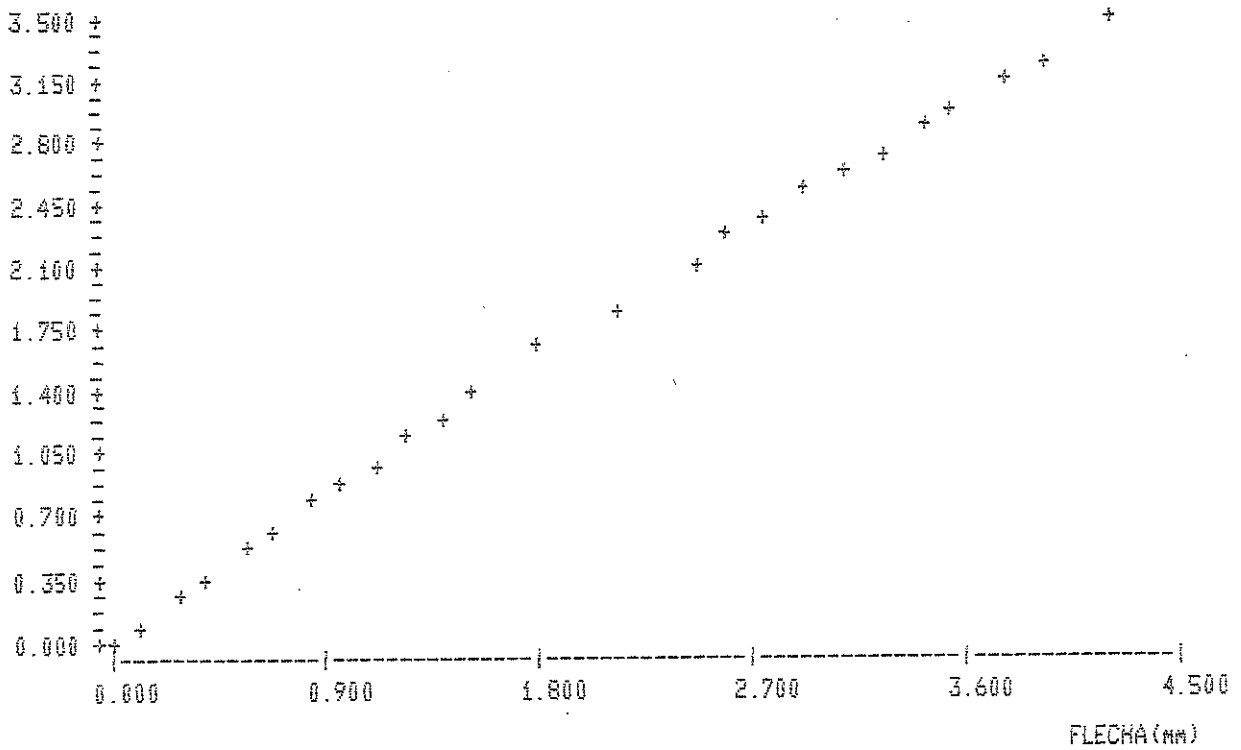


Figura 7.2 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 12$

Velocidade de Ensaio $V_e = 0,50$ KN/min

$$\text{FLECHA(mm)} = 1.839 \times \text{CARGA(KN)} - 0.155$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.71 \%$$

CARGA(KN)

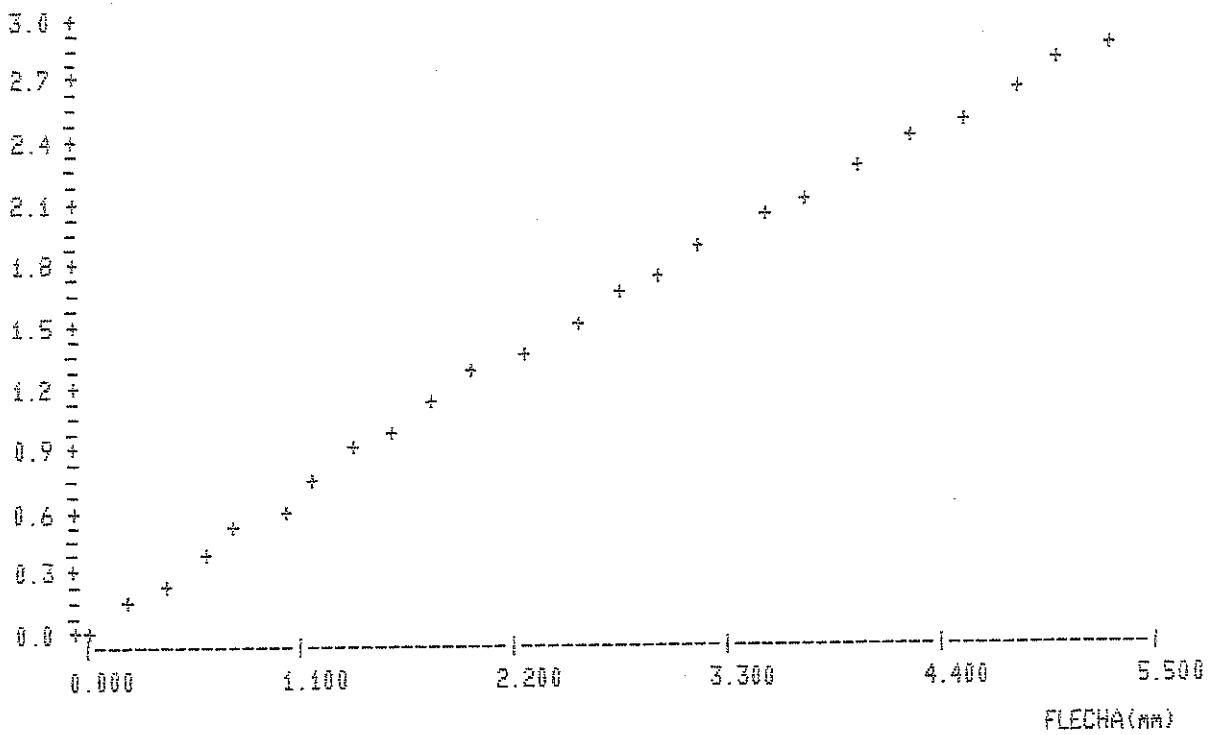


Figura 7.3 - Diagrama Carga x Flecha
Relação $l/h = 14$
Velocidade de Ensaio $V_e = 0,75 \text{ KN/min}$

$$\text{FLECHA(mm)} = 2.705 \times \text{CARGA(KN)} - 0.030$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.67 \%$$

CARGA(KN)

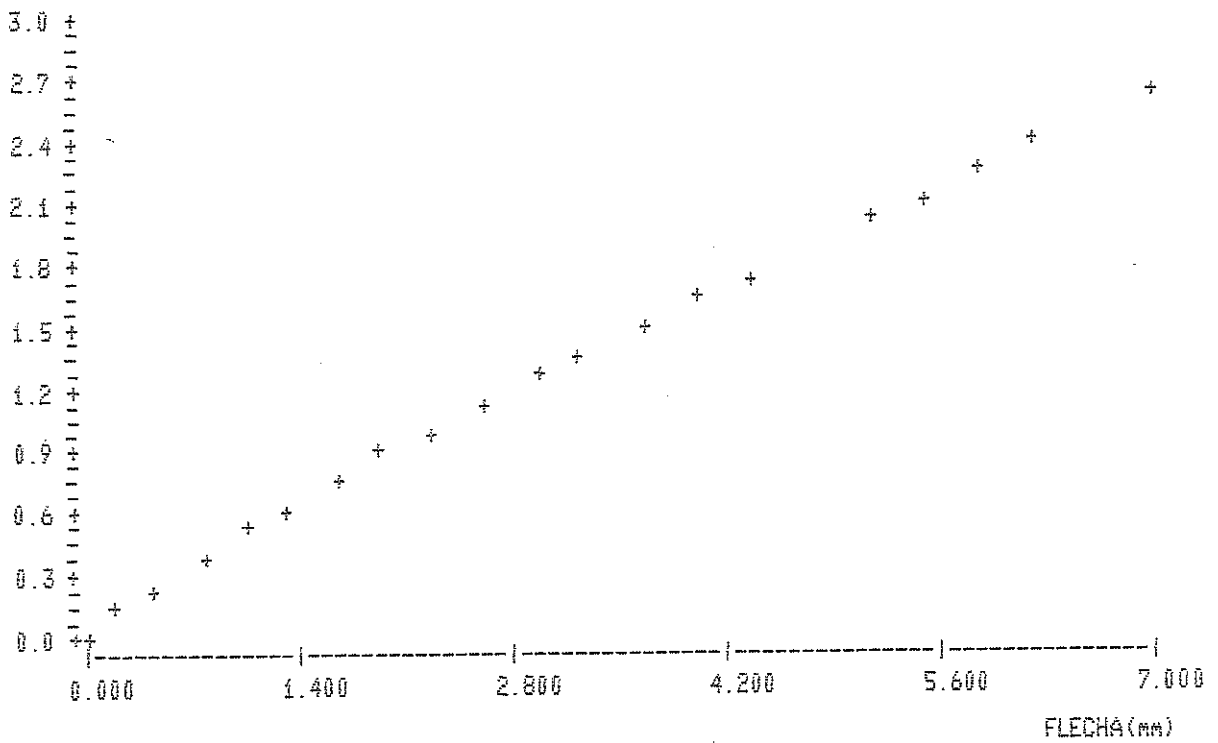


Figura 7.4 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 16$

Velocidade de Ensaio = 1,00 KN/min

$$\text{FLECHA (mm)} = 3.686 \times \text{CARGA (KN)} - 0.264$$

R-QUADRADO = 99.78 %

CARGA (KN)

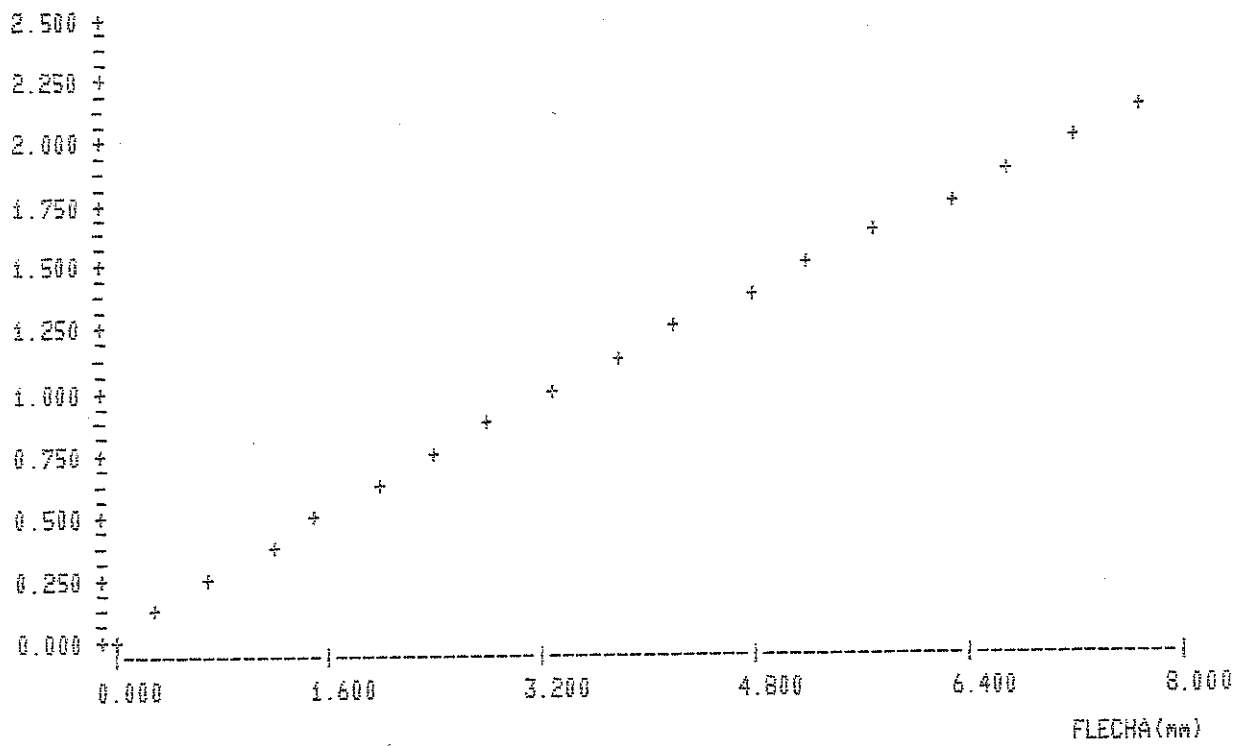


Figura 7.5 - Diagrama Carga x Flecha
Relação $l/h = 18$
Velocidade de Ensaio = 1,25 KN/min

$$\text{FLECHA(mm)} = 5.847 \times \text{CARGA(KN)} - 0.023$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.83\%$$

CARGA(KN)

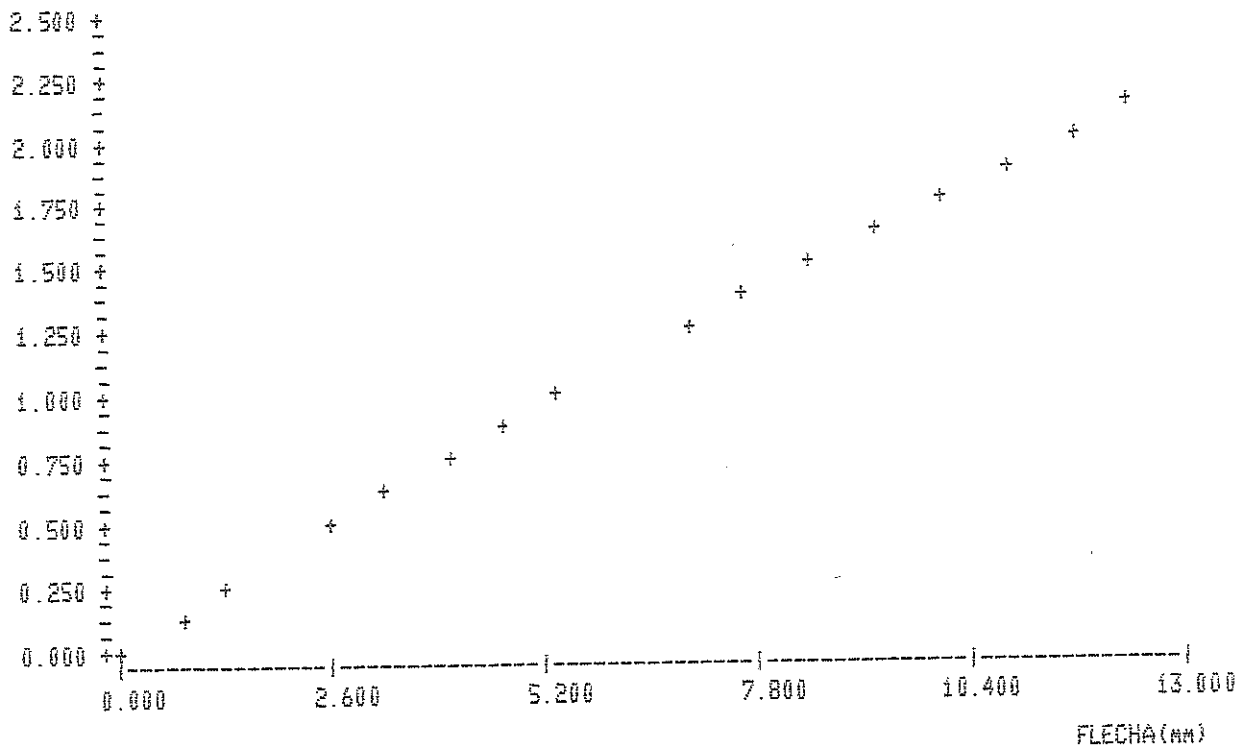


Figura 7.6 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 21$

Velocidade de Ensaio $V_e = 1,50$ KN/min

$$\text{FLECHA(mm)} = 0.728 \times \text{CARGA(KN)} - 0.058$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.85 \%$$

CARGA(KN)

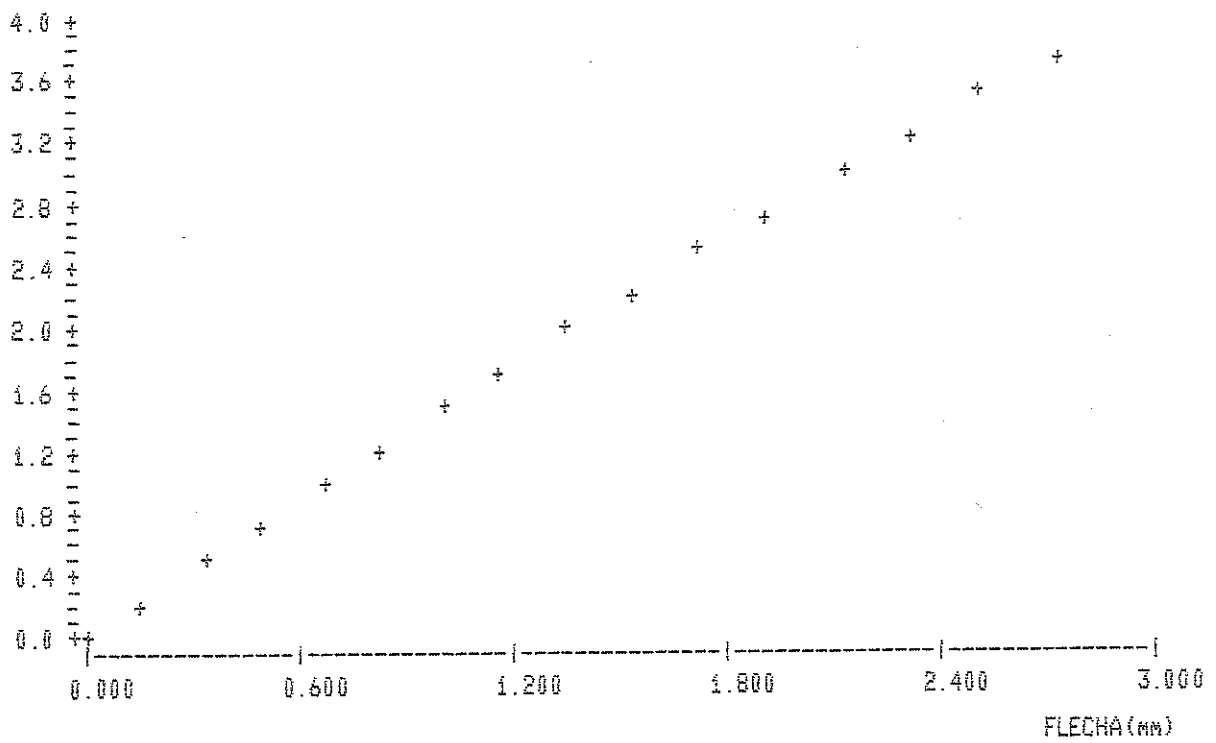


Figura 7.7 - Diagrama Carga x Flecha
Relação $\ell/h = 10$
Velocidade de Ensaio $V_e = 1,75 \text{ KN/min}$

$$\text{FLECHA (MM)} = 1.203 \times \text{CARGA (KN)} - 0.110$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.85 \%$$

CARGA (KN)

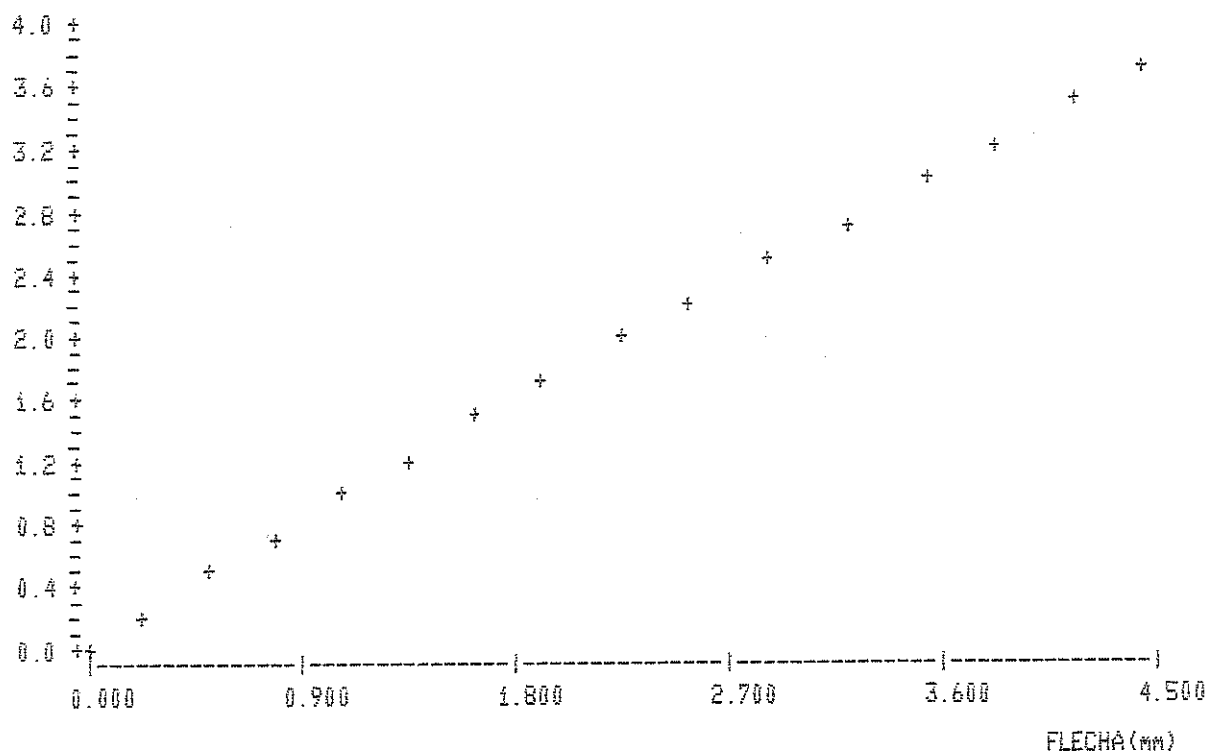


Figura 7.8 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 12$

Velocidade de Ensaio $V_e = 2,00$ KN/min

$$\text{FLECHA(mm)} = 1.814 \times \text{CARGA(KN)} - 0.198$$

R-QUADRADO = 99.75 %

CARGA(KN)

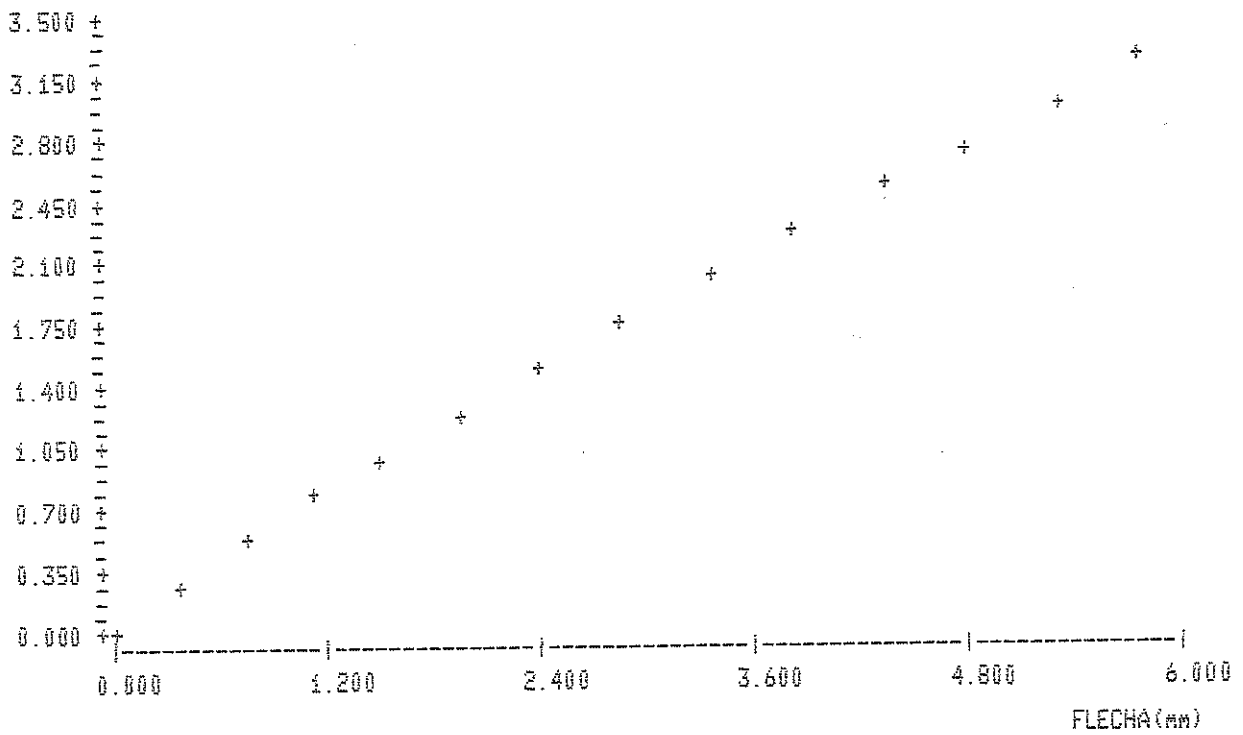


Figura 7.9 - Diagrama Carga x Flecha
Relação $l/h = 14$
Velocidade de Ensaio $V_e = 2,25$ KN/min

$$\text{FLECHA (mm)} = 2.583 \times \text{CARGA (KN)} - 0.223$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.63 \%$$

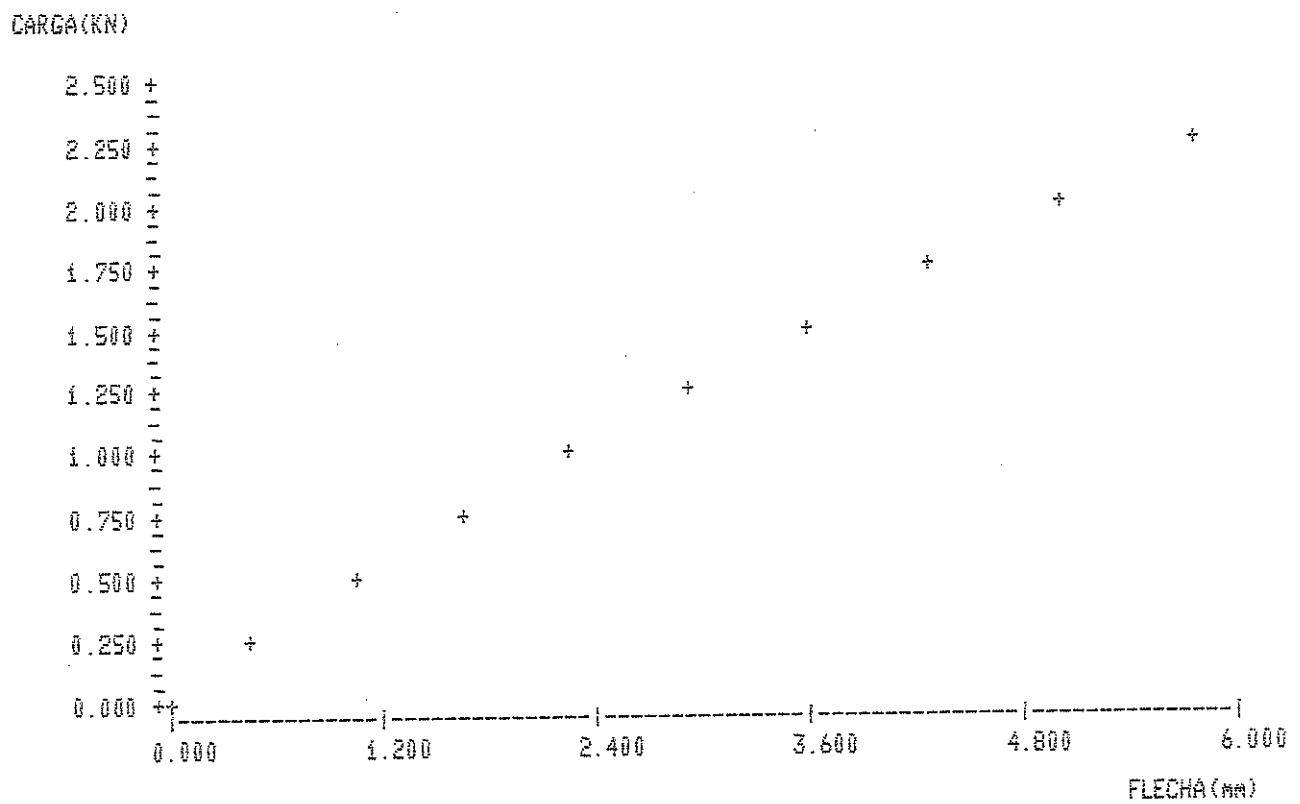


Figura 7.10 - Diagrama Carga x Flecha
Relação $l/h = 16$
Velocidade de Ensaio $V_e = 2,50 \text{ KN/min}$

$$\text{FLECHA(mm)} = 3.653 \times \text{CARGA(KN)} - 0.270$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.71 \%$$

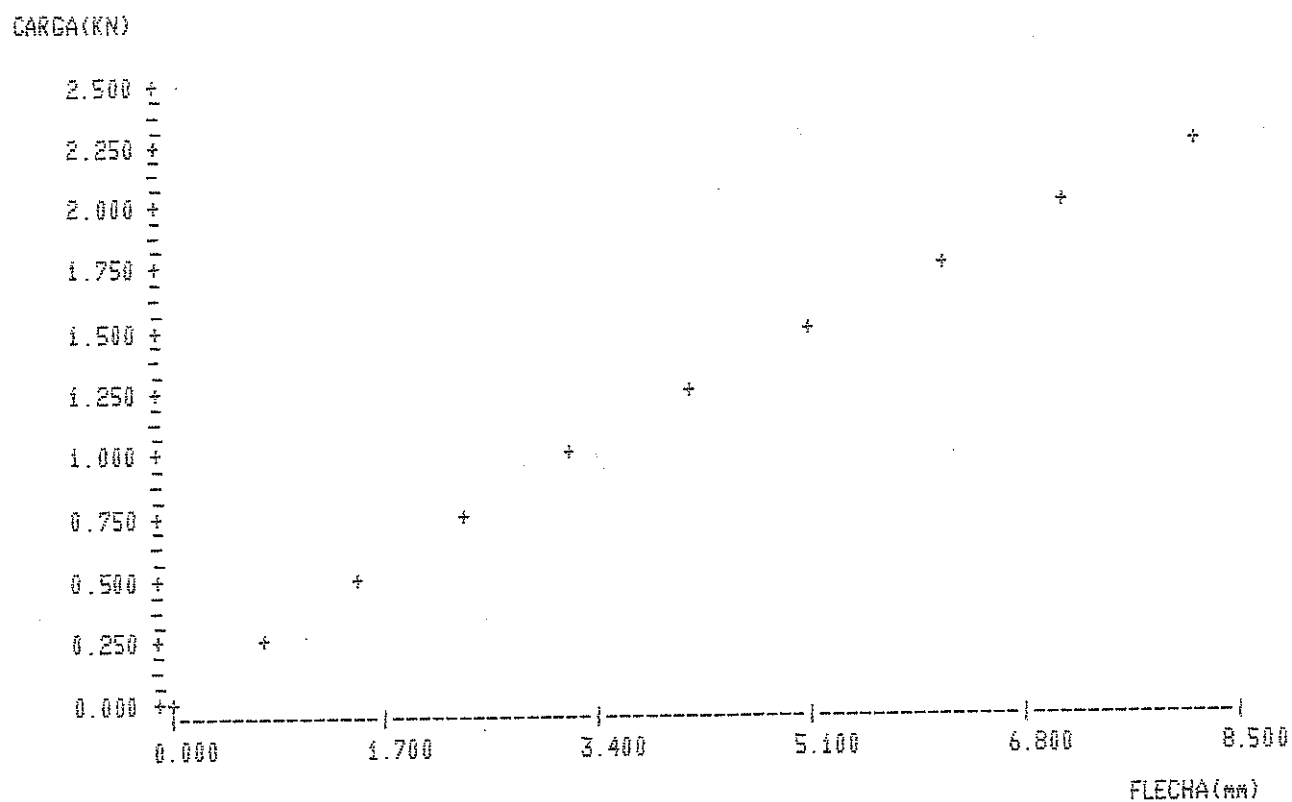


Figura 7.11 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 18$

Velocidade de Ensaio $V_e = 2,75 \text{ KN/min}$

$$\text{FLECHA(mm)} = 5.697 \times \text{CARGA(KN)} - 0.230$$

$$\text{R-QUADRADO} = 99.86 \%$$

CARGA(KN)

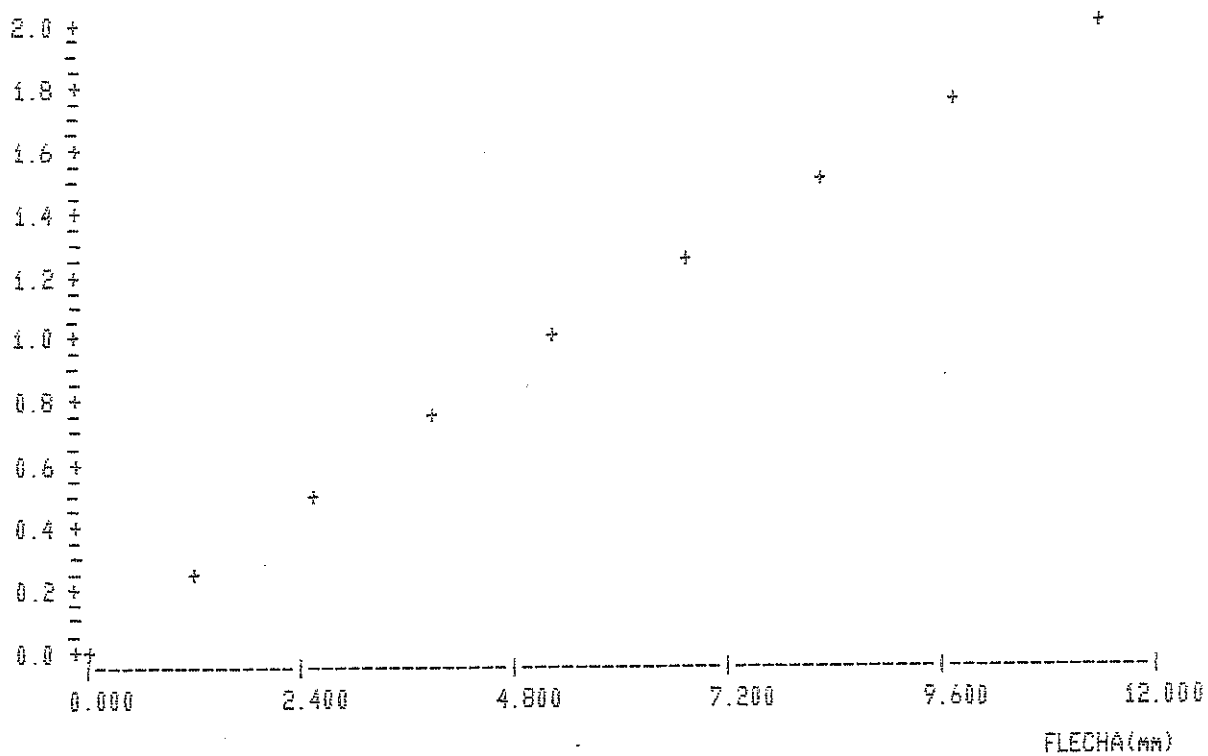


Figura 7.12 - Diagrama Carga x Flecha

Relação $l/h = 21$

Velocidade de Ensaio $V_e = 3,00 \text{ KN/min}$

7.3 - Módulo de Elasticidade à Flexão

Com base nas equações de regressão realizadas, foram calculados os respectivos valores dos Módulos de Elasticidade à flexão ajustados, 1296 ao todo, um por ensaio.

Os valores do Módulo de Elasticidade à Flexão foram obtidos através da equação 7.1.

$$E = \frac{P\ell^3}{48a I} \dots\dots\dots (7.1)$$

O procedimento foi o seguinte:

Escolhido um valor para a carga P, o valor da flecha "a" correspondente foi obtido através da equação de regressão para cada ensaio. Estes valores, mais o do vão-livre e o do momento de inércia I foram substituídos na equação 7.1, obtendo-se o valor do Módulo de Elasticidade à Flexão para cada corpo de prova.

Os 1296 valores do Módulo de Elasticidade à Flexão foram colocados em 18 tabelas, correspondendo uma a cada corpo de prova. Cada tabela contém os valores do Módulo de Elasticidade à flexão para cada velocidade de ensaio (v), em cada relação vão-livre/altura (ℓ/h). Como ilustração, são apresentados, na tabela V, os valores do Módulo de Elasticidade à Flexão, encontrados para o corpo de prova nº 2.

ℓ/h (KN/min)	10	12	14	16	18	21
0,25	664.131	702.499	731.459	753.804	766.556	770.431
0,50	671.613	711.404	737.272	762.934	776.772	781.520
0,75	675.990	716.614	740.672	768.275	782.748	788.007
1,00	679,095	720.310	743.085	777.064	786.988	792.609
1,25	681.504	723.177	744.956	775.003	790.277	796.179
1,50	683.472	725.519	746.485	777.405	792.964	799.096
1,75	685.135	727.500	747.778	779.435	795.236	801.562
2,00	686.577	729.216	748.898	781.194	797.204	803.698
2,25	687.848	730.729	749.886	782.745	798.940	805.582
2,50	688,985	732.083	750.770	784.133	800.493	807.268
2,75	690.014	733.307	751.569	785.389	801.898	808.793
3,00	690.953	734.425	752.299	786.535	803.180	810.185

TABELA V - Módulo de Elasticidade E(KN/cm²) em Função da Velocidade de Ensaio v(N/min) e da relação vão livre/altura (ℓ/h) para o corpo de prova nº 2.

7.4 - Módulo de Elasticidade à Flexão em Função da Velocidade de Ensaio (v)

Para a determinação das equações representativas da influência da velocidade de ensaio no Módulo de Elasticidade à Flexão, os 1296 valores, contidos nas 18 tabelas, foram submetidos a análise de regressão com a velocidade de ensaio.

Após várias tentativas, com diversos modelos, selecionou-se a expressão $E(v) = A + B \log v$ para representar a influência da velocidade de Ensaio no Módulo de Elasticidade à Flexão. Assim foram obtidas 108 equações, correspondendo uma a cada corpo de prova em cada relação vão-livre/altura (ℓ/h).

As 108 equações agrupadas em função da relação Vão-Livre/altura, assim se formaram 6 grupos de 18 equações. Para cada grupo de 18 equações foi calculada a média dos coeficientes das equações relacionando o Módulo de Elasticidade à Flexão com a velocidade de ensaio, em função da relação vão-livre/altura (ℓ/h). Assim chegou-se às equações 7.2 a 7.7 do quadro III.

ℓ/h		Nº DA EQUAÇÃO
10	$E(v) = 698,868 + 30,038 \log v$	7.2
12	$E(v) = 750,626 + 29,079 \log v$	7.3
14	$E(v) = 771,756 + 28,022 \log v$	7.4
16	$E(v) = 787,333 + 32,296 \log v$	7.5
18	$E(v) = 801,089 + 34,113 \log v$	7.6
21	$E(v) = 820,762 + 35,615 \log v$	7.7

QUADRO III - Equações Representativas da Influência da Velocidade de Carga no Módulo de Elasticidade (E) para Diferentes Relações Vão-Livre/Altura (ℓ/h).

Destas 6 últimas equações, também calculou-se a média dos respectivos coeficientes, obtendo-se uma única equação relacionando E e v, equação 7.8. Como pelas equações 7.2 a 7.7 ficou evidenciada uma certa variabilidade do coeficiente do termo $\log v$, calcularam-se os intervalos de confiança do coeficiente de v e do termo independente. Utilizou-se a idéia comum de se estabelecer o intervalo de confiança a partir do valor de "t" de Student associado à probabilidade de 95% e (6-1) graus de liberdade ($t = 2.571$).

$$E(v) = 771,739 + 31,527 \log v \dots \dots \dots (7.8)$$

(s = 43,044) (s = 2,983)

Desta forma, foi possível a obtenção de duas equações (7.9 e 7.10) para o estabelecimento de uma faixa na qual, com 95% de segurança, estariam incluídos os valores referentes à influência da velocidade de ensaio no Módulo de Elasticidade à Flexão representada pela inclinação das respectivas retas.

$$E(v) = 726,560 + 28,396 \log v \dots \dots \dots (7.9)$$

$$E(v) = 816,918 + 34,658 \log v \dots \dots \dots (7.10)$$

Finalmente foram traçadas, num gráfico, as retas correspondentes às equações 7.2 a 7.10, apresentadas na figura 7.13.

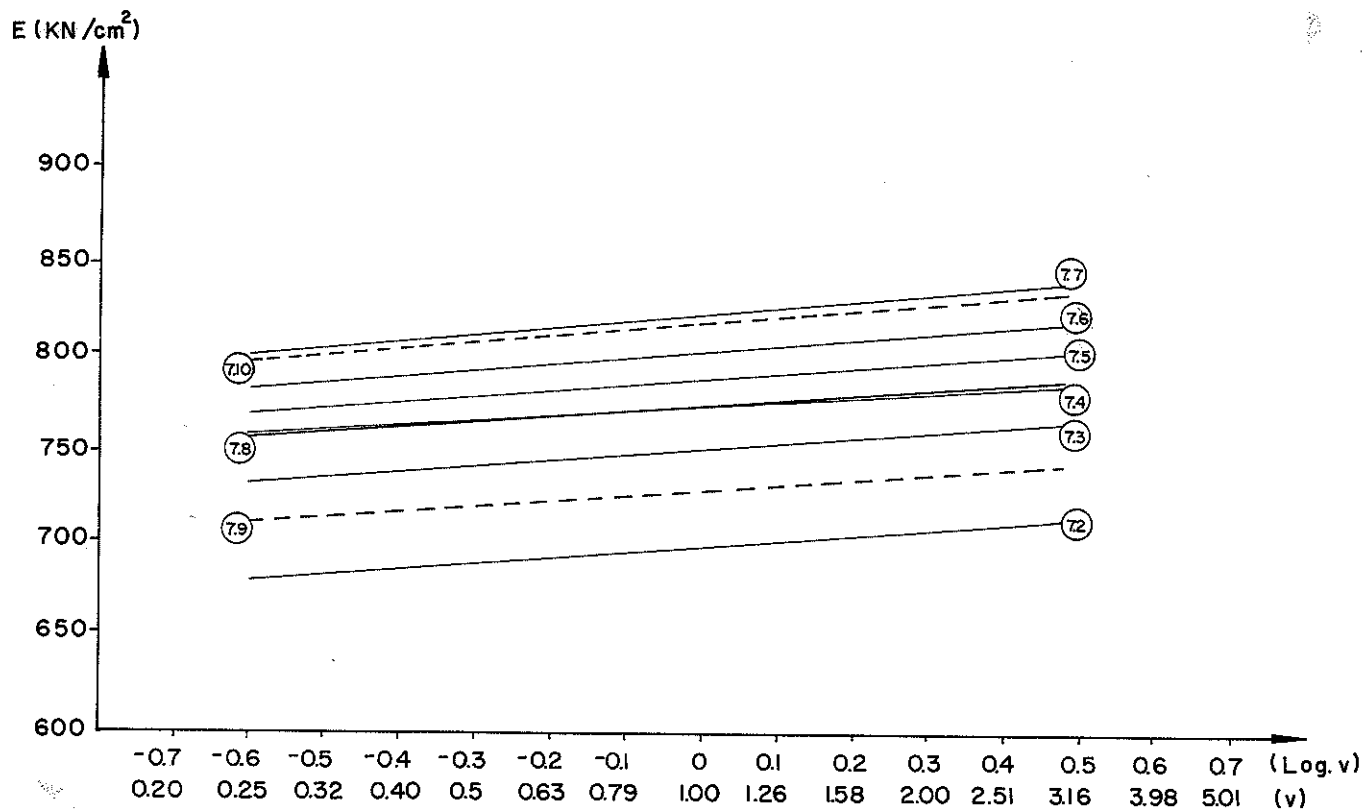


Figura 7.13 - Retas Correspondentes à Influência Velocidade de Ensaio no Módulo de Elasticidade à Flexão com a Faixa de 95% de Probabilidade.

7.5 - Conclusões

Nesta parte final do capítulo são apresentadas algumas conclusões referentes ao trabalho experimental realizado.

7.5.1 - Velocidade de Carga, Velocidade de Deslocamento, Velocidade de Deformação

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão, a velocidade do ensaio, seja de carga, de deslocamento ou de deformação não apresenta influência significativa, observadas as equivalências correspondentes. Na realidade, enquanto o corpo de prova é solicitado no regime elástico, a relação entre a carga e a flecha é linear. Assim é possível encontrar a relação equivalente com outra velocidade. Este procedimento foi adotado para a execução dos ensaios complementares visando estudar a influência da velocidade no módulo de ruptura.

7.5.2 - Influência da Velocidade de Ensaio no Módulo de Elasticidade

Através do estudo experimental, foi evidenciada a influência da velocidade de ensaio no Módulo de Elasticidade à flexão. Exprimindo em % esta influência pode-se dizer: quando a velocidade do ensaio é aumentada em 1000% o valor do módulo de elasticidade aumenta em aproximadamente 5%. Por este motivo é possível concluir: a variação apresentada pelo Módulo de Elasticidade à Flexão em função das mudanças na velocidade de ensaio pode ser desprezada pois dentro das condições normais dificilmente serão alteradas de maneira significativa as velocidade de ensaio.

8 - VELOCIDADE DE CARGA X VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO - ESTUDO EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR

8.1 - Introdução:

Complementando o estudo experimental, do capítulo 7, foi realizado um conjunto de ensaios com o propósito de estudar a possível influência, na carga e flecha de ruptura, quando o ensaio é realizado mantendo-se ou a velocidade de carga constante ou a velocidade de deslocamento constante.

A diferença básica entre os dois tipos de velocidade de ensaio baseia-se no fato de, no caso de ensaio com velocidade de carga constante, a velocidade de acréscimo das flechas aumenta progressivamente a partir do limite de proporcionalidade e, no caso do ensaio com velocidade de deslocamento constante, a velocidade de acréscimo da carga diminui progressivamente a partir do limite de proporcionalidade, figura 8.1.

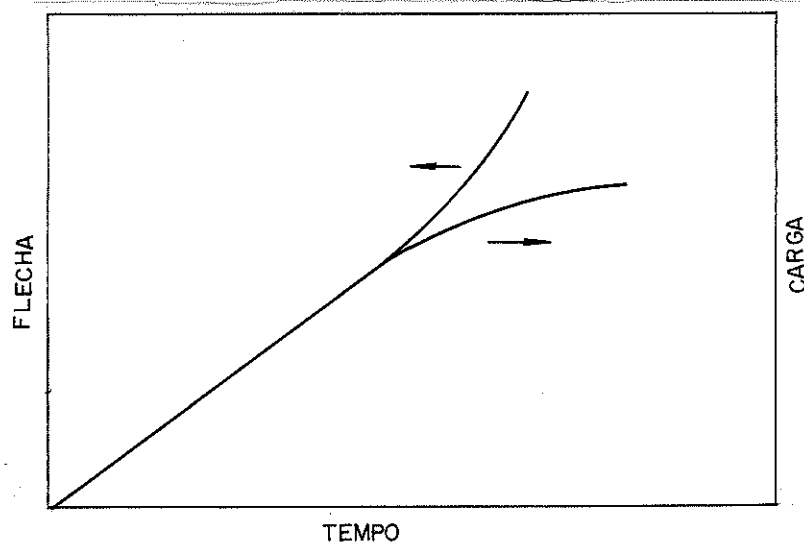


Figura 8.1 - Velocidade das Flechas e das Cargas

8.2 - Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados foram cortados a partir dos corpos de prova utilizados para o estudo experimental descrito no capítulo 7.

8.2.1 - Dimensões

Os corpos de prova para este estudo experimental complementar foram preparados com os seguintes dimensões: $(2 \times 4 \times 120) \text{ cm}^3$

e foram obtidos a partir dos corpos de prova de $(5 \times 5 \times 120)$ cm³ cortados de maneira a se obter 2 corpos de prova idênticos.

8.2.2 - Quantidade

Para esta parte do estudo foram confeccionados 36 corpos de prova os quais receberam, para identificação, numeração por pares com base no número de corpos de prova do qual se originaram, sendo diferenciados através das letras A e B, tal como apresentado na figura 8.2.

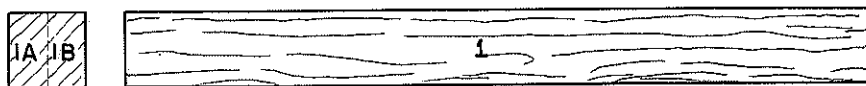


Figura 8.2 - Esquema de Corte para Obtenção dos Corpos de Prova

8.3 - Esquema Estático

O esquema estático adotado para a realização dos ensaios do estudo experimental complementar correspondeu ao de uma viga simplesmente apoiada na qual foi aplicado o carregamento através de uma carga (P) concentrada no meio do vão livre (ℓ), figura 8.3.

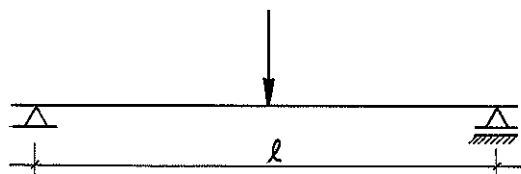


Figura 8.3 - Esquema Estático para os Ensaios

8.4 - Relação Vão Livre/Altura (ℓ/h)

A distância entre os apoios, vão livre, para a realização dos ensaios correspondentes a este capítulo foi adotada equivalente a $21 \cdot h$.

8.5 - Metodologia:

8.5.1 - Condicionamento dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram mantidos submersos em água para permanecerem saturados, no momento do ensaio foram retirados, enxugados com um pano e medida a sua seção transversal.

8.5.2 - Carregamento

Os corpos de prova de letra A foram ensaiados com velocidade de carga constante de $0,30 \text{ KN/cm}^2$ até atingirem a ruptura. No decorrer do ensaio foi feita a leitura da flecha através de um relógio comparador de 5 cm de curso e precisão de 10^{-3} cm , com intervalos de 15 segundos entre as leituras. A velocidade de aplicação da carga foi controlada através de um cronômetro e do dinamômetro da máquina universal de ensaios AMSLER. Os dados foram registrados numa folha de dados igual à utilizada nos ensaios referidos no capítulo 7.

Após a realização da série de ensaios nos corpos de prova de letra A foi calculado o Módulo de Elasticidade à Flexão de cada corpo de prova e obtida a velocidade de crescimento da flecha enquanto o andamento do ensaio permaneceu no regime elástico. Com este valor, da velocidade de crescimento da flecha, foi programado o ensaio do correspondente ao corpo de prova letra B, supondo ser equivalente o valor do Módulo de Elasticidade dos corpos de prova A e B. Assim os corpos de prova B foram ensaiados com velocidade de flecha ou deslocamento constante até a ruptura.

A velocidade de flecha ou de deslocamento foi mantida constante com base no tempo registrado no cronômetro e os deslocamentos indicados no relógio comparador. Com intervalo de 15 segundos foram feitas as leituras das cargas correspondentes no dinamômetro da Máquina Universal de Ensaio AMSLER do LaMEM.

8.5.3 - Leitura das Flechas na Ruptura

Uma das dificuldades a ser contornada foi a realização da leitura da flecha no momento da ruptura. O relógio comparador é um instrumento de precisão muito delicado e a ruptura ocorre de maneiras diferentes, correndo-se o risco de danificar o relógio comparador se instalado como o foi nos ensaios principais, nos quais, pela natureza das determinações, o corpo de prova não era levado à ruptura.

Para evitar o risco de dano no relógio comparador e na necessidade de ser realizada a leitura das flechas durante todo o ensaio optou-se por colocar o relógio comparador longe da região provável de ruptura, ligado a um ponto situado na altura da linha neutra da seção, no meio do vão, como aparece nas fotografias das figuras 8.4 e 8.5.

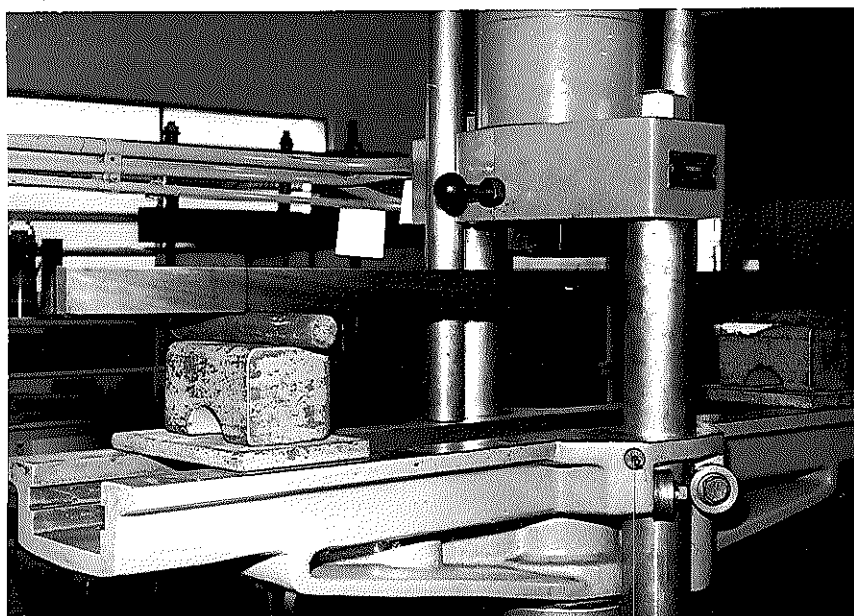


Figura 8.4 - Ponto de Ligação do Corpo de Prova com o Relógio Comparador através de um Prego Colocado na Altura da Linha Neutra da Seção, no meio do Vão.

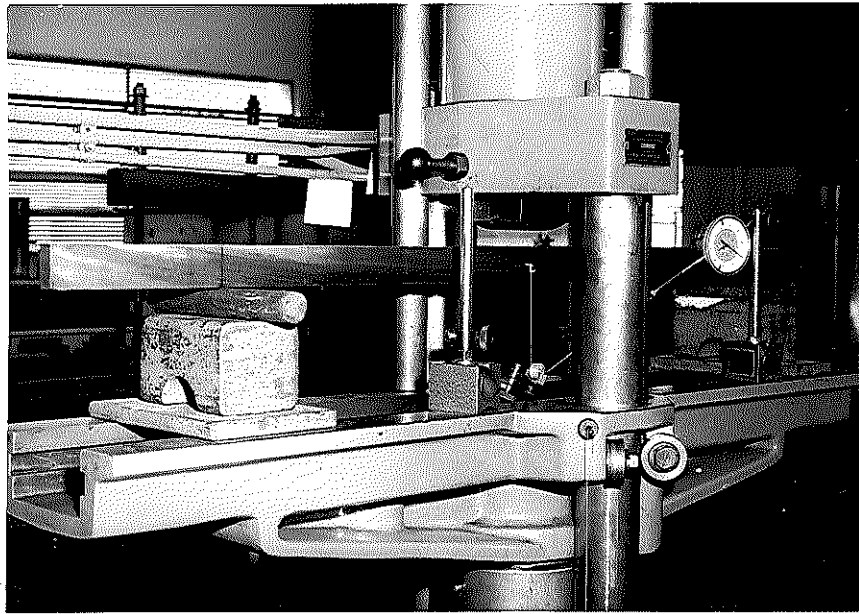


Figura 8.5 - Vista Geral da Montagem do Ensaio com a Instalação do Relógio Comparador

8.6 - Apresentação dos Resultados

Os resultados dos ensaios do Estudo Experimental complementar são apresentados através da Tabela IV na qual estão contidos a maioria dos dados obtidos.

8.6.1 - Módulo de Elasticidade à Flexão

O cálculo do módulo de elasticidade à flexão obedeceu o mesmo sistema adotado no capítulo 7, item 7.3.

Os valores do módulo de elasticidade, 36 no total, 18 dos corpos de prova A e 18 dos corpos de prova B foram comparados através da média apresentando os seguintes valores:

E_{mA} = Módulo de Elasticidade Médio à Flexão dos Corpos de Prova A = 908.461 KN/cm^2 .

E_{mB} = Módulo de Elasticidade Médio à Flexão dos Corpos de Prova B = 906.360 KN/cm^2

ã vista desses valores, os mōdulos de elasticidade foram considera dos equivalentes, confirmando a equivalēncia entre os ensaios rea lizados com velocidade de carga constante e os realizados com velo cidade de deslocamento constante, dentro do limite elástico.

CORPO DE PROVA	VELOCIDADE DE ENSAIO	BASE cm	ALTURA cm	ℓ cm	P _r KN	f _r cm	MOE KN/cm ²	PLp KN	fLp cm	σ _{LP} KN/cm ²	σ _R KN/cm ²	TEMPO L. PROP. MIN.	TEMPO ROT. L. PROP. MIN.
1A	0,250	2,01	4,07	85,47	1,770	2,810	872,626	1.000	1,320	3,851	6,815	4,00	7,08
1B	0,320	2,00	4,04	84,84	1,605	3,280	865,940	950	1,270	3,899	6,257	3,97	10,25
2A	0,300	2,01	4,07	85,47	1,635	2,800	820,630	1.100	1,540	4,236	6,296	3,67	5,41
2B	0,004	2,02	4,05	85,05	1,560	3,400	835,144	1.100	1,400	4,235	6,007	3,50	8,50
3A	0,300	2,02	4,05	85,05	1,700	4,300	764,109	750	1,125	2,888	6,546	2,50	5,67
3B	0,300	2,00	4,06	85,26	1,580	4,500	640,698	860	1,590	3,414	6,129	3,98	11,25
4A	0,300	2,01	4,04	84,84	1,575	2,730	959,988	900	1,080	3,491	6,110	3,00	5,25
4B	0,360	2,00	4,06	85,26	1,565	2,515	990,760	950	1,110	3,685	6,071	3,08	6,99
5A	0,300	2,00	4,05	85,05	1,725	3,500	1039,783	750	0,885	2,917	6,708	2,78	5,75
5B	0,320	2,00	4,07	85,47	1,645	3,050	970,911	910	1,085	3,521	6,366	3,39	9,53
6A	0,300	2,02	4,07	85,47	1,900	3,800	939,780	1.275	1,555	4,885	7,280	4,25	6,33
6B	0,340	2,00	4,08	85,68	1,850	3,520	957,747	1.150	1,390	4,439	7,142	4,09	10,35
7A	0,300	2,00	4,05	85,05	1,990	4,800	964,867	825	0,990	3,280	7,739	2,75	6,63
7B	0,360	2,00	4,04	84,84	1,695	4,155	934,796	860	1,065	3,353	6,680	2,96	11,54
8A	0,300	2,01	4,07	85,47	1,955	4,490	891,325	875	1,206	3,754	7,682	3,25	6,65
8B	0,360	2,00	4,07	85,47	1,680	3,615	953,969	890	1,800	3,444	6,501	3,00	10,04
9A	0,300	2,02	4,05	85,05	1,600	4,100	951,361	1.050	1,265	4,043	6,161	3,50	5,33
9B	0,360	2,00	4,07	85,47	1,725	3,340	915,331	850	1,750	3,289	6,675	2,99	9,28
10A	0,300	2,01	4,07	85,47	1,810	4,900	780,296	1.050	1,550	4,043	6,969	3,50	6,06
10B	0,360	2,00	4,07	85,47	1,690	3,795	897,971	830	1,070	3,212	6,540	2,97	10,54
11A	0,300	1,98	4,05	85,05	2,010	4,800	1060,544	975	1,075	3,830	7,896	3,25	6,70
11B	0,320	2,00	4,04	84,84	1,475	3,300	939,522	840	1,035	3,275	5,750	3,23	10,31
12A	0,300	3,00	4,06	85,26	1,740	4,500	900,982	825	1,060	3,347	7,058	2,75	5,80
12B	0,400	2,00	4,08	85,68	1,610	3,540	881,024	860	1,130	3,320	6,215	2,83	8,85
13A	0,300	2,00	4,04	84,84	1,475	3,700	840,212	900	1,240	3,509	5,750	3,00	4,92
13B	0,420	2,00	4,07	85,47	1,625	4,030	856,384	995	1,345	3,850	6,288	3,20	9,60
14A	0,300	2,00	4,02	84,42	1,755	3,700	1052,386	1.050	1,155	4,114	6,876	3,50	5,85
14B	0,320	2,00	4,07	85,47	1,730	3,340	1072,662	1.010	1,090	3,908	6,695	3,41	10,44
15A	0,300	2,02	4,03	84,63	1,215	2,500	840,233	975	1,330	3,773	4,701	3,25	4,05
15B	0,420	2,00	4,06	85,26	1,870	3,390	907,094	1.050	1,340	4,073	7,254	3,19	8,07
16A	0,300	2,02	4,07	85,47	1,560	3,300	886,912	975	1,260	3,736	5,977	3,25	5,20
16B	0,400	2,00	4,06	85,26	1,470	3,205	860,798	870	1,170	3,375	5,703	2,93	8,01
17A	0,300	2,00	4,05	85,05	1,805	4,500	890,481	1.200	1,560	4,667	7,019	4,00	6,02
17B	0,400	2,00	4,05	85,05	1,380	2,360	887,927	1.070	1,390	4,161	5,367	3,49	5,90
18A	0,300	2,00	4,04	84,84	1,365	2,540	895,781	975	1,265	3,801	5,321	3,25	4,55
18B	0,400	2,00	4,07	85,47	1,320	2,520	945,804	960	1,175	3,715	5,108	2,94	6,30

OBS: - Os corpos de prova A foram ensaiados com velocidade de carga constante (KN/min);
 - Os corpos de prova B foram ensaiados com velocidade de deslocamento constante (cm/min).

TABELA IV - Resultados do Estudo Experimental Complementar

8.6.2 - Influência do Tipo de Velocidade de Ensaio no Módulo de Ruptura

Para avaliar a influência do tipo de velocidade de ensaio no módulo de ruptura foi calculado o valor médio do módulo de ruptura dos corpos de prova A e dos corpos de prova B. O valor médio para os corpos de prova A (σ_{rmA}) foi $6,606 \text{ KN/cm}^2$ e para os corpos de prova B (σ_{rmB}) foi $6,260 \text{ KN}$.

O módulo de ruptura obtido através do ensaio com velocidade de carga constante foi aproximadamente 5,5% maior do que o módulo de ruptura obtido através do ensaio com velocidade de deslocamento constante.

8.6.3 - Influência do Tipo de Velocidade de Ensaio na Flecha de Ruptura

A partir dos valores da flecha dos corpos de prova na ruptura foi analisada a influência da velocidade de ensaio na flecha de ruptura. Foram calculadas as médias dos valores das flechas apresentadas pelos corpos de prova A e pelos corpos de prova B, os resultados foram:

- Flecha média com velocidade de carga constante

$$f_{rmA} = 3,765.$$

- Flecha média com velocidade de deslocamento constante

$$f_{rmB} = 3,406 \text{ cms}$$

Desses valores das flechas médias pode-se concluir: As flechas apresentadas pelos corpos de prova A (carregados com velocidade de carga constante) são em média 10,5% maiores do que as apresentadas pelos corpos de prova B (carregados com velocidade de deslocamento constante).

8.6.4 - Diagrama Módulo de Ruptura, Flecha x Tempo

Para avaliar os parâmetros: Módulo de Ruptura, Flecha e Tempo foi traçado um diagrama reunindo estes parâmetros, fig. 8.6.

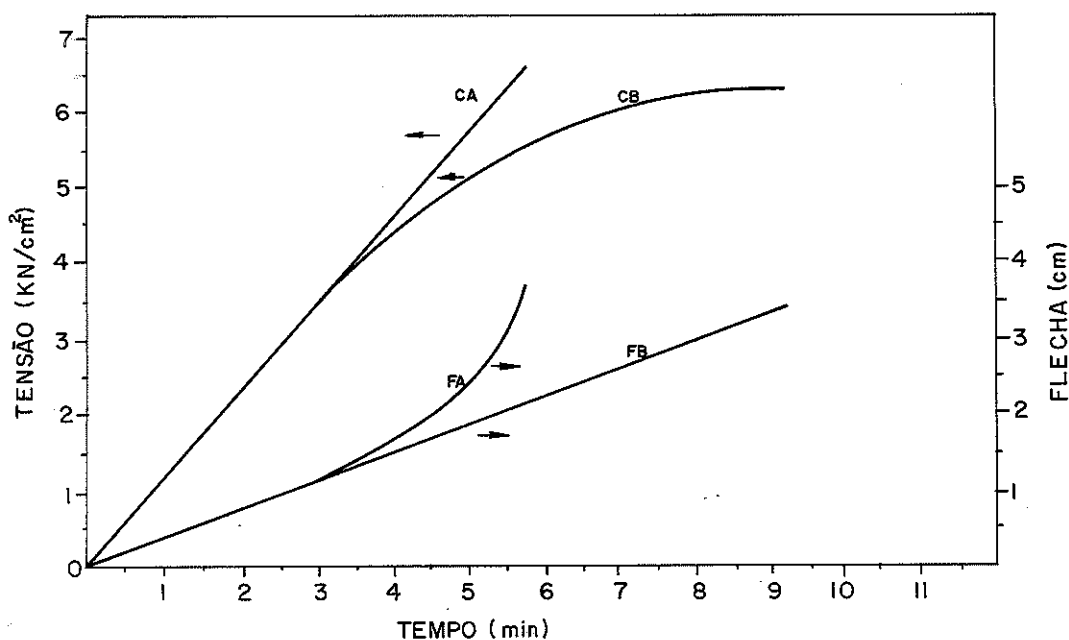


Figura 8.6 - Diagrama Módulo de Ruptura, Flecha x Tempo relativo ao Estudo da Influência do Tipo de Velocidade no Módulo de Ruptura e na Flecha.

As curvas C_A e C_B representam a sollicitação no corpo de prova quando ensaiado com velocidade de carga constante e com velocidade de deslocamento constante respectivamente. Enquanto as curvas F_A e F_B representam a flecha apresentada pelo corpo de prova quando ensaiado com velocidade de carga constante e com velocidade de deslocamento constante respectivamente.

8.6.5 - Diagrama Módulo de Ruptura x Flecha

Para uma melhor visualização do comportamento do Módulo de Ruptura e da Flecha, foram traçadas as curvas da figura 8.7 onde a curva A corresponde ao ensaio realizado com velocidade de carga constante e a curva B ao ensaio realizado com velocidade de deslocamento constante.

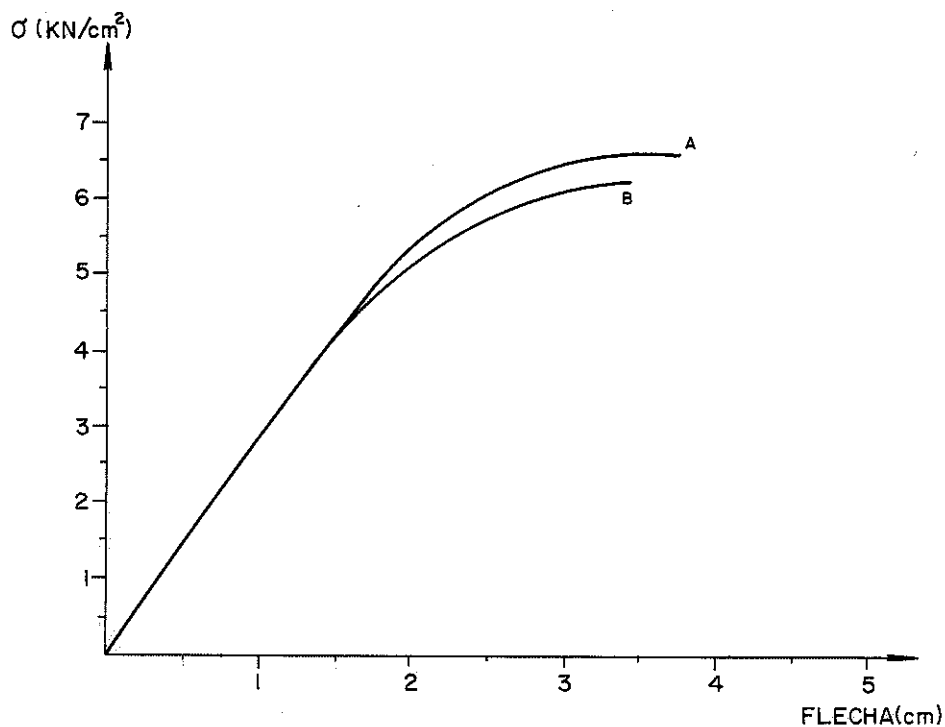


Fig. 8.7 - Diagrama M \ddot{o} dulo de Ruptura x Flecha

Através do diagrama pode ser observada claramente a influência do tipo de velocidade de ensaio. Assim vê-se no diagrama que a Tensão convencional de ruptura e a flecha são maiores no ensaio realizado com velocidade de carga constante.

9 - CONCLUSÕES E PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS

9.1 - Introdução:

Após o desenvolvimento da parte experimental é necessário, apresentar algumas considerações acerca dos resultados encontrados durante o trabalho como maneira de sintetizar algumas informações que contribuam para o conhecimento das propriedades de resistência da madeira.

9.2 - Velocidade de Ensaio na Determinação do Módulo de Elasticidade à Flexão

Durante o estudo da influência da velocidade de ensaio no módulo de elasticidade à flexão pode ser observada a variação não significativa deste parâmetro com a velocidade. Por este motivo, na realização do ensaio para determinação do módulo de elasticidade à flexão, não é necessário um controle rigoroso da velocidade do ensaio.

9.2.1 - Máquina Classificadora Eletro-Mecânica

A máquina classificadora eletro-mecânica, é um equipamento usado para classificar peças estruturais de madeira. As peças são introduzidas por uma extremidade, passando através de um cilindro de carga é registrada a flecha.

No caso da máquina de propriedade do IBDF, em Brasília, o registro de flecha é realizado a cada 15 cm a uma velocidade máxima de 8 km/h de viga.

De acordo com os resultados deste trabalho o emprego da máquina classificadora é totalmente válido, pois a velocidade de ensaio não afeta significativamente o valor do módulo de elasticidade.

9.2.2 - Ensaio de Obra

O ensaio de obra é destinado a classificar as peças a serem utilizadas numa estrutura. As vigas são apoiadas nas suas extremidades, é aplicado um carregamento no meio da viga, e registrado a flecha. Assim, através do ensaio de obra, é possível selecio-

nar as peças melhores para colocação nos lugares de maior solicitação.

Durante o ensaio, a carga é aplicada utilizando-se um saco de cal (25 kg) ou de cimento (50 kg). A velocidade com a qual é aplicada a carga nem sempre é a mesma, porém, com base nos resultados experimentais deste trabalho, pode-se afirmar não existir significativa influência da velocidade de ensaio nas flechas obtidas.

9.3 - A Velocidade de Ensaio e a NBR 6230/80

A NBR 6230/80 Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeira, recomenda, para o ensaio de flexão estática, que a ruptura do corpo de prova de dimensões (2 x 2 x 30) cm³ seja alcançada num tempo mínimo de 2 minutos, sem especificar o tipo de velocidade.

Os resultados dos estudos realizados evidenciaram diferenças nos resultados dos ensaios realizados, com tipos diferentes de velocidade, por este motivo é aconselhável adotar para o ensaio de flexão estática uma velocidade de deslocamento constante.

9.4 - Proposta de Novos Trabalhos

Foi, durante a realização da pesquisa, evidenciada a necessidade da realização de novos trabalhos, alguns dos quais são citados a seguir.

9.4.1 - Influência da Velocidade de Ensaio no Módulo de Elasticidade à Tração e à Compressão

É necessária a realização de pesquisa destinada a conhecer o comportamento da madeira, relativo ao módulo de elasticidade, quando solicitada sob diferentes velocidades de ensaio, na tração e na compressão.

9.4.2 - Influência do Tipo de Velocidade de Ensaio na Tensão de Ruptura

Devido às discrepâncias existentes nas recomendações internacionais, quanto ao tipo de velocidade de ensaio, para determinação da tensão de ruptura na tração e na compressão, é necessária

A realização de pesquisa com o objetivo de determinar qual o tipo de velocidade de ensaio mais adequado a esses tipos de solicitação.

9.4.3 - Análise das Deformações com Base na Anatomia da Madeira

Na presente pesquisa não foi analisado o efeito da deformação na micro estrutura da madeira. É necessário portanto, estudar este tópico para assim, determinar o comportamento do material a partir da sua micro estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1)- BOOTH, L.G. - The strength testing of timber during the 17th and 18th centuries. Journal of the Institute of Wood Science, (13): 6, Nov. 1964.
- (2)- Op. cit. p.7
- (3)- Op. cit. p.9
- (4)- Op. cit. p.11
- (5)- Op. cit.
- (6)- Op. cit.
- (7)- Op. cit. p.12
- (8)- Op. cit. p.16
- (9)- Op. cit. p.18
- (10)- Op. cit. p.19
- (11)- Op. cit. p.20
- (12)- Op. cit. p.22
- (13)- Op. cit.
- (14)- Op. cit. p.24
- (15)- Op. cit. p.25
- (16)- Op. cit. p.26
- (17)- TIMOSHENKO, Stephen P. - History of strength of materials. New York, McGraw-Hill Book, 1953. p.74.
- (18)- Op. cit. p.80.
- (19)- Loc., cit
- (20)- Op. cit p.127

- (21)- Op. cit. p.131 - 132
- (22)- GREMIO POLYTECNICO - Manual de resistência dos materiais.
São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, 1905. p.
183 - 198.
- (23)- TIEMANN, Harry D. - The effect of the speed of testing upon
the strength of wood and the standardization of tests for
speed. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS ANNUAL
MEETING, 11, Philadelphia - PA, Proc's, 1980. p.541 - 557.
- (24)- MONNIN, Marcel - Essais physiques, statiques et dynamiques
des bois. Bulletin de la Section Technique de L'Aéronautique
Militaire, (29): 3-76, Juin, 1919.
- (25)- Id. - Leçons sur les bois de construction. Paris, Ecole
Nationale Supérieure de l'Aéronautique, 1930/31. 39p.
- (26)- BROTERO, Frederico A. - Sugestões para o melhor conhecimento
de nossas madeiras; Propriedades físicas e mecânicas de
peroba rosa. São Paulo, Escola Polytechnica de São Pau
lo, Laboratório de Ensaio de Materiaes, 1931. p.5-62.
(Boletim nº 6).
- (27)- Id. - Estudo dos caractères físicos e mecânicos das ma-
deiras. São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, Labo
ratório de Ensaios de Materiaes, 1932. p.3-59. (bole
tim nº 8).
- (28)- PEREIRA, José Aranha - Contribuição para a identificação mi-
crographica das nossas madeiras. São Paulo, Laboratório
de Materiaes, 1933. p.7 - 165.(Boletim nº 9).
- (29)- MARKWARDT, L.J. & WILSON, T.R.C. - Strength and related
properties of woods grown in the United States. Technical
Bulletin, U.S. Dept. Agriculture, (479): 59 - 60, Sept.
1935.
- (30)- NOREN, Bengt - Relation Between compressive strength and
rate of deformation in testing swedish fir. ASTM Bulletin
43 - 50, Dec. 1954.
- (31)- BROKAW, M.P. & FOSTER, G.W. - Effect of rapid loading and
duration of stress on the strength properties of wood.

tested in compression and flexure. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1958. p.5 - 6. (nº 1518).

- (32)- MARKWARDT, L.J. & LISKA, J.A. - The influence of rate of loading on the strength of wood and wood - base materials. In: SYMPOSIUM ON SPEED OF TESTING, 1956. s.l., American Society for Testing Materials, 1956. p.3 - 18.
- (33)- McNATT, J. Dobbin - Design stresses for hardboard: effect of rate, duration, and repeated loading. Forest Products Journal, 20 (1): 53 - 60, Jan. 1970.
- (34)- STRICKLER, M.D. & PELLERIN, R.F. - Rate of loading effect on tensile strength of wood parallel to grain. Forest Products Journal, 23(10): 34 - 36, Oct. 1973.
- (35)- GERHARDS, Charles C - Effect of duration and rate of loading on strength of wood and wood - based materials. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab., 1977. 24p. (FPL 283).
- (36)- ZAKIC, Barislav S. - Wood beams under impact load. Journal of the Structural Division, 105 (7): 1489 - 1507, July, 1979.
- (37)- DE BONIS, A. Louis; WOEST, Franke E.; McLAIN, Thomas E. - Rate of loading influence on southern Pine 2 by 4's in bending. Forest Products Journal, 30 (11): 34 - 37, nov. 1980.
- (38)- TOMOMATSU, Akio; ASANO, Ikuo; OHTA, Massamitsu - Effect of deflection rate on bending strength of wood II: bending strength and loading history os deflection - rate changing during loading. Journal of the Japan Wood Research Society, 31 (2): 75 - 81, 1985.
- (39)- Id. - Effect of deflection rate on bending strength of wood III: bending strength under controlled loading - rate and controlled deflection - rate. Journal of the Japan Wood Research Society, 31 (2): 82 - 88, 1985.

- (40)- STANDARDIZATION Basics: Part I - the what and why standards, Part II - the people, process, and principles of standards, development. ASTM Standardization news: 24-27; 21 - 25, 60, Feb; mar. 1977.
- (41)- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - 1981 - Annual book for ASTM standards. Philadelphia, ASTM, 1981. 1192p.
- (42)- Id. - Standard methods of testing small clear specimens of timber. & 143 - 52. Philadelphia, ASTM, 1981. D. 59-116.
- (43)- Id. - Standard methods of static tests of timbers in structural sizes. D 198 - 76. op. cit. p.121 - 146.
- (44)- L'ASSOCIATION FRANCAISES DE NORMALISATION - Bois: caractéristiques physiques et mécaniques des bois. B 51 - 002. Paris, AFNOR, 1973. 16p.
- (45)- Id. - Bois: Essai de flexion statique. B 51 - 008. Paris, AFNOR, 1942. 4p.
- (46)- Id. - Protocole des essais du laboratoire d'essais et emplois des bois. op. cit. p.12-15.
- (47)- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Madeiras: ensaio de flexão estática (especificações) E 74-1960. Lisboa, LNEC 1961, 5p. (série B).
- (48)- BRITISH STANDARD - British standard methods of testing small clear specimens of timber. BS 373. s.l., Bs, 1957 19p.
- (49)- Id. British standard methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural sizes. BS 5820. s.l., BS, 1978. 6p.
- (50)- CIB WORKING COMMITTEE W18 - Testing methods of timber in structural sizes: recommendation. Materiaus et constructions Rilem Bulletin, 11(66): 445 - 452, 1978.
- (51)- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras: método brasileiro. NBR 6230/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. 16p.

- (52)- COMISIÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - Madeiras: método de ensaio de flexão estática. COPANT 555. Paraguay, COPANT, 1973. 10p.
- (53)- Id. - Madeiras: método de determinação de los esfuerzos unitários básicos. COPANT 745. Paraguay, COPANT, 1975. 9p.
- (54)- JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD - Method of bending test for wood. JIS Z 2113. Japan, Japanese Standards Association 1963. 2p.
- (55)- MAINIERI, Calvino & PEREIRA, José Aranha - Madeiras do Brasil sua caracterização, macroscópica, usos comuns e índices qualitativos físicos e mecânicos. In: ANUÁRIO BRASILEIRO DE ECONOMIA FLORESTAL, nº 17, Rio de Janeiro, Instituto Nacional do Pinho. São Paulo, IPT, 1965. 282p.
- (56)- BROTERO, Frederico Abranches - Métodos de ensaios adotados no I.P.T. para o estudo de madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1956. 60p. (Boletim nº 31).
- (57)- LAHR, Francisco Antonio Rocco - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983. 221p. (Tese de Doutorado).

BIBLIOGRAFIA

- 1- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Standard methods of static testes of timbers in structural sizes. D 198 - 76. Philadelphia, ASTM, 1981. p.121 - 146.
- 2- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Standard methods of testing small clear specimens of timber. D 143 - 52. Philadelphia, ASTM, 1981. p.59 - 116.
- 3- APLIN, E. N. & VEENAN, F.J. - Limit states design in wood: a canadian perspective. Forest Products Journal, 27 (7): 14-18, July, 1977.
- 4- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos de madeiras: método brasileiro. NBR 6230/80. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. 16p.
- 5- L'ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION - Bois: caractéristiques physiques et mécaniques des bois. B 51-002. Paris, AFNOR, 1973. 16p.
- 6- L'ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION - Bois: essai de flexion statique. B 51 - 008. Paris, AFNOR, 1942. 5p.
- 7- L'ASSOCIATION FRANÇAISES DE NORMALISATION - Protocole de essais du laboratoire d'essai et emplois des bois. Paris, AFNOR, 1942. p.12 - 15.
- 8- ATHERTON, George H. - Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. Forest Products Journal, 30 (11): 47 - 53, Nov. 1980.
- 9- BERGÓS, Juan - Maderas de construcción, decoración y artesanía. Barcelona, Ed. Gustavo Gili, 1951. 383p.
- 10- BODIG, Jozsef & JAYNE, Benjamin A. - Mechanics of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold, 1982 711p.
- 11- BOHANNAN, Billy - Structural engineering Research in Wood. Journal of the Strucutural Division, ASCE, 94 (2): 403 - 416 Feb. 1968.

- 12- BOOTH, L.G. - The strength testing of timber during the 17. th and 18th centuries. Journal of the Institute of Wood Science, (13): 3 - 30, Nov. 1964.
- 13- BRITISH STANDARD - British standard methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural sizes. BS 5820. s.l., BS, 1979. 6p.
- 14- BRITISH STANDAR - British standar methods of testing smal clear specimens of timber. BS 373. s.l., BS, 1957. 19p.
- 15- BROKAW, M. P. & FOSTER, G.W. - Effect of rapid loading and duration of stress on the strength properties of wood tested in compression and flexure. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab. 1958. 68p.
- 16- BROTERO, Frederico A. - Estudo dos caractēres physicos e mecānicos das madeiras. São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, Laboratōrio de Materiaes, 1932. p.3 - 59. (Boletim nº 8).
- 17- BROTERO, Frederico A. - Propriedades physicas e mecanicas de peroba rosa. São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo Lab. de Materiaes, 1931. p.29 - 62. (Boletim nº 6).
- 18- BROTERO, Frederico A. - Sugestões para o melhor conhecimento de nossas madeiras. São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, Lab. de Materiaes, 1931. p.5-28. (boletim nº 6).
- 19- BROTERO, Frederico A. - Metodos de ensaios adotados no I.P.T , para o estudo de madeiras nacionais. e. ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnolōgicas, 1956. p.7 - 28. (Boletim nº 31).
- 20- BROTERO, Frederico A. - Tabelas de resultados obtidos para madeiras nacionais. 2. ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnolōgicas, 1956. (Boletim nº 31).
- 21- BROWAN, H.P.; PANSHIN, A.J.; FORSAITH, C.C. - Textbook of wood technology. New York, McGraw - Hill Book, 1952. v.II, 783 p.

- 22- CARR JR., James H. - American lumber standards committee Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 63-64, Apr. 1967.
- 23- CHANDRASEKHAR, Putcha & SHARMA, B.D. - Reliability analysis of continous beams. Building and Enviroment, 14: 3 - 9, 1979.
- 24- CIB WORKING COMMITTEE. W 18 - Testing methods for timber in structural sizes: Recommendation. Matériaux et constructions Rilem Bulletin, 11 (66): 445 - 452, 1978.
- 25- COMISIÒN PANAMERICANA DE NORMAS TÈCNICAS - Madera: mètodo de determinaciòn de los esfuerzos unitarios bāsicos. COPANT 745. Paraguay, COPANT, 1975. 9p.
- 26- COMISIÒN PANAMERICANA DE NORMAS TÈCNICAS - ^Mmadera: mètodo de de ensayo de flexiòn estática. COPANT 555. Paraguay, COPANT 1973. 10p.
- 27- DEBAISE, G.R.; PORTER, A.W.; PENTONEY, R.E. - Morphology and mechanics of wood fracture. Materials Research & standards 6 (10): 493 - 499, Out. 1966.
- 28- DE BONIS, A. L.; WOESTE, Frank E.; McLAIN, Thomas E. - Rate of loading influence on southern pine. 2 by 4's in bending. Forest Products Journal, 30 (11): 34 - 37, Nov. 1980.
- 29- DESCH, H.E. - Timber: its structure and properties es. 5. ed. London, Macmillan, 1973. 424 p.
- 30- DESLANDES, Fernand & VANDENBERGHE, Léon - Les bois: caractéristiques usinage utilisation diverses. Paris, Eyrolles, 1959. 362 p. (Technologie du Bois).
- 31- EBY, Robert E. - Design standards for timber structures. Journal of the Structural Division, ASCE, 85 (2): 1 - 8, Feb. 1959.
- 32- FLINT, Thomas R. - Plywood quality inspection and testing. Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 71 - 74, Apr. 1967.
- 33- FREAS, Alan D. - Forest service research on structural use of wood. Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 91 - 104, Apr. 1967.

- 34- FOREST PRODUCTS LABORATORY - The growth, structure, and identification of wood. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, FPL, 1936. 32p.
35. FOREST PRODUCTS LABORATORY - Research in forest products. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, FPL, 1935 8p.
- 36- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Reserach in forest products. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, FPL, 1936. 9p. (Annual Report).
- 37- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Madison, U.S. Dept. Agriculture Forest Service, FPL, 1955. 528p. (Agriculture Handbook n9 72).
- 38- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, FPL, 1974. 415p. (Agriculture Handbook n9 72).
- 39- GALLIGAN, William L. & SNODGRASS, Delos V. - Machine stress rated lumber: challenge to design. Journal of the Structural Division, ASCE, 96 (12): 2639 - 2651, Dec. 1970.
- 40- GERHARDS, Charles C. - Effect of duration and rate of loading ond stregth of wood and wood - based materials. madison, U.S. Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab. 1977. 24p. (FPL 283).
- 41- GOODMAN, James R. & BODIG, Jozsef - Orthotropic elastic properties of wood. Journal of the Structural Division, Division, ASCE, 96 (11): 2301 - 2319, Nov. 1970.
- 42- GOODMAN, James R. & BODIG, Jozsef - Orthotropic elastic properties of wood: discussion. Journal of the Structural Division, ASCE, 97 (4): 931, Apr. 1971.
- 43- GOODMAN, James R.; KOVACS, Zsolt; BODIG, Jozsef - Code comparations of factor design for wood. Journal of the Structural Division, ASCE, 107. (8): 1511 - 1527, Aug. 1981.

- 44- GREMIO POLYTECHNICO - Manual de resistência dos materiaes.
São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, 1905. 304 p.
- 45- HAWLEY, L.F. - Seventeen fallacies about wood. Madison, U.S.
Dept. Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab. 1925
8p.
- 46- HOOLEY, Roy F. & HIBBERT, P.D. - Stress concentration in timber
beams. Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2):
127 - 139, Apr. 1967.
- 47- IMRAN, Mohammad; PALAZOTTO, Anthony N.; UTHENWOLDT, Gary -
Orthotropic elastic properties of wood: discussion. Journal
of the Structural Division, ASCE, 97 (9): 2427 - 2428, Sept
1971.
- 48- JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD - Method of bending test for wood.
JIS Z 2113. Japan, Japanese Standards Association, 1963. 2p.
- 49- KAISERLIK, Joseph H. & FREAS, Alan D. - Modulus of elasticity
of timber members: discussion. Journal of the structural
Division, ASCE, 104 (10): 1687 - 1689, Oct. 1978.
- 50- KENNEDY, D.E. - Wood engineering in forestry laboratories.
Journal Division, ASCE, 93 (2): 121 - 126, Apr. 1967.
- 51- KOEHLER, Arthur - The "grain" of wood with special reference to
the direction of the fibres. Madison, U.S. Dept. Agriculture,
Forest Service, Forest Products Lab., 1929. 7p.
- 52- KOEHLER, Arthur - The longitudinal shrinkage of wood. Madison,
U.S.D.A., Forest Service, Forest Products Lab., 1931. 7p.
- 53- KOEHLER, Arthur - The Shrinking and swelling of wood. Madison,
U.S.D.A., F.S., F.P.L., 1931. 23p.
- 54- KOLLMANN, Franz - Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.
2.ed. Berlin, Springer - Verlag, 1951. 1050p.
- 55- KOLLMANN, Franz F.P. & CÔTÉ Jr., WIEFRED, Ad. - Principles of
wood science and technology: I - solid wood. Berlin,
Springer - Verlag, 1968. 591p.

- 56- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Madeiras: ensaio e flexão estática (especificações). E.74 - 1960. Lisboa, LNEC, 1961. 5p. (série B).
- 57- ROCCO LAHR; Francisco Antonio - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983. 221p. (tese de Doutorado).
- 58- LISKA, Joseph A. - Wood-structural enigma or engineering reality Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 1 - 7, Apr. 1967.
- 59- LIU, J.Y. - Shear strength of tapered wood beams. Journal of the Structural Division, ASCE, 107 (5): 719 - 731, May. 1981.
- 60- LIU, J.Y. & CHENG, S. - Analysis of orthotropic beams. Madison, U.S.D.A., Forest Service, FPL, 1979. 37p. (Research Paper FPL 343).
- 61- MADSEN, Borg - Duration of load tests for dry bending members. Vancouver, Univ. of British Columbia, Dept. Civil Engineering, Oct. 1971. 43p. (Structural Research Series, Report nº 3).
- 62- MADSEN, Borg - Duration of load test for dry lumber subjected to shear. Vancouver, Univ. of British Columbia, Oct. 1972. 23p. (Structural research Series, Report nº 6).
- 63- MADSEN, Borg - Duration of wood test for wet lumber in bending. Vancouver, Univ. of British Columbia, March, 1972. 23p. (Structural Research Series, Report nº 4).
- 64- MADESEN, Borg - In - Grade testing; problem analysis. Forest Products Journal, 28 (4): 42 - 50, Apr. 1978.
- 65- MAINIERI, Calvino & PEREIRA, José Aranha - Madeiras do Brasil: sua caracterização macroscópica, usos comuns e Índices qualitativos físicos e mecânicos. In: ANUÁRIO BRASILEIRO DE ECONOMIA FLORESTAL; n.17, Rio de Janeiro, Instituto Nacional do Pinho. São Paulo, IPT, 1965. 282p.
- 66- MARKWARDT, L.J. - Evaluating structural wood: new method for establishing clear wood strength values. Materials Research & Standards, 9 (8): 17 - 20, Aug. 1969.

- 67- MARKWARDT, L.J. - New toughness machine is aid in wood selection. Madison, U.S.D.A., FS, FOL, 1926. 5p.
- 68- MARKWARDT, L.J. & LISKA, J.A. - The influence of rate of loading on the strength of wood and wood - base materials. In: SYMPOSIUM ON SPEED OF TESTING, 1956. s.l., American Society of Testing Materials, 1956. 18p.
- 69- MARKWARDT, L.J. & WILSON, T.R.C. - Strength and related properties of woods grown in the United States. Technical Bulletin, U.S. Dept. Agriculture, (479): 1 - 99, Sept. 1935.
- 70- McNATT, J. Dobbin - Design stresses for hardboard: effect of rate, duration, and repeated loading. Forest Products Journal, 20 (1): 53 - 60, Jan. 1970.
- 71- MONNIN, Marcel - Essais physiques, statiques et dynamiques des bois. Bulletin de la Section Technique de L'Aéronautique Militaire, (29): 3 - 76, Juin, 1919.
- 72- MONNIN, Marcel - Leçons sur les bois de construction. Paris, Ecole Nationale Supérieure de L'Aéronautique, 1930/31. 39p.
- 73- NORÉN, Bengt - Relation between compressive strength and rate of deformation in testing swedish fir. ASTM Bulletin: 43-50, Dec. 1954.
- 74- PECK, E.C. - The sap or moisture content of wood. Madison, USDA FS, FPL, 1935. 7p.
- 75- PEREIRA, José Aranha - Contribuição para a identificação micrographica das nossas madeiras. São Paulo, Escola Polytechnica de São Paulo, Laboratório de Materiaes, 1933. p.7-165. (Boletim nº 9).
- 76- PEREIRA, José Aranha & MAINIERI, Calvino - Nomenclatura das madeiras nacionais. 2.ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1956. p.31-60. (Boletim nº 31).
- 77- PERKINS, R.H. - Procedure for calculating distributed load deflection in log beams. Forest Products Journal, 32 (8): 41 - 43, Aug. 1982.

- 78- RHUDE, Maurice J. - Research needed in wood structures. Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 75 - 89, Apr. 1967.
- 79- ROBINSON, D.C. - Determination of load errors in universal universal testing machines due to speed of testing. Materials Research and Standards, 11 (1): 14 - 17, 39, Jan. 1971.
- 80- RUSCH, Hubert - Researches toward a general flexural theory for structural concrete. Journal of the American Concrete Institute, 32 (1): 1 - 28, July, 1960.
- 81- SEXSMITH, Robert G. & FOX, Selwyn P. - Limit states design concepts for timber engineering. Forest Products Journal, 28 (5): 49 - 54, May, 1978.
- 82- SHAFIZADEH, F. & NEARN, W.T. - Composition of wood and the origin of its anisotropic properties. Materials Research & Standards, 6 (12): 593 - 599, Dec. 1966.
- 83- SOMAYAJI, Shan - Design of timber beams: a graphical approach. The Journal of Structural Engineering, ASCE, 109 (1): 271 - 278, Jan. 1983.
- 84- STANDARDIZATION Basics: Part I - The what and why of standards. ASTM Standardization news: 24 - 27, Feb. 1977.
- 85-- STANDARDIZATION basics: Part II - the people, process, and principles of standards development. ASTM standardization news: 21 - 25, 60, Mar. 1977.
- 86- STRICKLER, M.D. & PELLERIN, R.F. - Rate of loading effect on tensile strength of wood parallel to grain. Forest Products Journal, 23 (10): 34 - 36, Oct. 1973.
- 87- SUDDARTH, S.K.; WOESTE, F.E.; YAO, J.T.P. - Effect of E-variability on the deflection behavior of a structure. Forest Products Journal 25 (1): 17 - 19, Jan. 1975.
- 88- SUPNIK, Ross H. - Rate sensitivity: its measurement and significance. Materials Research & Standards, 2 (6): 498 - 500, June, 1962.

- 89- TCHI, Robert J. - Concomitant strength relationship for lumber. The Journal of Structural Engineering, ASCE, 109 (8): 1954-1868, Aug. 1983.
- 90- TIEMANN, Harry D. - The effect of the speed of testing upon the strength of wood and the standardization of tests for speed. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS ANNUAL MEETING , 11, Philadelphia - PA, Proc's, 1908. P. 541 - 557.
- 91- TIMOSHENKO, Stephen P. - History of strengeth of materials. New York, McGraw-Hill Book, 1953. 452p.
- 92- TOMOMATSU, Akio; ASANO, Ikio; OHTA, Masamitsu - Effect of deflection rate on bending strength of wood II: bending strength and loading history of deflection - rate changing during loading. Journal of the Japan Wood Research Society, 31 (2): 75 - 81, 1985.
- 93- TOMOMATSU, Akio; ASANO, Ikio; OHTA, Masanitsu - Effect of deflection rate on bending strength of wood III; bending strength under controlled loading - rate and controlled deflection - rate. Journal of the Japan Wood Research Society, 31 (2): 82 - 88. 1985.
- 94- WALTERS, C.S. & REISS, W.L. - Predicting modulus of rupture from modulus of elasticity for small, clear specimens of oak and cottonwood. Forest Products Journal, 27 (6): 51 - 53, June 1977.
- 95- WEN, Robert K.; HENLEY, Bruce F.; HSIU, Frank - Modulus of elasticity of timber members. Journal of the Structural Division, ASCE, 103 (12): 2399 - 2404, Dec. 1977.
- 96- WEN, Robert K; HENLEY, Bruce F.; HSIU, Frank - Modulus of elasticity of timber members: discussion. Journal of the Structural Division, ASCE, 105 (9): 1856 - 1859, Sept. 1979.
- 97- WERREN, Fred - Structural timber research at Forest Products Laboratory. Journal of the Structural Division, ASCE, 95 (12): 2891 - 2906, Dec. 1969.
- 98- WILSON, T.R.C.; CARLSON, T.A.; LUXFORD, R.F. - The effect of partial seasoning on the strength of wood. Madison, USDA, FS, FPL, 1930. 13p.

- 99- WOOD, Lyman W. - The factor of safety in design for timber structures. Journal of the Structural Division, ASCE, 84 (7); 1838 - 1 - 1838 - 18, Nov. 1958.
- 100- WOOD, Lyman W. - Wood: a reliable engineering material. Journal of the Structural Division, ASCE, 93 (2): 57 - 62, Apr. 1967.
- 101- ZAKIC, Borislav D. - Inelastic bending of wood beams. Journal of the Structural Division, ASCE, 99 (10): 2079 - 2095, Oct. 1973.
- 102- ZAKIC, Borislav D. - Wood beams under impact load. Journal of the Structural Division, ASCE 105 (7): 1489 - 1507, July 1979.

