

## COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA MADEIRA E DERIVADOS

Rafael Rodolfo de Melo<sup>1</sup>, Cláudio Henrique Soares Del Menezzi<sup>2</sup>

**Resumo:** A madeira, assim como outros materiais utilizados em construção, sofre alterações em sua resistência e rigidez quando submetida a carregamentos de longa duração. Esse fenômeno tem importância considerável na avaliação da capacidade de resistência dos elementos estruturais. Mecanicamente a madeira se comporta como um sólido visco-elástico. Desta forma, com o passar do tempo os elementos estruturais de madeira submetidos a cargas permanentes ou cíclicas sofrem deformações permanentes, mesmo se o carregamento é feito dentro do regime elástico, o que caracteriza o comportamento viscoelástico. Esse comportamento depende, dentre outros fatores, principalmente da intensidade e da duração da carga. No presente estudo, foi realizada uma revisão a respeito desse fenômeno, evidenciando suas causas e efeitos, visando o seu melhor entendimento, o qual é essencial para o uso adequado e eficiente da madeira e de seus derivados como materiais estruturais.

**Palavras-chave:** reologia; propriedades dependentes do tempo; fluência; relaxamento.

## RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF WOOD AND WOOD BASED MATERIALS

**Abstract:** The wood, as well as other construction materials, presents changes in this stiffness and strength when submitted to a long time loading. This phenomenon is important in the analyses resistance capacity of structural materials. Mechanically, the wood behaves as a viscous-elastic solid. However, over time, the structural elements submitted to permanent or cyclic loading presents some deformation, which denotes a viscous-elastic behavior. This characteristic is influenced mainly on the intensity and duration of loading. In this study a review of rheological phenomenon is presented, showing up the causes and effects for a better understanding, which is essential for the appropriate and efficient use of the wood and wood composites as structural materials.

**Keywords:** rheology; time dependent properties; creep; relaxation.

---

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, M.Sc., Prof. Assistente, Campus Professora “Cinobelina Elvas” (CPCE), Universidade Federal do Piauí (UFPI), Bom Jesus-PI. Doutorando em Ciências Florestais pela Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF. <rrmelo2@yahoo.com.br>.

<sup>2</sup>Engenheiro Florestal, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Florestal (DEF), Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF <cmenezzi@unb.br>.

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira pode ser considerada um excelente material estrutural, reconhecida por sua resistência mecânica elevada e baixa massa específica quando comparada a outros materiais. Isso indica que seu emprego para um dado fim, seja estrutural ou não, pode ser realizado com economia e segurança, desde que sejam levadas em consideração suas características e suas propriedades físico-mecânicas. Esse conhecimento pode ser obtido por meio de numerosos ensaios de qualificação do material, sobre amostras representativas do lote de madeira.

Geralmente os testes de qualificação de madeiras consistem na obtenção de dados correspondentes ao carregamento lento e contínuo, aplicada a amostras de “pequenas dimensões” preparadas especialmente para os ensaios. Os ensaios normalmente realizados para determinação das características mecânicas de resistência e rigidez são executados com a aplicação de carregamentos num intervalo de tempo relativamente curto, de, no máximo, 5 minutos (USDA, 1999). Segundo Ballarin et al. (1998), esta situação difere sensivelmente da enfrentada pelos elementos estruturais em serviço, visto que, para muitos deles, o carregamento atuará durante toda a sua vida útil.

Para Bodig; Jayne (1993), dependendo da magnitude e da velocidade de aplicação de carga, a madeira pode apresentar três diferentes respostas: 1) a elasticidade, que é a capacidade de recuperar a sua forma original após a retirada da carga aplicada; 2) a flexibilidade, que conjuga elasticidade e rigidez quando solicitada a uma carga instantânea; 3) e a plasticidade, que é o estado em que ocorrem deformações permanentes, com a resistência mecânica podendo ser mais ou menos comprometida.

O estudo dos fenômenos reológicos em madeiras e compostos de madeira, ou seja, as deformações ocorridas ao longo do tempo em peças sob carregamento permanente ou de longa duração, têm sua importância para a definição dos parâmetros de cálculo dos estados limites de utilização (CÉLIA-SILVA, 1989). Reologia ou comportamento reológico é definido por Bodig; Jayne (1993) como o estudo da influência do tempo no comportamento da relação tensão-deformação dos materiais. O termo é derivado da palavra grega *rheo*, que significa fluir. Logo, a tradução direta do termo pode ser “o estudo da fluidez”.

No presente trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito do comportamento reológico das madeiras e dos compostos a base de madeira, destacando fatores influentes e suas consequências na resistência desses materiais.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Uso da Madeira Como Material Estrutural**

A alta resistência da madeira em relação ao seu peso e o baixo consumo energético necessário para sua produção são características desejáveis para os materiais estruturais. Comparando-se as propriedades da madeira com outros materiais tradicionais na construção, como o aço e o concreto, a relação resistência/massa específica para a madeira é cerca de três vezes maior que o aço e de dez vezes maior que o concreto. Em termos de energia necessária para a produção e da relação energia/resistência, a vantagem da madeira sobre esses materiais são ainda maiores (CALIL JR & DIAS, 1997).

O projeto de qualquer edificação é um estudo pelo qual a estrutura em si e suas partes constituintes são dimensionadas de forma que tenham resistência suficiente para suportar os esforços nas condições de uso que serão submetidas. Este processo envolve a análise e considerações a respeito das propriedades mecânicas e reológicas dos materiais. A determinação dos esforços quando os mesmos são solicitados por agentes externos (cargas, variações térmicas e de umidade), aliadas ao tempo de permanência de possíveis carregamentos sobre as peças, podem ser considerados alguns dos principais aspectos em uma análise estrutural (PFEIL, 1994).

Engenheiros projetistas trabalham habitualmente fixando valores bem inferiores aos que madeira seria capaz de suportar, como meio de proporcionar segurança satisfatória as estruturas. Os materiais utilizados em estruturas (ferro, aço, concreto, madeira, tijolos, etc.) diferem muito com relação a serem mais ou menos afetados pelo tempo de carregamento. No caso da madeira, o limite elástico e a máxima resistência apresentam valores mais elevados em curto período do que em longo tempo de carga. Estes aspectos que devem ser considerados pelo projetista estrutural, permitindo uma maior vida útil em serviço para estrutura, desde que as cargas de curta e de longa duração sejam consideradas em sua concepção estrutural (WOOD, 1951). Deste modo, a previsão histórica dos carregamentos e do comportamento das peças de madeira é indispensável aos projetistas e executores de estruturas de madeira, para a elaboração de projetos mais seguros, eficientes, econômicos e consequentemente mais racionais (CÉLIA-SILVA, 1989).

## **2.2 Propriedades Mecânicas da Madeira**

A resistência pode ser definida como a habilidade que um dado material tem de resistir a forças externas ou cargas, tendendo a alterar seu tamanho e forma. As propriedades mecânicas da madeira e dos compostos a base de madeira são obtidas pelas respostas desses quando submetidos a uma dada tensão, manifestando a sua capacidade de desenvolverem deformações reversíveis, irreversíveis e de resistirem à fratura (PAZZETO, 2009). Para Bodig; Jayne (1993), a resistência mecânica da madeira é dada na medida em que o material é comprimido, fletido ou tracionado sob o efeito da aplicação de carga, podendo ocorrer deformação elástica (mudanças de forma instantâneas e reversíveis) ou a deformação reológica dependendo do tempo de residência da carga.

### ***2.2.1. Elasticidade e Plasticidade da Madeira***

Combinando propriedades elásticas e plásticas, a madeira e seus derivados podem ser considerados como materiais viscoelásticos. Elasticidade é a propriedade da madeira que a possibilita retomar a sua forma original, após a remoção da carga aplicada. As propriedades elásticas são características de corpos sólidos, observadas somente quando a carga aplicada se situa abaixo do limite proporcional; acima deste limite ocorrerão deformações plásticas (irreversíveis), seguida pela ruptura do material. A elasticidade consiste na capacidade da madeira de deforma-se sem que haja a ruptura, por alongamento ou por encurtamento da madeira, sob tração ou compressão uniforme. A fluência e a fadiga correspondem a deformação ou redução da resistência com o passar do tempo para solicitações permanentes (caso da fluência) ou cíclicas (caso da fadiga) que atuam sobre a madeira.

De acordo com Bodig; Jayne (1993), para a madeira, a relação entre a carga aplicada e as deformações elásticas até o limite de elasticidade pode ser expressa pela Lei de Hooke (Equação 1). Segundo essa equação, o módulo de elasticidade é dado pela razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante. Essa relação é diretamente proporcional ao esforço, até o limite de elasticidade (ponto tangente) descrito pela relação tensão-deformação. Embora a lei de Hooke seja estabelecida pelo uso da relação tensão-deformação para determinação da elasticidade dos materiais, nos ensaios, essa relação é apresentada geralmente pela relação carga-deformação. Isso porque admite que durante o ensaio a área permanece constante, e portanto, aumentando-se a carga, aumenta-se na mesma proporção a tensão aplicada. (Figura 1).

$$\sigma = \alpha D \times \varepsilon \quad (\text{Equação 1})$$

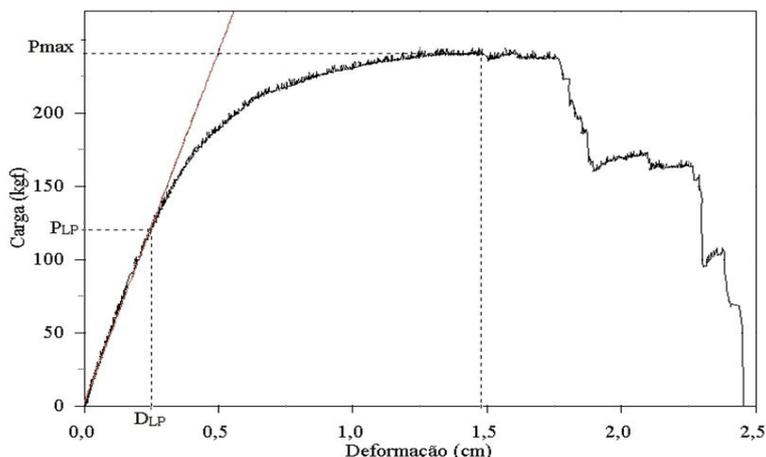
Em que:

$\sigma = P/A$  = resistência ou tensão; P = Carga aplicada; A = área sujeita ao esforço.

$\alpha D$  = coeficiente de deformação =  $\sigma/\varepsilon$ ;  $\varepsilon$  = Deformação relativa =  $\Delta l/l_0$ ;

$\Delta l$  = alteração da dimensão de um corpo, por ação de uma carga;

$l_0$  = dimensão inicial do corpo submetido ao esforço;



**Figura 1.** Relação carga x deformação para madeira.

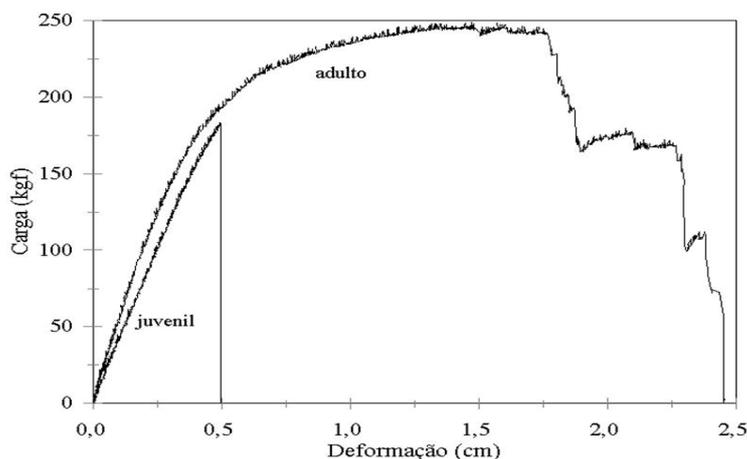
**Figure 1.** Load x deformation relation for wood.

O limite de resistência e comportamento elástico são características próprias de cada material e, na madeira, varia não só entre espécies, como para indivíduos de uma mesma espécie, e em um mesmo indivíduo, dependendo da posição que a amostra é retirada (KOLLMAN & CÔTE, 1968). Dentro do limite de proporcionalidade, a madeira encontra-se na fase elástica e a deformação é reversível, ou seja, ao suspender a carga, a madeira retorna lentamente ao seu estado inicial (*recovery*). Deve-se destacar que não existem materiais perfeitamente elásticos, e que após a suspensão da carga ocorrerá uma mínima deformação mesmo em sua fase elástica.

A madeira juvenil, formada nos primeiros anos de crescimento das árvores, reconhecidamente apresenta resistência inferior àquela apresentada pela madeira adulta. Além disso, nesta também pode ser observada a ausência do comportamento viscoso, que pode ser atribuído a pouca lignificação das células naquela região. No entanto, este comportamento observado com maior evidência em espécies de rápido crescimento, como as do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*, por apresentarem consideráveis proporções de lenho juvenil (Figura 2).

A plasticidade é o comportamento apresentado pela madeira quando a carga aplicada faz com que a amostra exceda o limite proporcional ( $P_{LP}$ ) e conseqüentemente a deformação do limite proporcional ( $D_{LP}$ ). Após esse ponto, a madeira apresenta um comportamento viscoso, que se apresenta ao longo do tempo para uma tensão constante. Outro aspecto a ser

mencionado é que, ao exceder o  $P_{LP}$ , a madeira apresenta uma deformação permanente, a qual não será mais recuperada (CASTELLANOS & AGUILAR, 2006). Para Rocha et al. (1988), dependendo da posição em que a carga atua sobre a amostra de madeira, essa pode apresentar uma maior ou menor fase plástica. Segundo ele, quando submetida a um esforço de tração a madeira apresenta uma deformação plástica pequena. Na compressão normal é acentuada e, na compressão paralela e flexão estática é média.



**Figura 2.** Relação carga x deformação para lenho juvenil e adulto.

**Figure 2.** Load x deformation relation for juvenile and mature wood.

### 2.3 Propriedades Dependentes do Tempo para a Madeira e Compostos de Madeira (Comportamento Reológico)

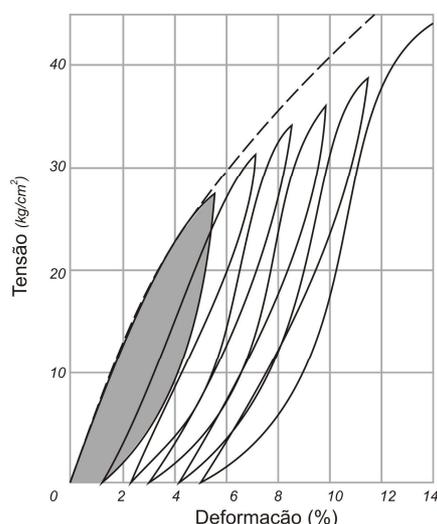
O diagrama de força-deslocamento ou tensão-deformação já vem sendo estudado há muito tempo, sendo a relação entre essas grandezas, uma das exibições gráficas mais utilizadas na previsão do comportamento mecânico de um material. A madeira e os compostos de madeira não são exceção. Suas propriedades mecânicas também podem ser caracterizadas pela família dos diagramas de tensão-deformação (BODIG; JAYNE, 1993).

Na Figura 3, pode ser observada a influência do comportamento reológico após sucessivas aplicações de cargas em painéis aglomerados, onde é visto que após a suspensão da aplicação de carga ocorre uma deformação permanente (histerese) no composto. Embora a imagem abaixo seja para aglomerados, os demais compostos de madeira, e a própria madeira sólida, reagem de forma semelhante quando submetidos a este tipo de ensaio. Esse comportamento é observado mesmo quando a carga não ultrapassa o limite elástico, pois, a madeira, assim como qualquer outro material, não apresenta na teoria comportamento perfeitamente elástico (BODIG; JAYNE, 1993).

Inúmeros exemplos podem ser citados em relação à influência do tempo na tensão-deformação para madeira e compostos de madeira. O comportamento reológico apresenta

importância fundamental para utilização da madeira como material estrutural e/ou para elementos de madeira sujeitos a ação de uma carga por um longo período. Como exemplo, a deflexão em vigas e outros tipos de elementos estruturais sujeitos a ação de uma dada carga por um longo período, pode ser determinante na avaliação do desempenho do material.

Para Frihart (2005), os efeitos dependentes do tempo são complexos e inter-relacionados com inúmeras outras características físicas, mecânicas e de composição (anatômicas) dos materiais, no caso, a madeira e produtos a base de madeira. Inicialmente, são causados por alterações na organização celular dos polímeros que compõem a madeira – celulose, hemicelulose e lignina. Entretanto, nos compostos lignocelulósicos, componentes adicionais como adesivos e demais aditivos utilizados em sua manufatura, também podem influenciar nas propriedades dependentes do tempo nesses produtos.



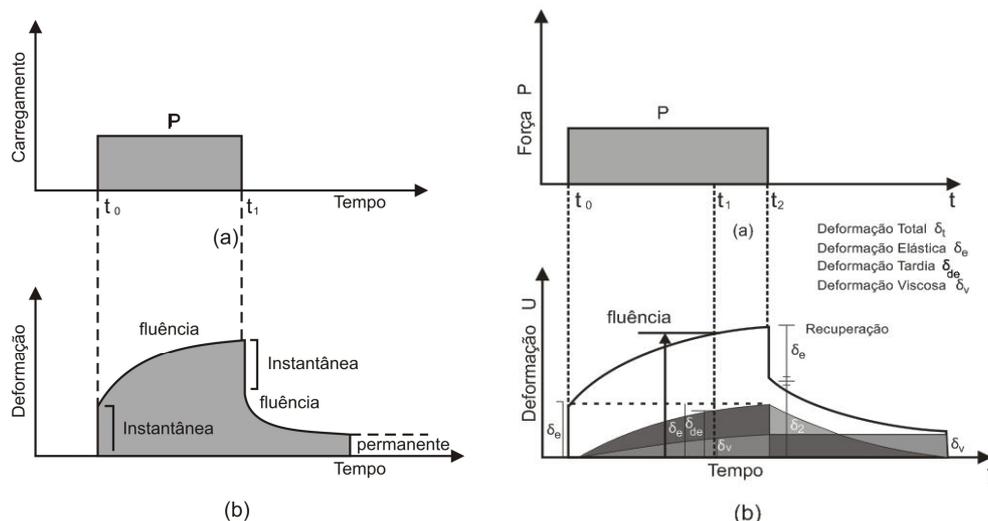
**Figura 3.** Histerese de tensão-deformação em aglomerados (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).  
**Figure 3.** Stress-deformation hysteresis in particleboard (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

### 2.3.1. Fluência

Quando é exercida uma carga sobre uma peça de madeira, inicialmente será observada uma deformação elástica. No entanto, se esta carga for mantida, ocorrerá também uma deformação dependente do tempo. Esse comportamento é conhecido como fluência. A fluência ocorre mesmo em tensões muito baixas, e continua por longos períodos enquanto a peça permanecer sob carregamento. Deve-se salientar ainda que, para cargas elevadas, eventualmente pode ocorrer a ruptura. Este fenômeno também é conhecido como ruptura tardia (USDA, 1999).

A fluência pode ser definida como o fenômeno de acréscimos progressivos na deformação instantânea de um elemento estrutural, quando da persistência do carregamento no tempo. A fluência sempre está associada a uma condição inelástica, porque o nível de tensão permanece constante (ou quase isso, com pequenas mudanças na secção transversal e nas dimensões), enquanto a deformação aumenta. Esse comportamento reológico (ou deformação dependente de tempo) é intimamente influenciado pelas propriedades da madeira, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente (LAUFENBERG, 1987).

Na Figura 4 pode ser observado graficamente o fenômeno da fluência. Observa-se que ao ser aplicada a carga, a madeira sofre uma deformação instantânea, a qual é proporcional a força aplicada. Com a manutenção da tensão, a deformação vai aumentando gradativamente com o tempo. Ao ser retirada a carga, a deformação instantânea observada no início do carregamento rapidamente é restaurada, em velocidade semelhante que ocorreu no início de ciclo. Já a deformação ocasionada em função do comportamento reológico (fluência), vai sendo recuperada lentamente. Entretanto, por não ser a madeira um material perfeitamente elástico, essa deformação não é totalmente recuperada, ocasionando uma deformação permanente.



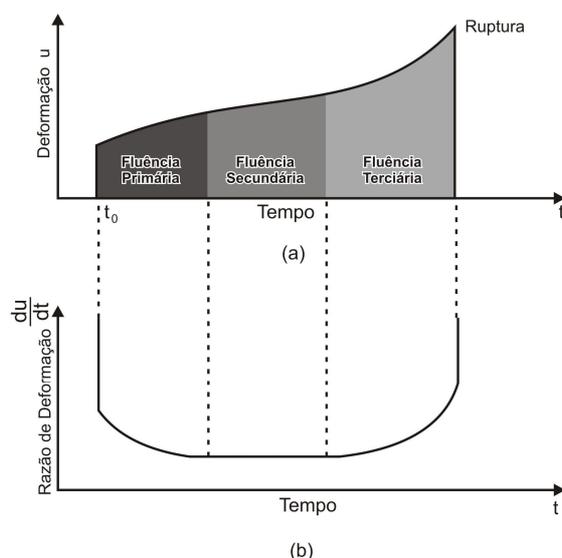
**Figura 4.** Relações entre carga x tempo (a) e deformação x tempo (b). A direita, os componentes de deformação (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

**Figure 4.** Load x time (a) and deformation x time (b) relations. Left, deformations components (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

Ainda na Figura 4 é descrita sistematicamente a curva da relação tempo x deformação, separado o comportamento dos três diferentes componentes de deformação – deformação elástica; deformação elástica tardia; e deformação viscosa. A aplicação instantânea de carga

no composto de madeira produz também, instantaneamente, uma elevada deformação elástica. A continuação do carregamento resulta em deformações adicionais (para os três tipos), as quais vão aumentando sua magnitude com o tempo. Com a liberação do carregamento, as deformações elásticas e elástica tardia, vão sendo recuperadas. Já a deformação viscosa permanece, sendo esta a predominante na madeira e compostos de madeira.

O fenômeno da fluência em madeiras pode ser dividido em três etapas: 1) a fluência primária, onde há rápida e elevada deformação logo após que a carga é colocada sobre a peça, fazendo com que a relação deformação x tempo inicie elevada e rapidamente seja reduzida pela acomodação celular do material – nessa fase predomina a deformação elástica; 2) fluência secundária, que ocorre quando a relação deformação x tempo apresenta-se aproximadamente constante; e 3) fluência terciária, quando a relação deformação x tempo voltar a aumentar e, se mantida, pode ocasionar a ruptura da peça (Figura 5).



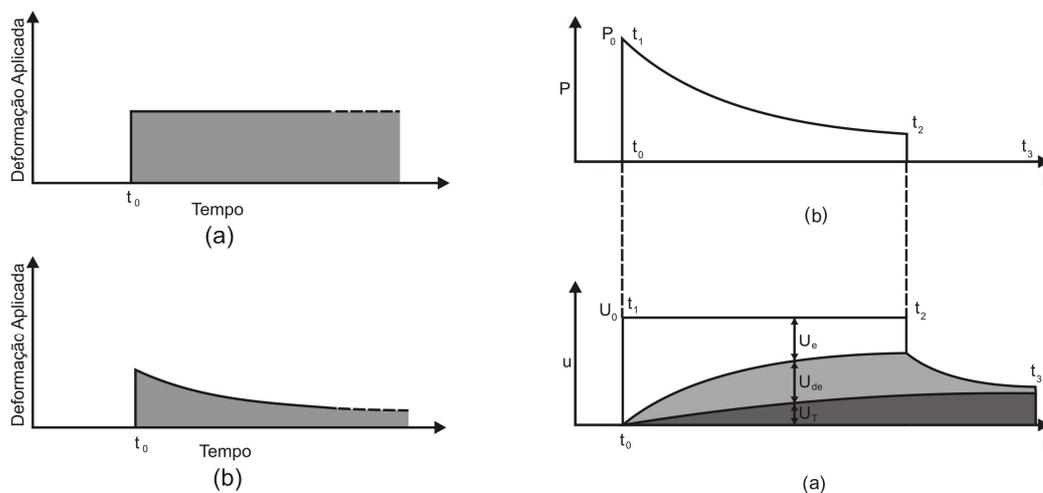
**Figura 5.** Comportamento da fluência. (a) estágios da fluência e (b) razão de fluência (adapt. BODIG & JAYNE, 1993).

**Figure 5.** Creep behavior, (a) creep phases and (b) creep rate (adapt. BODIG & JAYNE, 1993).

Inúmeros aspectos podem influenciar significativamente o comportamento de fluência em materiais lignocelulósicos. Dentre eles, podem ser citados: a origem do material (espécie, posição no tronco, tipo de lenho, etc.); a posição que é ensaiada (perpendicular, paralela ou normal as fibras); o tipo de material (madeira maciça ou compostos de madeira); temperatura; umidade; e nível de tensão (CALIL et al., 1995).

### 2.3.2. Relaxação

A relaxação pode ser definida como a redução da tensão necessária para a manutenção de um estado constante de deformação (BODIG; JAYNE, 1993). Na Figura 6, pode ser observado esse comportamento graficamente. Semelhante ao observado para a fluência, na relaxação, logo após a aplicação de carga é observada uma predominância do comportamento elástico. No decorrer do ensaio, com a redução contínua do carregamento, essa deformação elástica vai dando espaço para as deformações elástica tardia (*delayed elastic*) e viscosa.



**Figura 6.** Curva de relaxação. (a) deformação x tempo e (b) tensão x tempo. A direita, os componentes de deformação (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

**Figure 6.** Relaxation curve. (a) deformation x time and (b) load x time. Right, deformation components (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

### 2.3.3. Variáveis que Influenciam o Comportamento Reológico da Madeira

#### 2.3.3.1. Tipo de Material

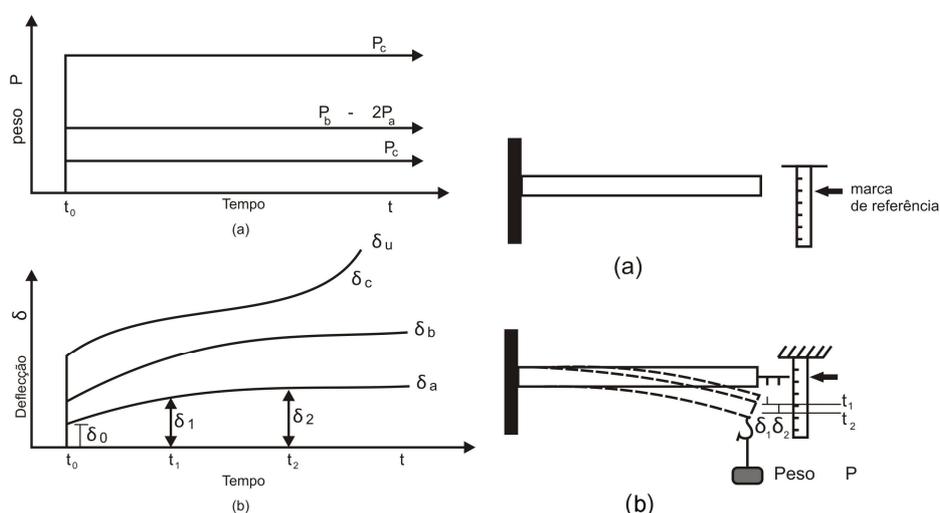
Assim como as demais propriedades da madeira, o tipo de material (madeira maciça e tipo de composto de madeira) influencia consideravelmente as propriedades dependentes do tempo. Geralmente, o comportamento da fluência está intimamente relacionado com a resistência do material.

A variação entre deformações de diferentes variedades de painéis foi observada por Pritchard et al. (2001). O autor verificou que painéis OSB foram mais resistentes a fluência quando comparados a MDF e aglomerados, sendo destes o MDF o menos resistente, o qual apresentou, para as tensões aplicadas, um comportamento acima do limite elástico. Pazzeto (2009), ao comparar a deformação em painéis MDP e MDF, também verificou para o segundo uma maior deformação. Entretanto, a autora verificou que para as tensões aplicadas, o material encontrava-se dentro do regime elástico. Laufenberg (1987) destaca ainda que não só

o tipo de painel que tem efeito sob a fluência, mas também os produtos com que este é confeccionado, principalmente o adesivo, que é utilizado em maiores proporções.

### 2.3.3.2 Nível de Tensão

O nível de tensão aplicado sobre uma dada espécie de madeira, para uma mesma condição de temperatura e umidade, apresenta relação linear e diretamente proporcional com a fluência que essa virá a apresentar (USDA, 1999). O comportamento da fluência em vigas de madeira composta sob a atuação de diferentes cargas pode ser observada na Figura 7. É visto que a maior diferença de deformação entre as cargas aplicadas ocorre no início do carregamento. No decorrer do ensaio, a relação deflexão x tempo entre as cargas são relativamente próximas, pelo menos, até o estágio de fluência secundária.



**Figura 7.** Comportamento da fluência em vigas de madeira composta. (a) níveis de carregamento e (b) deflecções correspondentes (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

**Figure 7.** Creep behavior in wood composite beams. (a) loading levels and (b) corresponding deflections (adapt. BODIG; JAYNE, 1993).

Em seu estudo, Ballarin et al. (1998) relatam que a fluência ocorre mesmo em níveis baixos de tensões e em temperatura ambiente, sendo mais pronunciada nos esforços de compressão perpendicular as fibras e na flexão estática. Este último tem sido o ensaio normalmente adotado para acompanhamento laboratorial do fenômeno. Wu (1993) destaca ainda que, sob condições de baixa umidade e temperatura, essa relação linear entre fluência e tensão aplicada é de até 50% da força necessária para ruptura. Já para condições de elevada umidade e temperatura, essa relação passa a ser não linear quando para níveis de tensão superiores a 20% da carga máxima.

#### 2.3.3.3 Temperatura

O comportamento de uma madeira sobre carregamento contínuo em diferentes temperaturas foi observado por Wu (1993). O autor observou que para as maiores temperaturas a fluência apresentou-se mais acentuada. Esse comportamento é tido como um padrão, não apenas para madeira, mas também para compostos de madeira.

Para Gatto (2006), isso ocorre por que o aumento da temperatura faz com que os componentes da madeira apresentem uma maior plasticidade. Segundo o autor a madeira é ao mesmo tempo plástica (pode ser deformada permanentemente, sem quebrar – quando acima do LP) e elástica (pode ser deformada levemente e quando a força é removida irá retornar a sua forma original – quando abaixo do LP). Esta afirmação esta de acordo com Stamm (1964), que menciona que calor e umidade agem como plasticizantes da madeira, reduzindo a pressão necessária para que a madeira ceda plasticamente ao mesmo tempo em que aumenta a compressão total que ocorre sob altas pressões.

#### 2.3.3.4 Umidade

Kojima; Yamamoto (2005) estudaram a fluência em madeiras para três diferentes teores de umidade (amostras acima do PSF, secas ao ar e secas em estufas). Os autores observaram o incremento de deformação para as amostras, onde comportamento da fluência mostrou-se intimamente relacionado com a umidade das amostras (até o PSF). Um aspecto particularmente interessante da fluência em madeiras é que ciclos de umidade no ambiente tendem a causar uma maior deformação em fluência quando comparado a uma condição constante de umidade (LAUFENBERG, 1987). Esse comportamento foi observado por Roszyk (2005). O autor estudou quatro diferentes condições de teores de umidade em ensaios de fluência e, constatou que teores de umidades cíclicos, apresentaram uma maior deformação, mesmo quando comparados a teores de umidade constantes e elevados.

#### 2.3.3.5 Ângulo das Microfibrilas da Parede Celular ( $S_2$ )

O ângulo das microfibrilas da camada  $S_2$  da parede celular apresenta uma elevada e direta relação com a resistência de madeiras (KOLLMANN & CÔTE, 1968). Este comportamento também é observado para a fluência. Para peças de madeira retiradas um mesmo indivíduo, uma maior resistência é verificada para aquelas obtidas nas regiões do lenho com um menor ângulo microfibrilar. Esse comportamento foi verificado por Kojima; Yamamoto (2004), para *Cryptomeria japonica*.

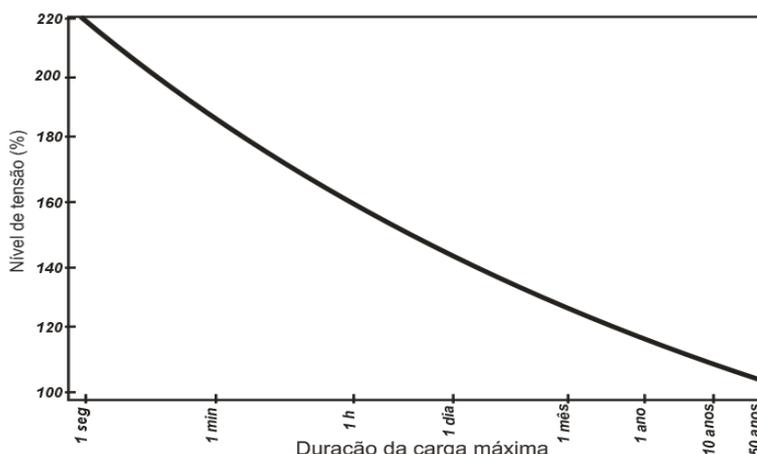
#### 2.3.3.6 Tempo de Carregamento

A duração da carga, ou o tempo durante no qual a carga atua em uma peça de madeira (maciça ou composta), quer seja de forma intermitente ou contínua, é um fator importante na determinação da carga máxima que esta peça pode receber sem que seja excedido o coeficiente de segurança. Esse comportamento pode ser sensivelmente afetado por alterações de temperatura e/ou umidade relativa (USDA, 1999). Szücs (2004) define o carregamento como conjunto de ações com probabilidade de atuação simultânea que devem ser combinadas de forma a representar a condição mais desfavorável para a estrutura. O autor destaca ainda que para a madeira deve-se considerar a sua elevada resistência a ação de cargas de curta duração (cargas rápidas). Este aspecto dá uma vantagem à madeira sob outros materiais estruturais, como ferro, aço, concreto, etc. Isso se deve por a madeira apresentar uma elevada elasticidade quando comparado aos materiais supramencionados. O mesmo autor comenta ainda que o carregamento possa ser dividido nas seguintes classes: permanente, presente em toda a vida útil da construção; longa duração, presente em mais de seis meses de vida útil da construção; média duração, presente em mais de uma semana de vida útil da construção; curta duração, presente em menos de uma semana de vida útil da construção; e instantânea, em um curto espaço de tempo – inferior a um dia.

A madeira pode deformar ou fletir lentamente quando exposta a um esforço constante. A resistência da madeira decresce proporcionalmente ao tempo em que a carga é aplicada. Segundo Loferski (1997), em uma peça de madeira que tenha suportado uma mesma carga continuamente durante um longo período, culminando com a ruptura, a carga que provocou a falha é muito menor do que aquela determinada por suas propriedades de resistência. Contrariamente, se a duração da carga é muito curta, a capacidade de suportar cargas pode ser mais elevada que as suas propriedades de resistência. Já se a carga sob a amostra for intermitente, esse comportamento apresenta um efeito cumulativo de perda de resistência (fadiga). Pfeil (1994), também ressalta a influência do tempo de aplicação de carga sobre a resistência da madeira. Para determinação da resistência das madeiras ( $f$ ) são realizados ensaios em que o carregamento atua sobre a amostra durante cerca de 5 minutos. Aplicando-se uma carga inferior a esta resistência durante um longo período, a madeira pode romper após alguns dias ou meses, dependendo da intensidade da carga. Esse comportamento é

conhecido como ruptura tardia. Para romper em num período aproximadamente de 10 anos, seria necessária uma tensão de 0,62. Isso significa que uma peça de madeira sob a ação contínua de uma carga, romperia com aproximadamente 10 anos se essa carga fosse de aproximadamente 60% da resistência máxima que ela apresentaria no ensaio com tempo de carregamento de 5 minutos.

Segundo Wood (1951), o tempo de permanência ou duração da carga é de fundamental importância para os materiais que apresentam propriedades que dependem do tempo tal como a madeira, significando, portanto, que o material analisado apresenta variações reológicas (Figura 8). A deformação da madeira sob carga em decorrência do tempo sempre ocorre. Caso a carga seja suficientemente alta e a duração longa, ocorrerá eventualmente uma ruptura por fluência.



**Figura 8.** Relação entre tensão sobre a madeira em serviço e duração da carga (adapt. WOOD, 1951).

**Figure 8.** Relation between stress of under wood service and duration of loading (adapt. WOOD, 1951).

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento reológico da madeira e dos compostos de madeira é de suma importância para suas utilizações de forma consciente, principalmente em peças de uso estrutural, que além do carregamento prolongado são submetidas as ações de intempéries. Entretanto, peças não estruturais, como componentes de estantes, mesas, armários, dentre outros móveis, quando submetidas ao carregamento contínuo, também podem sofrer alterações devido suas propriedades dependentes do tempo.

Quando submetida a carregamentos cíclicos, a madeira ou compostos de madeira, mesmo para tensões que ocorram dentro do limite de proporcionalidade, após a suspensão da

aplicação de carga, apresenta uma deformação residual e irreversível. Esse aspecto faz com que a capacidade do material de suportar carga seja continuamente reduzida. Apesar disso, na maioria dos estudos em que se busca avaliar a resistência da madeira e derivados, tem sido dado maior ênfase a resistência sob tensão estática, e relativamente pouca atenção para os efeitos causados por tensões cíclicas. Para o carregamento contínuo de carga de intensidade inferior ao limite proporcional, esse fenômeno também pode ser observado, porém em menor intensidade.

No Brasil, apesar da reconhecida influência do comportamento reológico sobre peças de madeira maciça ou compostos de madeira, poucos trabalhos foram e/ou vem sendo desenvolvidos com enfoque neste tema. A maioria das literaturas nacionais que fazem referência ao tema o tratam com superficialidade.

#### **4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BALLARIN, A.W.; TARGA, L.A.; SOBRAL, L.M. Fluência em peças fletidas de *E. citriodora* e *P. elliottii* submetidas a níveis de carregamento elevados. In: V Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira. **Anais...** Belo Horizonte, 11p, 1998.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood products**. Florida: Krieger Publishing. 1993, 712p.

CALIL JR, C.; DIAS, A.A. Uso da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, p.71-77, 1997.

CALIL JR., C.; BALLARIN, A.W.; MARTINELLI, E. Fluência em peças fletidas de madeira. In: V EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Belo Horizonte, 1995. **Anais...** v. 2, p.131-142.

CASTELLANOS, J.R.S.; AGUILAR, J.M.V. Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis* sp. **Madera y Bosques**, v.12, n.2, p.3-15, 2006.

CÉLIA-SILVA, A.H. **Contribuição ao estudo da fluência em vigas fletidas de madeira**. 1989. 107p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

FRIHART, C.R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Capítulo 9. New York: CRC Press, 2005.

GATTO, D.A. **Caracterização tecnológica do vergamento das madeiras de *Luhea divaricata*, *Carya illinoensis* e *Platano x acerifolia* como subsídio para o manejo florestal**. 2006. 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

KLOCK, U. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H.E. 2000, 275p. Moore. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KOJIMA, Y.; YAMAMOTO, H. Effect of moisture content on the longitudinal tensile creep behavior of wood. **Journal of Wood Science**, v.51, p.462-477, 2005.

KOJIMA Y.; YAMAMOTO, H. Properties of the cell wall constituents in relation to the longitudinal elasticity of wood. Part 2. Origin of the moisture dependency of the longitudinal elasticity of wood. **Wood Science Technology**, v.37, p.427–434, 2004.

LAUFENBERG, T.L. et al. **Creep and creep rupture behavior of wood-based structural panels**. USDA. Res. Pap. Fpl-Rp-574, 1987.

LOFERSKI, J.R. SMILSKI, S. Engineered wood products a guide for specifiers designers and users. Madson, WI: PFS Research Fondation.