

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA E NO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM MADEIRA DE HÍBRIDOS DE EUCALIPTOS

INFLUENCE OF TEMPERATURE IN THE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY IN WOOD FROM HYBRIDS OF EUCALYPTUS

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹ Ana Lúcia Crespo Oliveira² Judy Norka Rodo Mantilla³

RESUMO

O trabalho trata da influência da temperatura, em um intervalo de 20°C a 240°C, nas propriedades físicas da madeira: umidade e massa específica e mecânicas: resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras. O programa experimental foi realizado com 78 corpos de prova, de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, com massa específica aparente média de 671 kg/m³ e teor de umidade de 11,14%. Foram seguidos os procedimentos dos ensaios prescritos pela NBR 7190. Os resultados mostram uma diminuição linear do teor de umidade com o aumento da temperatura até 160°C. Destacam-se duas retas, a primeira de 20°C até 65°C com pequeno decréscimo do teor de umidade, chegando a 4% e a segunda de 65°C até 160°C com perda mais acentuada chegando a 0% de teor de umidade. Acima de 160°C, não apresentando mais umidade, a madeira perde apenas material orgânico, chegando a 20% de perda de massa quando atinge uma temperatura de 240°C. A massa específica praticamente permanece constante até a temperatura de 100°C. A partir da temperatura de 100°C até 240°C a massa específica decresce linearmente chegando a 20%. A resistência à compressão paralela às fibras aumenta linearmente com a temperatura, chegando a 19% na temperatura de 100°C e, após esta temperatura, o comportamento se inverte com decréscimo linear até a temperatura de 180°C. A partir de 180°C, a queda de resistência é acentuada, chegando, na temperatura de 240°C, a 32% menor do que a resistência na temperatura de 20°C. O módulo de elasticidade diminui, apenas aumenta a temperatura. Até 120°C existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8%. Já de 120°C até 200°C a diminuição também é linear, porém, bastante acentuada chegando a 38%.

Palavras-chave: altas temperaturas; degradação térmica da madeira; resistência da madeira.

ABSTRACT

This paper deals with the influence of temperature in a range from 20 °C to 240 °C, in the physical properties of wood: humidity and specific and mechanical masses: strength and modulus of elasticity for the parallel compression to the fibers. The experimental program was performed with 78 specimens of hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* with mean apparent specific gravity of 671 kg/m³ and moisture content of 11.14%. The test procedures prescribed by NBR 7190 were followed. The results show a linear decrease in moisture content with increasing temperature up to 160°C. Two straight lines are noteworthy, the first one from 20°C to 65°C with slight decrease in moisture content, reaching 4% and the second one from 65°C to 160°C with the sharpest loss reaching 0% content of moisture. Above 160°C, the moisture content is zero, so that the wood loses only organic material, coming to lose 20% by weight when it reaches

- 1 Engenheiro Civil, Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antonio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Bloco 1, 4º Andar, Sala 4123, CEP 31270-901, Belo Horizonte (MG), Brasil. mantilla@dees.ufmg.br
- 2 Engenheira Civil, Msc., Doutoranda no Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antonio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Bloco 1, 4º Andar, Sala 4123, CEP 31270-901, Belo Horizonte (MG), Brasil. lucia@dees.ufmg.br
- 3 Engenheira Civil, Dr^a., Professora Assistente da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade FUMEC, Rua Dom Modesto Augusto, 102, Apto. 200, Coração Eucarístico, CEP 30535-430, Belo Horizonte (MG), Brasil. judy.mantilla@fumec.br

Recebido para publicação em 30/10/2012 e aceito em 24/09/2014

a temperature of 240°C. The specific mass remains practically constant until the temperature of 100°C. Temperature between 100°C to 240°C, the specific mass decreases linearly reaching 20 per cent. The strength to compression parallel to the fibers increases linearly with the temperature, reaching 19% at 100°C. Above this temperature, the behavior is inverse, with linear decrease until the temperature of 180°C. From 180°C the compression strength decreases reaching the temperature of 240°C at 32% lower than the resistance at the temperature of 20°C. As the modulus of elasticity decreases, it only increases the temperature. Up to the temperature of 120°C, it has a very slight linear decrease of around 8 per cent. However, between 120°C and 200°C the decrease is also linear, but more accentuated, reaching 38 per cent.

Keywords: high temperatures; thermal degradation of wood; strength of wood.

INTRODUÇÃO

As mudanças no comportamento dos elementos estruturais quando submetidos a altas temperaturas, principalmente no dimensionamento em situação de incêndio, são devido às mudanças das características mecânicas em função da temperatura, ABNT NBR 14432 (2001). O aumento da temperatura do elemento estrutural provoca a redução das características mecânicas do material, assim como o desenvolvimento de tensões que sobrecarregam a estrutura (COSTA; SILVA, 2006). Manríquez e Moraes (2009), Buchanan (2004), Pinto (2005) e Schaffer (1967) compartilham essas evidências.

Segundo Purkiss (2007), na madeira estrutural sujeita ao fogo, a camada externa carbonizada perde a resistência, mas resguarda a parte interna não carbonizada do excesso de temperatura garantindo assim uma menor perda de resistência do material remanescente. E acrescenta que três propriedades são necessárias para se determinar o comportamento da madeira estrutural ao fogo: a taxa de carbonização, a resistência e a elasticidade da madeira.

A madeira é definida quimicamente como um biopolímero tridimensional composto por uma rede interligada de celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de compostos extraíveis e inorgânicos. As temperaturas elevadas provocam a degradação térmica dos componentes químicos presentes em sua estrutura molecular. Pinheiro e Sêye (1998) e Raad, Pinheiro e Yoshida (2006) verificaram experimentalmente que, dos três principais componentes da madeira, a hemicelulose e a celulose, cerca de 70% da composição da madeira, são instáveis e se despolimerizam com temperaturas entre 225°C e 375°C. Os autores afirmam que a perda acentuada de massa é devido à degradação desses dois componentes. A lignina, outro elemento

constituente, por ser estável, se degrada de modo mais lento sendo, no entanto, o principal responsável pela carbonização da madeira. Outra abordagem é apresentada por White e Dietenberger (2001) que indicam que o grau das alterações depende dos seguintes fatores: gradiente de temperatura ao qual a madeira é exposta, condições e período de exposição, fonte de aquecimento, teor de umidade e espécie da madeira.

Segundo Siau (1984), por causa de estrutura porosa da madeira, a condutividade térmica é baixa ($\lambda = 0,12 \text{ W/m.K}$). Esse fato é devido à quantidade de ar presente em seu interior, já que a condutividade térmica do ar é de $\lambda = 0,0216 \text{ W/m.K}$. Diferentemente de materiais homogêneos, o fluxo de calor que ocorre na madeira varia em cada plano anatômico e em função de irregularidades existentes como fendas, nós, etc. No sentido das fibras é 2,25 a 2,75 vezes maior do que nos outros sentidos (radial e tangencial). A constituição física do material lenhoso influencia também na condutividade do calor, quanto maior for a massa específica (menor quantidade de ar por unidade de volume) maior será sua condutividade térmica e quanto maior for o teor de umidade, maior será também a condutividade térmica, visto que a condutividade térmica da água é $\lambda = 0,5 \text{ W/m.K}$.

Skaar (1988) afirma que a água no lenho da madeira, quando a umidade está acima de 28%, encontra-se livre e percola pelos vazios dos elementos anatômicos da madeira. Já entre 6% e 28% de umidade a água ocupa os espaços submicroscópicos da parede celular, em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares e entre 0% e 6% de umidade, a água é chamada de água de adsorção química e está aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e de hemicelulose. O autor comenta, além disso, que a madeira com umidade apresenta comportamento diferenciado quando sujeita à variação da temperatura. Se for aquecida,

ela tende a se expandir por efeito térmico e a se contrair, devido à perda de umidade. A menos que a madeira esteja com um teor de umidade inicial muito baixo (menor que 3% ou 4% de umidade), a contração, em decorrência da perda de umidade, será maior que a expansão térmica, de forma que a mudança dimensional resultante será negativa. No entanto, quando a madeira está com teor de umidade intermediário, entre 8% e 20%, ao ser aquecida, inicialmente, ela irá se expandir para logo se contrair gradualmente, até um volume menor que o inicial à medida que ocorre a perda de umidade por efeito do aquecimento.

As propriedades de resistência mecânica da madeira variam linearmente com a temperatura, quando submetida a temperaturas abaixo de 150°C, para um teor de umidade constante (KRETSCHMANN, 2010). A mudança que ocorre nas propriedades quando a madeira é rapidamente aquecida ou esfriada é denominada de “efeito imediato”. Em temperaturas abaixo de 100°C, o “efeito imediato” é reversível, isto é, se a mudança de temperatura for rápida, a propriedade irá retornar para o valor correspondente à temperatura original. Acima dos 100°C ocorre o “efeito irreversível” devido à degradação de substâncias componentes da madeira, o que resulta em perda de peso e resistência. Esta perda depende de fatores que incluem teor de umidade, meio de aquecimento, gradiente de temperatura, período de exposição, espécie e tamanho da peça analisada.

Schaffer (1967) comenta que, acima de 100°C, a água da madeira exposta ao calor evapora, no entanto, uma parte migra para o interior e que resulta em um aumento da umidade na parte interna da madeira.

Durante um incêndio, a camada aquecida de madeira por baixo do carvão que se forma, tem suas propriedades mecânicas reduzidas devido ao aumento de temperatura e à mudança na umidade. No entanto, segundo Piazza et al. (2005), acima de 65°C a madeira apresenta uma melhoria das características mecânicas, devido ao fato da umidade diminuir, dessa forma pode ser mascarado o efeito negativo da degradação térmica.

Manríquez (2008, 2012) analisou resultados de diferentes estudos (SCHAFER 1967, YOUNG; CLANCY, 2001, KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975, GERHARDS, 1982, THOMAS, 1996, BAKAR; HIZIROGLU; TAHIR, 2012) com a finalidade de avaliar a influência do aumento de temperatura na perda de resistência à

compressão da madeira. Concluiu que a resistência à compressão paralela às fibras dos corpos de prova de madeira seca é maior que a dos corpos de prova de madeira úmida. Da mesma forma, Manríquez e Moraes (2009) analisaram resultados de resistência à compressão paralela às fibras, obtidos por diferentes pesquisadores, em corpos de prova de diferentes espécies submetidos à variação de temperatura. Concluem que a diferença está associada ao teor de umidade das amostras, de forma que menores teores de umidade permitem uma degradação mais rápida dos polímeros da madeira, refletindo na perda de resistência. Também concluíram que sob o efeito da temperatura, de 20°C até 210°C, o módulo de elasticidade diminui cerca de 40%, podendo chegar a uma redução de 90% para 250°C.

Manríquez (2008) analisou amostras da espécie paricá (*Schizolobium amazonicum*) com teor de umidade médio de 11,74% e massas específicas aparentes entre 282,94 kg/m³ e 464,53 kg/m³, submetidas a temperaturas entre 20°C e 230°C e verificou que a resistência mecânica diminui em função do aumento da temperatura sendo que a 230°C essa redução chega a 35,07% para a resistência à compressão. Também Manríquez e Moraes (2009) analisaram resultados experimentais de diversos pesquisadores e concluíram que ocorreram reduções na resistência à compressão paralela às fibras de até 75%, para diversas espécies de madeira, em gradientes até 240°C.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho é avaliar a influência da variação de temperatura, em um intervalo de 20°C a 240°C, na umidade, massa específica, resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

A madeira utilizada no programa experimental é de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla* oriunda de florestas plantadas no sul da Bahia, Brasil. Foram utilizadas seis vigas de madeira serradas, secas em estufa, com seções 50 x 180 mm e comprimentos de 3690 mm com teor de umidade de 11,14% e massa específica aparente média de 671 kg/m³. As vigas foram compradas em uma serraria de Belo Horizonte.

De cada uma das 6 vigas foram retirados 14 corpos de prova (CPs) de 50 x 50 x 150 mm, sendo a dimensão de 150 mm paralela às fibras conforme

a NBR 7190 (1997), o que resultou um total de 84 CPs. Foram formados 12 conjuntos de 7 CPs, sendo 6 de cada viga e 1 CP para acompanhamento de cada temperatura, retirado aleatoriamente de uma das vigas. Os conjuntos de CPs foram submetidos à temperatura ambiente em uma câmara climatizada a 20°C e umidade relativa 68%, pelo período de 3 meses. Nove destes conjuntos foram acondicionados em estufas com circulação de ar, nas temperaturas 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C e 200°C. Dois conjuntos foram acondicionados em forno mufla nas temperaturas de 220°C e 24°C.

Metodologia de ensaio

De cada conjunto de sete CPs, o CP para acompanhamento do gradiente de temperatura (testemunha) foi previamente perfurado na parte superior para a instalação de um sensor de temperatura (termopar tipo K). Uma vez inserido no furo, o sensor foi protegido por um tubo de cerâmica refratária. A variação de temperatura no interior do corpo de prova (CP) foi acompanhada por um sistema de aquisição de dados (Figura 1). Quando a câmara quente (estufa ou forno mufla) atingiu a temperatura definida para cada conjunto, o tempo de permanência dos CPs, nessa temperatura, foi definido pelo sensor de temperatura embutido no CP para acompanhamento do gradiente de temperatura. Quando este sensor atingia a temperatura da câmara quente, indicava que toda a massa dos CPs também atingiram esta temperatura. Em seguida

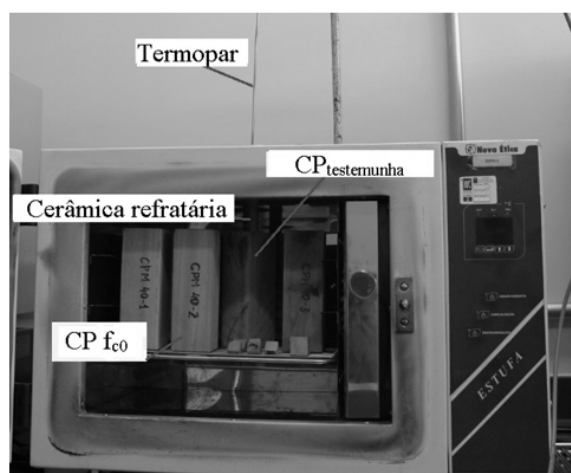


FIGURA 1: Condicionamento do CP na câmara de temperatura.

FIGURE 1: Conditioning of specimens in chamber temperature.

foram retirados os CPs da câmara quente. A taxa de aquecimento foi de 5°C por minuto.

Antes de serem colocados os CPs na câmara quente, determinavam-se peso e dimensões de cada CP, para a obtenção da umidade e massa específica aparente, segundo os procedimentos da ABNT NBR 7190 (1997), anexo B. Essa mesma norma foi adotada para a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade paralelo às fibras. Devido às dimensões dos CPs serem bem maiores que os indicados pela norma e para determinação do volume foram feitas 5 medidas de cada aresta, a utilização do método estereométrico foi considerado suficientemente válido.

Os ensaios foram realizados em uma Máquina Universal com capacidade de 30 kN. Para a medida de deformação foi utilizado um *clip-gage* com comprimento base de 50 mm (Figura 2). O carregamento aplicado foi de acordo com o diagrama de carga (cíclico) adotado pela ABNT NBR 7190 (1979).

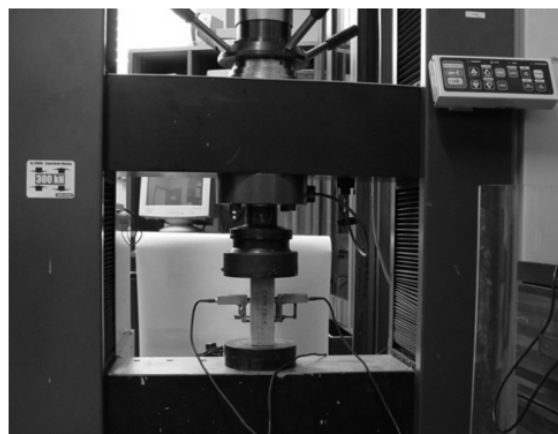


FIGURA 2: Ensaio à compressão.

FIGURE 2: Test compression.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definições

Foi definida a resistência relativa à compressão paralela às fibras, como a razão entre a resistência à compressão paralela as fibras, em uma determinada temperatura (T) e a resistência à compressão paralela às fibras a 20°C, representada por $f_{c0,T}/f_{c0,20°C}$. E o módulo de elasticidade relativo paralelo às fibras como a razão entre o módulo de elasticidade paralelo às fibras, em uma dada temperatura (T) e o módulo de elasticidade paralelo às fibras a 20°C, representada por $E_{c0,T}/E_{c0,20°C}$. A

massa específica relativa como a razão entre a massa específica aparente em uma dada temperatura (T) e a massa específica aparente a 20°C, representada por $D_{ap,T}/D_{ap,20°C}$.

Teor de umidade e massa específica aparente

O teor de umidade médio das 6 vigas selecionadas à temperatura de 20°C, foi de 11,18%. Após a retirada dos CPs da câmara quente e a realização dos ensaios mecânicos, foi determinado seu teor de umidade, que está apresentado na Tabela 1 para todas as temperaturas de ensaio. Notar que os valores “negativos de umidade” (valores com * na Tabela 1) são referentes à perda de massa de outros componentes da madeira e não mais de água.

Na Figura 3 é mostrada a variação do teor de umidade em função do aumento da temperatura.

É importante ressaltar que o tempo de permanência, na temperatura, foi o necessário para que toda a massa do CP ficasse com a mesma temperatura. Na Figura 3 destacam-se duas retas, a primeira de 20°C até 65°C e a segunda de 65°C até 160°C, com inclinações diferentes e R^2 de 0,85 e 0,95, respectivamente. Com relação à primeira reta, a variação da umidade em função da temperatura, até aproximadamente 65°C, é de 4%. Kretschmann (2010) indica que, até essa temperatura, as

mudanças que ocorrem na madeira, sob a influência da temperatura, são reversíveis (“efeito imediato”) e para temperaturas maiores que 65°C as mudanças são devidas a processos químicos, assim a desidratação da madeira nesta etapa ocorre por perda de água adsorvida.

Observa-se na Tabela 1, que, quando o CP está numa temperatura entre 140°C e 180°C, o teor de umidade poderá ser zero. Já na Figura 3, pode-se constatar que, quando o CP atinge a temperatura de 160°C, o teor de umidade é zero. Acima dessa temperatura o CP começa a perder os componentes orgânicos da madeira, isto explica o valor “negativo da umidade”. Esse fato também foi observado por Pinheiro e Sèye (1998), porém, com temperaturas acima de 200°C, o que confirma a degradação dos componentes mais instáveis da madeira: a hemicelulose e a celulose.

A massa específica aparente de cada um dos CPs é apresentada na Tabela 2 em função da temperatura, e na Figura 4 a massa específica relativa em função da temperatura.

A massa específica relativa é próxima de um até a temperatura de 100°C (Figura 4), o que significa que a massa específica da madeira submetida até essa temperatura apresenta um valor igual ao da massa específica na temperatura ambiente de 20°C, indicando que a perda de volume devido à

TABELA 1: Teor de umidade dos corpos de prova em função da temperatura.

TABLE 1: Moisture content of specimens because of the temperature.

Temp. (°C)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)	U_f (%)
	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga 6	Média	Desv.Pad.
20	11,14	11,20	11,17	11,14	11,24	11,19	11,18	0,04
40	10,81	10,60	10,75	10,74	11,01	9,67	10,60	0,47
60	9,90	9,50	9,81	9,61	10,14	8,81	9,63	0,46
80	7,01	7,25	7,22	6,31	7,23	6,66	6,95	0,38
100	6,00	5,97	5,99	5,47	5,73	5,03	5,70	0,39
120	3,04	3,31	3,85	2,26	4,10	3,70	3,38	0,67
140	1,88	1,63	2,12	1,09	2,10	1,03	1,64	0,48
160	0,71	-0,04 ¹	0,38	-0,07 ¹	0,09	-1,63 ¹	-0,09 ¹	0,81
180	-0,45 ¹	-1,72 ¹	-1,35 ¹	-1,24 ¹	-1,91 ¹	-4,30 ¹	-1,83 ¹	1,31
200	-8,94 ¹	-6,41 ¹	-7,89 ¹	-7,94 ¹	-3,41 ¹	-8,71 ¹	-7,22 ¹	2,06
220	-10,32 ¹	-11,30 ¹	-11,72 ¹	-13,16 ¹	-11,79 ¹	-13,61 ¹	-11,98 ¹	1,21
240	-15,98 ¹	-13,81 ¹	-14,69 ¹	-14,33 ¹	-11,25 ¹	-15,00 ¹	-14,18 ¹	1,61

Em que: ¹significa que o valor não é mais referente à umidade e sim à perda de componentes da madeira, U_f = umidade final.

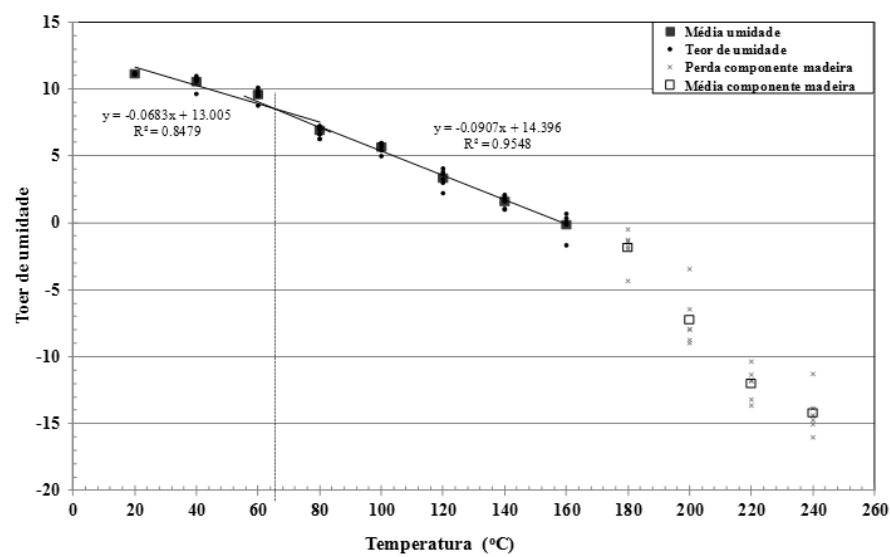


FIGURA 3: Teor de umidade em função do aumento da temperatura.
FIGURE 3: Moisture content versus increasing temperature.

TABELA 2: Massa específica aparente dos corpos de prova em função da temperatura.
TABLE 2: Specific Gravity as a function of temperature in the specimens.

Temperatura (°C)	D _{ap} Viga 1	D _{ap} Viga 2	D _{ap} Viga 3	D _{ap} Viga 4	D _{ap} Viga 5	D _{ap} Viga 6	D _{ap} Média	D _{ap} Desv.Pad.
	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)
20	678	750	710	583	714	740	696	61
40	675	748	709	579	705	745	694	62
60	674	719	708	591	710	769	695	60
80	674	718	733	577	711	765	696	66
100	672	731	757	588	700	743	699	62
120	590	702	730	576	678	738	669	70
140	563	688	718	570	668	737	657	74
160	537	674	706	563	657	736	646	79
180	510	660	694	557	647	735	634	85
200	529	628	651	537	623	675	607	60
220	528	609	626	497	615	633	585	57
240	491	590	605	494	580	640	567	61

Em que: D_{ap} = Massa específica aparente.

diminuição da umidade é compensada pelo aumento de volume devido à dilatação térmica. Na Figura 4 e na Tabela 2, observa-se uma redução crescente da densidade de 5% a 20%, respectivamente para uma temperatura de 120°C a 240°C. Esta redução ocorreu por perda de água, por expansão térmica e por perda de material orgânico, no presente trabalho não foi possível definir especificamente as proporções

de cada fenômeno. Segundo Skaar (1988), o aumento da temperatura provoca uma diminuição da densidade da madeira, principalmente, devido à perda de água presente nas interfaces entre moléculas de celulose e hemicelulose, rompendo-se as forças intermoleculares de Van der Waals e as Ligações de Hidrogênio.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico da

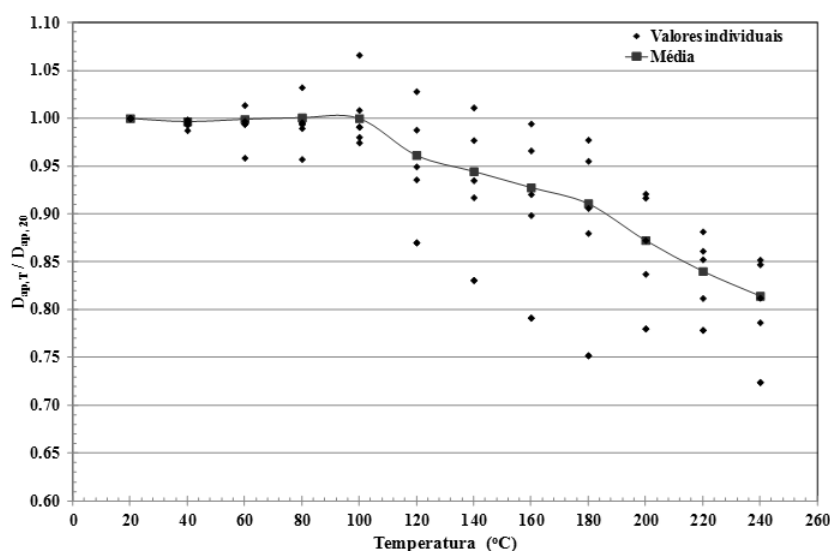


FIGURA 4: Massa específica relativa em função do aumento da temperatura.

FIGURE 4: Relative Specific Gravity according to the increasing temperature.

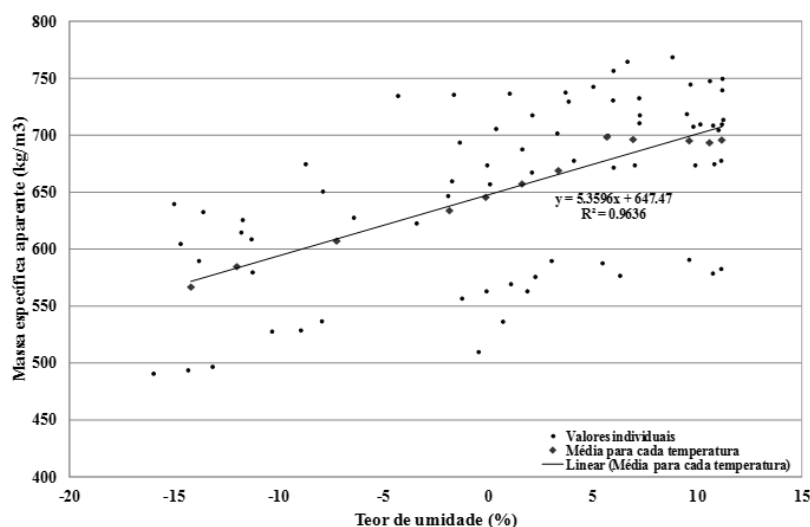


FIGURA 5: Massa específica relativa em função do teor de umidade.

FIGURE 5: Specific Gravity versus moisture content.

variação da massa específica em função da variação da umidade. Nota-se que existe uma correlação linear, altamente significativa, entre os valores médios. Não foi possível explicar este fato com os dados disponíveis.

Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras em função da temperatura está apresentada na Tabela 3 e, como exemplo, é mostrado na Figura 6 o aspecto visual de cada um dos CPs da viga 2

após serem submetidos às temperaturas de 20°C a 240°C, na qual se observam a variação da coloração da madeira e alguns modos de ruptura pós-ensaio de compressão.

A partir de uma análise visual dos modos de ruptura dos CPs em função da temperatura e dos apresentados na ASTM D 143 (2009) (Figura 7) até a temperatura de 100°C se detectou na maioria dos CPs o tipo “d”. Para as temperaturas entre 120 e 180°C, os tipos “e” e “b”. Para temperaturas acima de 180°C não se detectou nenhum dos tipos apresentados pela ASTM D 143 (2009). A ruptura

TABELA 3: Resistência à compressão paralela às fibras em função da temperatura.
TABLE 3: Compressive strength parallel to the fibers according to the temperature.

Temperatura (°C)	f_{c0} (MPa) Viga 1	f_{c0} (MPa) Viga 2	f_{c0} (MPa) Viga 3	f_{c0} (MPa) Viga 4	f_{c0} (MPa) Viga 5	f_{c0} (MPa) Viga 6	f_{c0} (MPa) Média	f_{c0} (MPa) Desv.Pad.
20	64	49	71	44	62	66	59,33	10,50
40	67	49	70	54	67	57	60,67	8,50
60	65	57	72	55	70	52	61,83	8,33
80	70	58	74	57	68	72	66,50	7,26
100	73	64	81	63	70	66	69,50	6,77
120	72	57	79	62	72	72	69,00	8,00
140	79	49	80	58	74	71	68,50	12,41
160	80	58	80	49	76	60	67,17	13,21
180	61	65	83	59	73	51	65,33	11,27
200	59	46	70	56	65	50	57,67	9,00
220	49	39	52	32	47	47	44,33	7,42
240	26	44	54	33	43	42	40,33	9,69



FIGURA 6: Variação na coloração da madeira e modos de ruptura após o ensaio de compressão.
FIGURE 6: Variation in the wood color and rupture modes after the compression test.

em todos os casos ocorreu por explosão indicando uma fragilidade na união dos elementos anatômicos da madeira.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico da resistência relativa em função da variação de temperatura.

Ao se analisar a Figura 8, comparando-a com a resistência relativa da madeira à temperatura ambiente com a de 100°C observa-se que ocorre um acréscimo de 19%, em média e, após os 100°C, o comportamento se inverte com decréscimo linear

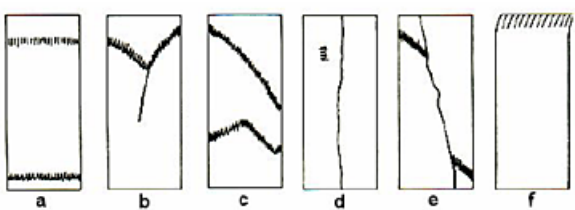


FIGURA 7: Modos de ruptura na compressão paralela às fibras: a) esmagamento horizontal; b) fenda radial ou tangencial; c) cisalhamento transversal; d) rachadura longitudinal; e) esmagamento e cisalhamento paralelo às fibras; f) esmagamento na extremidade. Fonte: ASTM D 143 (2009).
FIGURE 7: Modes of rupture in compression parallel to the grain: a) horizontal crushing, b) radial or tangential crack, c) transverse shear, d) Longitudinal crack e) crushing and shear parallel to the grains f) end crushing. Source: ASTM D 143 (2009).

até a temperatura de 180°C, porém, ainda 10% maior do que a resistência à temperatura de 20°C. A partir de 180°C, a queda de resistência é elevada, chegando, na temperatura de 240°C, a 32% menor do que a resistência na temperatura de 20°C. Segundo Piazza et al. (2005), o aumento aparente de resistência é devido à diminuição da umidade.

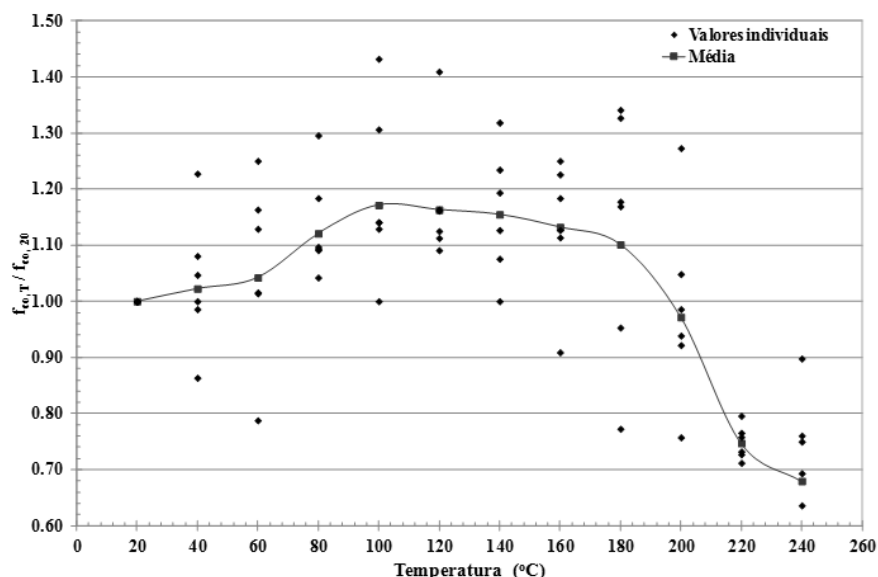


FIGURA 8: Resistência relativa à compressão paralela às fibras em função da temperatura.

FIGURE 8: Relative resistance to compression parallel to the fibers according to the temperature.

Já Kretschmann (2010) indica que para um teor de umidade constante e temperaturas abaixo de 150°C, as propriedades de resistência mecânica diminuem linearmente com a temperatura. Visando explicar essa redução de resistência, White e Dietenberger (2001) e Rocha, Pérez e Cortez (2004) indicam que a biomassa lignocelulósica é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose e hemicelulose, além de lignina, estando também presentes outras substâncias em

pequenas quantidades como extrativos e cinzas, tornando a pirólise da madeira, um processo bastante complexo no qual a conversão térmica que ocorre implica na ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio. Manríquez (2008) também encontrou que a resistência mecânica do paricá (*Schizolobium amazonicum*), diminuiu até 35,07% na temperatura de 230°C e Manríquez e Moraes (2009) indicam reduções na resistência à compressão paralela às fibras para diversas espécies

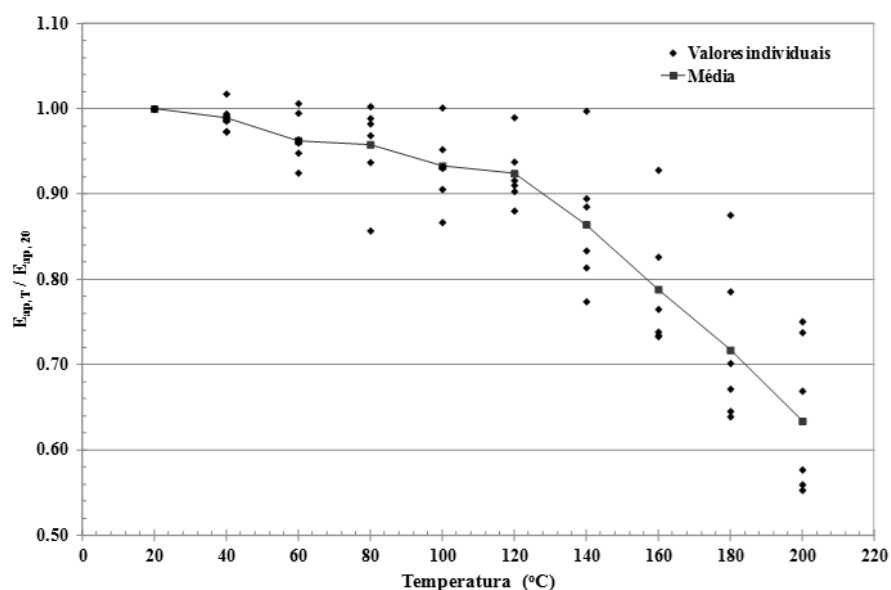


FIGURA 9: Módulo de elasticidade relativo à compressão paralela às fibras em função da temperatura.

FIGURE 9: Elasticity modulus relative to compression parallel to the fibers as a function of temperature.

de até 75%.

Módulo de elasticidade

Na Tabela 4 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade em função da temperatura e na Figura 9 tem-se o gráfico do módulo de elasticidade relativo em função da temperatura.

Analisando o gráfico da Figura 9 observa-se que o comportamento do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura é muito diferente do comportamento da resistência à compressão (Figura 8). O módulo de elasticidade diminui apenas aumenta a temperatura. Até 120°C existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8%. Já de 120°C até 200°C a diminuição também é linear, porém, bastante acentuada chegando a 38%. Esse fato já foi constatado por Piazza, Tomasi e Modena (2005) e Manríquez e Moraes (2009).

Na Figura 10 é apresentado um gráfico relacionando à resistência relativa e o módulo de elasticidade relativa com a massa específica relativa. Observa-se que enquanto a massa específica relativa permanece 1 (até a temperatura de 100°C) não existe uma correlação com a resistência e o módulo de elasticidade relativo, já para temperaturas acima de 100°C a correlação é altíssima. Este comportamento pode ser explicado devido ao fato de a massa específica relativa não sofrer praticamente nenhuma variação até a temperatura de 100°C, como mostra a Figura 4, e a resistência relativa aumentar consideravelmente devido à diminuição do teor de

umidade com o aumento da temperatura. Assim não existe esta correlação entre estas duas variáveis no intervalo de 20°C a 100°C.

CONCLUSÃO

A madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla* apresenta uma diminuição linear do teor de umidade com o aumento da temperatura até 160°C. Destacam-se duas retas, a primeira de 20°C até 65°C com pequeno decréscimo do teor de umidade, chegando a 4% e a segunda de 65°C até 160°C com perda mais acentuada chegando a 0% de teor de umidade. Acima de 160°C, não apresentando mais umidade, a madeira perde apenas material orgânico, chegando a 20% de perda de massa quando atinge uma temperatura de 240°C. A massa específica praticamente permanece constante até a temperatura de 100°C indicando que a perda de volume devido à diminuição da umidade é compensada pelo aumento de volume devido à dilatação térmica. A partir da temperatura de 100°C até 240°C, a massa específica decresce linearmente chegando a 20 %. A resistência à compressão paralela às fibras aumenta linearmente com a temperatura, chegando a 19% na temperatura de 100°C e após esta temperatura o comportamento se inverte com decréscimo linear até a temperatura de 180°C, porém, ainda 10% maior do que a resistência à temperatura de 20°C. A partir de 180°C, a queda de resistência é elevada, chegando, na temperatura de 240°C a 32% menor do que a resistência na temperatura de 20°C. O

TABELA 4: Módulo de elasticidade paralelo às fibras em função da temperatura.
TABLE 4: Elastic modulus parallel to the grains as a function of temperature.

Temperatura(°C)	E _{c0} (MPa) Viga 1	E _{c0} (MPa) Viga 2	E _{c0} (MPa) Viga 3	E _{c0} (MPa) Viga 4	E _{c0} (MPa) Viga 5	E _{c0} (MPa) Viga 6	E _{c0} (MPa) Média	E _{c0} (MPa) Desv.Pad.
20	12715	8758	12925	8922	11671	12248	11207	1884
40	12371	8632	12585	8869	11558	12463	11080	1841
60	11759	8813	12408	8877	11067	11804	10788	1564
80	12573	8208	12960	8643	10002	12033	10737	2065
100	12731	8150	12309	8317	10118	11093	10453	1950
120	11924	7911	11379	8172	10625	12123	10356	1868
140	10600	7753	10518	7984	9034	12216	9684	1731
160	9728	6432	9545	7372	8557	11368	8834	1773
180	8128	6146	8681	7010	7533	10723	8037	1583
200	7113	5861	7457	6697	6455	9038	7104	1095

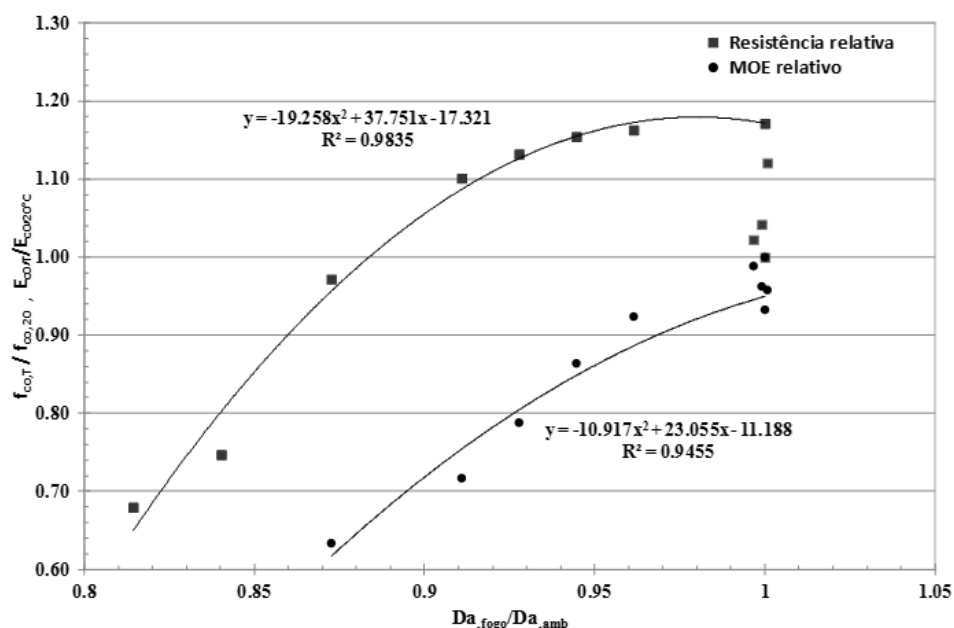


FIGURA 10: Resistência e módulo de elasticidade relativo à compressão paralela às fibras em função da massa específica relativa.

FIGURE 10: Resistance and elasticity modulus relative to the parallel compression to the grains according to the relative specific gravity.

comportamento do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura é muito diferente do comportamento da resistência à compressão. O módulo de elasticidade diminui apenas aumenta a temperatura. Até 120°C existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8%. Já de 120°C até 200°C, a diminuição também é linear, porém, bastante acentuada chegando a 38%. A resistência e o módulo de elasticidade relativo até a temperatura de 100°C não têm uma correlação significativa com a massa específica relativa, já para temperaturas acima de 100°C, a correlação é altíssima.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of testing small clear specimens of timber**. ASTM D-143-94. Annual book of ASTM Standards, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro 1979.

NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro 2001.

BAKAR, B. F. A.; HIZIROGLU, S.; TAHIR, P. Properties of some thermally modified Wood species. **Materials and Design**, v. 43, p. 348-355, 2012.

BUCHANAN, A. International developments in design for structural fire safety. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, Passo Fundo, v. 1, n. 1, p. 51-78, 2004.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU, 2006, São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006.

GERHARDS, C. C. Effect of the moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. **Wood and Fiber**, Pennsylvania, USA, v. 14, n. 1, p. 4-36, 1982.

KNUDSON, R. M.; SCHNIEWIND, A. P. Performance of structural wood members exposed to fire. **Forest Products Journal**, USA, v. 25, n. 2,

p. 23–32, 1975.

KRETSCHMANN, D. E. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. [s. l.]: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

MANRÍQUEZ F, M. J. **Coefficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. 2012. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2012.

Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2008.

MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

PIAZZA, M.; TOMASI, R.; MODENA, R. **Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo Le nuove normative europee**. Milano: Biblioteca Tecnica Hoepli, 2005. 736 p.

PINHEIRO, P. C. C.; SÈYE, O. Influência da temperatura da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 53., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 1998.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2005. 138 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de

Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2007. 387 p.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M.; CORTEZ, L. A. B. **Aspectos teóricos e práticos do processo de pirólise de biomassa**. Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Alcool”. Itajubá: UNIFEI, 2004. 22 p.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SKAAR, C. **Wood-Water Relations**. 1. ed. Berlin: Springer, 1988. 283 p.

THOMAS, G. C. **Fire resistance of light timber framed walls and floors**. 1996. 176 f. Tese (Phd in Fire Engineering) - University of Canterbury, New Zealand's South Island, 1996.

SCHAFFER, E. L. **Charring rate of selectad woods: transverse to grain**. [s. l.]: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory, 1967.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. **Wood products: thermal degradation and fire**. [s. l.]: Elsevier Science, 2001. p. 9712-9716.

YOUNG, S. A.; CLANCY, P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions. **Fire and Materials**, v. 25, p. 83-93, 2001.