



Estudo experimental sobre o comportamento da resistência mecânica de amostras de madeira sob ação de fogo simulando incêndios residenciais

L. K. Oliveira¹, A. G. Graeff², E. E. C. Rodrigues², L. C. P. Silva Filho²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i1.43>

Artículo recibido el 03 de Octubre de 2012 y revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 29 de Diciembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el tercer número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2013

RESUMEN

Embora a construção civil tenha avançado tecnologicamente, a madeira continua sendo muito empregada neste setor. Entretanto, a madeira é suscetível a ataque de insetos, possui grande variabilidade e, entre outras desvantagens, é material combustível. Devido à inflamabilidade, o tempo de combate a incêndios em edificações de madeira é reduzido. Conhecer o comportamento deste material mediante a ação do fogo permite criar planos de fuga para os ocupantes de edificações construídas em madeira. Este trabalho versa sobre a perda de resistência mecânica à compressão e à flexão da madeira, apresentando os resultados obtidos de amostras de madeira cedrinho expostas a situação de incêndio de baixo risco, por períodos que variam de 2,5 a 10 minutos. Dos ensaios observou-se que a perda de resistência à compressão, aos 5 e 10 minutos, foram de 34% e 90%, respectivamente. Já a perda de resistência à flexão foi de 51% e 90% para 5 e 10 minutos de exposição, respectivamente. Entretanto, percebe-se que a perda de resistência é dependente da geometria da seção.

Palabras Clave: incêndio; madeira; comportamento mecânico.

© 2013 ALCONPAT Internacional

ABSTRACT

Although the civil construction has substantially improved, timber is still consistently used. However, timber is susceptible to insect attack, it has great variability and, among other disadvantages, it is considered as a combustible material. Due to this inflammability, the period of time required to fight the fire in buildings is reduced. Knowing the behaviour of this material against fire situation allows creating escape routes for building users. This work aims to obtain the loss of compressive and flexural strength of cedarwood specimens subjected to low risk fire situation, in periods of exposure ranging from 2,5 to 10 minutes. The results show that the loss in the compressive strength at 5 and 10 minutes of exposure were 34% and 90%, respectively. The loss in the flexural strength was 51% and 90% for 5 and 10 minutes of exposure, respectively. However, it was observed that the loss in strength depends on the geometrical characteristics of the cross section of the specimen.

Keywords: fire; wood; mechanical behavior.

Autor de contacto: Angela Gaio Graeff (angel.graeff@gmail.com)

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 1, Enero – Abril 2013, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2013.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas referentes aos materiais de construção produziram alternativas ao emprego da madeira no setor de construção civil, entretanto este material continua sendo amplamente utilizado no referido setor.

O emprego da madeira na construção civil pode ser justificado por questões tais como o fato de ser considerada como uma reserva renovável, a possibilidade de reutilização do material, o emprego de ferramentas simples no manuseio do material, as boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica, a baixa massa específica e o bom desempenho mecânico. Apesar das características favoráveis que este material apresenta, ele é suscetível ao ataque de insetos, apresenta grande variabilidade mecânica e, entre outras desvantagens, é um material combustível. A incerteza do comportamento físico e mecânico da madeira sob ação do fogo tem feito com que muitos projetistas de setor construtivo declinem da escolha deste material no uso estrutural. Conhecer o comportamento da madeira em termos de perda de resistência mecânica mediante situação de incêndio permite eliminar possíveis preconceitos no emprego deste material no setor da construção civil, bem como melhorar as condições de segurança nas edificações.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo verificar a variação da resistência mecânica da madeira cedrinho quando exposta a incêndio de baixo risco. Foram ensaiados corpos de prova de madeira em diferentes tempos de exposições ao fogo, de maneira a determinar a resistência residual à compressão e à flexão destes corpos de prova após exposição ao fogo.

2. FUNDAMENTOS SOBRE A COMBUSTÃO DE PEÇAS DE MADEIRA

Conforme Lepage *et al.* (1986), a queima da madeira ocorre através de uma combinação de reações pirolíticas, oxidativas e hidrolíticas dos polímeros da parede celular, que se verificam com o aumento de temperatura, gerando produção de gases inflamáveis que realimentam o processo de combustão.

Ou seja, o material não entra em combustão diretamente. Primeiramente, a madeira se decompõe, por pirólise, em produtos voláteis e combustíveis, que então se inflamam. Durante a pirólise ocorre uma transformação dos compostos de elevado peso molecular, por degradação térmica, em compostos de reduzido peso molecular. A formação do carvão, particularmente pela degradação da lignina, é um importante resultado da reação de pirólise. Dadas suas propriedades como isolante térmico, o mesmo retarda o avanço das temperaturas para o interior do material, ajudando a preservar seu núcleo. Essa é a razão porque, após incêndios florestais, muitas árvores conseguem se recuperar.

Num incêndio, podemos distinguir diversos estágios de degradação da madeira. De acordo com Lepage *et al.* (1986), no estágio inicial a superfície da madeira é aquecida por uma combinação de mecanismos de radiação e/ou convecção de calor. Devido às características físicas da madeira (baixa condutibilidade térmica, baixa densidade, elevado calor específico), formam-se zonas isotérmicas, que, desprezando os efeitos de borda, terão a forma definida pela superfície exposta ao aquecimento e ser-lhe-ão paralelas. No decorrer do aquecimento, estas isotermas irão avançar pela peça de madeira, no sentido do fluxo de calor, até que a temperatura do meio, atrás da peça de madeira, se equilibre com a dos meios que contém a fonte de calor.

O aquecimento provoca um recuo da isoterma T_0 para o interior do material. Em seu entorno se cria uma nova região (zona A na figura 1), cuja temperatura fica compreendida entre T_0 e 200°C . Nesta região ocorre uma secagem gradual da madeira, se observando a formação de vapor de água e traços de gás carbônico, ácido fórmico, ácido acético e de glioxal.

Se for mantido o aquecimento externo, a temperatura da superfície da peça de madeira continuará a se elevar. Forma-se uma nova região (zona B na figura 1) entre as isotermas de 200°C e 280°C, na qual ocorre uma pirólise suave da madeira, com caráter endotérmico e que ocasiona a liberação de uma maior quantidade de vapor de água, dióxido de carbono, ácido fórmico e acético, glioxal e, em menor proporção, monóxido de carbono. Estes produtos voláteis procuram sair da peça, junto com os que estão sendo formados na camada anterior, com temperatura entre T_0 e 200°C. Começa, então, a ocorrer um acúmulo de gases voláteis na superfície do material.

Com a continuação do aquecimento externo, as isotermas deslocam-se ainda mais no sentido do interior do elemento. A superfície da madeira pode chegar a atingir 500°C. Uma nova região se forma (zona C na figura 1) entre as isotermas de 280°C e 500°C, na qual o comportamento térmico vai aos poucos se alterando. Na faixa com temperaturas de até ~320°C, a pirólise da madeira tem caráter endotérmico, devido à absorção de energia pela lignina. Em temperaturas superiores a pirólise da lignina passa a ser exotérmica, resultando em um efeito global exotérmico. A partir daí ocorre um incremento da quantidade de calor fornecida às regiões mais frias do sistema e a degradação de acelera. Se o calor não for dissipado, a temperatura do sistema cresce rapidamente.

A degradação térmica da madeira nas zonas mais aquecidas gera monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogênio, que eluem do sistema, diluídos com os produtos da pirólise das zonas mais internas do material. Também são gerados alcatrões altamente inflamáveis, constituídos por produtos líquidos de alto ponto de ebulição, que são arrastados para fora do corpo sólido pelos gases e vapores da pirólise. Obtém-se, assim, uma suspensão de gotículas de alcatrão em fase gasosa efluente, que é chamada corriqueiramente de fumaça. A queima dos gases e vapores efluentes da peça de madeira ocasiona a formação de chamas luminosas de difusão, nas quais as temperaturas podem chegar a 1100°C.

A elevação da temperatura com mudança do comportamento de pirólise está associada ao processo de formação de carvão vegetal. Como já citado, os depósitos de carvão tendem a retardar o progresso da combustão da madeira, reduzindo a quantidade de calor que tem acesso ao interior da peça. Por este motivo, nota-se que após as chamas iniciais, mais vigorosas, há um amortecimento da combustão, como resultado da diminuição do fluxo de calor para as zonas onde se processa a pirólise da madeira.

Nesse processo o material vai sendo consumido. Na faixa onde a temperatura fica entre 280 e 350°C, a madeira perde quantidade considerável de massa (~68%), e na faixa entre 350 e 370°C, a massa remanescente é de somente cerca de 20% do valor inicial.

Continuando a combustão da peça de madeira, a temperatura da superfície eleva-se acima de 500°C. Forma-se então uma região situada entre a isoterma de 500°C e a superfície (zona D na figura 1). Nessa zona, os produtos provenientes das zonas anteriores sofrem reações secundárias mais energéticas, sendo que os alcatrões e produtos voláteis sofrem pirólise, formando produtos altamente combustíveis. Ou seja, os produtos de pirólise com alto peso molecular sofrem pirólise secundária e reações entre si, antes de deixarem o sistema. As reações secundárias podem ser catalisadas pelo carvão gerado, que tende a apresentar elevada atividade catalítica.

Esses produtos altamente inflamáveis podem sustentar a combustão, enquanto houver produção por pirólise da madeira nas zonas anteriores. Acima de 500°C (calor vermelho incipiente), ocorre também a combustão, em fase sólida do carvão vegetal. Nota-se a incandescência do carvão, neste estágio. Quando a temperatura da superfície da peça de madeira, agora convertida em carvão vegetal, atingir a temperatura de 1000°C (calor vermelho-amarelado), a velocidade de consumo do carvão vegetal por incandescência será maior que a velocidade de penetração das isotermas no interior da peça de madeira. Conforme Lepage *et al.* (1986), “Cerca de metade a dois terços do calor disponível na madeira é liberado por meio de chama; o restante é liberado na combustão do

carvão vegetal.”. A medida que se exaure a madeira intacta, a chama luminosa de difusão da queima dos produtos de pirólise da madeira é substituída pela chama não-luminosa de difusão da queima de hidrogênio e monóxido de carbono. Assim que se esgote o suprimento de monóxido de carbono e hidrogênio, a chama extingue-se, restando apenas a combustão do carvão vegetal com pequena ou nenhuma chama.

Na Figura 1 estão representados os deslocamentos das isotermas quando da exposição da madeira a fonte de calor e as zonas de temperatura A, B, C e D.

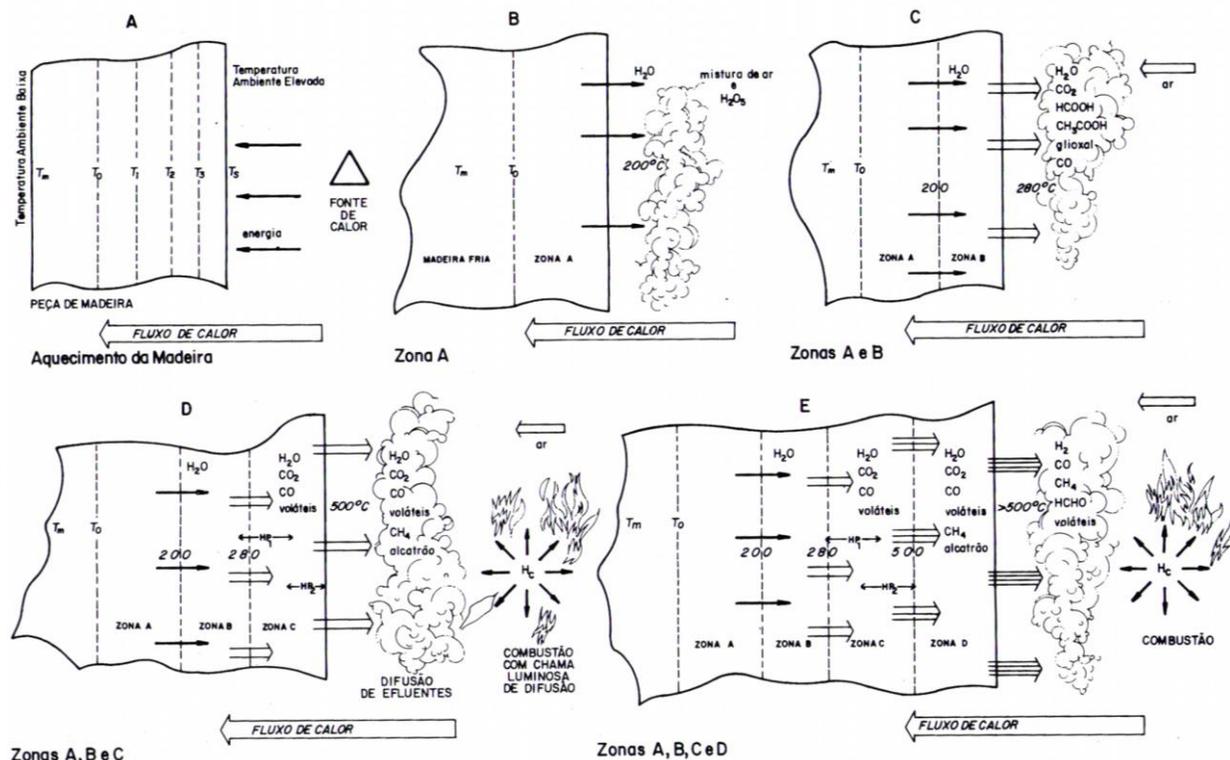


Figura 1. Representação esquemática da combustão da madeira [LEPAGE *et al.*, 1986].

3. CLASSIFICAÇÕES DE INCÊNDIO

As normas técnicas brasileiras utilizam diversas formas de classificação para caracterizar o tipo de incêndio, sendo a mais comum delas a que tenta estimar o grau de risco da edificação. Conforme Rodrigues (2009), “grau de risco é a probabilidade de um incêndio em uma edificação e o nível de dificuldade para debelá-lo com o mínimo de prejuízo ao patrimônio e à vida.”

Quanto ao grau de risco, o Estado de São Paulo (2011), define valores que distinguem e limitam os tipos de incêndio. O autor classifica os incêndios da seguinte forma, quanto ao risco:

- baixo: até 300MJ/m^2 ;
- médio: entre 300 e 1200MJ/m^2 ;
- alto: acima de 1200MJ/m^2 .

Porto Alegre (2001) classifica os incêndios em quatro categorias, denominadas classes, sendo distintas entre si pelo tipo de material combustível envolvido. Conforme essa lei, os incêndios de classe A são aqueles que ocorrem em materiais combustíveis sólidos, tais como madeira, papel, tecido, lixo e assemelhados.

Para os fins desse trabalho, se decidiu simular os efeitos de um incêndio de baixa intensidade, equivalente a uma conflagração doméstica.

4. MÉTODO DE ENSAIO EXPERIMENTAL

4.1. Simulador de Incêndio

Devido à inexistência de normatização técnica para ensaios de simulação de incêndio em madeira, a alternativa encontrada foi a definição de um método para simular incêndio que fosse passível de posterior reprodução e escolha dos materiais necessários.

Desta maneira, a simulação de incêndio de baixo risco em amostras de madeira foi realizada de acordo com a metodologia empregada por Rodrigues (2009). Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos listados a seguir:

- a) empilhamento da carga de incêndio;
- b) colocação do recipiente de aço, com dimensões de 40x50 cm e 5 cm de altura, sob o engradado de madeira;
- c) disposição de 6 corpos de prova para cada ensaio, acima do engradado, a 65 cm do piso;
- d) posicionamento dos termopares no engradado, no ambiente e nos corpos de prova;
- e) disposição do combustível de ignição no recipiente metálico, na quantidade de um litro, e posterior ignição;
- f) quando da ignição do combustível, início da cronometragem, com a finalidade de controlar o tempo de incêndio;
- g) atingido o tempo de incêndio para o ensaio executado, extinção do incêndio;
- h) repetição dos procedimentos acima listados considerando tempos e corpos de prova diferentes;
- i) rompimento dos corpos de prova;
- j) compilação das tensões de ruptura obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão, calculando-se em seguida as resistências características.

A simulação de incêndio de baixo risco foi realizada em um simulador de incêndio em escala reduzida construído no Quartel do Comando do Corpo de Bombeiros de Rio Grande do Sul, conforme Figura 2. Este simulador foi previamente utilizado nos experimentos de Rodrigues (2009).

Uma vez que o simulador reproduz as condições da compartimentação de uma habitação popular, em escala reduzida a 1/3 das dimensões reais, ele tem condições propícias para a realização dos ensaios referentes à perda da resistência de estruturas de madeira em incêndios de baixo risco, geralmente ligados a condições residenciais. Levando esses fatores em conta, considerou-se que esse simulador é adequado aos experimentos propostos para o presente trabalho.

Conforme Rodrigues (2009), o simulador consiste em três compartimentos sobrepostos, construídos em alvenaria convencional, separados por lajes de concreto, com resistência média (f_{ck}) de 40 MPa e espessura de 4 cm. Internamente, cada compartimento possui dimensões de 1x1 metro e 80 cm de altura.

Os compartimentos foram revestidos por dentro com blocos de concreto celular autoclavado, comprovadamente resistentes ao fogo, com juntas secas, fixadas às paredes do simulador com argamassa convencional, bem como as lajes foram colocadas sobre estes blocos apenas utilizando seus pesos próprios para fixação.



Figura 2. Simulador de incêndio de baixo risco.

Utilizou-se, nos ensaios realizados no presente trabalho, apenas o compartimento central do simulador. A vedação do compartimento, em sua porção frontal, foi feita por meio de chapas de aço com espessura de 2 mm fixadas ao simulador por abraçadeiras.

O Estado de São Paulo (2011) define que carga de incêndio é a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis contidos em um espaço, inclusive o revestimento das paredes, divisórias, pisos e tetos. Segundo São Paulo (2011), são classificados como incêndios de baixo risco aqueles cuja carga de incêndio não ultrapasse 300MJ/m^2 .

Rodrigues (2009) dimensionou a carga de incêndio correspondente a incêndios de baixo risco para a escala do simulador utilizado em seu trabalho e que foi reutilizado no presente trabalho. Assim sendo, para incêndios de baixo risco, foram necessários, conforme o mesmo autor, os seguintes materiais:

- a) a quantidade de madeira foi utilizada de acordo com a carga de incêndio requerida, utilizando o poder calorífico específico da madeira igual a 19 MJ/kg , determinado pela NBR 14.432¹, totalizando os pesos respectivos para risco baixo em escala reduzida de $9,1\text{ kg}$;
- b) devido à proibição da comercialização da madeira pinho-do-Paraná especificada na norma, através da Portaria do IBAMA nº 37-N de 03 de abril de 1992, foi utilizada a madeira pinus advinda de reflorestamento e disponível no mercado;
- c) o recipiente para o líquido inflamável de ignição confeccionado em aço de espessura de 2 mm, apresentava dimensões de $40 \times 50\text{ cm}$ e 5 cm de altura;
- d) o engradado de madeira ficou à altura do solo de 10 cm , sendo suportado por blocos de concreto celular.

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimentos. Rio de Janeiro, 2001.

Quanto às madeiras que compunham o engradado, estas possuíam seções quadradas medindo 4,5 x 4,5 cm e 50 cm de comprimento. As quantidades foram determinadas considerando o peso total necessário para a carga de incêndio de baixo risco, após período de estabilização da umidade das referidas peças. Sendo assim, foram necessárias 18 peças de madeira de pinus, nas dimensões referidas, para a carga de incêndio de 300MJ/m². A Figura 3 ilustra como as madeiras que compunham a carga de incêndio foram dispostas no simulador de incêndio.



Figura 3. Disposição da carga de incêndio e recipiente.

4.2. Variáveis da pesquisa

As variáveis empregadas nesta pesquisa estão descritas na Tabela 1. Apenas a madeira cedrinho foi analisada nesta pesquisa. Os tempos de exposição ao fogo foram escolhidos de maneira a se obter diferentes graus de deterioração dos corpos de prova, sendo o tempo de 10 minutos estimado para reduzir drasticamente a seção transversal e conseqüente resistência da madeira.

Tabela 1. Variáveis da pesquisa.

Variável	Valor
Tipo de ensaio de caracterização mecânica	Resistência à compressão Resistência à flexão
Tempo de exposição ao fogo	0 minutos 2,5 minutos 5 minutos 7,5 minutos 10 minutos

Os corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras e a flexão seguiram as determinações do anexo B da NBR 7190 (1997a), de acordo com o método simplificado. Foram utilizados 6 corpos de prova para cada tipo de ensaio.

Os corpos de prova empregados para o ensaio de compressão eram prismas curtos, com área transversal retangular de 5x5 cm e altura de 15 cm, como preconizado pelas normas brasileiras.

Já os corpos de prova adotados para o ensaio de flexão eram prismas mais longos, simulando vigas retangulares, com seção transversal de 5x5 e comprimento de 115 cm.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal SHIMADZU de 200 tf. Foi adotada para ambos os ensaios uma taxa de carregamento padrão de 10 MPa/min, conforme indicado pelas normas brasileiras.

O ensaio de flexão foi realizado com aplicação de carga em três pontos, sendo a distância adotada entre os apoios igual a 105 cm, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4. Equipamento de ensaio de resistência à flexão.

4.3. Monitoramento da temperatura

Com a finalidade de acompanhar o desenvolvimento das temperaturas no interior do forno de ensaio, foram utilizados três termopares do tipo K.

Os termopares foram dispostos em três regiões distintas (conforme mostrado na Figura 5):

- a) pilha de madeira: disposta sobre o engradado de madeira ignizado;
- b) ambiente: situado em posição intermediária à pilha e aos corpos de prova;
- c) corpos de prova: posicionado de forma centralizada aos corpos de prova.

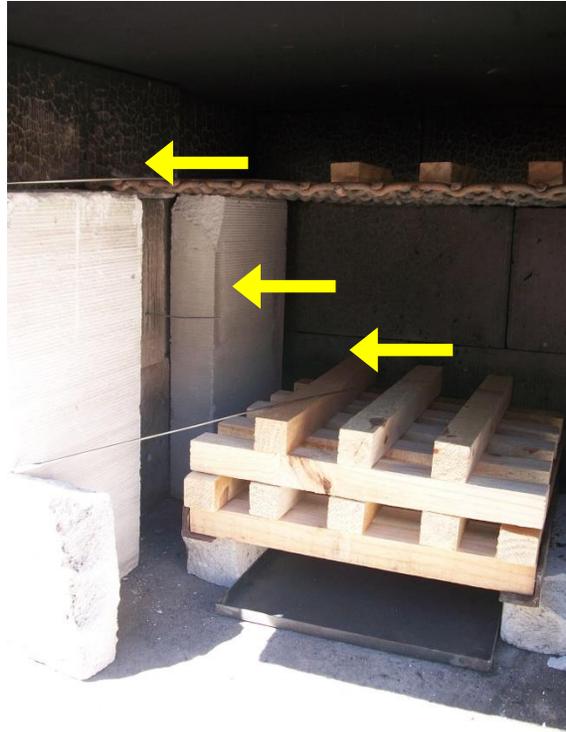


Figura 5. Posicionamento dos termopares

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Evolução das temperaturas durante os ensaios de exposição ao fogo

As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam os gráficos da temperatura desenvolvida nos ensaios de simulação de incêndio com duração de 2,5, 5,0, 7,5 e 10 minutos, respectivamente.

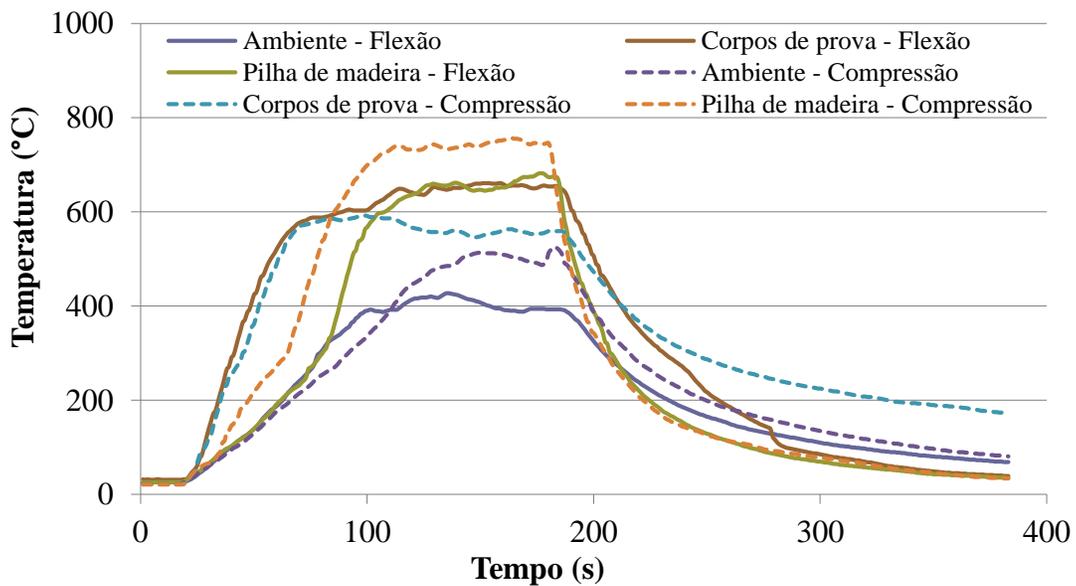


Figura 6. Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 2,5 minutos.

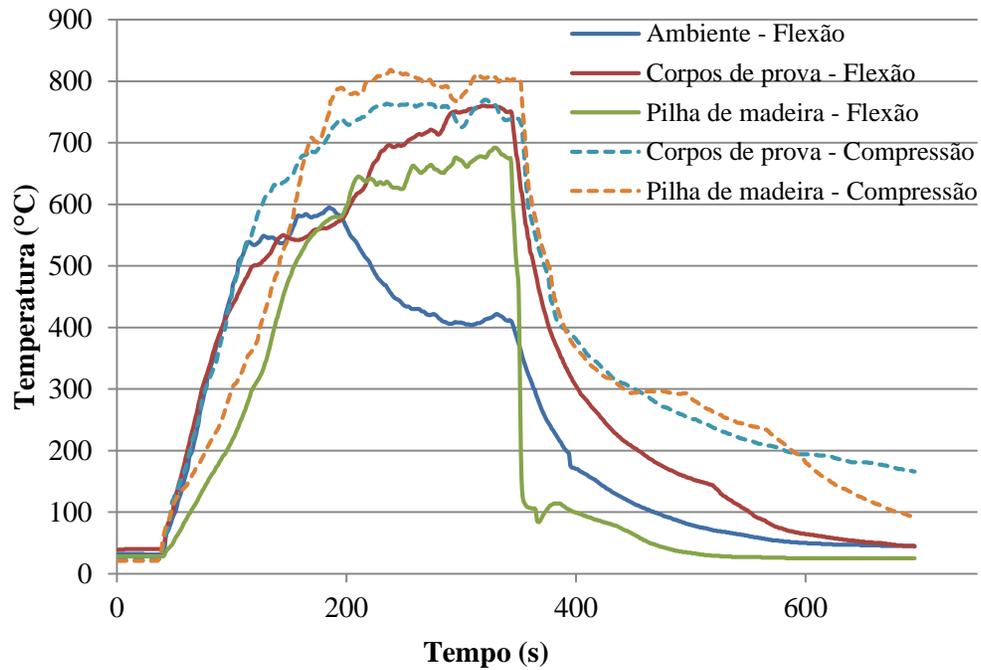


Figura 7. Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 5 minutos.

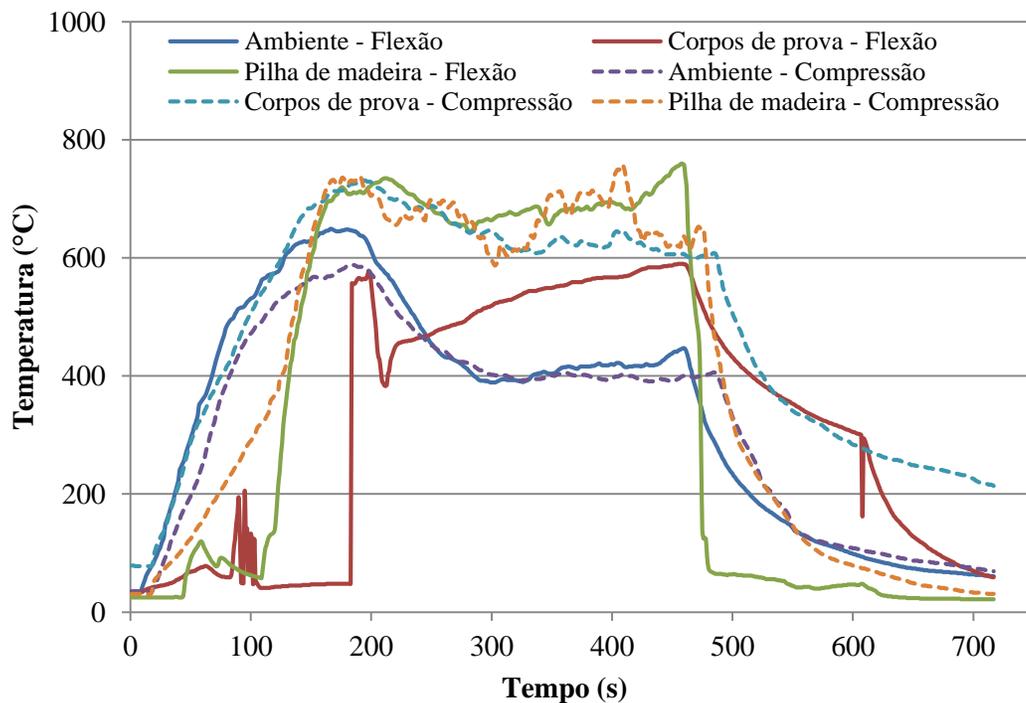


Figura 8. Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 7,5 minutos.

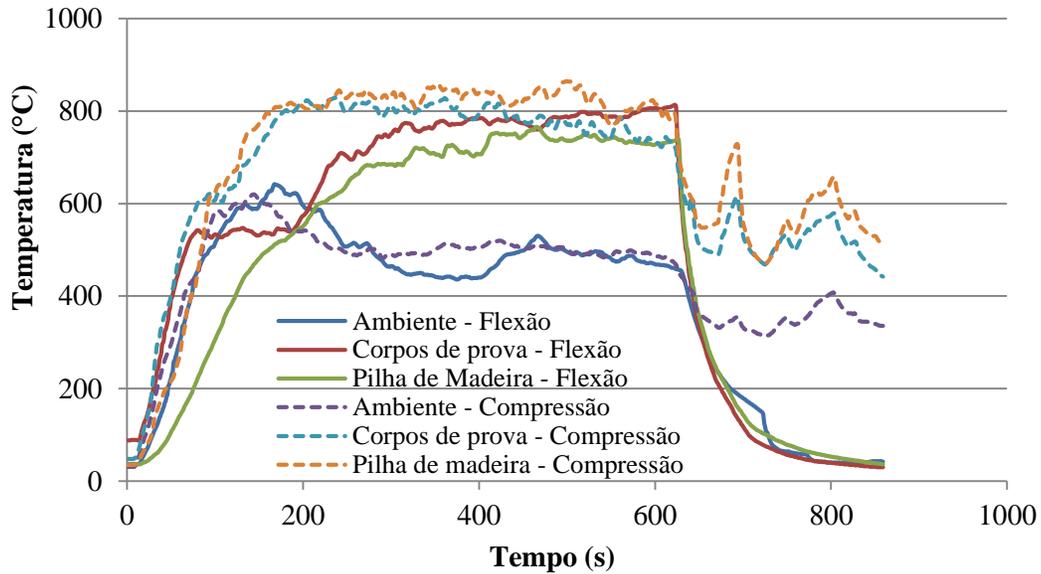


Figura 9. Leitura dos termopares considerando tempo de incêndio de 10 minutos.

Os gráficos de temperatura, para os diferentes tempos de simulação de incêndio, nos permitem observar o comportamento do incêndio. No período inicial, os gráficos mostram rápida elevação de temperatura. As temperaturas de incêndio não ultrapassaram 900 °C, mesmo quando o período de simulação foi de 10 minutos.

É importante salientar que se constatou a dificuldade em extinguir o incêndio com tempo de duração acima de 7,5 minutos. A madeira, aos 7,5 minutos de exposição à simulação de incêndio, adquiriu temperatura suficiente para alimentar sua queima, mesmo quando retirada da exposição às chamas. Sendo assim, para que os corpos de prova não sofressem queima por período maior que o de ensaio, foi necessário lançar areia sobre os corpos de prova, após retiradas do simulador, para que os mesmos fossem resfriados e não recebessem oxigênio necessário para a combustão.

No rompimento dos corpos de prova, observou-se a alteração das características da superfície dos corpos de prova de madeira. A pirólise da madeira ocorreu primeiramente na face externa dos corpos de prova, permanecendo madeira sã no seu interior, conforme Figura 10.



Figura 10. Seção de unidade amostral submetida a 7,5 minutos de incêndio.

5.2. Valores característicos de resistência à compressão e flexão

A NBR 7190 (1997a) sugere a utilização da seguinte expressão para estimar os valores característicos de resistência à compressão e à flexão:

$$x_{wk} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: x_n = resistência da unidade amostral n ; x_{wk} = resistência característica.

Os valores x_1, x_2, x_n , representam os resultados de resistência obtidos quando do ensaio de ruptura dos corpos de prova, sendo n o número de corpos de prova de cada ensaio. A NBR 7190 (1997a) estabelece que os resultados devem ser colocados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar, não se tomando para x_{wk} valor inferior a x_1 , nem a 0,7 do valor médio (x_m).

Para o caso específico desta pesquisa, foram utilizados 6 corpos de prova para cada tempo de exposição e tipo de ensaio (compressão ou flexão). Ou seja, de acordo com a equação 1, são considerados efetivamente na fórmula apenas três corpos de prova (para cada tempo de exposição e tipo de ensaio) que obtiveram as menores resistências.

Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, em termos de resistência característica, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resistência residual característica à ruptura por compressão paralelamente às fibras.

Tempo (min)	F _{tk} (MPa)
0	32,25
2,5	37,34
5	21,28
7,5	14,73
10	2,86

A Figura 11 apresenta o gráfico contendo os valores de resistências residuais obtidos no ensaio de ruptura e as médias das resistências dos corpos de prova, segundo seu período de exposição à simulação de incêndio. As resistências residuais apresentadas no gráfico estão em valores característicos.

Neste gráfico, observa-se aumento de resistência residual e média de resistência dos corpos de prova submetidos à simulação de incêndio, considerando período de exposição de 2,5 minutos, em relação às demais unidades. Observando o gráfico da figura 7 e comparando com os gráficos das figuras 8, 9 e 10, verifica-se que os corpos de prova, relativas ao tempo de 2,5 minutos de simulação de incêndio dos corpos de prova destinados ao ensaio de ruptura à compressão paralelamente às fibras, foram expostas a temperaturas menores que as demais. Entretanto, mesmo sendo a temperatura de exposição menor que as demais, este lote apresentou resistência residual e média de resistência à compressão maior que as unidades de testemunho.

Este aumento de resistência à compressão pode ter ocorrido devido à secagem da madeira quando exposta ao calor, de maneira a não provocar perda de seção transversal dos corpos de prova devido ao incêndio.

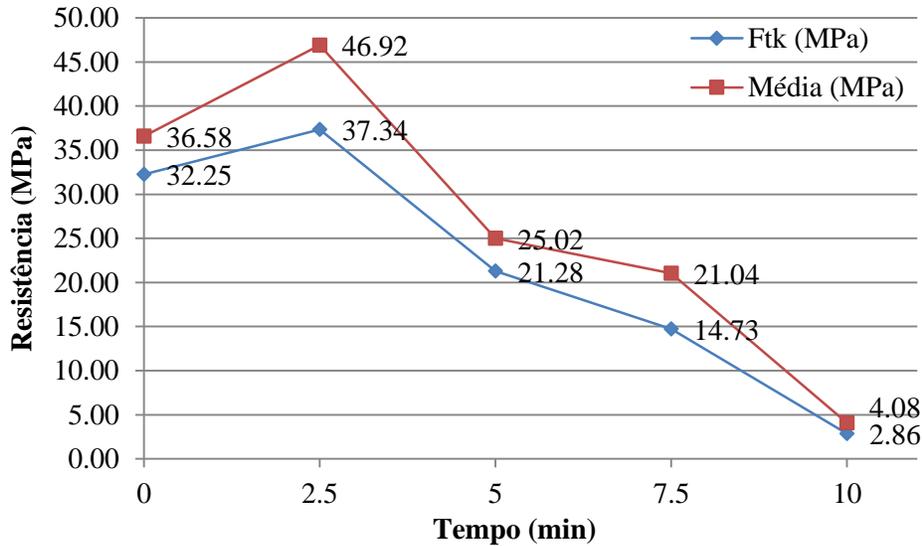


Figura 11. Resistência residual à compressão paralelamente às fibras.

A Figura 12 apresenta o gráfico da perda de resistência residual à compressão paralelamente às fibras em valores percentuais. Os valores apresentados representam a resistência característica das unidades expostas à simulação de incêndio de baixo risco em termos da resistência característica das unidades de testemunho.

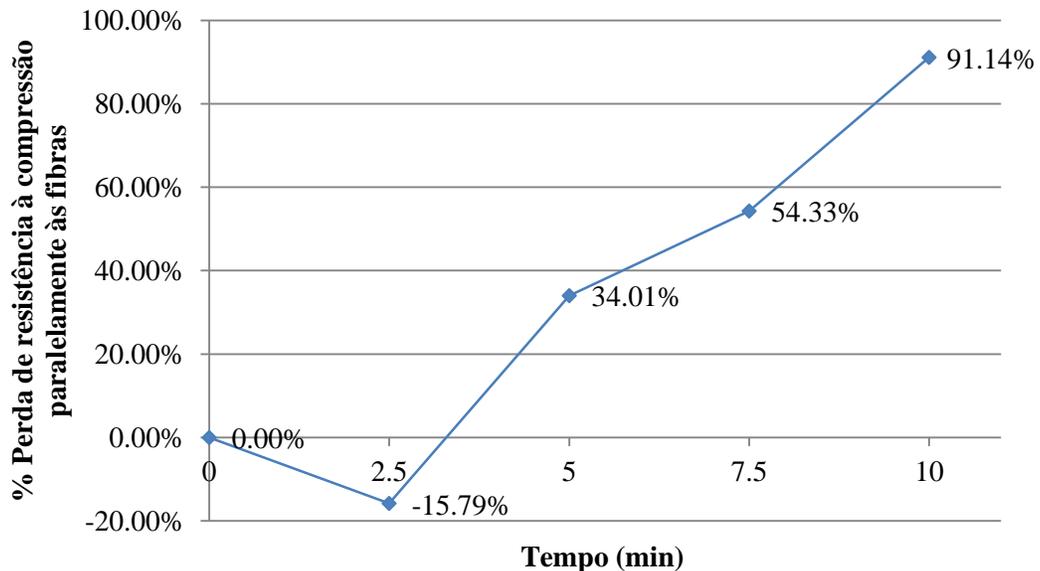


Figura 12. Percentual da resistência residual à compressão paralelamente às fibras.

Os resultados mostram que os corpos de prova expostos a 5 minutos de simulação de incêndio de baixo risco sofreram perda de resistência da ordem de 34% e, aos 10 minutos de exposição, 91%. No entanto, estes resultados estimam a queda de resistência dos corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm e 15 cm de comprimento, e este comportamento deve ser alterado a medida que se modifica a seção transversal dos corpos de prova analisados. Ou seja, a resistência ao fogo de corpos de prova com seção transversal maior deve ser maior comparativamente com os corpos de prova analisados neste trabalho. Esta observação está de acordo com informações apresentadas no trabalho desenvolvido por Pinto (2004), onde a autora comenta que peças mais robustas expostas ao calor formam uma camada superficial de carvão, que age como uma espécie de isolante, impedindo a rápida saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da seção, resultando em um menor aquecimento e taxa de degradação.

Resistência à flexão

Os valores das resistências características residuais à flexão, conforme recomendação da NBR 7190 (1997a), estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resistência residual característica à ruptura por flexão.

Tempo (min)	F _{tk} (MPa)
0	44,21
2,5	38,08
5	21,76
7,5	11,36
10	3,99

Na Figura 13 observam-se os valores característicos e os valores médios de resistência à flexão, segundo o tempo de exposição à simulação de incêndio.

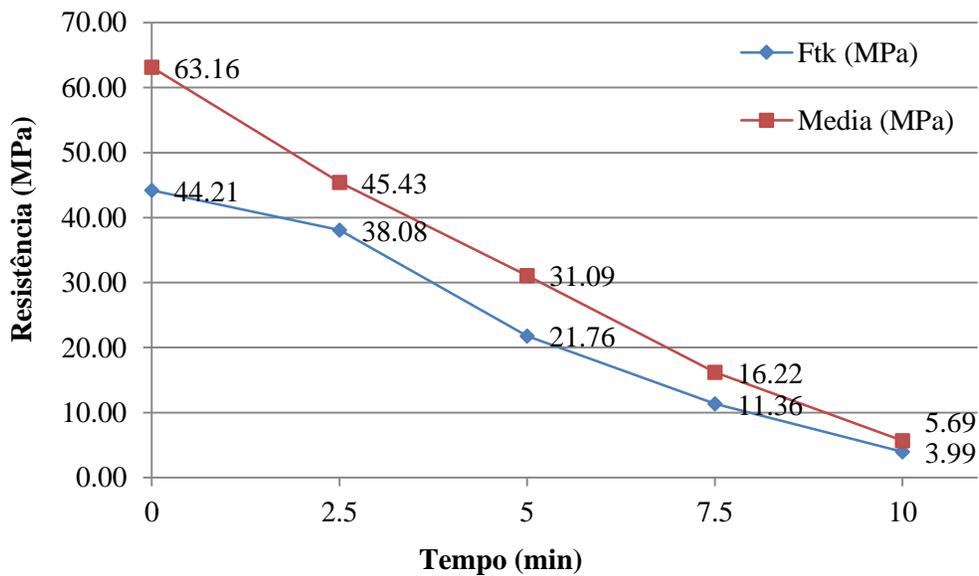


Figura 13. Resistência residual à flexão.

A redução da resistência residual à flexão das madeiras expostas à simulação de incêndio, conforme se observa no gráfico, aproximou-se de uma tendência linear. A média de resistências teve comportamento semelhante.

A perda de resistência residual à flexão, em valores percentuais, está representada na Figura 14. Os valores apresentados representam a resistência característica das unidades expostas à simulação de incêndio de baixo risco em termos da resistência característica das unidades de testemunho.

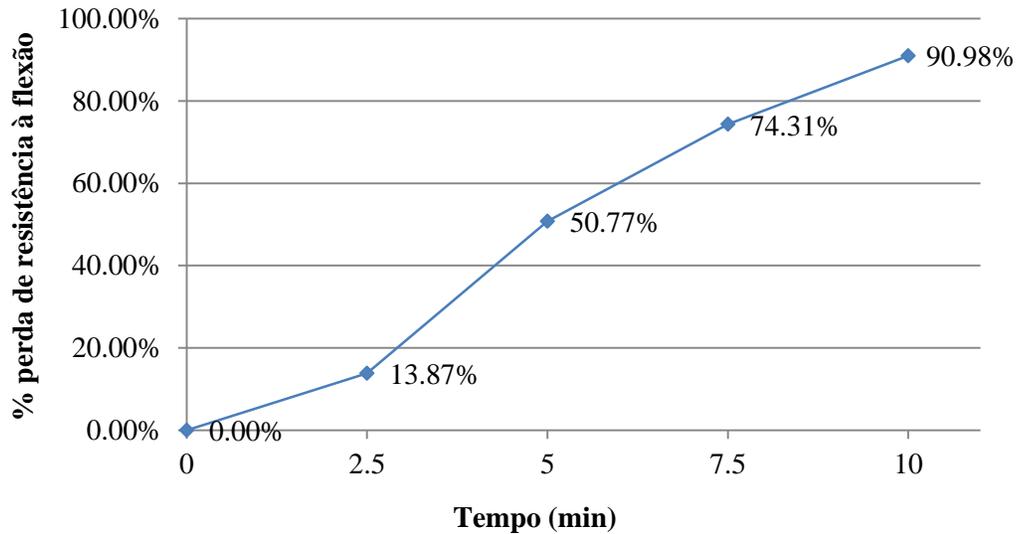


Figura 14. Percentual da resistência residual à flexão.

De acordo com a Figura 14, observa-se que os corpos de prova aos 5 minutos de exposição ao incêndio tiveram aproximadamente 50% de perda de resistência. Quanto a exposição à simulação de incêndio considerando período de 10 minutos, observou-se que os corpos de prova apresentaram perda de aproximadamente 91%. Assim como nos ensaios de ruptura à compressão, em ambos os tempos de exposição ao fogo, a perda foi maior que a esperada nas hipóteses iniciais. No entanto, cabe salientar que estas perdas são relativas a corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm e 115 cm de comprimento, e que este comportamento frente a situação de incêndio é dependente da geometria da seção transversal dos elementos analisados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira sofreu decréscimo na resistência mecânica após exposição à simulação de incêndio de baixo risco, seja quando submetida aos ensaios de ruptura à compressão, seja quando submetida aos ensaios de ruptura à flexão. Os valores percentuais obtidos de perda de resistência à compressão para os corpos de prova submetidos à simulação de incêndio de baixo risco, referentes ao tempo de exposição de 5 minutos, apresentaram 34% de perda de resistência. No entanto, os corpos de prova expostos ao mesmo período de simulação de incêndio, quando submetidas ao ensaio de ruptura à flexão, apresentaram perda de resistência de aproximadamente 51%.

Constatou-se que, para ambos os ensaios de ruptura, a perda de resistência mecânica dos corpos de prova expostos à simulação de incêndio pelo período de incêndio de 10 minutos foi acima de 90%. Entretanto, é importante acrescentar que a perda de resistência está relacionada com a geometria da seção da peça. Ou seja, à medida que se aumenta a geometria da seção dos corpos de prova submetidos à simulação de incêndio, a perda de resistência será menor em comparação com os

resultados obtidos neste trabalho. A relação entre a diminuição da resistência em relação à geometria da seção provavelmente não obedece a um critério linear, sendo que este comportamento ainda deve ser estudado para garantir condições seguras de utilização da madeira em construções civis.

Além disso, sugere-se, para pesquisas futuras, verificar qual a influência dos produtos ignífugantes na resistência mecânica da madeira, quando exposta ao incêndio, qual o tipo de proteção mecânica poderia ser empregado em estruturas de madeira para que esta sofresse menor influência possível do incêndio, e a especificação de um modelo de previsão da perda da resistência à flexão e à compressão paralelamente às fibras em função do tempo de exposição a incêndio de baixo risco.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997a), *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997b), *NBR 13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio*. Rio de Janeiro.
- Estado de São Paulo (2011), *Decreto n. 56.819*. Institui o Regulamento de Segurança contra Incêndio das edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo e dá providências correlatas. São Paulo.
- Lepage, E. S., Oliveira, A. M. F., Lelis, A. T.; Lopez, G. A. C., Chimelo, J. P., Oliveira, L. C. S., Cañedo, M. D., Cavalcante, M. S., Ielo, P. K. Y., Zanotto, P. A., Milano, S. (1986), *Manual de preservação de madeiras*. São Paulo: IPT, v. 1.
- Pinto, E. M. (2004), *A madeira: um material construtivo resistente ao fogo*. Revista Eletrônica de Ciências, nº 27, São Carlos.
- Porto Alegre (2001), *Lei complementar nº 420/1998*. Institui o Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre e dá outras providências. Porto Alegre.
- Rodrigues, E. E. C. (2009), *Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.