

Incêndio real em um apartamento de interesse social - um estudo de caso

(A real fire in a social interest apartment - a case study)

Valdir Pignatta e Silva

*Professor, D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. E-mail: valpigss@usp.br*

Francisco Carlos Rodrigues

*Professor, D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Estruturas
E-mail: francisco@dees.ufmg.br*

Ricardo Hallal Fakury

*Professor, D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Estruturas
E-mail: fakury@dees.ufmg.br*

Fabio Domingos Pannoni

Engenheiro Especialista, D.Sc., Gerdau Açominas. E-mail: fabio.pannoni@gerdau.com.br

Resumo

É descrito o comportamento da estrutura de perfis formados a frio (PFF) submetida ao incêndio ocorrido em um apartamento de um conjunto habitacional de baixo custo, com quatro blocos idênticos de quatro pavimentos e oito apartamentos por andar. Cada apartamento tem 44 m² de área total. Segundo a Norma Brasileira, esse tipo de edifício é isento de verificação estrutural em situação de incêndio. Foram realizados ensaios para a caracterização do aço empregado nos pilares e vigas e ensaios metalográficos para estimar a temperatura atingida pelo aço durante o incêndio. O modelamento CFD (Computational Fluid Dynamics) do cenário do incêndio foi feito utilizando-se o programa de computador SMARTFIRE. A análise térmica da estrutura de aço em situação de incêndio foi realizada por meio do programa SUPERTEMPCALC. A verificação estrutural foi feita empregando-se as expressões da Norma Brasileira para o projeto dos PFF em temperatura ambiente, com base no AISI/USA, mas usando os fatores de redução de resistência recomendados pelo Eurocode 3 part1.2.

Palavras-chave: Incêndio natural, incêndio real, apartamento de interesse social, perfis formados a frio, análise térmica.

Abstract

This paper describes the behavior of a cold-formed steel (CFS) framed structure in response to a real fire that occurred in a residential apartment. A set of residential buildings is composed by four identical four-story blocks of eight apartments per floor, housed by poor people; each apartment has 44 m² of total area. The Brazilian Code does not require that this type of building be checked for fire safety. A real fire in a residential apartment was modeled, as well the structural fire resistance; the maximum fire temperature reached during the burning on the structural material was assessed by scanning electron microscopy tests for the further comparative analysis between the theoretical and actual results. A CFD scenario representative of the actual building geometry, materials and fire behavior was modeled by means of the software SMARTFIRE. A steel thermal analysis in fire situation was conducted by means the software SUPERTEMPCALC, and the structural analysis of the steel frame was performed according to the expressions recommended by the Brazilian Standard for design of CFS for room temperature, based on the AISI/USA, but using the strength reduction factors recommended by Eurocode 3 part1.2.

Keyword: Real fire, natural fire, small apartment, cold formed steel, thermal analysis.

1. Introdução

No Brasil, apesar de a densidade populacional brasileira não ser excessiva (180 milhões de habitantes para 8,5 milhões de m²), há uma grande concentração de pessoas junto às metrópoles devido à migração em busca de emprego. Muitas dessas pessoas, por falta de condições econômicas, acabam por formarem as favelas. Uma alternativa para reduzir o “favelização” é a construção de edifícios de baixo custo, denominados “edifícios de interesse social”. A legislação brasileira permite que essa classe de edifícios, com área total e altura limitadas, possa dispensar a verificação estrutural em situação de incêndio. Esses edifícios residenciais são compostos de apartamentos de pequena área e divididos por alvenarias de tijolos cerâmicos ou de blocos de concreto. A baixa carga de incêndio, a proteção parcial contra fogo das estruturas e a compartimentação, ainda que imperfeita, permitem intuir que a segurança a incêndio não é muito prejudicada nesses casos.

O Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek (Figura 1), concebido como de interesse social, foi construído em 1988 na cidade de Limeira, Estado de São Paulo, sendo formado por quatro blocos



Figura 1 - Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek.



Figura 2 - Vigas e pilares.

idênticos, geminados dois a dois. Cada um dos blocos possui quatro pavimentos com oito apartamentos por andar. Os apartamentos são do tipo popular, possuindo 44,29 m² de área total, com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço. A edificação possui a estrutura principal constituída por vigas e pilares de perfis de aço formados a frio.

Em janeiro de 2002, ocorreu um incêndio em um apartamento situado no quarto andar de um dos blocos do Conjunto Habitacional, o qual, apesar de não ter sido combatido com eficácia, não se propagou para outros apartamentos do edifício. O incêndio destruiu todo o mobiliário e revestimento do apartamento; uma criança que dormia no local correu risco de morte e parte da alvenaria foi demolida em seguida, devido a sua parcial danificação. Não houve danos na estrutura de aço. O incêndio real, ocorrido em um apartamento localizado em um edifício com as características mencionadas, permitiu aos autores avaliarem, de forma cientificamente mais precisa, o efeito do fogo. Esse trabalho descreve a análise feita e apresenta as conclusões do estudo, tomando como referência a situação real encontrada após o final do incêndio.

2. A estrutura do edifício

Os pilares e vigas do Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek são constituídos por perfis de aço formados

a frio, em seção-caixão com 100 mm de largura e 200 mm de altura, conforme se vê na Figura 3. Os pilares são compostos por dois perfis Ue 200x50x30x5,0, justapostos e unidos por solda contínua de filete. As vigas são compostas por dois perfis Ue 200x50x15xt, também justapostos e unidos por solda contínua de filete, com espessura de chapa (*t*) de 3,3 mm (a estudada nesse trabalho), 3,75 mm ou 4,75 mm.

Os elementos estruturais não possuem revestimento contra fogo, mas podem ser considerados, parcialmente, protegidos pelo contato com a alvenaria com espessura de 100 mm, constituída por blocos de concreto revestidos por argamassa, em várias partes de suas superfícies externas, conforme a planta do apartamento, mostrada na Figura 4. As lajes são constituídas de vigotas pré-moldadas de concreto e lajotas cerâmicas, com 70 mm de altura e 50 mm de capa de concreto moldado in loco, perfazendo 120 mm de espessura.

3. O incêndio e suas conseqüências

A Figura 4 mostra a planta do apartamento incendiado, com uma simulação do mobiliário existente, e com a indicação do local de início do incêndio, na sala, em tomada localizada atrás do televisor, conforme Certidão de Sinistro emitido pelo Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo⁽⁴⁾.

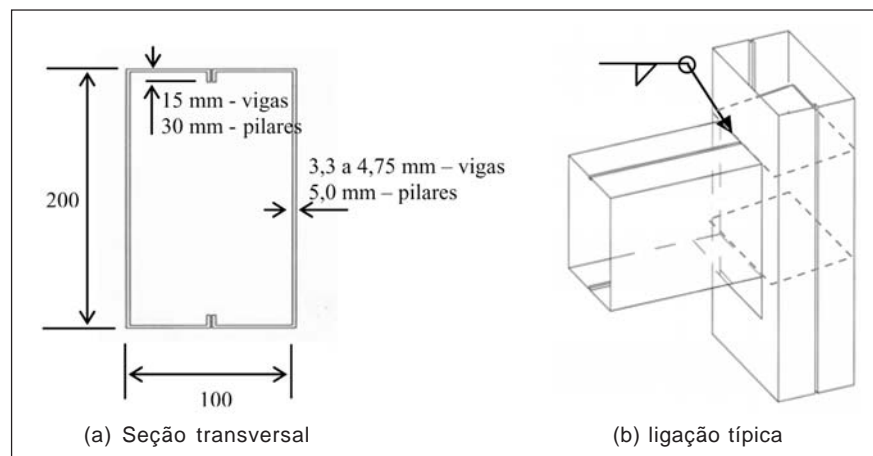


Figura 3 - Vigas e pilares.

Na região onde o incêndio se iniciou, houve desprendimento de pedaços de lajotas de cerâmica da laje (Figura 5). A estrutura de aço não entrou em colapso e não apresentou danos aparentes. Os revestimentos das alvenarias se soltaram, o que também pode ser visto na Figura 5. Nas paredes, não houve fissuras e, tampouco, nas lajes, mantendo-se, assim, a estanqueidade desses elementos. Não houve a propagação do fogo para os dois dormitórios e para o banheiro; no entanto, esses cômodos foram duramente atingidos pela fumaça, ficando completamente escurecidos. Evidentemente, o incêndio não se propagou pelo fato de que a compartimentação, apesar de imperfeita, foi eficaz.

4. Análise metalográfica

Devido à impossibilidade de se obter o projeto estrutural original, tornou-se necessário caracterizar o aço por meio da retirada de amostras de vigas e pilares. Sete amostras, de dimensões 300 mm x 60 mm, foram removidas da sala de estar (a área mais afetada pelo fogo) com o intuito de obter-se a composição química e de averiguar alguma redução potencial de resistência mecânica causada pelo fogo. Uma amostra, A1, foi retirada de uma área não afetada pelo incêndio e serviu como referência para as demais (Figuras 6 e 7).

A Tabela 1 fornece a composição química das amostras retiradas da estrutura e a Tabela 2 fornece as propriedades mecânicas básicas das amostras. Pode-se observar que a estrutura foi fabricada com aço patinável de alta resistência mecânica, notando-se, na micrografia, uma estrutura ferrítica-perlítica típica de um aço estrutural. Pode-se, ainda, medir uma camada superficial, onde ocorreu decarbonetação, causada pelo ambiente redutor da atmosfera durante o incêndio. A maior parte dos produtos laminados a quente passa pelo último estágio de laminação a temperaturas próximas a 870°C ou superior. A estrutura metalográfica é, então, classificada como

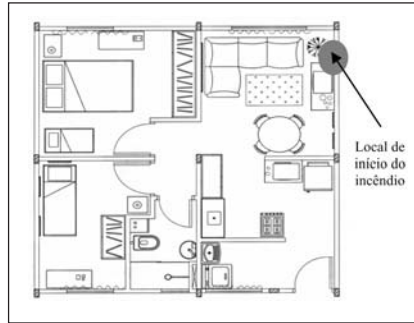


Figura 4 - Planta do apartamento com mobiliário e local de início do incêndio.

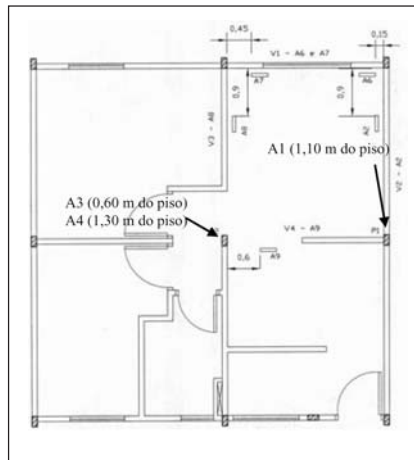


Figura 6 - Local de extração das amostras.



Figura 5 - Detalhe das lajotas cerâmicas danificadas.



Figura 7 - Pilar central após a retirada das amostras A3 e A4.

Tabela 1 - Composição química do aço das sete amostras retiradas da estrutura.

Elemento	Amostras						
	A1 (fria)	A2	A3	A4	A6	A7	A8
%C	0,119	0,117	0,108	0,112	0,114	0,106	0,106
%Mn	0,432	0,398	0,394	0,398	0,398	0,395	0,386
%P	0,094	0,096	0,099	0,104	0,096	0,093	0,086
%S	0,012	0,008	0,013	0,014	0,008	0,007	0,006
%Si	0,453	0,437	0,480	0,493	0,435	0,426	0,415
%Al	0,045	0,060	0,056	0,057	0,060	0,059	0,058
%Nb	0,013	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,014
%V	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005
%Ti	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
%Cu	0,204	0,200	0,219	0,215	0,199	0,200	0,201
%Cr	0,869	0,848	0,890	0,896	0,844	0,841	0,830
%Mo	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
%B	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
%Ni	0,013	0,013	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço das amostras retiradas da estrutura.

Amostra	Propriedades Mecânicas				
	Resistência ao escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento, % (200 mm)	Espessura de descarbonetação, μm	Tamanho de grão (ASTM)
1	402	529	30	50	11
2	394	517	29	200	11
3	400	525	32	120	11
4	389	507	31	120	11
6	444	557	27	40	11
7	445	558	27	Nil	11
8	406	533	28	150	11

austenita. Sob condições normais, a austenita é transformada, predominantemente, em ferrita e perlita, durante o resfriamento à temperatura ambiente.

O diagrama de fase ferro-carbono pode ser utilizado para prever as mudanças de fase no aço. O diagrama possui três pontos invariantes, dos quais somente um é relevante para esse estudo. Esse ponto é conhecido como ponto eutetóide e ocorre a 0,8% C e 723°C. Nesse estágio, a austenita começará a ser transformada em um componente conhecido como perlita, que consiste de lamelas alternadas de ferrita e cementita. A temperatura na qual a transformação acontece é conhecida como temperatura crítica. Assim, a temperatura eutetóide, A1, é de 723°C. Desde que a temperatura do aço não exceda, por certo tempo, a temperatura de transformação de »723°C, é esperado que o aço permaneça com propriedades metalúrgicas aceitáveis. Após o resfriamento à temperatura ambiente, suas propriedades mecânicas residuais serão as mesmas encontradas na condição pré-incêndio. Smith et al.⁽¹⁵⁾ e Kirby et al.⁽¹⁰⁾ fornecem dados experimentais para aços estruturais submetidos a diferentes ciclos de aquecimento e resfriamento. Qualquer ascensão de temperatura entre 720°C e 870°C tem um pequeno impacto sobre as pro-

priedades estruturais do aço, após seu resfriamento à temperatura ambiente. Qualquer aquecimento além desses valores causará uma transformação permanente relativa à sua composição química original, que resultará em um crescimento de grão e, algumas vezes, endurecimento, que, com o posterior esfriamento, afetará, de modo adverso, as propriedades mecânicas residuais. Os ensaios realizados, nas sete amostras, não revelaram qualquer alteração significativa na microestrutura, o mesmo sendo obtido para as propriedades mecânicas. Isso nos permite inferir que os componentes estruturais não sofreram aquecimento superior a 870°C. Pudemos observar a carepa de laminação bastante aderente no pilar central, indicando que as temperaturas se situaram abaixo de 550°C (aços estruturais expostos a temperaturas acima de 600°C desenvolverão uma superfície grosseira, erodida, muito diferente daquela obtida pela laminação a quente). As amostras retiradas das vigas apresentaram, de modo geral, superfície grosseira, rugosa, indicando temperaturas acima de 600°C - 650°C. Como conclusão, pode-se inferir que o pilar central não foi aquecido a mais do que 550°C; as amostras retiradas das vigas apresentaram resultados que demonstram que as temperaturas ficaram situadas entre 650°C e 723°C.

5. Análise computacional fluido-dinâmica via programa SMARTFIRE

O modelamento CFD do incêndio foi feito utilizando-se uma versão educacional do software SMARTFIRE V4.0⁽⁸⁾, contendo uma modificação especialmente desenvolvida para essa pesquisa. A modificação tratou da captura simultânea de dados de temperatura de volumes de controle especialmente posicionados.

O primeiro passo para o modelamento tratou da construção, em escala, do ambiente do apartamento. Paredes, lajes, aberturas, combustíveis, etc. foram criados em um módulo denominado *Case Specification Module*. Alguns volumes de controle foram introduzidos, de modo a se obterem as temperaturas na atmosfera gasosa contígua às regiões de coleta dos espécimes (Figura 8). Em seguida, foi criada uma malha CFD com cerca de 105 mil elementos tetraédricos e implementado o modelo no "engine CFD" do SMARTFIRE. Considerou-se um incêndio com origem no rack de TV, sendo propagado para uma árvore de natal contígua e, em seguida, propagado para o sofá. Alguns itens de mobiliário (tapete de lã e cortina sintética) não foram considerados. A liberação máxima de calor

(*peak heat output*) considerada para o sofá foi de 15,65 MJ, para a árvore de natal foi de 7,84 MJ e, para o rack de TV, 5,37 MJ. A queima dos objetos selecionados (rack, árvore de natal e sofá) foi deflagrada por meio do uso de duas possíveis condições: temperatura máxima de 573K ou fluxo máximo de radiação (Y negativo) maior do que 22000 W/m^2 (o fluxo radiante que incide sobre o objeto a partir dos gases quentes confinados no teto e é, provavelmente, o mecanismo mais comum para a ignição de um objeto remoto). Foi assumido o modelo de radiação “six-flux” e, para turbulên-

cia, o modelo K-Epsilon. O resultado da simulação de incêndio está representado, de forma sintética, nas Figuras 9 e 10. A máxima temperatura foi obtida no volume de controle situado sobre a amostra junto à viga da janela; em oposição, a menor temperatura foi obtida no volume de controle situado sobre a amostra na região inferior do pilar central. De modo geral, as maiores temperaturas foram obtidas em tempos próximos a 25-26 minutos do início do incêndio.

É importante salientar que, embora as portas internas estivessem abertas, houve um pronunciado efeito de com-

partimentação (interna e externa). A Figura 11 mostra um corte da sala para o tempo de 5 min. Foram obtidas temperaturas, no nível de 2 m, da ordem de 190°C . Na Figura 12, são apresentadas as temperaturas dos gases quentes junto ao pilar central e à viga.

Sendo utilizado o método tradicional da norma ISO 834⁽⁹⁾ ou curva ISO 834, os fatores de massividade da seção transversal devem ser considerados iguais a 147 m^{-1} e 208 m^{-1} para o pilar e para a viga, respectivamente, ou aproximadamente, 600°C e 655°C , para 15 min, e 780°C e 815°C , para 30 min.

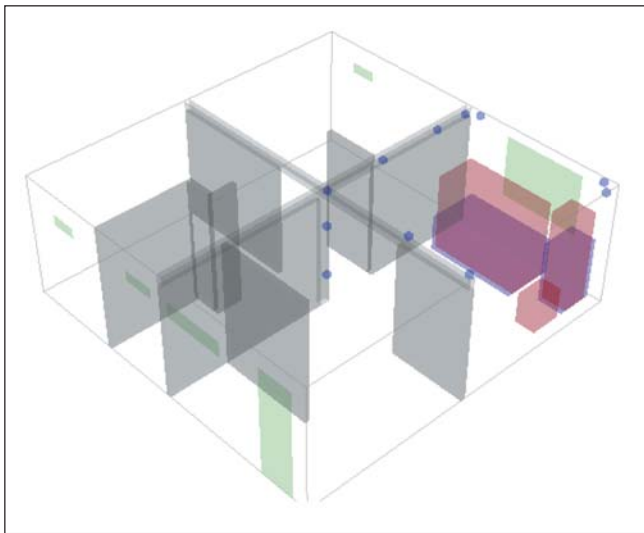


Figura 8 - Representação do apartamento e dos volumes de controle.

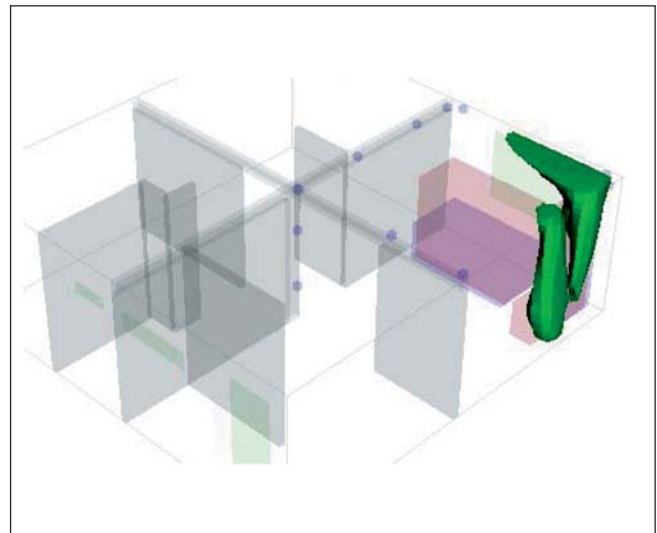


Figura 9 - Representação dos primeiros 3 min do incêndio.

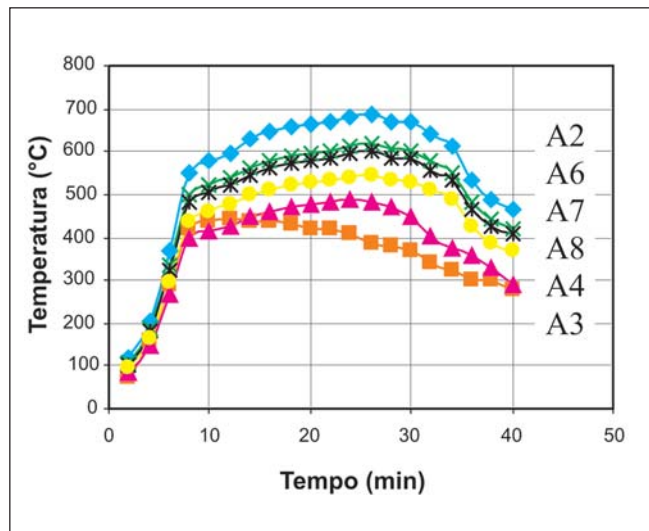


Figura 10 - Temperaturas estimadas por CFD para os volumes de controle posicionados selecionados.

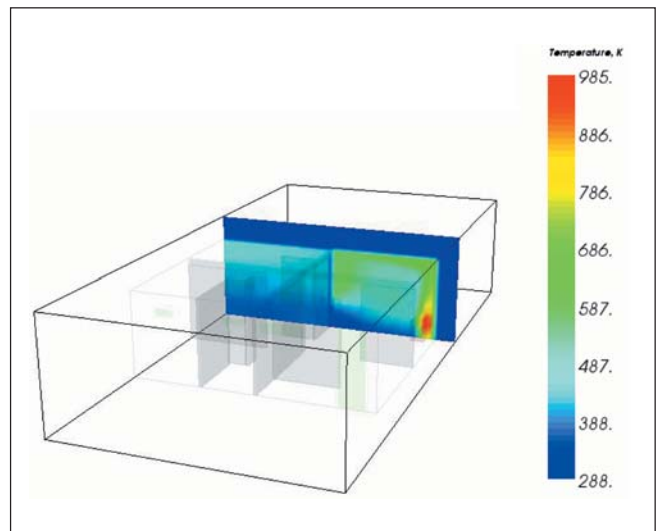


Figura 11 - Efeito da compartimentação sobre a distribuição de temperaturas, para 5 min.

6. Análise térmica via programa SUPERTEPCALC

Os fatores de redução considerados para a resistência ao escoamento e para o módulo de elasticidade do aço são apresentados na Figura 13. A emissividade resultante para o aço, concreto ou alvenaria foi considerada igual 0,7. As densidades da alvenaria e do concreto foram consideradas iguais a 1600 e 2300 kg/cm³, respectivamente. Foi considerado um conteúdo de umidade de 1,5%, em peso, para o concreto. Outros parâmetros térmicos foram tomados com base no EC 2⁽⁵⁾, EC 3⁽⁶⁾ e OZONE⁽³⁾.

As temperaturas do pilar e de uma parede de tijolos com 10 cm de espessura em um dos lados do pilar foram determinadas (Figuras 14 e 16) por meio da análise térmica, empregando o programa computacional Supertempcalc⁽²⁾ (convecção, radiação e condução), com base na curva natural (Figura 12) de-

terminada no item 5 e no incêndio-padrão ISO. A temperatura equivalente é a temperatura uniforme que causa a mesma força normal resistente (Figuras 15 e 17 e Tabela 3).

Para 31,5 min, a temperatura do aço que causa a mesma força normal resistente é equivalente a uma temperatura uniforme de 382,5 °C (fator de redução igual a 0,675).

As temperaturas da viga sob laje (Figuras 18 e 20) foram determinadas por meio da análise térmica empregando o programa computacional Supertempcalc (convecção, radiação e condução) para incêndio-padrão e incêndio natural (Figura 12). A temperatura equivalente é a temperatura uniforme que causa a mesma resistência ao momento-fletor (Figuras 19 e 21 e Tabela 4).

Para 27 min, a temperatura do aço que causa o mesmo momento-fletor resistente é equivalente à temperatura uniforme de 610°C (fator de redução igual a 0,27).

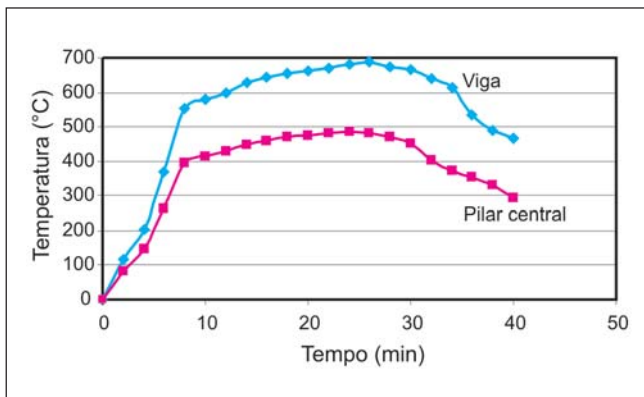


Figura 12 - Temperatura dos gases obtidas com o Smartfire.

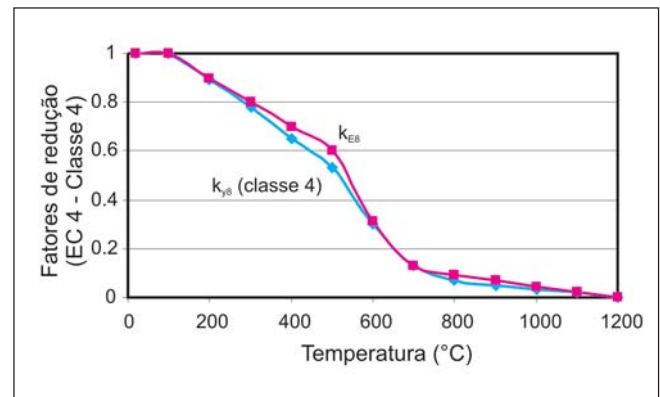


Figura 13 - Fatores de redução para o aço.

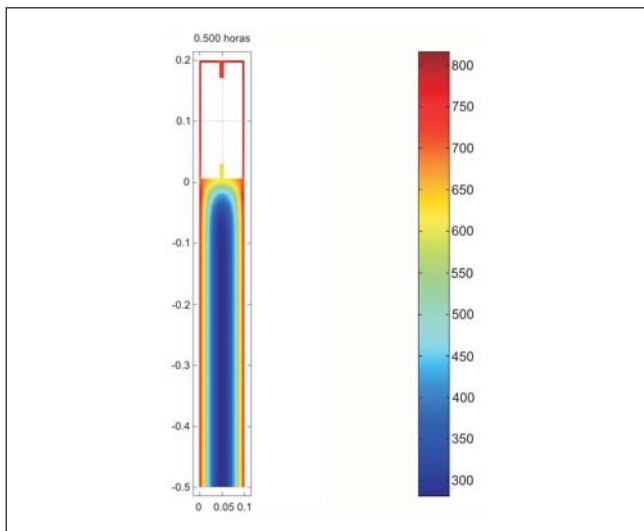


Figura 14 - Temperatura aos 30min no pilar e parede centrais (Curva ISO 834).

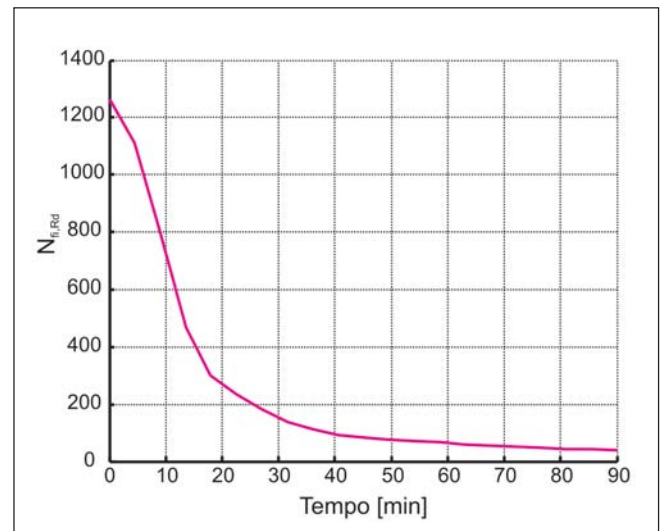


Figura 15 - Força normal resistente em função do tempo em um pilar com parede, onde $N_{fi,Rd} = A f_y k_{y,q}$ (curva ISO 834).

Tabela 3 - Temperatura equivalente para o pilar - Curva ISO 834.

Tempo (min)	$k_{y,0}$	Temperatura equivalente (°C)
0	1	20
4,56	0,881642	207,86
9	0,632318	415,82
13,56	0,372497	588,98
18	0,239644	613,68
22,56	0,185231	629,94
27	0,145084	661,73
31,56	0,109844	715,99
36	0,088712	765,90
40,56	0,073862	810,99
45	0,065033	842,34

Tabela 4 - Temperatura equivalente para a viga - Curva ISO 834.

Tempo (min)	Fator de redução	Temperatura equivalente (°C)
0	1	20
4,56	0,82	267,07
9	0,5	518,04
13,56	0,279	608,81
18	0,211	619,86
22,56	0,18	632,79
27	0,143	664,12
31,56	0,114	707,88

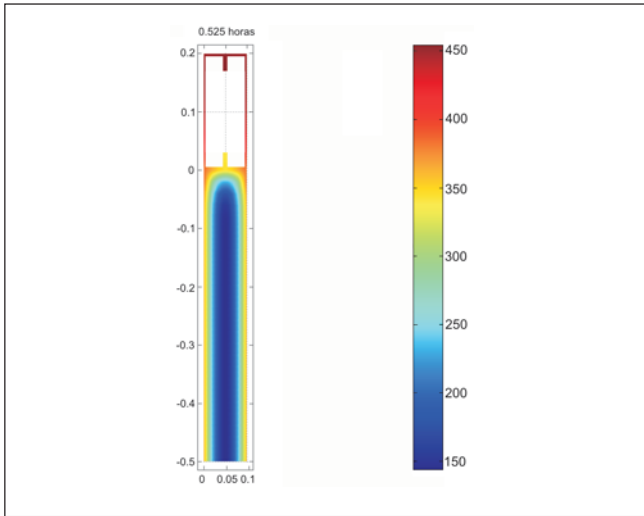


Figura 16 - Temperatura aos 30min no pilar e parede centrais (Incêndio Natural).

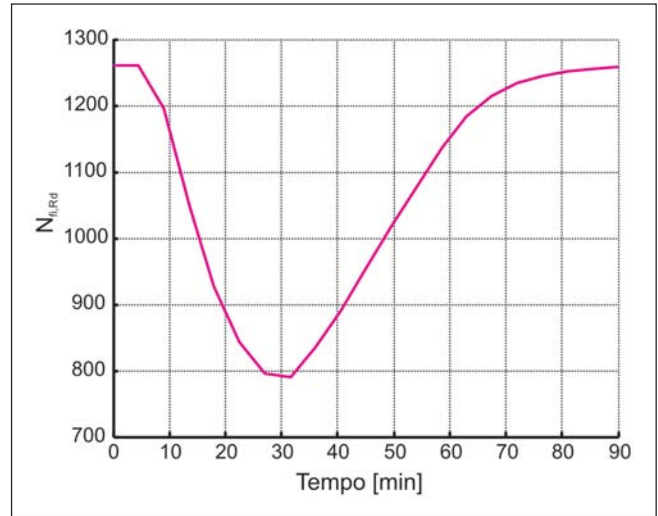


Figura 17 - Força normal resistente em função do tempo, de um pilar com parede (Incêndio Natural).

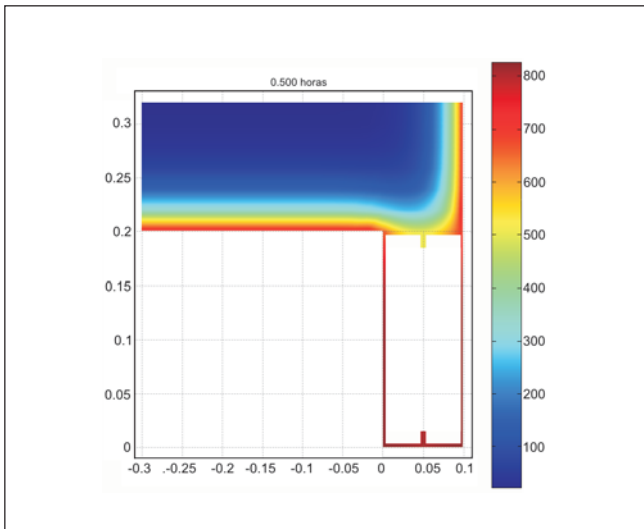


Figura 18 - Temperatura aos 30min para a viga sob laje (Curva ISO 834).

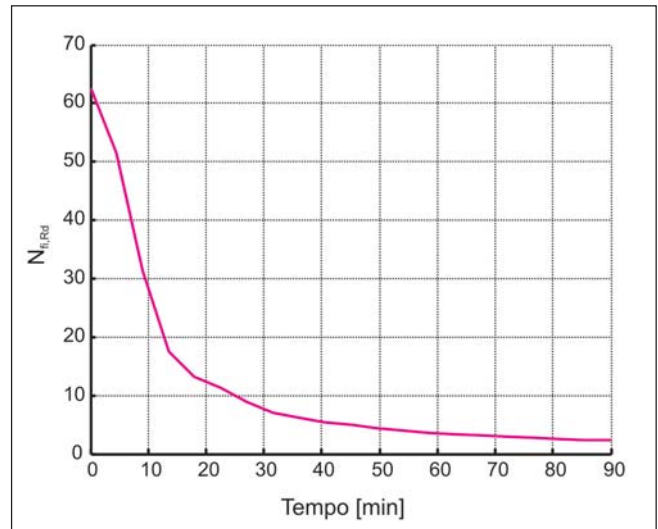


Figura 19 - Momento-fletor resistente em função do tempo, para a viga sob laje (Curva ISO 834).

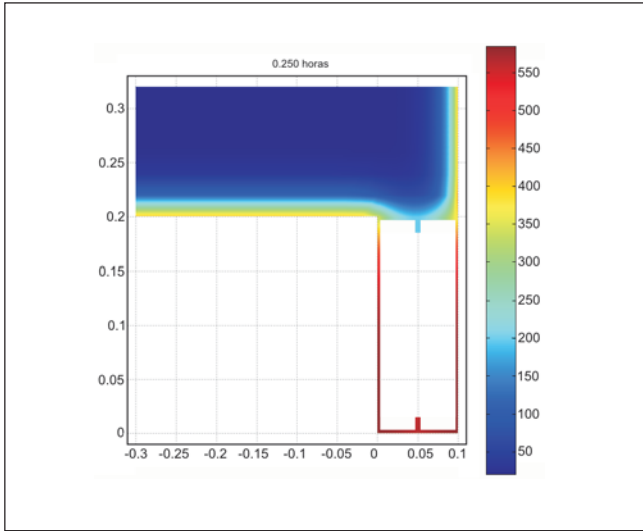


Figura 20 - Temperatura aos 30min para a viga sob laje (Incêndio Natural).

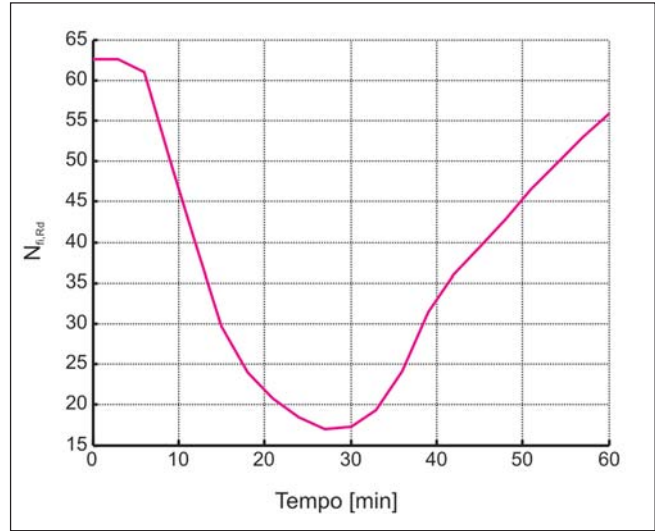


Figura 21 - Resistência ao momento-fletor versus tempo para a viga sob laje (Incêndio Natural).

7. Verificação estrutural

A estrutura completa do Conjunto Habitacional foi modelada incluindo os quatro blocos, em três dimensões, com as lajes simuladas como diafragmas infinitamente rígidos em seu plano e com rigidez nula no plano perpendicular. As bases dos pilares foram consideradas engastadas nas duas direções principais e todas as ligações entre vigas e pilares foram consideradas rígidas (Figuras 2 e 3). A união entre esses elementos é executada por meio de solda de filete em toda a volta do perfil da viga e há nervuras horizontais, internas aos pilares, no nível de cada mesa das vigas. A análise estrutural foi feita usando o programa computacional comercial SAP 2000⁽¹³⁾, para a combinação excepcional de ações recomendada pela NBR 14323^{(11), (14)} (equação 1).

$$F_{fi,d} = \sum_{i=1}^n \gamma_{gi,fi} F_{Gi,fi,k} "+" F_{Q,exc} "+" \psi \sum_{j=1}^m \gamma_{qj,fi} F_{Qj,fi,k} \quad (1)$$

Onde:

$F_{fi,d}$ - valor de cálculo da ação em situação de incêndio.

$F_{Gi,fi,k}$ - valor característico da ação permanente i em situação de incêndio.

$F_{Qj,fi,k}$ - valor característico da ação variável j em situação de incêndio.

$F_{Q,exc}$ - valor característico da ação térmica (excepcional), geralmente igual a zero na presença das forças gravitacionais e para o incêndio-padrão ISO-834.

$\gamma_{gi,fi} = 1,2$ - coeficiente de ponderação para a ação permanente i em situação de incêndio.

$\gamma_{qj,fi} = 1,0$ - coeficiente de ponderação para ação variável j em situação de incêndio.

$\Psi = 0,2$ para locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas.

$\Psi = 0,0$ para cargas de vento.

Como ações permanentes, foram considerados os pesos próprios dos materiais estruturais e construtivos (laje pré-moldada de vigotas de concreto e blocos cerâmicos, com 120 mm de espessura, incluindo capa de concreto na face superior e reboco na face inferior: 2,52 kN/m²; revestimento do piso: 1,0 kN/m²; parede com espessura de 100 mm: 3,57 kN/m) e, como ação decorrente do uso, uma sobrecarga de 1,5 kN/m² nos pisos, de 0,5 kN/m² na cobertura e de 3,0 kN/m² nas escadas.

Os pilares e vigas foram verificados em situação de incêndio obedecendo-se à NBR 14762⁽¹²⁾, que tem como base as prescrições do AISI⁽¹⁾, adaptada à condição de incêndio. Essa adaptação consistiu em incluir, no formulário, os fatores de redução $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ e outros fatores recomendados pelo Eurocode 3 - Part 1.2⁽⁷⁾, para elementos de classe 4. Além disso, foram inseridos redutores dos esforços atuantes para dimensionamento em situação de incêndio (equação 1) recomendados pela NBR 14323⁽¹¹⁾, com base na versão anterior do Eurocode 3 - Part 1.2⁽⁷⁾. Para essa verificação, foi utilizado o programa computacional DIMPEF-FIRE simplificado (Soares⁽¹⁶⁾) desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

As equações 2 e 3, da NBR 14323^{(11), (12)}, foram verificadas.

$$\varphi_E = \frac{N_{fi,Sd}}{N_{fi,Rd}} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{fi,Sd}}{N_{ex,fi}}\right) W_{el,x} k_{y\theta} f_y} \leq 1,0$$

$$\varphi_R = \frac{N_{fi,Sd}}{A k_{y,\theta} f_y} + \frac{M_{x,fi,Sd}}{W_{el,x} k_{y\theta} f_y} \leq 1,0 \quad (2)$$

$N_{fi,Sd}$ - força normal solicitante de cálculo em situação de incêndio.

$N_{fi,Rd}$ - resistência de cálculo de uma barra axialmente tracionada ou comprimida em situação de incêndio.

$M_{x,fi,Sd}$ - momento-fletor solicitante de cálculo em situação de incêndio em torno do eixo x.

$W_{el,x}$ - módulo resistente elástico da seção.

$N_{ex,fi}$ - carga de flambagem elástica em situação de incêndio, por flexão em torno do eixo x (de menor momento de inércia).

A - área.

$k_{y,\theta}$ - fator de redução para a resistência ao escoamento dos aços laminados em temperatura elevada relativo ao valor a 20°C.

f_y - resistência ao escoamento a 20°C dos aços laminados.

$$N_{fi,Rd} = \frac{\rho_\theta A_{ef} k_{y,\theta} f_y}{(1 + \lambda_{0,\theta})} \text{ para } 0 \leq \lambda_{0,\theta} < 0,2 \text{ ou}$$

$$N_{fi,Rd} = \frac{\rho_\theta A_{ef} k_{y,\theta} f_y}{1,2} \text{ para } \lambda_{0,\theta} \geq 0,2 \quad (3)$$

onde:

A_{ef} - área efetiva da seção transversal da barra, levando em conta os efeitos da flambagem local.

ρ_θ - fator de redução associado à flambagem da barra para a temperatura θ .

$\lambda_{0,\theta}$ - índice de esbelteza reduzido da barra em situação de incêndio.

Tendo em vista a eficácia da compartimentação e a troca de calor entre o aço da estrutura e paredes ou laje, a temperatura varia na seção transversal dos elementos estruturais. No entanto, por simplicidade, essa variação não foi considerada, e, por conseqüência, foram desprezados os esforços solicitantes decorrentes do gradiente térmico. Foram desprezados, também, os esforços solicitantes advindos do impedimento das dilatações térmicas e os pequenos momentos em torno do eixo de menor inércia. Por outro lado, tomaram-se os máximos valores encontrados na análise metalográfica ou da térmica e admitiu-se uma temperatura uniformemente distribuída.

Estudaram-se, nesse artigo, o pilar central em contato com alvenaria em uma das faces e a viga junto à janela, na região mais atingida pelo calor.

Os comprimentos de flambagem do pilar, em torno do eixo de menor e maior inércia, foram, respectivamente, 2,92 m e 3,68 m. Adotou-se $f_y = 390$ MPa, mínimo valor encontrado para resistência ao escoamento conforme metalografia.

As temperaturas no pilar, conforme ensaio metalográfico, não superaram os 550°C. Conforme emprego do Smartfire e Supertemcalc, o aço do pilar central atinge uma temperatura média inferior a 400°C. Para esse nível de temperatura, o pilar do quarto andar ou do térreo atingem φ_E e $\varphi_R \leq 1,0$, portanto há segurança com base nas hipóteses desse trabalho. Observou-se, in loco, que não houve qualquer dano global ou local no pilar de aço do último andar.

No caso da viga junto à janela, conforme metalografia, as temperaturas em determinados pontos ficaram entre 650°C e 723 °C. Conforme emprego do Smartfire e Supertemcalc, o aço dessa viga atinge uma temperatura média da ordem de 610°C. Para esses valores, $\varphi_R \leq 1,0$, garantindo a segurança estrutural para as hipóteses adotadas. Pela formulação empregada, não haveria colapso no andar incendiado, o que foi confirmado no fato real.

Admitindo-se a curva ISO 834⁽⁹⁾, porém calculando-se uma temperatura equivalente uniforme no contorno, conforme Supertemcalc, a resistência da viga a incêndio é da ordem de 30 min, ou seja, para um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 30 min, $\varphi_R \leq 1,0$.

8. Conclusões

Esse trabalho analisou o cenário de um incêndio real em um pequeno apartamento na cidade de Limeira, Estado de São Paulo, Brasil. A estrutura de aço, sem revestimento térmico contra-fogo, comportou-se de forma bastante satisfatória. A compartimentação, apesar de imperfeita, devido à ausência de porta corta fogo, funcionou perfeitamente. Análises térmicas e estruturais, por meio de programas computacionais (SmartFire, Supertemcalc e outros) e análises metalográficas foram realizadas. Concluiu-se que, segundo a metalografia, o aço deve ter atingido temperaturas inferiores a 550°C para o pilar central exposto e da ordem de 650°C para a viga mais atingida. Segundo os modelos computacionais, essa temperatura atingiu, em “média”, 380°C no pilar e 610°C na viga. Com base nessas temperaturas e empregando-se métodos simplificados de verificação estrutural, encontraram-se níveis aceitáveis de segurança. Empregando-se métodos tradicionais simplificados de determinação de temperatura, com base nos fatores de massividade das seções e na curva ISO 834, encontraram-se valores mais altos.

A seqüência desse trabalho já está em andamento no Brasil, com a finalidade de analisar, com mais precisão, o nível de segurança de edifícios baixos de aço sem revestimento.

9. Agradecimentos

Ao CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço por ter tornado possível a elaboração desse trabalho. À Cosipa - Companhia Siderúrgica Paulista pelos ensaios feitos. Ao CNPq, ao Dr. John Ewer, da Universidade de Greenwich, e ao Eng. Mauri Resende Vargas.

10. Referências bibliográficas

- [1] American Iron and Steel Institute. *Cold Formed Steel Design*. AISI. USA, 1996.
- [2] ANDERBERG Y. SUPER-TEMPALC. A commercial and user friendly computer program with automatic FEM-generation for temperature analysis of structures exposed to heat. Fire Safety Design. Lund; 1991. and TCD 5.0. User's Manual. Fire Safety Design. Lund. 1997.
- [3] CADORIN, J. F; FRANSSEN, J. M. Software OZONE V 2.2. Liège. 2002.
- [4] Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (State of Sao Paulo Firemen Dept.). Certidão de Sinistro n.015/130/03, expedido pelo 16° GB - 1° SGB - 3°/4° PB, Limeira, State of Sao Paulo. Brazil. 2003.
- [5] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design part 1.2. Brussels. 2004.
- [6] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire Design. Brussels. 2005.
- [7] European Committee for Standardization. Eurocode 3 - Part 1.2. Design of Steel Structures- Structural Fire Design, Brussels, 1995.
- [8] EWER, J., JIA, F., GRANDISON, A., GALEA, E., PATEL, M. *SMARTFIRE V4.0 User Guide and Technical Manual*. Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, UK, 2004.
- [9] International Standardization for Organization - Fire-resistance tests - Elements of building construction. ISO 834. Genève, 1994.
- [10] KIRBY, B.R., LAPWOOD, D.G. and THOMSON, G. *The Reinstatement of Fire Damaged Steel and Iron Framed Structures*. British Steel Corporation, Swinden Laboratories. United Kingdom. 1986.
- [11] NBR 14323. *Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio (steel fire design)*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (Brazilian Standard). Rio de Janeiro. 1999.
- [12] NBR 14762. *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (cold formed steel design)*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (Brazilian Standard), Rio de Janeiro, 2001.
- [13] SAP 2000 Nonlinear. Version 8.2.7, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA. 2003.
- [14] SILVA, P. V., FAKURY, R. H. Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal* 37. Elsevier, 2002.
- [15] SMITH, C.I., KIRBY, B.R., LAPWOOD, D.G., COLE, K.J., CUNNINGHAM, A.P. *The reinstatement of fire damaged steel framed structures*. British Steel Corporation, Teesdale Laboratories. United Kingdom. 1980.
- [16] SOARES, C. H. *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio em situação de incêndio. (Cold formed steel design - Master Degree)*. UFMG, Belo Horizonte: 2002.

Artigo recebido em 07/02/2007 e aprovado em 07/02/2007.

REM - Revista Escola de Minas
71 anos divulgando CIÊNCIA.

www.rem.com.br
