

## Utilização de métodos computacionais na reconstrução de incêndios: aplicação ao caso do shopping total

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho<sup>1</sup>, Fernanda Ruschel<sup>2</sup>, Juliane N. Dolvitsch<sup>3</sup>, Rogério Cattelan Antochaves de Lima<sup>4</sup>, George Cajaty Barbosa Braga<sup>5</sup>

### Resumo

A validação das ferramentas de simulação computacional de incêndio é fundamental para estudar situações de propagação do fogo e para determinar as curvas de elevação de temperatura dos elementos estruturais em cada cenário. Isso permite, identificar riscos e planejar estratégias para proteger as estruturas e seus usuários dos efeitos de incêndios. O presente trabalho reporta uma simulação aproximada da dinâmica de um dos mais importantes incêndios recentes ocorridos na cidade de Porto Alegre, que atingiu o Shopping Total. Os resultados obtidos indicam que as ferramentas de simulação são promissoras, mas que é necessário investir na formação de bancos de dados mais amplos e precisos sobre as características dos materiais encontrados nas edificações, para poder fornecer aos programas informações sobre comportamento de ignição e propriedades em temperatura ambiente e sob aquecimento.

*Palavras-chave:* simulação computacional, incêndio, altas temperaturas.

---

<sup>1</sup> Professor Doutor, UFRGS, lcarlos66@gmail.com

<sup>2</sup> Engenharia Civil, fe\_ruschel@hotmail.com

<sup>3</sup> Acadêmica Engenharia Civil, UFRGS, dolvitsch.juliane@yahoo.com.br

<sup>4</sup> Professor Doutor, UFSM, rogerio@ufsm.br

<sup>5</sup> Doutor, CBMDF<sup>1</sup>, george.braga@gmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais . Av. Osvaldo Aranha, 99 - 90035-190 - Porto Alegre - RS - Brasil – +55 51 33083333.

# 1 Introdução

Nos últimos anos diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na área de altas temperaturas. Entretanto, como o tema é relativamente recente, a maioria das pesquisas até agora realizadas está mais focada na área de análise de estruturas de aço e no comportamento dos materiais constituintes do concreto, buscando avaliar as alterações ocorridas nas propriedades de materiais estruturais (concreto, aço, alvenaria) quando os mesmos são submetidos a temperaturas elevadas, não abordando a questão do comportamento da estrutura como um todo. São raros os estudos que tentam analisar o comportamento de estruturas completas em situação de incêndio, questão fundamental devido à importância dos efeitos de interação entre elementos estruturais com rigidez diferenciadas e submetidos a níveis de aquecimento distintos. Além disso, em incêndios reais, as curvas efetivas de temperatura e a dinâmica do fogo são diferentes do que em ensaios em escala menor. Em função do alto custo que envolve as instalações e equipamentos necessários para realização de ensaios experimentais em escala real de estruturas completas em situação de incêndio, esse tipo de pesquisa ainda é escasso no mundo e praticamente inexistente no Brasil.

Nesse contexto, uma alternativa para analisar consiste no uso de simulações computacionais, ferramentas que usam modelos de dinâmica computacional de fluídos (CFD) para estimar a dinâmica do fogo, e reproduzir a dispersão da temperatura e da fumaça. Obviamente, essas simulações têm que levar em consideração a geometria do ambiente e as características dos materiais existentes no meio. As mesmas podem ser complementadas por ferramentas de análise da difusão da temperatura em elementos estruturais, que podem inclusive tentar considerar as transformações ocorridas e estimar os efeitos em termos tensionais e de redução de resistência.

Este conjunto de ferramentas de simulação computacional adequadamente ajustadas e com boa acurácia permitem compreender como incêndios vão afetar as estruturas e, portanto, favorecem a criação e aperfeiçoamento das normas técnicas necessárias para garantir a segurança de usuários e a preservação do patrimônio. Além disso, estas ferramentas de simulação podem auxiliar na reconstrução de cenários de sinistro, permitindo analisar o suposto comportamento do fogo e testar hipóteses sobre as causas de sua ocorrência, se constituindo em apoio à investigação de incêndios.

O problema é que a validade das simulações obtidas com utilização dessas ferramentas ainda é questionável, considerando que o fenômeno é bastante complexo e que as mesmas foram desenvolvidas a partir de princípios teóricos simplificados. Existem dúvidas em relação ao desempenho dos softwares e incertezas sobre a capacidade de reproduzir as condições ocorridas em um incêndio real. A única forma de validar essas ferramentas para essas situações é, portanto, a comparação com incêndios reais. Vale ressaltar, entretanto, que são poucos os casos reais de incêndio em que se tem conhecimento da dinâmica do incêndio, com o registro de dados referentes à situação da estrutura como um todo após o sinistro, que viabilizem um estudo comparativo para validar tais ferramentas (RUSCHEL, 2011).

Neste contexto, realizou-se uma simulação computacional de um incêndio ocorrido em uma estrutura real usando uma das ferramentas de simulação computacional mais modernas, o software “Fire Dynamics Simulator”, desenvolvido pelo NIST. O caso escolhido foi o incêndio no Shopping Total, em Porto Alegre - RS, em função da disponibilidade de dados acerca de danos e estimativas de temperaturas atingidas em diferentes locais, derivados de uma inspeção detalhada efetuada após o sinistro, com o objetivo de reconstruir a dinâmica do mesmo e identificar os elementos deteriorados.

## **2 Descrição do caso estudado**

O incêndio escolhido como referência para desenvolvimento do estudo descrito nesse trabalho aconteceu em 2007, à noite, num shopping center localizado próximo ao centro da cidade de Porto Alegre, no Sul do Brasil.

O edifício sinistrado era composto por quatro andares, sendo os dois inferiores ocupados por lojas e os demais destinados ao estacionamento de veículos. O prédio foi construído em cinco módulos, todos com o mesmo conceito estrutural, separados por juntas de dilatação, como se pode observar na Figura 1.

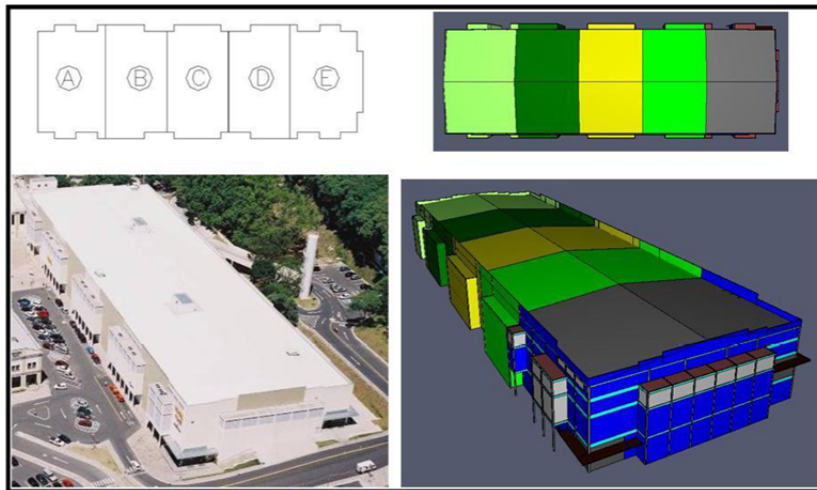


Figura 1: Modulação do prédio. À esquerda, esquema da modulação e foto do prédio antes do sinistro. À direita, modelo a ser utilizado na simulação.

O modelo estrutural era formado por pilares e vigas principais pré-moldadas com vigas secundárias e lajes moldadas in loco. Os pé-direito de cada um dos andares de lojas era de 5,20 metros, e o nível de compartimentação era muito baixo, pois as lojas eram separadas por divisórias de vidro com aproximadamente 2,00 metros de altura. Isso permitia usar um sistema de ar condicionado único para toda estrutura, fato que durante o incêndio permitiu que os gases e a fuligem rapidamente avançassem para os demais módulos.

De acordo com os testemunhos dos usuários e a análise do local após o evento, concluiu-se que o mesmo se iniciou devido a um problema elétrico ocorrido em uma loja de brinquedos, localizada no segundo pavimento do prédio principal do Shopping. Ou seja, era uma loja de canto posicionada, na figura 1, junto à aresta visível da unidade em azul. No mesmo alinhamento, no primeiro andar, estava localizada uma das entradas do prédio.

Fazendo proveito do pé-direito elevado, a loja de brinquedos foi dotada de um mezanino metálico, que ocupava aproximadamente metade de sua área e serviu com um anteparo de confinamento durante os primeiros momentos do sinistro. Na mesma estava armazenada, como seria de esperar, uma grande quantidade de materiais combustíveis, formada por brinquedos e embalagens fabricados com papel, plásticos e espuma.

### 3 Investigação do sinistro

Após debelado o incêndio e resfriado os escombros, a estrutura sinistrada foi liberada para análise. Vistorias foram realizadas pelos engenheiros e técnicos do

Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) para verificar quais as áreas afetadas e determinar as demandas de demolição ou reforço de elementos estruturais. Para tanto foi efetuado um exame visual detalhado da estrutura, com registro das patologias e rupturas estruturais, de forma a obter um mapeamento das regiões mais deterioradas. Com base no exame visual foram definidos pontos para coleta de corpos-de-prova de concreto e aço e de amostras de pó de concreto a várias profundidades de alguns elementos localizados em áreas deterioradas e preservadas, para averiguar a intensidade e profundidade das alterações nas propriedades dos materiais.

Por fim, foram retirados e levados para ensaios em laboratório algumas vigas principais.

Durante a inspeção rapidamente se constatou que a extensão lateral dos danos, a partir do foco do incêndio, era bastante reduzida, afetando basicamente metade do módulo E. Esse comportamento característico foi resultado de um detalhe importante do projeto estrutural, que usava lajes de entrepiso com espessura bastante reduzida, em torno de 5centímetros. As tensões hidrotérmicas e a expansão da tela de armadura localizada no centro das lajes provocou uma forte delaminação desses elementos, com perda total de alguns panos de laje. Esse foi um aspecto determinante na dinâmica do incêndio, pois logo no período inicial do incêndio a perda dessas lajes facilitou a propagação vertical e limitou, de forma decisiva, a propagação lateral do incêndio. O fenômeno de perda de parte das lajes se repetiu nos andares superiores, facilitando a ascensão do calor e gerando um comportamento tipo chaminé. Isso intensificou os danos na área sobre a loja de brinquedos, atingindo até a cobertura, mas preservou lojas localizadas a uma distância pequena do foco de incêndio (KLEIN et al. 2007).

Durante a vistoria, a localização e os danos nestes planos foram mapeados, por andar, gerando mapas indicando os locais deteriorados. Esses dados foram usados para alimentar a simulação computacional, como será discutido no item 4.

### **3.1 Análises de amostras por Difração de Raios-X**

Os indícios coletados confirmaram que se desenvolveram altas temperaturas na região do foco do incêndio, gerando perdas importante de resistência em alguns elementos, que tiveram que ser demolidos. Os principais dados sobre a extensão dos danos nospilares, que permitiram efetuar estimativas das temperaturas atingidas junto aos

elementos estruturais, foram obtidos de resultados de ensaios de Difração de Raios-X realizados em amostras pulverulentas de concreto retiradas desta região.

O ensaio de Difração de Raios-X está entre os mais utilizados para a determinação de modificações da microestrutura em matrizes cimentícias (Lima 2005). O LEME desenvolveu uma escala de análise que permite estimar as máximas temperaturas em sinistros, obtidas a partir de análise dos difratogramas.

A ideia do estudo do qual esse trabalho é parte era averiguar se as curvas de elevação de temperatura derivadas de simulações computacionais, aplicadas sobre os elementos, resultariam em deteriorações similares às observadas nos ensaios em amostras coletadas. Para os fins do presente artigo o foco será mantido no pilar P221, do qual foram retiradas amostras na base (altura de 1,05 metros) e no topo (altura de 4,00 metros), sendo que no topo foram realizadas coletas em duas profundidades diferentes, uma superficial e outra até 3,5 centímetros. A Figura 2 demonstra os resultados do ensaio de difração efetuados, sendo possível observar as variações nos picos de cristalinidade.

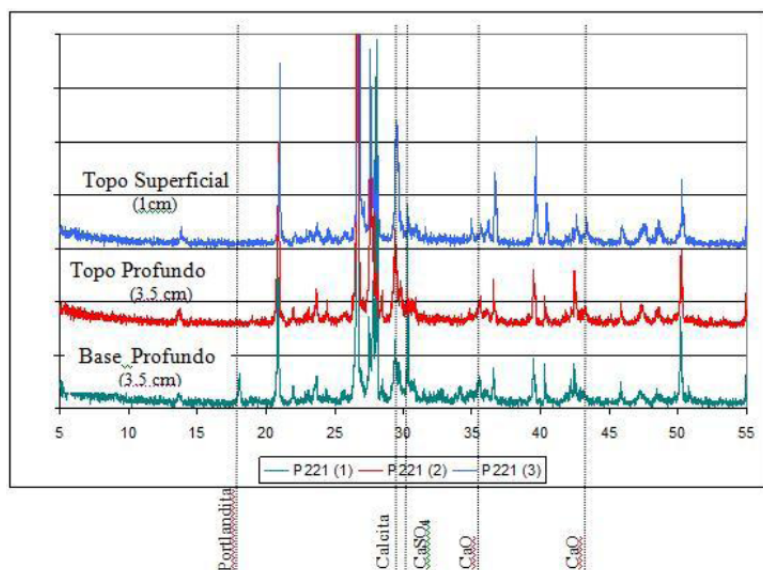


Figura 2: Difratograma do pilar P221 localizado no segundo andar na loja foco do incêndio.

A análise dos difratogramas evidencia que a parte superior do pilar sofreu uma degradação muito maior que a base, devido ao acúmulo de gases quentes na parte superior do recinto. Isso é demonstrado pelo desaparecimento dos picos de Portlandita, um dos compostos mais abundantes do cimento, mas que se decompõe em Calcita e Óxido de Cálcio quando a temperatura atinge 350°C (Castellote et al. 2003). Ou seja, as

diferenças de temperatura nessas zonas devem ser consideráveis se a simulação estiver se comportando adequadamente.

## 4 Simulação computacional

O software escolhido para efetuar a simulação do incêndio foi o Fire Dynamics Simulator© (FDS), desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology), devido à sua larga aceitação e boa reputação.

O programa permite simular a evolução de um incêndio e analisar o movimento dos gases quentes e dos particulados por meio de informações sobre temperatura, densidade, pressão, velocidade e composição química de cada célula da malha de análise estabelecida (McGRATTAN, 2006).

Para visualização dos resultados obtidos com o FDS, é utilizado o software Smokewiew©, também desenvolvido pelo NIST.

A simulação computacional teve início com a montagem do modelo do prédio sinistrado, efetuado a partir das plantas arquitetônicas disponíveis, com ajuda do software Pyrosim©, da Thunderhead Engineering, que fornece uma interface gráfica para trabalhar com o FDS. Concentrou-se a representação na área mais afetada pelo incêndio, o Bloco E, na qual foi usada uma malha mais detalhada. As demais regiões foram representadas de forma simplificada, como mostrado na Figura 3.

Tendo gerado o modelo foi necessário introduzir a carga de incêndio e provocar a ignição. A carga de incêndio especificada na norma ABNT NBR 14432 (2001) para uma unidade comercial do tipo loja de brinquedos é de 500MJ/m<sup>2</sup>.

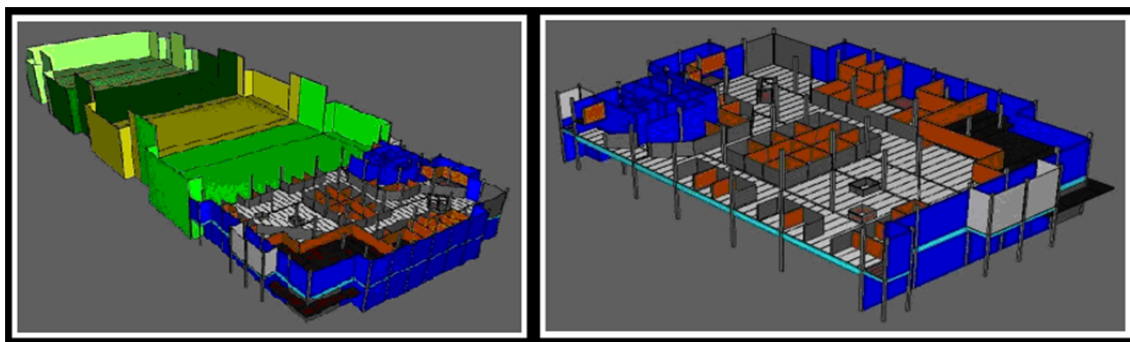


Figura 3: Vista do segundo andar da estrutura representada no Pyrosim, mostrando o maior nível de detalhamento criado para representação do Bloco E.

Esta carga de incêndio foi representada pela colocação de cubos de material combustível espalhados pela área da loja, buscando simular aproximadamente a distribuição do estoque nas prateleiras, visto que não se dispunham de dados exatos da distribuição da carga no momento do incêndio. Foram dadas propriedades correspondentes ao PVC e à espuma de poliuretano aos cubos, pois se concluiu que esses materiais, presentes no banco de dados do software, representariam adequadamente a composição primária da carga de incêndio presente na loja.

Uma pequena parte da carga (0,001%) foi transformada em um queimador, que foi posicionado no centro da loja, representando o fator desencadeador do incêndio, um possível problema elétrico.

O nível de detalhamento da simulação é dependente da malha de cálculo empregada. Quanto mais fina for a malha, melhores são as aproximações de cálculo, mas o tempo de simulação se eleva de forma considerável.

Para um melhor aproveitamento do tempo, foi definida uma malha mais fina para o Bloco E e uma menos definida para o restante do Shopping. Visto que o tamanho do modelo (o maior já utilizado no país) inviabilizou sua análise em desktops comuns, as malhas foram divididas em 5 partes, permitindo uma análise paralelizada em 5 núcleos diferentes do Cluster Newton, integrante do Centro de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Foram incorporadas ao modelo superfícies de registro dos valores da temperatura, denominadas “slices” pelo software. Para controle pontual das temperaturas foram, ainda, adicionados medidores de temperatura pontuais (termopares virtuais) em alguns dos elementos estruturais dos quais haviam sido coletados dados após o sinistro. Além disso, o tempo de simulação foi acelerado para que a representação do incêndio ocorresse em apenas 60 segundos. Isto foi possível através da aceleração das taxas de queima dos materiais, o que resultou no aumento da rampa de temperatura do foco do incêndio.

Foi necessário incorporar “gatilhos” que provocaram a remoção das lajes quando a temperatura atingiu um patamar pré-determinado, representando sua destruição por deslocamento. Isso foi fundamental para acertar a representação do comportamento do incêndio, mas teve que ser efetuado manualmente, pois as propriedades padrão do concreto usadas no software não consideram a ocorrência do deslocamento explosivo.



## 5 Resultados

Analisando os resultados das simulações computacionais é possível perceber que o fogo se manteve concentrado nas proximidades da loja foco, como esperado. Percebe-se, ainda, que as temperaturas mais elevadas se concentram no bloco E do Shopping, junto ao forro de gesso, o que está de acordo com os indícios obtidos do exame de amostras retiradas da estrutura após o sinistro. O mecanismo de rompimento das lajes incorporado pelos autores permitiu representar adequadamente a dinâmica que resultou na ocorrência do efeito chaminé (característica marcante de incêndios em edificações de diversos andares em que o fogo tende a subir aos andares superiores), que foi reproduzido de forma perfeita nas simulações, como se pode verificar analisando a “slice” de temperatura mostrado na Figura 4.

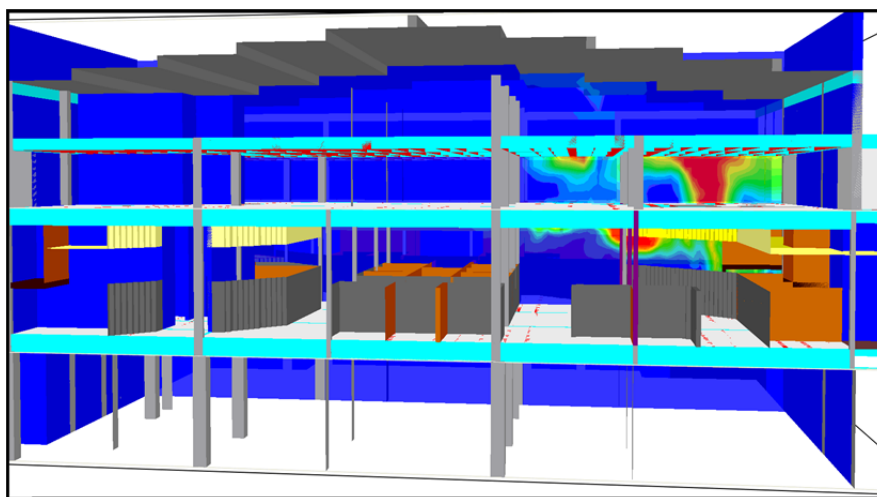


Figura 4: Slice de temperatura resultante da simulação mostrando o efeito chaminé.

Além da distribuição das temperaturas nas “slices”, foi possível visualizar a distribuição da fumaça no software Smokeview. Durante as vistorias realizadas na estrutura sinistrada verificou-se que a fuligem havia se espalhado por todos os blocos do Shopping, comportamento reproduzido na simulação, como é possível verificar na Figura 5.

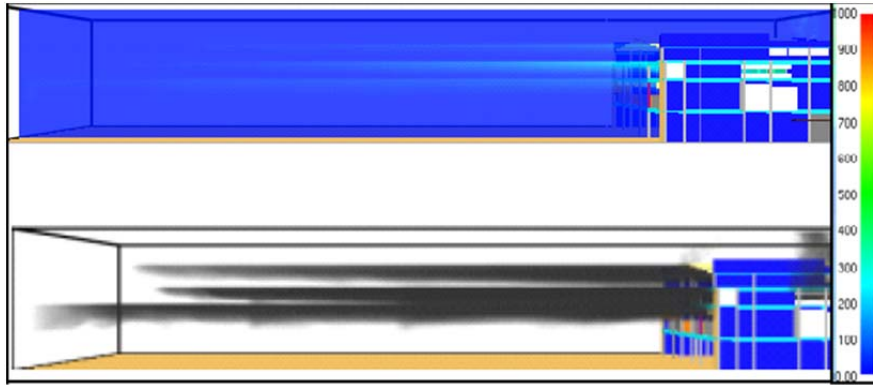


Figura 5: Temperaturas e avanço da fuligem nos outros blocos do shopping.

Medidores pontuais de temperatura foram colocados no pilar P221, nos locais de retirada das amostras de pós para o ensaio de difração. Os resultados são mostrados na Figura 6. Nota-se que as diferenças entre a parte superior e inferior do pilar são pequenas, demonstrando a necessidade de ajustes na dinâmica de incêndio para adequadamente reproduzir os efeitos localizados.

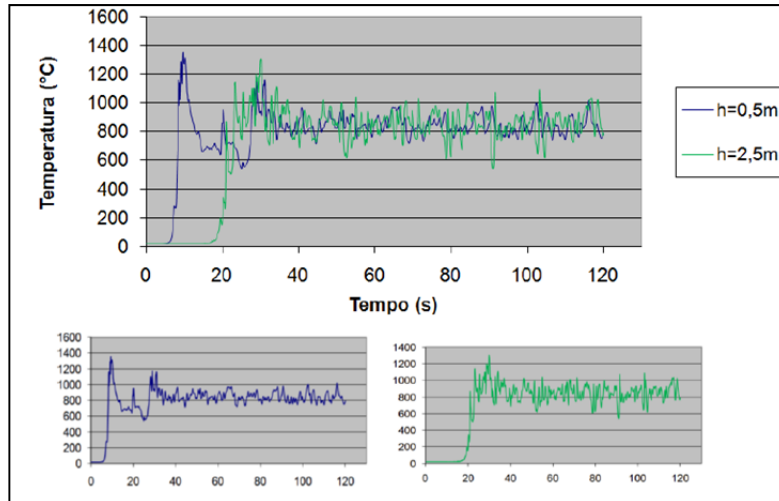


Figura 6: Temperaturas atingidas na base (esquerda) e topo (direita) do pilar P221 no segundo pavimento, interior da loja do foco do incêndio.

## 5 Conclusões

A análise dos resultados obtidos evidencia que é possível efetuar simulações computacionais de incêndios reais de grandes dimensões, com uma razoável aproximação da dinâmica dos sinistros, se houverem dados disponíveis sobre a estrutura antes do

incêndio. A simulação computacional, efetuada com emprego do FDS, apesar das limitações na representação de todos os detalhes da estrutura real, se mostrou capaz de reproduzir aspectos importantes do incêndio. Foi possível obter uma boa distribuição das temperaturas, com clara concentração de calor nas regiões superiores dos andares. Além disso a difusão de particulados se mostrou fiel à realidade.

O desenvolvimento do trabalho evidencia a necessidade de incorporar o comportamento de deslocamento (spalling) para que se possa representar adequadamente algumas dinâmicas de incêndio. Graças ao ajuste efetuado para representar esse comportamento foi possível reproduzir o efeito chaminé característico de incêndios em edificações de múltiplos andares.

Outra necessidade detectada foi a demanda de dados sobre as características de combustão dos vários materiais usados atualmente, informação necessária para representar a dinâmica de incêndio. É necessário investir pesado na formação de um banco de dados de materiais diversos. As temperaturas verificadas nas superfícies dos elementos estruturais, em alguns casos, se mostraram compatíveis com os resultados dos ensaios de Difração de Raios – X. Mas ainda é necessário efetuar ajustes na dinâmica para representar adequadamente o efeito localizado do incêndio, evidenciando que análises locais de efeitos de deterioração e perda de segurança são difíceis de representar e devem ser realizadas com cautela. Uma dificuldade adicional do uso da simulação em casos reais complexos consiste no custo computacional. O modelo construído para a simulação foi desenvolvido em escala real, o que gerou uma demanda computacional extrema e tornou os tempos de processamento de cada teste bastante longos, mesmo utilizando o Cluster Newton - CESUP. Um modelo em escala reduzida poderia ser mais interessante no sentido de otimização dos tempos de processamento, mas o modelo em escala reduzida implica na redução dos parâmetros da simulação como a carga de incêndio e existem discussões sobre esta redução ser linear ou não.

## **6 Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, na forma de bolsas de IC e mestrado.

## 7 Referências

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

CASTELLOTE, M. et al. – “Microstructure: solidphases.” In: Course on Effect of Heat on Concrete, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. (Apostila).

KLEIN, D. L. et al. **Análise da estrutura de concreto armado do Shopping Total após sinistro - Portoshop S/A**. Porto Alegre: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. (Relatório Técnico 16/2007).

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MCGRATTAN, K.. **Fire Dynamics Simulator (version 4) – technical reference guide**. NIST Specialpublication 1018. Washington, 2006.

RUSCHEL, F. **Avaliação da Utilização de Ferramentas de Simulação Computacional para Reconstituição de Incêndios em Edificações de Concreto Armado: Aplicação ao Caso do Shopping Total em Porto Alegre-RS**. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

## **Using computational simulation tools for reconstitution of firesituations: application to shopping total case**

### **Abstract**

One important line of research of the Laboratory of Structural Tests and Modeling (LEME) from the Federal University of Brazil at Rio Grande do Sul (UFRGS) aims to contribute to the study of structural elements under high temperature exposure typical of fire developments in buildings. This type of research is still scarce in Brazil, mainly due to the high costs of experimental facilities and equipment necessary to conduct laboratory or controlled tests that accurately reproduce real fire conditions. A possible way to overcome this problem is to use computational simulations to estimate boundary conditions on the surface of structural elements during fire situations. One interesting aspect related to the use of computational scenarios is enabling the testing of different hypothesis regarding the dynamics of the blaze, resulting in distinct temperature and smoke flow estimates. However, there is still a lot of uncertainty regarding the accuracy of simulation tools in reproducing real situations, and the validity of the resulting estimates is often questioned. To check if this concern is valid, it is useful to analyze how these tools reproduce known case studies, context in which the present study was conceived. The work attempted to represent, using one of the most modern computer simulation tools (the “Fire Dynamics Simulator” software, from NIST), a fire that occurred in a real structure, in Porto Alegre/RS. The case of a commercial Shopping Mall (Shopping Total) was chosen due to availability of data about damage and estimates of temperatures reached in different locations, obtained from a detailed inspection conducted by the LEME team after the event, in order to reconstruct fire dynamics and identify damaged elements. The paper contains a comparative study of temperature curves in selected structural elements, both estimated by simulation and obtained by testing samples collected after the fire. The results indicate that the use of simulation tools is promising, but highlight the need to invest in the formation of larger and more precise databases about the characteristics of materials found in buildings in order to provide better input information about ignition behavior and properties at room temperature and under heating for the simulation tools to work with. The study made clear that it is necessary to develop better strategies for considering the sharp and sudden deterioration of materials due to spalling, in order to reliably reproduce the behavior of thin slab elements. Several adjustments and adaptations were necessary to obtain a good fit between real structural behavior and the results of the numerical simulations.

*Keywords:* Computational simulation. Fire behavior. High temperatures. Structural deterioration.