

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA RECONSTITUIÇÃO  
DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO  
ARMADO: APLICAÇÃO AO CASO SHOPPING TOTAL EM  
PORTO ALEGRE-RS**

**Fernanda Ruschel**

Porto Alegre  
2011

Fernanda Ruschel

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA RECONSTITUIÇÃO  
DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO  
ARMADO: APLICAÇÃO AO CASO SHOPPING TOTAL EM  
PORTO ALEGRE-RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, na modalidade Acadêmico.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Co-orientador: Dr. George Cajaty Barbosa Braga

Porto Alegre

2011

R951a Ruschel, Fernanda

Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado : aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre - RS / Fernanda Ruschel. – Porto Alegre, 2011.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coorientador: Prof. Dr. George Cajaty Barbosa Braga

1. Estruturas de concreto – Incêndio. 2. Simulação computacional. 3. Altas temperaturas.  
I. Silva Filho, Luiz Carlos da, orient. II. Braga, George Cajaty Barbosa, coorient. III. Título.

CDU-624.012.45(043)

**FERNANDA RUSCHEL**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA RECONSTITUIÇÃO  
DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO  
ARMADO: APLICAÇÃO AO CASO SHOPPING TOTAL EM  
PORTO ALEGRE-RS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de fevereiro de 2011.

---

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
Ph.D. pela Leeds University, UK  
Orientador

---

**George Cajaty Barbosa Braga**  
Dr. pela Universidade de Brasília  
Co-Orientador

---

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
Ph.D. pela Leeds University, UK  
Coordenador do PPGEC

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Américo Campos Filho (UFRGS)**  
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

---

**Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho (PUC - Campinas)**  
Dra. pela Universidade de São Paulo

---

**Rogério Cattelan Antochaves de Lima (UniPampa)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Carlos Wengrover Rosa (CREA-RS)**  
Eng. Civil e de Segurança do Trabalho pela UFRGS

À minha família, em especial aos meus pais  
Erica e Paulino, pelo apoio incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e coragem para enfrentar cada desafio, sei que Ele sempre esteve ao meu lado, me amparando e apoiando nos momentos difíceis.

Ao professor Luiz Carlos, pela orientação, pela compreensão nos momentos em que não pude estar tão presente como gostaria, em função da transferência para Passo Fundo, e pela solicitude em me atender inclusive aos sábados, quando não era possível que eu estivesse em Porto Alegre durante a semana. Agradeço ainda pela amizade sincera e principalmente pela confiança e incentivo constantes, sempre acreditando no meu potencial e no sucesso deste trabalho.

Ao co-orientador George Cajaty, que apesar da distância esteve sempre presente esclarecendo minhas dúvidas por e-mail e arrumando um tempinho para me receber quando vinha à Porto Alegre, agradeço pelos inúmeros conhecimentos transmitidos no uso do FDS, pela paciência, pelo incentivo, pela prestatividade e amizade demonstrados no desenvolvimento deste trabalho.

À bolsista de iniciação científica, Juliane Dolvitsch, sempre disposta a encarar uma manhã de sábado na UFRGS decifrando o Pyrosim e analisando as simulações, agradeço por ter sido meu braço direito e esquerdo no LEME. Seu auxílio e prestatividade foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Lindolfo Meira, por todo o auxílio prestado e pela compilação do FDS, sem a qual não seria possível a utilização do CESUP.

À Engenhosul e à Simon Engenharia pelo fornecimento dos projetos arquitetônico e estrutural do Shopping Total, que possibilitaram a correta reprodução da geometria da edificação.

À Thunderhead Engineering pelo fornecimento das licenças educacionais do Pyrosim.

Ao 1º Comando Regional de Bombeiros, através do Capitão Vitamar Dutra, pelas importantes informações fornecidas a respeito do incêndio no Shopping Total, pelo fornecimento do arquivo de fotos do sinistro assim como do projeto de PPCI do shopping.

Aos colegas de laboratório Eduardo Estêvam Rodrigues e Larissa Kirchhof pelo fornecimento de subsídios literários para esta pesquisa, pela amizade e pelas palavras de incentivo.

Ao Pedro Felipe Scheffer pela introdução inicial ao FDS e à Luciane Caetano pelo auxílio no entendimento dos difratogramas.

Ao CESUP, pela permissão para utilização dos recursos computacionais que possibilitaram a execução deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos colegas e amigos da Caixa, pelo apoio e compreensão nas minhas ausências.

Ao Douglas, meu amor, pelas inúmeras vezes em que foi preciso “colocar a mão na massa” para me ajudar, mas acima de tudo pela compreensão e paciência nos meus momentos de desânimo, pelas palavras de carinho e incentivo e pela confiança no êxito desse trabalho.

À minha irmã Patrícia, que considero antes de tudo uma grande amiga, agradeço pelo incentivo, pelo carinho sempre demonstrado e pela compreensão nos momentos em que precisei estar ausente.

Um agradecimento mais do que especial aos meus pais, Erica e Paulino, pela dedicação, incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida, pela compreensão e paciência nos meus momentos de estresse e pela confiança constante na minha capacidade de superar qualquer obstáculo e atingir meus objetivos.

Algo só é impossível até que alguém duvida e resolve  
provar o contrário.

*Albert Einstein*

## RESUMO

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.

Devido ao alto custo dos estudos referentes à análise dos efeitos causados pelo aquecimento em elementos estruturais integrantes de uma estrutura completa, em função da complexidade de instalações e equipamentos necessários para ensaios experimentais desse gênero, esse tipo de pesquisa ainda é escasso no Brasil e no mundo. Uma alternativa consiste no uso de simulações computacionais, que permitem analisar o suposto comportamento do fogo durante um incêndio, testar hipóteses acerca das causas e estimar fluxos de temperatura e particulados. Porém, dada a incerteza acerca da precisão e acurácia dessas ferramentas de simulação para representar situações reais, sua validade é muitas vezes questionada. Cabe, portanto, analisar a eficiência das mesmas através do uso de estudos de caso, contexto no qual se enquadra o presente trabalho. No mesmo se buscou reproduzir, usando uma das ferramentas de simulação computacional mais modernas, o software “Fire Dynamics Simulator”, do NIST, um incêndio ocorrido em uma estrutura real. 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. O trabalho discute as dificuldades envolvidas no processo de geração de um modelo capaz de representar adequadamente o incêndio. Após a reprodução da arquitetura da estrutura, foi necessário testar vários cenários, usando formas distintas de ignição e representação da carga de incêndio e ajustando as propriedades dos materiais de forma a reproduzir as características reais do sinistro. Após o ajuste da dinâmica de incêndio, se efetuou um estudo comparativo das curvas de temperatura atuantes em alguns elementos de interesse, estimadas pela simulação, e indícios obtidos por ensaios de amostras coletadas após o incêndio. 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. Ficou evidente que a introdução de estratégias para consideração do fenômeno de deterioração brusca dos materiais por spalling é fundamental para que se possa reproduzir a dinâmica de alguns incêndios reais. Com os ajustes e adaptações efetuados foi possível ter uma boa aproximação do comportamento registrado na estrutura real através da simulação numérica. Esta pesquisa foi desenvolvida junto ao Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Palavras-chave:** Incêndio; Simulação Computacional; Altas Temperaturas

## ABSTRACT

RUSCHEL, F. **Evaluation of Computational Simulation Tools in the Reconstitution of Fires in Reinforced Concrete Buildings: Application to the Shopping Total, Porto Alegre, RS.** 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Due to the high cost of studies concerning the analysis of the effects caused by heating in structural members of a complete structure, arising from the complexity of facilities and equipment required for experimental tests of this kind, this kind of research is still scarce in Brazil and worldwide. As an alternative it is possible to use computational simulations that enable fire behavior analysis during a fire as well as testing different hypothesis for their causes and estimated temperature and particulate flows. However, there is still a lot of uncertainty about the performance of such simulation tools to represent real situations, and their validity is often questionable. Thus, it is necessary to analyze their efficiency through the use of case studies, context in which this study fits. This study attempted to represent, using one of the most modern tools of computer simulation, the software "Fire Dynamics Simulator, " NIST, a fire occurred in an real structure. The case chosen was the real fire that occurred at the Shopping Total, in Porto Alegre, RS, due to availability of data about damage and estimates of temperatures reached in different locations, obtained from a detailed inspection that was conducted in the building after the fire occurrence, in order to reconstruct the dynamics of the fire and identify the damaged elements. This dissertation discusses the difficulties involved in the generation of a model capable of adequately representing the fire. After reproducing the building structure, it was necessary to test several fire scenes using different forms of ignition and representation of the fire load and adjusting the material properties to reproduce the real fire characteristics. After adjusting the dynamics of the fire, was then conducted a comparative study of the temperature curves acting on the targeted structural elements, estimated by simulation, and evidence obtained by testing samples collected after the fire. The results indicated that the simulation tools are promising, but it is necessary to invest in the formation of larger databases and precise about the characteristics of the materials found in buildings in order to provide information to programs about ignition behavior and properties at room temperature and under heating. It was evident that the introduction of strategies for consideration by the sharp deterioration of materials by spalling is essential to reproduce the dynamics of some real fires. With the adjustments and adaptations made was possible to have a good approximation of the real structural behavior recorded by numerical simulation. This research was developed at the National Center of Supercomputing from the Federal University of Rio Grande do Sul.

**Keywords:** Fire; Computational Simulation; High Temperatures

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxograma de atividades.....	21
Figura 2.1: Efeito de colapsos localizados devido a um incêndio sobre um edifício.....	25
Figura 2.2: Colapso progressivo verificado nas torres do <i>World Trade Center</i> .....	26
Figura 2.3: Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais.....	30
Figura 2.4: Temperatura no elemento estrutural para o modelo de incêndio natural.....	30
Figura 2.5: Incêndio no Ed. Andraus, em São Paulo, 1972.....	32
Figura 2.6: Incêndio no Ed. Joelma, em São Paulo, 1974.....	33
Figura 2.7: Incêndio no Ed. Grande Avenida, em São Paulo, 1981.....	33
Figura 2.8: Incêndio nos edifícios da CESP, em São Paulo, 1987.....	34
Figura 2.9: Incêndio no edifício das Lojas Renner, em Porto Alegre, 1976.....	35
Figura 2.10: Incêndio no Ed. Andorinhas, no Rio de Janeiro, 1986.....	35
Figura 2.11: Colapso parcial de um depósito devido ao incêndio, em Ghent – Bélgica, 1973.....	36
Figura 2.12: Colapso parcial do Ronan Point, em Londres – UK, 1978.....	36
Figura 2.13: Colapso parcial da loja de departamentos Katrantzos Sport, Atenas – Grécia, 1980.....	37
Figura 2.14: Incêndio durante partida de futebol no Estádio de Bradford, deixou 52 mortos e mais de 200 feridos, Inglaterra, 1980.....	37
Figura 2.15: Ruínas do depósito das lojas Zêlo, colapso total por ocasião do incêndio, Barueri-SP, 1994.....	38
Figura 2.16: Colapso total da Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996.....	38
Figura 2.17: Colapso total de fábrica de roupas em Alexandria – Egito, 2000.....	38
Figura 2.18: Colapso total de um edifício residencial em São Petersburgo – Rússia, 2002.....	39
Figura 2.19: Incêndio no Edifício da Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2004.....	39
Figura 2.20: Incêndio na Torre Windsor em Madri – Espanha, 2005.....	39
Figura 2.21: Incêndio no Shopping Total, Porto Alegre, 2007.....	40
Figura 2.22: Incêndio no edifício da Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Delft, Holanda, 2008.....	40
Figura 2.23: Evolução das fases cristalinas de cimentos durante o aquecimento: teor normal de C <sub>3</sub> A.....	42
Figura 2.24: Difrátograma de ensaios realizados em pastas de cimento de resistência convencional.....	43
Figura 3.1: Modelo de Duas Camadas.....	49
Figura 3.2: Modelo de Campo.....	50

Figura 3.3: Tela de processamento do FDS (à esquerda) e exemplo de arquivo de entrada de dados (à direita).....	52
Figura 3.4: Exemplos de visualização no Smokeview.....	52
Figura 3.5: Interface gráfica do Pyrosim.....	53
Figura 3.6: Desenho esquemático do barraco, mostrando os possíveis focos (setas na figura à esquerda (vista superior), enquanto à direita é possível visualizar a vista lateral do barraco).....	54
Figura 3.7: Marcas de queima com seta amarela mostrando a mesma posição no local real do incêndio e na simulação computacional.....	54
Figura 3.8: Momento em que ocorre a generalização do incêndio ( <i>flashover</i> ), incluindo gráfico da temperatura.....	55
Figura 3.9: Simulação no FDS e ensaio experimental no estudo da compartimentação vertical.....	55
Figura 4.1: Shopping Total, Porto Alegre.....	56
Figura 4.2: Esquema do 2º pavimento do shopping, indicando o local do foco do incêndio.....	57
Figura 4.3: Vista interna do 2º pavimento durante e após o incêndio.....	57
Figura 4.4: Vista externa durante o incêndio.....	58
Figura 4.5: Vista externa após o incêndio.....	58
Figura 4.6: Vista interna das garagens do 3º pavimento.....	59
Figura 4.7: Vista aérea e detalhe da modulação do Prédio 7 do Shopping Total.....	60
Figura 4.8: Localização da Loja França no 2º pavimento do módulo E.....	60
Figura 4.9: Representação da estrutura do prédio: esquema da estrutura do módulo E (à esquerda) e detalhe da laje vista por baixo (à direita).....	61
Figura 4.10: Vista do elemento metálico do mezanino da Loja França, flambado devido à restrição de deformação térmica exercida pela ancoragem nas vigas de concreto.....	62
Figura 4.11: Zona onde ocorreu ruptura completa da laje, no teto do 2º pavimento.....	62
Figura 4.12: Aspecto das lajes de piso do 4º pavimento deterioradas e fragmentos de concreto deslocados das lajes.....	63
Figura 4.13: Vista de elementos com flambagem local na treliça de cobertura.....	63
Figura 4.14: Escapamento da fumaça pelas fissuras e aberturas.....	64
Figura 4.15: Fissuração no encontro de viga e pilar.....	64
Figura 4.16: Deslocamento do concreto e flambagem da armadura no topo dos pilares.....	65
Figura 4.17: Dessecação superficial de elementos de concreto armado do piso do 4º pavimento.....	65
Figura 4.18: Extração de corpos de prova e ensaio de flexão em vigota extraída.....	66
Figura 4.19: Extração de amostra de pó para ensaio de difratometria de raios-X.....	67

Figura 4.20: Posição dos pilares de onde foram retiradas amostras de pó para ensaio de difratometria de raios-X – Bloco E.....	67
Figura 4.21: Difratoograma 1 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X do pilar P213.....	68
Figura 4.22: Difratoograma 2 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X do pilar P221.....	69
Figura 4.23: Difratoograma 3 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X dos pilares do eixo B.....	70
Figura 5.1: Vistas do volume geométrico do bloco E reproduzido no AutoCad.....	71
Figura 5.2: Comparação entre a estrutura real e o modelo adotado: foto do prédio antes do sinistro (à esquerda) e modelo a ser utilizado na simulação (à direita).....	72
Figura 5.3: Vistas do modelo utilizado (Cobertura e 4º Pavimento).....	73
Figura 5.4: Vistas do modelo utilizado (3º Pavimento e 2º Pavimento sobre forro).....	73
Figura 5.5: Vistas do modelo utilizado (2º Pavimento sob forro e Térreo).....	74
Figura 5.6: Representação da carga de incêndio através de um queimador tipo “vent”...	75
Figura 5.7: Representação da carga de incêndio em três caixas de madeira que funcionavam como queimadores imediatos e permanentes.....	75
Figura 5.8: Vista interna da segunda simulação: Carga de incêndio em três caixas de madeira.....	76
Figura 5.9: Vista interna do 2º pavimento do módulo E com a representação adotada para o material combustível no interior da loja (blocos de espuma em verde e de PVC em lilás).....	77
Figura 5.10: Vista interna do 2º pavimento do módulo E no terceiro teste realizado.....	77
Figura 5.11: Marcação dos locais onde haveria rompimento das lajes e posicionamento dos termopares. À esquerda, laje entre o 2º e o 3º pavimento. À direita, laje entre o 3º e o 4º pavimento.....	79
Figura 5.12: Marcação dos locais onde haveria rompimento do forro de gesso e posicionamento dos termopares.....	80
Figura 5.13: Vistas externas da fachada frontal (à esquerda) e lateral (à direita) do módulo E.....	81
Figura 5.14: Marcação dos locais onde poderia haver aberturas nas fachadas com posicionamento dos termopares.....	81
Figura 5.15: Pequenos orifícios demarcados nas paredes por trás das venezianas e termopares correspondentes.....	82
Figura 6.1: Vista, no modelo, do 2º pavimento do módulo E com a indicação da loja onde iniciou o incêndio e dos pilares analisados.....	84
Figura 6.2: Vistas da simulação do Cenário Original aos 6.6s, 8.4s e 11.4s de simulação.....	86
Figura 6.3: Vistas da simulação do Cenário Original aos 12.6s, 14.4s e 16.8s de simulação.....	87

Figura 6.4: Vistas da simulação do Cenário Original aos 19.2s, 25.8s e 28.8s de simulação.....	88
Figura 6.5: Vistas da simulação do Cenário Original aos 32.4s, 50.4s e 66.6s de simulação.....	89
Figura 6.6: Vistas externas da simulação do Cenário Original.....	90
Figura 6.7: Temperaturas atingidas no 2º, 3º e 4º pav. do pilar P213 – h=1,5m.....	91
Figura 6.8: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 2º pavimento.....	92
Figura 6.9: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 3º pavimento.....	93
Figura 6.10: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 4º pavimento.....	93
Figura 6.11: Temperaturas atingidas no topo e na base do pilar P221 – 2º pav.....	94
Figura 6.12: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P221.....	95
Figura 6.13: Temperaturas atingidas na face do pilar P220: 2º pav. – h=1,5m.....	96
Figura 6.14: <i>Slices</i> de temperatura cruzando o eixo do pilar P220.....	96
Figura 6.15: Temperaturas atingidas na face do pilar P218: 2º pav. – h=1,5m.....	97
Figura 6.16: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P218.....	97
Figura 6.17: Temperaturas atingidas na face do pilar P221: 2º pav. – h=1,5m.....	98
Figura 6.18: <i>Slices</i> de temperatura cruzando o eixo do pilar P221.....	98
Figura 6.19: Temperaturas atingidas na face do pilar P217: 2º pav. – h=1,5m.....	99
Figura 6.20: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P217.....	99
Figura 6.21: <i>Slices</i> de temperatura cruzando o eixo do pilar P217.....	100
Figura 6.22: Temperaturas atingidas na face do pilar P222: 2º pav. – h=1,5m.....	100
Figura 6.23: <i>Slices</i> de temperatura cruzando o eixo do pilar P222.....	101
Figura 6.24: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “z” em h=1,5m do piso do 2º pavimento.....	102
Figura 6.25: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 e propagação da fumaça.....	103
Figura 6.26: Vistas internas da simulação do Cenário Alternativo 1.....	105
Figura 6.27: Vistas externas da simulação do Cenário Alternativo 1.....	106
Figura 6.28: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do queimador.....	107
Figura 6.29: Temperaturas atingidas nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m..	108
Figura 6.30: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P218.....	109
Figura 6.31: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P217.....	109
Figura 6.32: Temperaturas atingidas nos pilares P217 e P218: 2º pav. – h=1,5m.....	110
Figura 6.33: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 em t=20,4s.....	111
Figura 6.34: Vistas da simulação do Cenário Alternativo 2.....	112
Figura 6.35: Imagens em perspectiva da simulação do Cenário Alternativo 2.....	113

Figura 6.36: Propagação do fogo para o módulo D em $t=52,2s$ .....	113
Figura 6.37: Propagação da fumaça no prédio em $t=120s$ .....	113
Figura 6.38: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do queimador.....	114
Figura 6.39: Temperaturas atingidas nos pilares P221 e P222: 2º pav. – $h=1,5m$ .....	115
Figura 6.40: Temperaturas atingidas no pilar P220: 2º pav. – $h=1,5m$ .....	115
Figura 6.41: Temperaturas atingidas nos pilares P218 e P217: 2º pav. – $h=1,5m$ .....	116
Figura 6.42: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P218.....	116
Figura 6.43: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “x” do pilar P217.....	117
Figura 6.44: <i>Slice</i> de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222.....	117
Figura 6.45: Vista externa da <i>slice</i> de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222.....	118
Figura A1: Planta padrão do 2º pavimento.....	129
Figura A2: Mapeamento de danos no 3º pavimento.....	130
Figura A3: Mapeamento de danos no 4º pavimento.....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Temperatura dos gases em função do tempo, curva ASTM E-119.....	29
Tabela 5.1: Propriedades utilizadas para os materiais nas simulações realizadas.....	78
Figura 6.1: Picos de temperatura máx. nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.....	108
Tabela 6.2: Picos de temperatura máx. nos pilares P217 e P218: 2º pav. – h=1,5m.....	110
Figura 6.3: Comparação das temperaturas atingidas nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.....	115

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	20
1.4 LIMITAÇÕES.....	22
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2 INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES</b> .....	24
2.1 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	24
2.2 CURVA PADRÃO E TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF).....	28
2.3 INCÊNDIOS IMPORTANTES NO BRASIL E SUAS CONSEQUÊNCIAS.....	32
2.4 INVESTIGAÇÃO DE INCÊNDIOS ATRAVÉS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....	41
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
<b>3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO</b>	47
3.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	48
3.2 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS NO ESTUDO.....	50
<b>3.2.1 Fire Dynamic Simulator - FDS</b> .....	51
<b>3.2.2 Smokeview</b> .....	52
<b>3.2.3 Pyrosim</b> .....	53
<b>3.2.4 Revisão de alguns estudos realizados com o FDS</b> .....	53
<b>4 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO ANALISADO: O SINISTRO DO SHOPPING TOTAL EM PORTO ALEGRE</b> .....	56
4.1 O INCÊNDIO.....	56
4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA SINISTRADA.....	59
<b>4.2.1 Descrição da Estrutura Afetada</b> .....	60
<b>4.2.2 Inspeção Visual: Mapeamento das Regiões Deterioradas e Reconstituição da Dinâmica do Incêndio</b> .....	61
<b>4.2.3 Extração de Amostras e Ensaios</b> .....	66
<b>5 MONTAGEM DO MODELO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO</b> .....	71
5.1 REPRODUÇÃO DA GEOMETRIA DA ESTRUTURA.....	71
5.2 REPRESENTAÇÃO DA CARGA DE INCÊNDIO.....	74
5.3 CRITÉRIOS ADOTADOS.....	78
<b>6 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS</b> .....	84

6.1 CENÁRIO ORIGINAL.....	85
<b>6.1.1 Dinâmica do incêndio verificada.....</b>	<b>85</b>
<b>6.1.2 Análise das temperaturas atingidas.....</b>	<b>91</b>
6.2 CENÁRIO ALTERNATIVO 1: PRESENÇA DE SPRINKLERS.....	104
<b>6.2.1 Dinâmica do incêndio verificada.....</b>	<b>104</b>
<b>6.2.2 Análise das temperaturas atingidas.....</b>	<b>107</b>
6.3 CENÁRIO ALTERNATIVO 2: SEM EFEITO CHAMINÉ.....	111
<b>6.3.1 Dinâmica do incêndio verificada.....</b>	<b>112</b>
<b>6.3.2 Análise das temperaturas atingidas.....</b>	<b>114</b>
<b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>119</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
7.2 CONCLUSÕES.....	121
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
REFERÊNCIAS .....	123
ANEXO A.....	128

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o tema de pesquisa e a justificativa para a escolha do mesmo; discutida a relevância do assunto no meio científico e tecnológico; e explanados os objetivos propostos e a estratégia de pesquisa adotada, bem como são apresentadas as limitações impostas e a estruturação do trabalho.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Durante milhares de anos o fogo foi um assunto associado a noções de mistério, medo, superstição e adoração. Os homens primitivos associavam o fogo à catástrofe. Em certa época da sua evolução, todavia, o homem aprendeu a dominar o fogo. Nas cavernas foram encontrados vestígios do uso do fogo pelo homem de Neanderthal há 50.000 anos e pelo homem de Pequim há 250.000 anos. Esses e outros homens primitivos descobriram como usar o fogo para aquecimento, para iluminação, para cozinhar o alimento e também para se proteger contra animais selvagens (RAMALHO, 2008).

No entanto, apesar de ser um grande auxiliar do homem em muitas tarefas, o fogo é também um de seus maiores inimigos em potencial. Segundo Silva (2009), de dois em dois minutos ocorre um incêndio no Brasil. A cada hora morre pelo menos uma pessoa em consequência de incêndios. Isso gera, diariamente, um considerável montante de prejuízos materiais.

O fogo também causa danos às estruturas civis. Conforme Silva (2001), o aumento da temperatura de um elemento estrutural pode causar reduções de resistência e rigidez, além de provocar o aparecimento de esforços solicitantes adicionais. Com o aumento da temperatura, os elétrons começam a vibrar e a sua mobilidade aumenta. Consequentemente, os componentes dos materiais se dilatam e podem levar à ocorrência de rupturas, tais como fissuras e deslocamentos.

Segundo Neville (1997), os deslocamentos ocorrem pelo surgimento de fissuras paralelas à superfície devido à tendência de “descolamento” das camadas superficiais quentes em relação

às camadas interiores mais frias do concreto. A fissuração é mais intensa nas juntas, nas regiões mal adensadas e nos planos de barras de armadura.

No caso do concreto armado, uma vez que o aumento de temperatura atinge o nível da armadura, a mesma passa a conduzir calor, acelerando os efeitos da elevação de temperatura.

Atualmente, a preocupação com a segurança contra incêndio é crescente, seja em edifícios residenciais, estabelecimentos comerciais e mesmo em indústrias. Essa preocupação se manifesta fisicamente na presença cada vez maior de extintores, sinalizações e iluminações de emergência nas edificações, além de hidrantes nas vias públicas.

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. A maioria dos trabalhos desenvolvidos na área de efeitos de incêndios em estruturas teve por objetivo 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. É importante ressaltar que em incêndios reais, as curvas efetivas de temperatura e a dinâmica do fogo são diferentes do que em ensaios em escala menor, sendo o conhecimento da dinâmica de incêndio dentro da edificação essencial para viabilizar estudos referentes à análise do comportamento de estruturas completas em situação de incêndio.

Em função do alto custo envolvido nas instalações e equipamentos necessários para a 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 fluidos (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. Ou seja, um conjunto de ferramentas de simulação computacional adequadamente ajustadas e com boa acurácia ajudaria a compreender como incêndios vão afetar estruturas e favoreceria, portanto, a criação e aperfeiçoamento das normas técnicas necessárias para garantir a segurança de usuários e a preservação do patrimônio.

Além disso, as ferramentas de simulação poderiam 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 a utilização dessas ferramentas ainda é questionável, considerando que o problema é bastante complexo e que as mesmas foram desenvolvidas a partir de princípios teóricos simplificados. Existem dúvidas em relação ao desempenho dos softwares e incerteza se são capazes de reproduzir as condições ocorridas em um incêndio real.

A única forma de validar essas ferramentas para tais 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.

É nesse contexto que se enquadra a proposta do presente trabalho. Uma das linhas de pesquisa desenvolvidas pelo Grupo de Estudos de Altas Temperaturas (ALTEMP) do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS visa justamente contribuir com estudos referentes à análise dos efeitos causados pelo aquecimento em elementos estruturais integrantes de uma estrutura completa, que tenha sido submetida à situação de incêndio. Este trabalho pretende ampliar a abrangência dessa linha de pesquisa, estudando a propagação do incêndio dentro de uma estrutura completa. Levando em conta os custos elevados dos ensaios experimentais, optou-se pela realização de uma simulação computacional de um incêndio ocorrido em uma estrutura real, de geometria complexa, usando uma das ferramentas de simulação computacional mais modernas, o software “Fire Dynamics Simulator”, desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology).

O caso escolhido foi o incêndio no Shopping Total, ocorrido em julho/2007 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.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar se é possível reproduzir a dinâmica de incêndio ocorrida em uma situação real usando uma ferramenta de simulação computacional.

Como objetivos específicos do estudo foram definidos:

- avaliar criticamente as dificuldades de representação de uma situação de incêndio real, em uma estrutura complexa, usando uma ferramenta de simulação computacional;
- comparar a curva de temperatura estimada em alguns elementos estruturais pela simulação computacional com os indícios acerca da faixa de temperatura atingida nesses locais (no incêndio real) obtidos através de exame visual e ensaios de difratometria em amostras retiradas desses elementos após o sinistro;
- usar o modelo computacional para analisar cenários alternativos de desenvolvimento do incêndio, buscando identificar como atuam certos fatores que poderiam modificar a sua evolução, tais como uma ação mais efetiva da rede de sprinklers;

## 1.3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A avaliação proposta será feita com base em uma reconstituição, através de simulação computacional no software Fire Dynamics Simulator (FDS), do incêndio ocorrido no Shopping Total, em Porto Alegre-RS, no dia 20 de julho de 2007.

Será tomada como base de comparação para análise da acurácia do modelo de simulação as observações registradas e dados coletados na vistoria técnica e análise da estrutura sinistrada, realizadas pelos engenheiros e técnicos do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais –

LEME, da Escola de Engenharia da UFRGS, no período de 07 de setembro a 15 de outubro de 2007. A escolha desse estudo de caso se deu pela grande quantidade de dados disponíveis coletados durante as investigações efetuadas após o evento. Além da inspeção visual, foram extraídas amostras de material para realização de ensaios de raios-x, que possibilitaram o mapeamento dos níveis de temperatura atingidos nos elementos estruturais. Esses dados serão comparados com os obtidos pela simulação no FDS.

Para um melhor entendimento, apresenta-se na figura 1.1 um fluxograma de desenvolvimento das fases do trabalho, dividido em quatro macro-etapas.

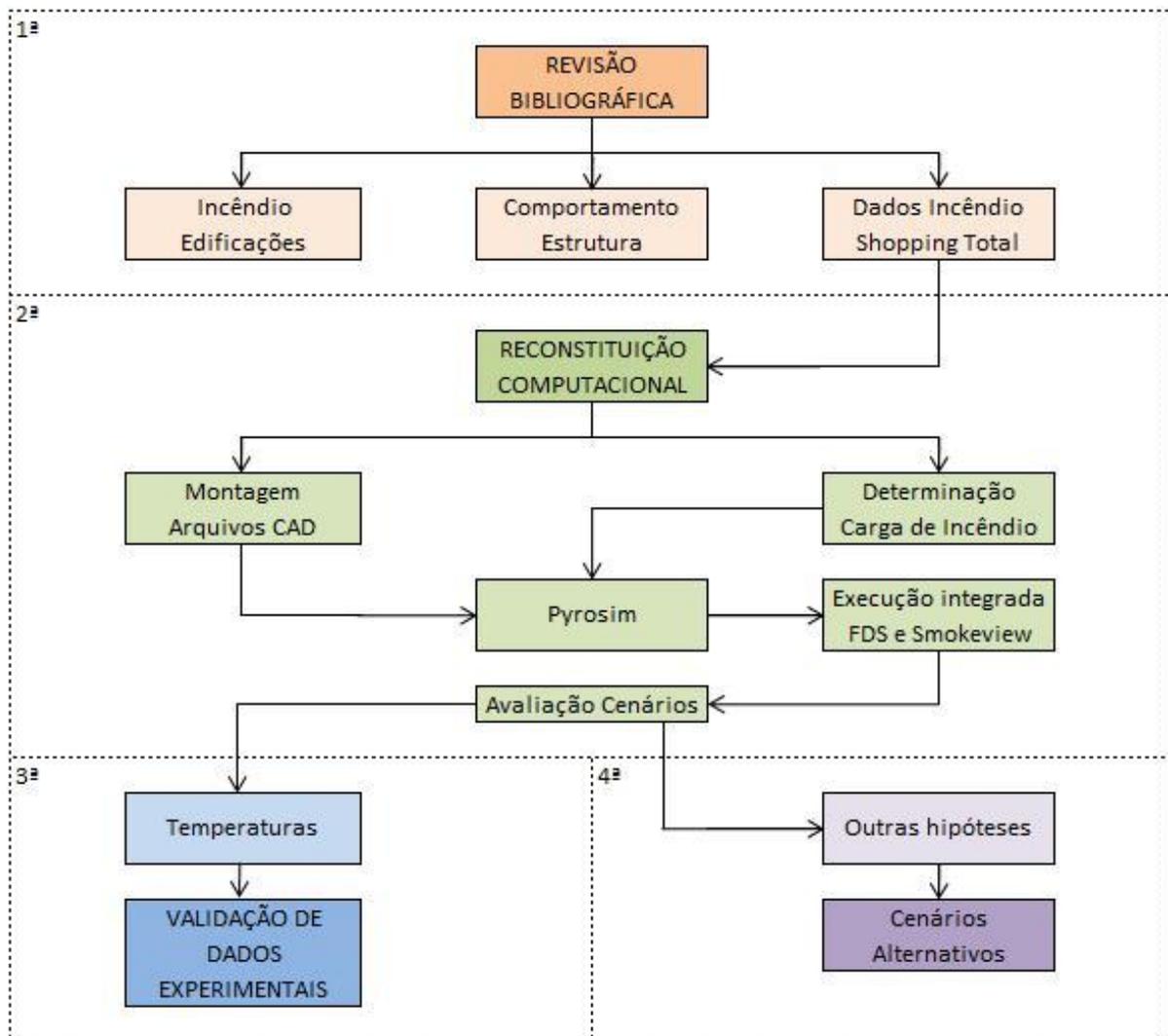


Figura 1.1: Fluxograma de atividades.

A Revisão Bibliográfica envolveu a coleta e revisão crítica de informações acerca do fenômeno incêndio em edificações e do comportamento típico esperado de estruturas e

materiais estruturais quando submetidos a aquecimento. Além disso, se efetuou uma análise minuciosa do levantamento de dados sobre o incêndio ocorrido no Shopping Total.

Com base nas informações da investigação e detalhes do projeto do Shopping Total, partiu-se para a reconstituição computacional do incêndio, com determinação da carga de incêndio e reprodução da geometria das lojas num ambiente CAD.

Para facilitar a reprodução da geometria do shopping e a inserção dos demais dados de entrada, necessários para a simulação do incêndio no FDS, foi utilizado o programa Pyrosim.

Reproduzida a geometria da edificação, foram realizados diversos testes com o intuito de verificar qual a melhor forma de representação para o material combustível. Foram então estabelecidos critérios e hipóteses de acordo com cada cenário que se pretendia analisar (cenário original do incêndio e hipóteses alternativas). Para cada caso, obtidas as relações temperatura-tempo dos gases e a elevação da temperatura nos elementos estruturais no FDS, foi feita a análise comparativa com os indícios verificados na estrutura sinistrada e com os difratogramas obtidos através dos ensaios nas amostras de material deteriorado.

## 1.4 LIMITAÇÕES

Em função do limitado tempo para o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado, da dificuldade na obtenção de dados e definição de alguns fatores importantes no desenvolvimento de um incêndio real, algumas limitações tiveram de ser admitidas:

- foi usada apenas uma ferramenta de simulação (o FDS) para realização do teste;
- as comparações e análises foram feitas com base na simulação de um único caso de incêndio real, o ocorrido no Shopping Total;
- os efeitos em termos de temperatura desenvolvidas foram analisados apenas nos pontos onde foram retiradas amostras durante a vistoria técnica;
- a carga de incêndio não é conhecida e foi representada de forma aproximada, tomando como base a finalidade da loja onde ocorreu o incêndio;

- as condições de ventilação no momento do sinistro não são conhecidas e tiveram que ser estimadas.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 7 capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 1 é apresentado o problema de pesquisa, bem como as justificativas que levaram à escolha deste no contexto científico. Também são discutidos os objetivos, a estratégia de pesquisa adotada e limitações impostas além de descrever a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre o fenômeno incêndio em edificações e a sua correlação com a estrutura, além de uma pequena descrição a respeito da análise de difratogramas e sua importância na investigação de incêndios.

Uma discussão a respeito das ferramentas disponíveis para análise de incêndio e as justificativas para a utilização do FDS são apresentadas no capítulo 3.

No capítulo 4 é discutido o caso do incêndio no Shopping Total, são apresentados e comentados os ensaios realizados pelo LEME na estrutura pós-incêndio.

O capítulo 5 relata como foi feita a montagem do modelo utilizado nas simulações, apresentando as estratégias e critérios adotados.

A análise das simulações realizadas, através de um estudo comparativo com os dados obtidos da estrutura sinistrada, é apresentada no capítulo 6.

No capítulo 7 são feitas as conclusões a respeito do estudo realizado, mencionando os objetivos atingidos e apresentando sugestões para futuros trabalhos.

## 2. INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES

Os incêndios, quando comparados a outros tipos de sinistros que podem afetar estruturas civis, podem ser considerados como eventos de baixa probabilidade de ocorrência. Porém, quando os mesmos se manifestam, normalmente causam grande destruição, colocando em risco a vida de pessoas e a estabilidade das edificações. Por isso, existe um interesse cada vez maior em entender como as altas temperaturas afetam as estruturas e ameaçam sua estabilidade. Para situar o leitor acerca da importância do tema, neste capítulo se faz uma breve e resumida revisão sobre os efeitos de incêndios na segurança estrutural, além de uma abordagem rápida sobre a análise por difratometria de raios-X, tendo em vista sua utilidade na investigação de incêndios.

### 2.1 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A segurança das pessoas que ocupam as edificações atingidas por incêndios depende de muitos fatores ligados ao projeto e à construção, incluindo a expectativa de que certos prédios, ou parte dos mesmos, não entrem em colapso durante o incêndio, ou que os elementos de concreto ou alvenaria que compartimentam a mesma atuem inibindo o alastramento das chamas. Como explica Lima (2005), em muitos casos os elementos estruturais, mesmo se degradando, exercem papel essencial no retardo do dano causado pelo fogo, permitindo que se evacuem os ocupantes e se inicie o combate ao incêndio. Dessa forma, é de suma importância entender como as estruturas das edificações respondem ao aquecimento a que são submetidas em uma situação de incêndio.

Os requisitos de segurança contra incêndio para as edificações são estabelecidos por leis e decretos e buscam refletir os riscos a que ficam submetidos os ocupantes e a equipe de combate na ocorrência de um sinistro. No Brasil, a consideração do desempenho estrutural no âmbito da segurança contra incêndio em edificações é relativamente recente; as pesquisas e normas relacionadas ao projeto de estruturas em situação de incêndio são incipientes, comparadas àquelas em desenvolvimento em países como Japão, Reino Unido, Suécia e os EUA.

A experiência internacional indica que todos os materiais comumente utilizados nas estruturas das edificações (tais como o concreto e o aço) perdem resistência e rigidez quando

submetidos a altas temperaturas. Assim, é necessário verificar a capacidade resistente das estruturas em situação de incêndio, pois a deterioração térmica progressiva pode levar algumas estruturas ao colapso.

O colapso de estruturas de concreto devido a incêndios pode ser local, parcial ou global. No colapso local ocorre a falência estrutural de elementos isolados, não comprometendo a estabilidade global da edificação. O colapso parcial se caracteriza pela falência estrutural de alguns elementos que comprometem a estabilidade de parte da edificação, levando tal parte a desabar. Já o colapso global consiste na falência estrutural progressiva dos elementos do edifício (COSTA, 2007).

A ruptura ou colapso localizado de apenas um elemento que compõe um pórtico de concreto armado pode implicar em diferentes riscos à estabilidade global da edificação dependendo da localização do elemento rompido.

Conforme ilustrado na figura 2.1, a ausência repentina de um pilar pode levar toda parte do edifício localizada acima deste a desabar. Da mesma forma, se uma viga perde a capacidade de suporte, as lajes que estão apoiadas nela podem desabar junto sobre os pavimentos abaixo. Mesmo que a carga da parte do edifício acima dos elementos rompidos seja redistribuída a outros elementos do pavimento, estes podem não ter resistência suficiente para absorver a sobrecarga estática e dinâmica e deflagrar o colapso progressivo do edifício.

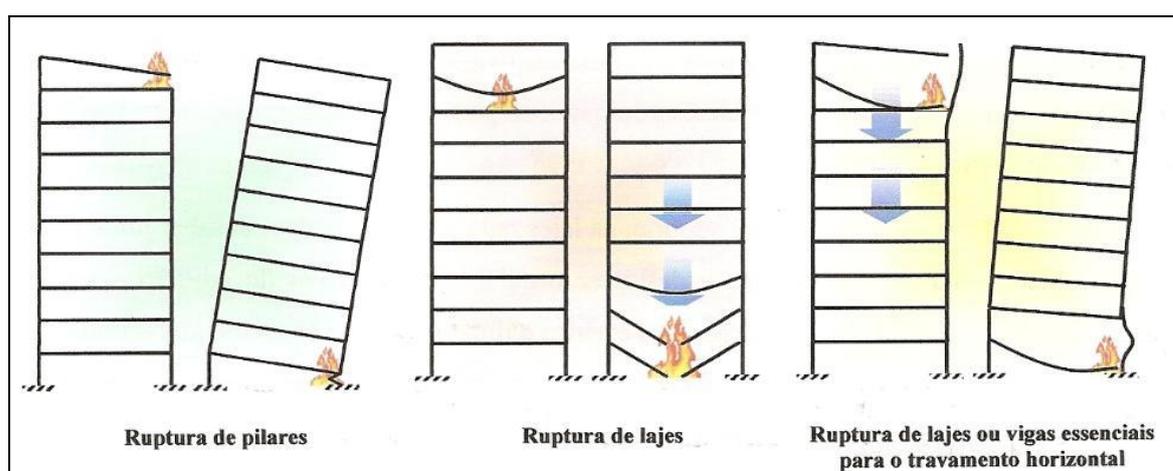


Figura 2.1: Efeito de colapsos localizados devido a um incêndio sobre um edifício (COSTA, 2007).

Um exemplo de colapso no qual o incêndio teve participação foi a queda das torres gêmeas do *World Trade Center*, em 2001. O impacto da aeronave enfraqueceu a estrutura e ocasionou a

perda da proteção térmica de diferentes elementos estruturais. A queima do combustível de aviação ocasionou uma elevação intensa da temperatura, afetando as estruturas remanescentes até que ocorreram colapsos localizados que levaram ao desabamento de alguns pavimentos. O impacto sobre os pavimentos subsequentes desencadeou o colapso progressivo (HAMBURGUER et al., 2002).



Figura 2.2: Colapso progressivo verificado nas torres do *World Trade Center* (SEITO et al., 2008).

São raros os casos de colapso global, especialmente de estruturas de concreto armado, que em geral apresentam bom comportamento ao incêndio. Mas, sob certas condições específicas, quando se utilizam concretos com porosidade muito baixa e que podem ter teores de umidade interna elevados, podem acontecer colapsos devido à perda de seção por *spalling* explosivo, como demonstram Lima (2005) e Kirchhoff (2010).

Esse tipo de comportamento foi reconhecido após a ocorrência de alguns incêndios de veículos em túneis, no *Mont Blanc* e no *Channel Tunnel*. Nesses casos, a ação de altas temperaturas, atuando sobre os revestimentos de concreto com baixa permeabilidade e grande umidade, com uma grande densidade de aço na linha média, causou danos de proporções significativas, devido ao deslocamento de grandes seções de concreto. Deslocamentos importantes também podem acontecer em lajes de pequena espessura, devido à dilatação da armadura, mesmo sem a contribuição da umidade. Nesses casos não se observam colapsos, mas a deterioração térmica é acentuada pela exposição da armadura.

Em alguns casos, os deslocamentos podem fazer com que se perca totalmente a seção de concreto. Isso é um efeito muito importante, pois alguns elementos estruturais, como as lajes e os pilares-parede, muitas vezes devem assumir uma relevante função de compartimentação durante um incêndio, para que se reduzam os danos. Nestes casos, estes elementos são responsáveis não só pela garantia da estabilidade, mas também pela estanqueidade e pelo isolamento térmico<sup>1</sup>. A perda do concreto permite a passagem de chamas e do ar quente, ocasionando a perda da compartimentação.

No estudo do comportamento de estruturas em situação de incêndio, três etapas são importantes: modelagem do incêndio, análise térmica e análise estrutural. A modelagem do incêndio, que é o objeto de estudo deste trabalho, busca simular a dinâmica desde a ignição até a propagação do fogo, e permite estimar a relação temperatura-tempo dos gases. A análise térmica visa obter a elevação da temperatura nos elementos estruturais, a partir da relação temperatura-tempo dos gases. A elevação da temperatura é importante para avaliação das mudanças nas propriedades dos materiais, que deverão ser utilizadas na análise estrutural (CALDAS, 2008).

As curvas de evolução de temperatura obtidas na modelagem do incêndio são fundamentais, portanto, para estimar o comportamento estrutural. Em última análise, para avaliar a capacidade de estruturas de resistir a incêndios, se busca justamente estimar qual o tempo de resistência ao fogo, real ou sob condições padronizadas de ensaio, como discutido a seguir.

---

<sup>1</sup> A estabilidade é a manutenção da capacidade de suporte do elemento estrutural durante o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) (NBR 14432:2001).

A estanqueidade é a capacidade do elemento de impedir a formação de rachaduras ou aberturas, através das quais possam passar chamas e gases quentes, capazes de ignizar um chumaço de algodão, para os compartimentos adjacentes (NBR 14432:2001).

O isolamento é a capacidade do elemento de impedir a ocorrência, na face que não está exposta ao incêndio, de incrementos de temperatura maiores que 140°C na média dos pontos de medida ou maiores que 180°C em qualquer ponto de medida (NBR 14432:2001).

As funções simultâneas de estanqueidade e isolamento compõem a função corta-fogo, essencial para confinar o incêndio a um compartimento, impedindo a propagação do sinistro para os compartimentos adjacentes (COSTA et al., 2005).

## 2.2 CURVA PADRÃO E TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

Segundo Costa (2007), a ação térmica no concreto armado, em condição de incêndio, é caracterizada pela redução das propriedades mecânicas e pela imposição de esforços adicionais devido ao impedimento das deformações de natureza térmica.

Na análise estrutural, a redução da resistência e do módulo de elasticidade em função da elevada temperatura é obtida por meio de fatores de redução, que atribuem um decréscimo das propriedades mecânicas para cada nível térmico. Por simplicidade, a forma segundo a qual a temperatura se eleva durante o incêndio é representada por meio de “curvas temperatura-tempo” ou, simplesmente, “curvas de incêndio”.

Essas curvas podem ser padronizadas (curva-padrão) ou parametrizadas pelas características do cenário do incêndio (curvas naturais) e a partir delas é possível calcular a máxima temperatura atingida pelos elementos estruturais e a correspondente capacidade resistente.

Com a finalidade de facilitar procedimentos de ensaios e projetos de estruturas, o incêndio foi padronizado por curvas nominais, representadas por uma equação simples ou tabelas, de aplicação direta e generalizada a qualquer compartimento, independente do cenário de incêndio. A principal característica desta família de curvas é a de possuir apenas um ramo ascendente, admitindo, portanto, que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo. As curvas-padrão ASTM E-119 e a ISO-834 são as curvas temperatura-tempo mais conhecidas internacionalmente, sendo normalmente empregadas na realização de testes de elementos construtivos e no dimensionamento de edifícios usuais (residenciais e/ou comerciais). Essas curvas relacionam o aumento da temperatura com o tempo, em compartimentos cuja carga de incêndio é composta por materiais celulósicos. Os métodos prescritivos de dimensionamento de estruturas, apresentados nas normas brasileiras NBR 14323:1999 e NBR 15200:2004 têm por base a curva padrão ISO-834.

A curva ISO-834 é derivada da expressão abaixo:

$$\theta_g - \theta_0 = 345 * \log_{10} (8t - 1) \quad (2.1)$$

onde:  $t$  = tempo (min);

$\theta_0$  = temperatura dos gases do ambiente, no instante  $t = 0$ , admitida normalmente como 20 °C;

$\theta_g$  = temperatura dos gases quentes no ambiente (°C).

Por sua vez, a curva ASTM E-119, similar à ISO, é apresentada por meio da tabela 2.1.

Tabela 2.1: Temperatura dos gases em função do tempo, curva ASTM E-119.

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
0	20
5	538
10	704
15	760
20	795
25	821
30	843
35	862
40	878
45	892
50	905
55	916
60	927
65	937
70	946
75	955
80	963
85	971
90	978
120	1010
240	1093
480	1260

(fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000)

A figura 2.3 apresenta as curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais.

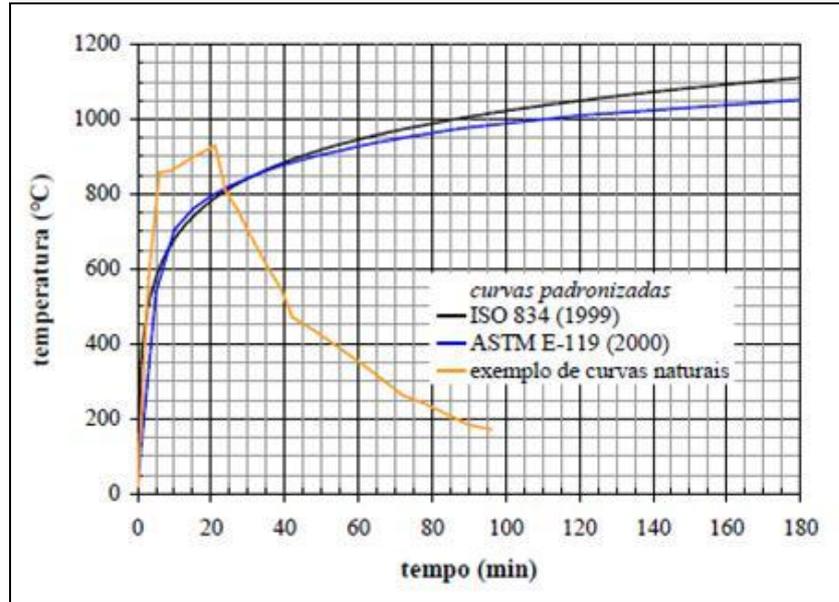


Figura 2.3: Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais (WALRAVEN, 1999).

No entanto, a severidade do incêndio depende das características geométricas e também do uso da edificação, variando conseqüentemente para cada caso.

As curvas-padrão não representam o comportamento real do incêndio em estruturas. São expressões padronizadas, difundidas e adotadas por vários códigos normativos, por questões práticas. Existem as curvas naturais que descrevem com mais realismo a evolução da temperatura do incêndio no ambiente, pois são parametrizadas por características do compartimento em chamas, tais como: grau de ventilação, características dos materiais combustíveis presentes no ambiente e características térmicas do material constituinte da compartimentação. Como pode ser visto na figura 2.4, além do ramo ascendente, essas curvas possuem também o ramo descendente que descreve a fase de resfriamento do incêndio (COSTA et al., 2002).

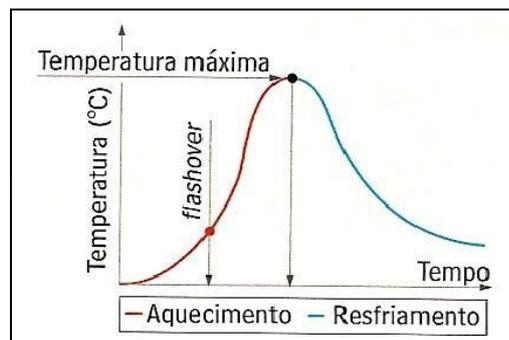


Figura 2.4: Temperatura no elemento estrutural para o modelo de incêndio natural (COSTA et al., 2005)

Diferentemente do que ocorre nos incêndios em ambientes abertos, em ambientes fechados a presença das paredes nas edificações, e principalmente do teto, tem o efeito de aumentar o calor radiante retornado para a superfície do material combustível. O desenvolvimento do incêndio em um ambiente fechado pode ser dividido em três fases:

- 1<sup>a</sup>) Ignição: início da inflamação, combustão de um primeiro item dentro do compartimento. Nessa fase o incêndio ainda é localizado e há uma grande variabilidade de temperatura no ambiente. O crescimento da temperatura é gradual, praticamente sem influência das características do compartimento (ventilação, materiais empregados, etc.) e sem risco de colapso estrutural. Esse estágio vai até o instante denominado *flashover*, onde a inflamação se torna generalizada. Se as medidas de proteção ativa forem eficientes, o fogo é extinto rapidamente e, portanto, não há necessidade de verificação estrutural (PURKISS, 1996);
- 2<sup>a</sup>) Aquecimento: há um aumento súbito na taxa de crescimento da temperatura. Todo material combustível no compartimento entra em combustão e a temperatura se torna praticamente uniforme no ambiente. Nessa fase, a extinção do incêndio é bastante improvável e as ações de combate se concentram em evitar que o fogo se alastre para os compartimentos e edificações adjacentes;
- 3<sup>a</sup>) Resfriamento: Após a extinção de todo o material combustível durante a fase de aquecimento, inicia-se uma redução gradual da temperatura.

É importante ressaltar que somente os modelos de incêndio natural permitem determinar a temperatura máxima atingida pelo elemento, para a qual ele deve ser dimensionado. Porém, o que ocorre na prática é o emprego da curva padrão com um tempo arbitrado para determinar a temperatura de dimensionamento, sendo esse o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

O TRRF é avaliado em função do risco de incêndio e das consequências que o mesmo pode vir a causar devido a uma falha estrutural. Este tempo está estabelecido em normas e códigos de acordo com a ocupação/uso a que se destina a edificação e à altura da mesma.

Não se deve confundir o TRRF com o tempo necessário para desocupação da edificação ou o tempo de combate ao fogo pela equipe de bombeiros, trata-se do tempo em que será atingida a máxima temperatura durante o incêndio. Todos os elementos estruturais devem seguir a um TRRF normatizado, mantendo suas capacidades de suporte às ações mecânicas para temperaturas associadas a este tempo.

### 2.3 INCÊNDIOS IMPORTANTES NO BRASIL E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Nas décadas de 70 e 80 do século passado houve grandes incêndios em edifícios altos e lojas de departamentos no Brasil.

O edifício Andraus, construído em São Paulo com 115m de altura e 32 andares, foi atingido, em fevereiro de 1972, por um incêndio que consumiu praticamente toda a sua estrutura, conforme pode ser observado na figura 2.5. A possível causa do incêndio teria sido uma sobrecarga no sistema elétrico. O fogo iniciou-se no segundo pavimento e consumiu o prédio, que reunia escritórios empresariais, deixando 16 mortos e 330 feridos.



Figura 2.5: Incêndio no Ed. Andraus, em São Paulo, 1972 (BOMBEIROS EMERGÊNCIA, 2009a).

Dois anos após o sinistro no edifício Andraus, em fevereiro de 1974, o edifício Joelma, também em São Paulo, foi palco de uma das maiores tragédias provocadas por incêndio no Brasil (figura 2.6). Um curto-circuito em um ar condicionado do 12º andar provocou um incêndio que se espalhou por todo o edifício, deixando 179 mortos e 300 feridos.



Figura 2.6: Incêndio no Ed. Joelma, em São Paulo, 1974 (BOMBEIROS EMERGÊNCIA, 2009b).

Em julho de 1978, um incêndio atingiu grande parte das instalações do Museu de Arte Moderna no Rio de Janeiro. Em setembro do mesmo ano outro incêndio destruiu parte do Conjunto Nacional, na avenida Paulista, em São Paulo.

Em fevereiro de 1981, outro edifício na avenida Paulista, o Grande Avenida, foi atingido por um incêndio (figura 2.7). O sinistro teve início na sobreloja do edifício, deixou 17 vítimas fatais e 53 feridos, destruindo todos os andares do prédio. A corrente de vento que subia da avenida Nove de Julho (pela parte de trás do prédio) funcionou como um verdadeiro fole, alimentando o fogo e fazendo com que todos os andares fossem consumidos pelo mesmo rapidamente (WIKIPÉDIA, 2009a).



Figura 2.7: Incêndio no Ed. Grande Avenida, em São Paulo, 1981 (WIKIPÉDIA, 2009a).

O incêndio nos edifícios da CESP foi um famoso episódio ocorrido na noite de 21 de maio de 1987 e que perdurou até o final da tarde do dia seguinte (figura 2.8). O fogo se iniciou por volta das 18h30 e atingiu praticamente todos os andares dos Edifícios "Sede 1" e "Sede 2" da companhia. Durante o incêndio, a parte central do edifício "Sede 2" ruiu, desabando como se estivesse sendo implodida e matando um funcionário da empresa. A parte da frente seria implodida dias depois. Há a suspeita, embora não confirmada, de que o incêndio teria sido criminoso.



Figura 2.8: Incêndio nos edifícios da CESP, em São Paulo, 1987 (Adaptado de COSTA, 2007 e REVISTA VEJA SÃO PAULO, 2009).

Analisando a história gaúcha também se encontram alguns incêndios que foram muito marcantes. A população que circulava pelo Centro de Porto Alegre na tarde de 27 de abril de 1976 parou para assistir, chocada, às cenas do maior incêndio que já atingiu a capital gaúcha.

O incêndio se propagou rapidamente e atingiu os sete andares do prédio das Lojas Renner, que ficaram tomados pelo fogo, como se pode ver na figura 2.9. O evento teve consequências trágicas, com 41 mortos e mais de 60 feridos.

O incêndio da Renner foi o maior e mais marcante na vida de Porto Alegre, mas não o primeiro de grandes proporções. Em 29 de dezembro de 1973, as chamas que consumiram as Lojas Americanas, na Rua da Praia, só não deixaram maior número de vítimas porque começaram no final de uma tarde de sábado, quando o local já estava fechando. Cinco pessoas morreram.



Figura 2.9: Incêndio no edifício das Lojas Renner, em Porto Alegre, 1976 (JORNAL ELETRÔNICO CPOVO.NET, 2009).

Em 17 de fevereiro de 1986, a cidade do Rio de Janeiro também viveu momentos de pânico e terror com a tragédia do edifício Andorinha, mostrado na figura 2.10, na qual foram registrados cerca de 50 feridos e confirmadas 21 mortes. Foi o maior incêndio, em vítimas, da história conhecida do Rio de Janeiro. A causa do incêndio foi uma sobrecarga de energia em um aparelho de ar-condicionado. As cenas do edifício Andorinha, transmitidas ao vivo pela televisão, chocaram o País.



Figura 2.10: Incêndio no Ed. Andorinhas, no Rio de Janeiro, 1986 (Adaptado de JORNAL ELETRÔNICO CONSELHEIRO X, 2008 e JB ONLINE, 2008).

Em outubro de 1988, um incêndio atingiu o Edifício Visconde de Itaboraí, onde funcionavam o Banco do Brasil e a Cacex, em Brasília. O fogo destruiu o segundo andar do prédio, tendo atingido até o quarto andar e provocado a morte de uma pessoa. Segundo os peritos da polícia, o incêndio foi criminoso. Ainda em 1988, outro incêndio em Brasília, atinge o Ministério da Habitação e Bem-Estar Social.

Esses eventos marcaram a evolução da preocupação com a segurança contra incêndios nas edificações. Foram incêndios que mataram centenas de pessoas, causaram danos materiais consideráveis e geraram uma fobia coletiva em relação a incêndios em edificações altas. A preocupação se incrementou pela divulgação de outros incêndios de grande impacto que ocorreram pelo mundo, conforme indicado nas figuras 2.11 a 2.14.



Figura 2.11: Colapso parcial de um depósito devido ao incêndio, em Ghent – Bélgica, 1973 (FELLINGER & BREUNESSE, 2005).



Figura 2.12: Colapso parcial do Ronan Point, em Londres - UK, 1978 (PEARSON & DELATTE, 2005).



Figura 2.13: Colapso parcial da loja de departamentos Katrantzos Sport, Atenas - Grécia, 1980 (BEITEL & IWANKIW, 2002).



Figura 2.14: Incêndio durante partida de futebol no Estádio de Bradford, deixou 52 mortos e mais de 200 feridos, Inglaterra, 1980 (CUNHA, 2008).

Embora a preocupação com a segurança das edificações em situação de incêndio tenha aumentado, estimulando a multiplicação das pesquisas associadas ao tema, nas últimas duas

décadas continuaram a ocorrer sinistros de bastante importância, que merecem ser destacados. As figuras 2.15 a 2.22 ilustram algumas destas situações.



Figura 2.15: Ruínas do depósito das lojas Zêlo, colapso total por ocasião do incêndio, Barueri-SP, 1994 (COSTA, 2002).

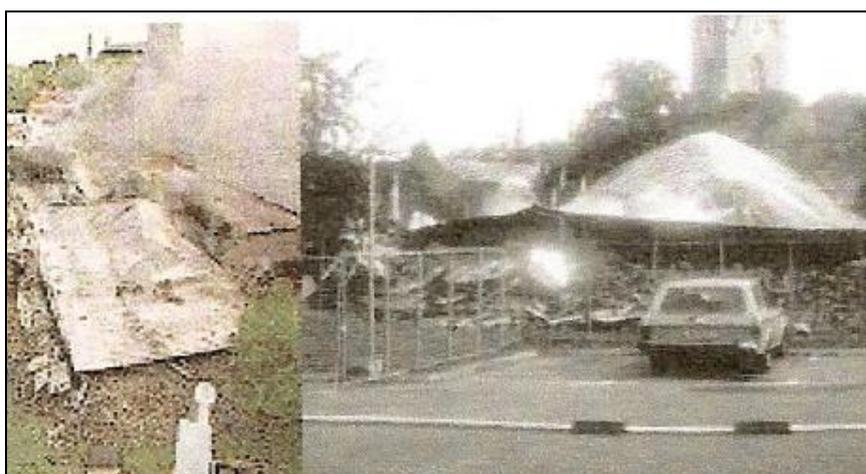


Figura 2.16: Colapso total da Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996 (CULLHED, 2003).



Figura 2.17: Colapso total de fábrica de roupas em Alexandria - Egito, 2000 (BBC News, 2000).



Figura 2.18: Colapso total de um edifício residencial em São Petersburgo - Rússia, 2002 (BBC News, 2002).



Figura 2.19: Incêndio no Edifício da Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2004 (Adaptado de AGUIAR, 2004 e PORTAL DO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2004).



Figura 2.20: Incêndio na Torre Windsor em Madri - Espanha, 2005 (Adaptado de COSTA, 2007 e SILVA, 2009).



Figura 2.21: Incêndio no Shopping Total, Porto Alegre, 2007 (Fonte: Arquivo Corpo de Bombeiros de Porto Alegre 1º CRB).



Figura 2.22: Incêndio na Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Delft, Holanda, 2008 (Adaptado de BLOGSPOT, 2008 e GORGULHO, 2007).

## 2.4 INVESTIGAÇÃO DE INCÊNDIOS ATRAVÉS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A difração de raios-X está entre as técnicas mais utilizadas para monitorar as modificações da microestrutura da pasta cimentícia, pois permite a identificação direta dos cristais presentes, possibilitando acompanhar as mudanças que ocorrem com os elementos à medida que as amostras são submetidas a diferentes níveis de temperatura.

O ensaio está baseado no fenômeno físico da difração, que ocorre devido à diferença de fase entre duas ou mais ondas que percorrem caminhos ópticos diferentes. Os fótons de raios-X, ao incidirem em um cristal, são difratados por uma rede cristalina e, posteriormente, captados e processados por circuitos eletrônicos, sendo o sinal resultante plotado em um gráfico, cujos eixos coordenados são a intensidade da radiação difratada e o ângulo de difração. Este gráfico, chamado difratograma, irá possibilitar a identificação dos cristais presentes no material, pois cada fase produz um difratograma típico, sendo a intensidade de cada pico proporcional à concentração dos respectivos cristais na mistura (STUTZMAN, 1996 apud LIMA, 2005).

As considerações feitas a partir da análise dos difratogramas podem ser muito úteis durante a perícia de estruturas sinistradas, pois permitem que se faça uma avaliação representativa das condições remanescentes da estrutura de modo que se tenha uma estimativa da temperatura máxima atingida durante o incêndio a partir de pequenas amostras de concreto, coletadas em diversos locais da edificação.

Durante o processo de aquecimento as partículas hidratadas sofrem transformações químicas que provocam a formação de novos compostos, daí a importância do monitoramento destas transformações.

A figura 2.23 mostra um gráfico com a evolução das fases cristalinas, durante o processo de aquecimento, de cimentos com teor normal de  $C_3A$ . A análise deste gráfico, feita a seguir, se deu com base nas considerações feitas por Lima (2005).

Observando a figura, percebe-se que o silicato de cálcio hidratado desaparece progressivamente até a temperatura de  $400^{\circ}C$ . A descalcificação do C-S-H acarreta a produção de CaO, que reagindo com o  $CO_2$  presente na atmosfera, produz calcita. Já quando a fração cristalina do gel de C-S-H desaparece, o que ocorre em torno dos  $400^{\circ}C$ , se forma a

larnita. Em resumo, conforme Chana e Price (2003), apud Lima (2005), o gel de C-S-H sofre um processo de desidratação, que se inicia em 100°C e termina próximo a 400°C. Durante o mesmo, ocorre liberação de água e, em alguns casos, formação de silicatos anidros e óxido de cálcio.

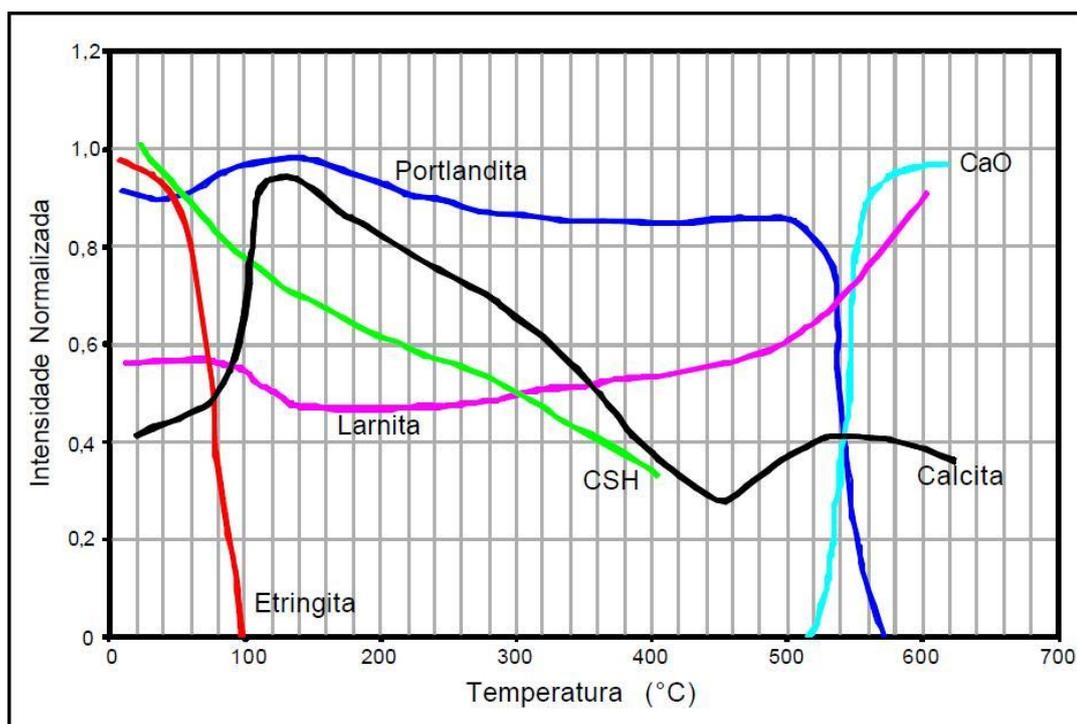


Figura 2.23: Evolução das fases cristalinas de cimentos durante o aquecimento: teor normal de C<sub>3</sub>A (CASTELLOTE et al., 2003 apud LIMA, 2005)

Em relação à portlandita, verifica-se que a quantidade inicialmente existente decresce até a temperatura de 100°C, devido à rápida carbonatação do pó, ocorrendo um correspondente acréscimo de calcita. Ao atingir a temperatura de 530°C, instantaneamente a portlandita se decompõe, pela perda de água, transformando-se em CaO.

No caso da etringita, esta perde água e vai se decompondo com o aumento da temperatura. Segundo Lima (2005), nenhuma fase cristalina contendo sulfato é detectada em temperaturas superiores a 100°C.

Essas mudanças foram consolidadas pela equipe do LEME numa metodologia de análise de estruturas termicamente deterioradas, descrita por Lima (2005), que será usada nesse trabalho. Lima (2005) explica que a escolha dos compostos a acompanhar foi baseada na sua potencialidade de atuar como indicadores do nível de degradação térmica, buscando

estabelecer correlações que permitissem estimar a temperatura alcançada durante um incêndio. Como base de referência para estimativa das temperaturas máximas atingidas durante o incêndio na estrutura sinistrada serão utilizados os difratogramas obtidos em ensaios de pastas de cimento com resistência convencional realizados por Lima (2005), em sua tese de doutorado, que foram compilados e mostrados na figura 2.24.

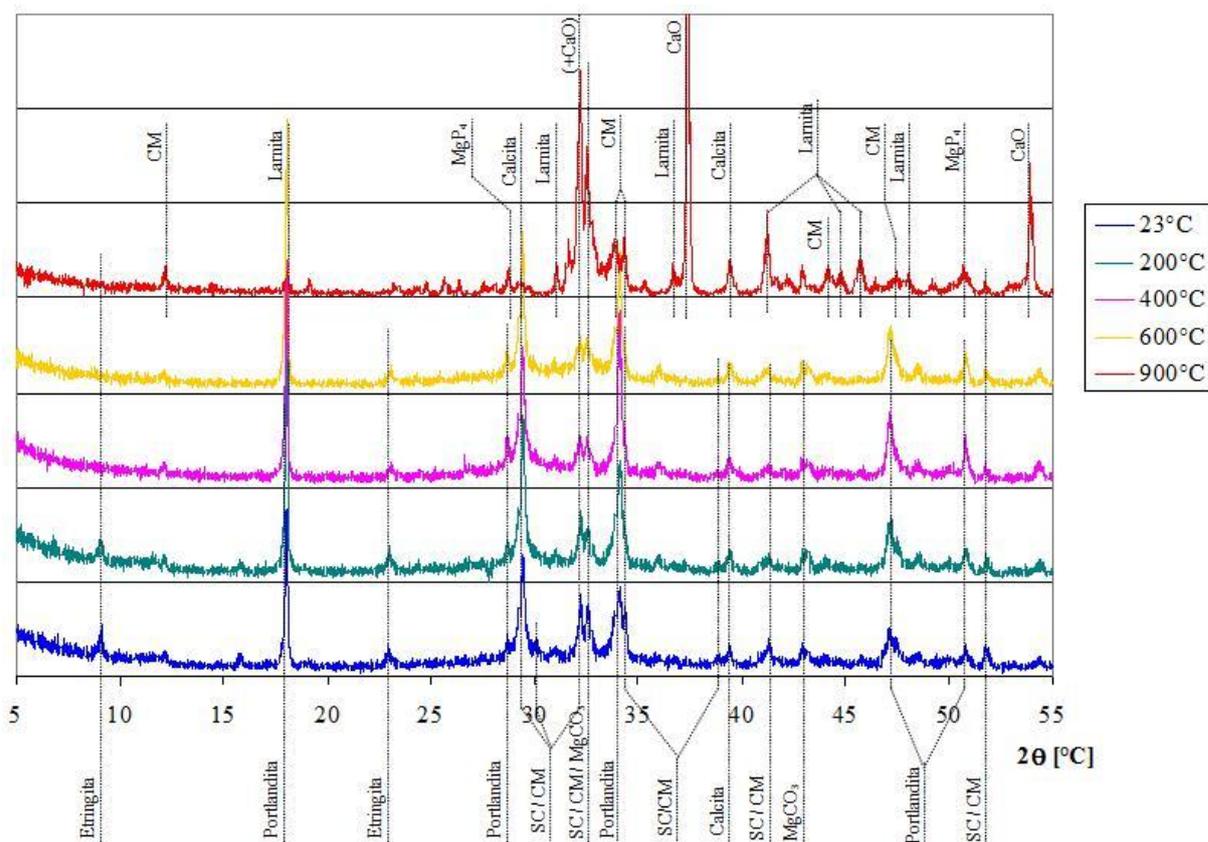


Figura 2.24: Difratograma de ensaios realizados em pastas de cimento de resistência convencional (LIMA, 2005)

Como se pode observar na figura, o pico correspondente à etringita só é visível em amostras aquecidas até 200°C. Conforme indicado na literatura, a etringita é estável à temperatura ambiente, mas perde água durante o aquecimento e se decompõe. Castellote et al. (2003 apud LIMA, 2005) comentam que a desidratação começa a ocorrer a 100°C. Entretanto, Lima (2005) verificou que o difratograma de amostras aquecidas a 200°C ainda mostrava sinais da presença de etringita. No entanto, nenhuma das amostras coletadas submetidas a patamares de temperatura acima dos 200°C mostrou sinais significativos de presença de etringita, indicando que a deterioração desse composto nestes níveis de aquecimento é praticamente completa.

Já nos difratogramas das amostras expostas até 400°C, a portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) se apresenta estável. Observa-se o início da sua transformação em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) nas amostras expostas a 600°C, ocorrendo seu completo desaparecimento nos difratogramas de 900°C. Segundo Lima (2005), isto se explica pelo fato de que a decomposição por desidratação deste composto se inicia em torno de 530°C.

Confirmando as expectativas sugeridas por Castellote et al. (2003 apud LIMA, 2005), a larnita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) foi encontrada nos difratogramas de todas as temperaturas. Verificou-se, conforme esperado, que o aquecimento tende a aumentar a intensidade dos picos deste composto. Lima (2005) acredita que a variação na intensidade do pico deste composto possa ser utilizada para identificar amostras aquecidas a temperaturas superiores a 600°C, desde que se obtenham amostras do mesmo material que não foram aquecidas.

Um dos indicadores mais interessantes apontados por Lima (2005) consiste na substituição do pico de portlandita por um pico menor de larnita para um ângulo de cerca de 18.08°.

É possível verificar a presença de compostos de silicatos de cálcio e magnésio (SC/SM) em todas as amostras, provavelmente oriundos da abundante fase de silicatos hidratados (C-S-H). Esses apresentam composição variável e se mantêm estáveis nas análises de amostras aquecidas até 600°C. Com o aumento da temperatura percebe-se um aumento gradativo desses picos, tanto em intensidade como em quantidade.

O óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) é outra fase cristalina característica, normalmente ausente ou em baixíssima quantidade à temperatura ambiente, porém sempre presente nos difratogramas das amostras submetidas a mais de 600°C. Este óxido se forma a partir da decomposição da portlandita e da calcita.

A presença da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) é verificada em todas as temperaturas, embora nos níveis mais baixos seus picos estejam sobrepostos aos picos dos silicatos de cálcio e magnésio. Em torno de 800°C, a calcita se decompõe em  $\text{CaO}$  e  $\text{CO}_2$ , que pode ser liberado em forma de gás. Aparentemente, entretanto, o gás carbônico se recombina, ocupando as valências deixadas pela desidratação dos silicatos. Então, formam-se carbonatos, que se tornam uma característica marcante das amostras aquecidas a 900°C.

De acordo com Lima (2005) é possível, ainda, inferir que difratogramas contendo picos cristalinos de óxido de cálcio com grande intensidade relativa indicam que a amostra

analisada atingiu no mínimo 600°C. Já difratogramas com quantidades muito baixas de calcita indicam que a temperatura alcançada pelo material analisado superou 800°C. A presença de picos de carbonato espalhados pelo difratograma também indica aquecimento a temperatura de cerca de 900°C e a presença de etringita indica aquecimentos suaves, abaixo de 200°C.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No item 2.3 foi visto que, embora raros, os incêndios de fato podem representar um risco para as estruturas civis. As prescrições adotadas nos projetos estruturais atuais que tratam da segurança ao fogo, segundo o enfoque tradicional, têm por base o fato de que as altas temperaturas decorrentes de um incêndio reduzem a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos elementos estruturais da edificação, e, adicionalmente, promovem deformações térmicas, podendo levar à ruína da estrutura. Para a verificação da segurança estrutural em situação de incêndio, deve-se conhecer a exigência de resistência ao fogo para cada tipo de edificação, de acordo com as normas vigentes no país.

As Normas Brasileiras que tratam da segurança estrutural frente ao fogo são: NBR 15200:2004 "Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio", NBR 14323:1999 "Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio - Procedimento" e NBR 14432:2001 "Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento".

O desempenho requerido para os elementos estruturais (concreto, aço, madeira, alvenaria estrutural, etc.) ou de compartimentação prescritos na NBR 14432:2001 visa reduzir a probabilidade de colapso estrutural, facilitando o rápido acesso do Corpo de Bombeiros e permitindo a retirada dos ocupantes em condições de segurança, além de reduzir os danos às propriedades vizinhas.

Ressalta-se que a aplicação plena das prescrições da engenharia de segurança contra incêndio já se iniciou no Brasil, justamente devido ao avanço das normas citadas. Elas permitem, além do caminho tradicional que emprega cartas de cobertura de materiais de revestimento contra fogo em estruturas de aço ou tabelas de dimensões mínimas de elementos de concreto, o emprego de métodos simplificados e avançados de análise térmica e estrutural, bem como a

aplicação da dinâmica de incêndio na modelagem de diferentes cenários de incêndio e da análise de risco (CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO, 2009).

A simulação computacional das situações de incêndio permite compreender como os aspectos estruturais, ambientais e de materiais utilizados no processo construtivo influenciam no desenvolvimento do fogo, favorecendo a melhoria da elaboração das normas técnicas, a preservação do meio ambiente e um maior controle dos materiais empregados na construção civil (ALVES et al., 2008). A idéia desse trabalho é justamente investigar a potencialidade dessas ferramentas, descritas em maior detalhe no capítulo 3.

### **3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO**

Um modelo numérico de incêndio é uma ferramenta que simula os eventos que acontecem durante o sinistro, desde a combustão à evacuação das pessoas, passando pelo colapso eventual da estrutura (não apenas o desenvolvimento do fogo e o transporte da fumaça). Os modelos podem ser divididos em modelos experimentais e modelos matemáticos: os experimentais são aqueles que operam no espaço físico, já os matemáticos são caracterizados por um conjunto de equações que descrevem o evento relacionado com o incêndio.

Devido à complexidade destas equações e a necessidade de um grande número de iterações para obtenção de resultados precisos, torna-se necessário utilizar o recurso dos computadores. A modelagem computacional de incêndios pode utilizar dois métodos: o probabilístico e o determinístico (KARLSSON e QUINTIERE, 2000).

Os modelos estatísticos, obtidos através do método probabilístico, não se baseiam diretamente nas leis da física, da termodinâmica e da química, mas sim, em previsões estatísticas sobre a transição de um estágio para outro do desenvolvimento do incêndio. Envolve a distribuição de probabilidades de determinados eventos ocorrerem a partir de um cenário específico. As probabilidades de evolução do fogo de uma fase para outra são determinadas a partir do conhecimento de dados experimentais e de dados estatísticos de ocorrências reais. Já os modelos deterministas, obtidos através do método determinístico, são baseados nos princípios físicos e químicos sobre a natureza do incêndio.

Os softwares para dimensionamento em situação de incêndio não são mais do que ferramentas desenvolvidas para a resolução dessas equações matemáticas, quer determinísticas, quer estatísticas. Em função do campo de aplicação do software pode-se dividi-los em: modelos térmicos em situação de incêndio, modelos de resistência ao fogo de estruturas, modelos de evacuação de pessoas, softwares de análise da resposta dos sistemas de segurança e diversos.

O presente trabalho envolve o estudo apenas de softwares relacionados com o comportamento térmico da estrutura em situação de incêndio.

### 3.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A simulação computacional de incêndio é uma ferramenta de grande importância e muito atual para o conhecimento da dinâmica do fogo nas edificações, assim como dos efeitos causados pela elevação da temperatura. Na busca pela determinação da origem de um incêndio, frequentemente é preciso realizar testes e ensaios que permitam determinar o cenário mais provável. Através da modelagem computacional é possível comparar o evento real com a simulação de várias causas e cenários diferentes. Por meio dela, pode-se também contribuir sobremaneira para a minimização dos danos provocados pelo incêndio antes mesmo de sua ocorrência.

Através da simulação é possível verificar as condições a que um local pode ter sido submetido quando da ocorrência de um incêndio, calculando dados importantes como: temperatura, concentração de gases (como oxigênio e monóxido de carbono), tempo para acionamento dos detectores de fumaça e calor e dos sprinklers, tempo de queima, entre outros.

Segundo Braga et al. (2008), embora todo o embasamento físico e matemático das leis de conservação que governam a transferência de calor, dinâmica de fluidos e combustão já ser conhecido há mais de um século, foi apenas recentemente que a modelagem numérica de incêndio começou a ser possível. Surgiu, então, uma nova realidade na área de investigação de incêndio, tornando possível simular situações que poderiam realmente ter acontecido, em comparação com as evidências físicas encontradas no incêndio real.

Os softwares mais comuns para dimensionamento em situação de incêndio descrevem a forma como se desenvolve o transporte de calor e de fumaça no incêndio. Nestes casos, são empregadas duas classes de modelagem computacional: modelos de camadas (ou duas zonas) e modelos de campos (ou CFD- computational fluid dynamics).

O primeiro modelo de grande aplicabilidade, devido à sua simplicidade física e computacional, foi o modelo de duas camadas. Trata-se de um modelo para simulação de incêndio em ambientes construídos e divide o espaço em duas camadas: uma superior mais quente e uma inferior mais fria (ver figura 3.1).

Considera-se, neste caso, que as camadas são uniformes, uma vez que as diferenças na própria camada são desprezíveis quando comparadas com as diferenças que existem entre as duas camadas. Este modelo permite o cálculo de distribuição de fumaça, bem como altura da

camada de fumaça e a sua temperatura através dos compartimentos de uma edificação durante um incêndio (JONES et al., 2005). Como exemplos de ferramentas computacionais utilizadas para realizar este cálculo pode-se destacar o CFAST (desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology - NIST) e o ARGOS (desenvolvido pelo Danish Institute of Fire and Security Technology – DBI).

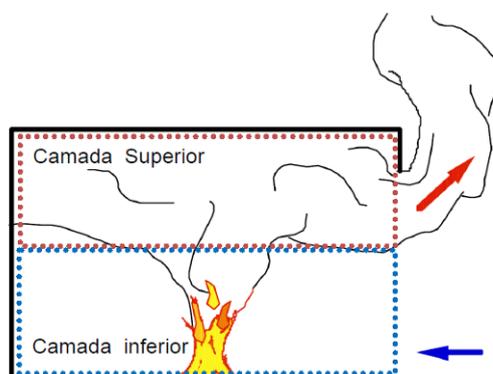


Figura 3.1: Modelo de Duas Camadas (FORNEY, 2005).

Recentemente foram introduzidos os modelos de campo, que representam a tecnologia de ponta no que diz respeito à segurança em situação de incêndio, baseados em dinâmica computacional de fluidos (CFD). Essa técnica é adotada em diversas áreas da engenharia e é baseada na solução completa, tridimensional e dependente do tempo das equações fundamentais de conservação de massa, de energia e de momento (KARLSSON e QUINTIERE, 2000). O uso de modelos CFD permite descrever incêndios em geometrias complexas e incorporar uma grande variedade de fenômenos físicos (McGRATTAN, 2006).

Estes modelos se utilizam das equações de conservação das massas, espécies, momento e energia, e o ambiente incendiado é dividido em sub-volumes (figura 3.2). As equações de conservação são aplicadas a cada célula. Neste modelo a conservação de momento é explicitamente imposta, dessa forma, variáveis adicionais (as componentes da tensão viscosa devido ao escoamento do fluido) surgem no conjunto de equações. A substituição destas na equação de conservação de momento (segunda lei de Newton aplicada ao escoamento do fluido) resulta nas conhecidas equações de Navier-Stokes e a solução destas é central para qualquer algoritmo de CFD (ANDERSON, TANNEHILL e PLETCHER, 1984).

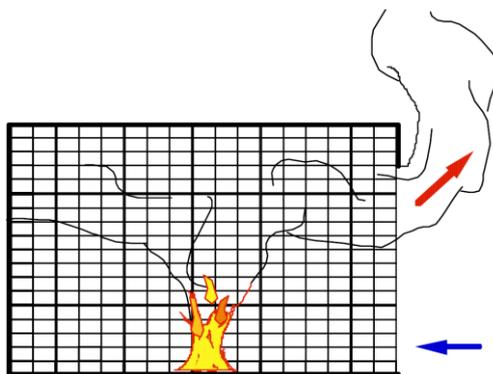


Figura 3.2: Modelo de Campo (FORNEY, 2005).

Os dados de entrada, normalmente, são a geometria do compartimento, os materiais, número e tamanho de aberturas, características do mobiliário do compartimento e a taxa de liberação de calor. Os resultados obtidos com estes softwares são, principalmente, o tempo para ocorrência do *flashover*, a temperatura nas células e a espessura da camada de fumaça.

A resolução dos modelos CFD é demorada e a sua duração é importante, pois o tempo de cálculo dos modelos aumenta à medida que aumenta a quantidade de sub-volumes. Alguns dos parâmetros são assumidos, os modelos CFD têm de ser validados antes que se possa generalizar seu uso.

Como exemplo de programas que utilizam este tipo de modelo pode-se destacar o Fire Dynamics Simulator (FDS), também desenvolvido pelo NIST, e o Smartfire, desenvolvido pela Universidade de Greenwich.

### 3.2 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS NO ESTUDO

Dentre os softwares conhecidos para simular incêndios computacionalmente, um dos mais utilizados, devido à sua precisão, é o Fire Dynamics Simulator (FDS), desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology).

O FDS, utilizado sempre em conjunto com o Smokeview e opcionalmente com o Pyrosim, é um software livre e vem sendo empregado de forma crescente no auxílio de perícias pelo Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF). Estudos a respeito do software vêm sendo desenvolvidos em parceria entre o LEME e o CBMDF. Embora o uso desta tecnologia ainda seja recente, principalmente no Brasil, ela vem se desenvolvendo muito rapidamente.

O número crescente de pesquisas sobre o comportamento dos diversos materiais quando expostos a elevadas temperaturas e suas propriedades térmicas permitirão criar modelos computacionais cada vez mais precisos; facilitando, sobremaneira, o estudo das situações reais de incêndio, melhorando a prevenção e atualizando as normas de proteção contra incêndio.

### 3.2.1 Fire Dynamic Simulator - FDS

O FDS é um modelador de incêndio com base em dinâmica computacional de fluidos (CFD). Ele resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriada para baixa velocidade (REHM e BAUM, 1978), com fluxo termicamente dirigido e com ênfase no transporte de calor e fumaça dos incêndios. Este tipo de programa permite que sejam avaliados a dinâmica de um incêndio e o movimento da fumaça por meio de informações sobre temperatura, densidade, pressão, velocidade e composição química em cada célula (MCGRATTAN, 2006).

Estando já na sua quinta versão, o FDS vem se consolidando como uma ferramenta poderosa para a investigação de incêndios. Desde 1999, ele vem sendo utilizado em alguns casos de grande repercussão nos Estados Unidos para avaliar a dinâmica do incêndio, como nos ocorridos em *Cherry Road/DC*, que vitimou dois bombeiros (MADRZYKOWSKI e VETTORI, 1999) e na boate *Station Nightclub*, onde mais de cem pessoas morreram e duzentas ficaram feridas (GROSSHANDLER et al., 2005).

A entrada de dados no FDS se dá por meio de arquivos de texto (figura 3.3). No entanto, já existem softwares, produzidos por terceiros, que facilitam a entrada de dados no FDS permitindo a importação de arquivos de CAD.

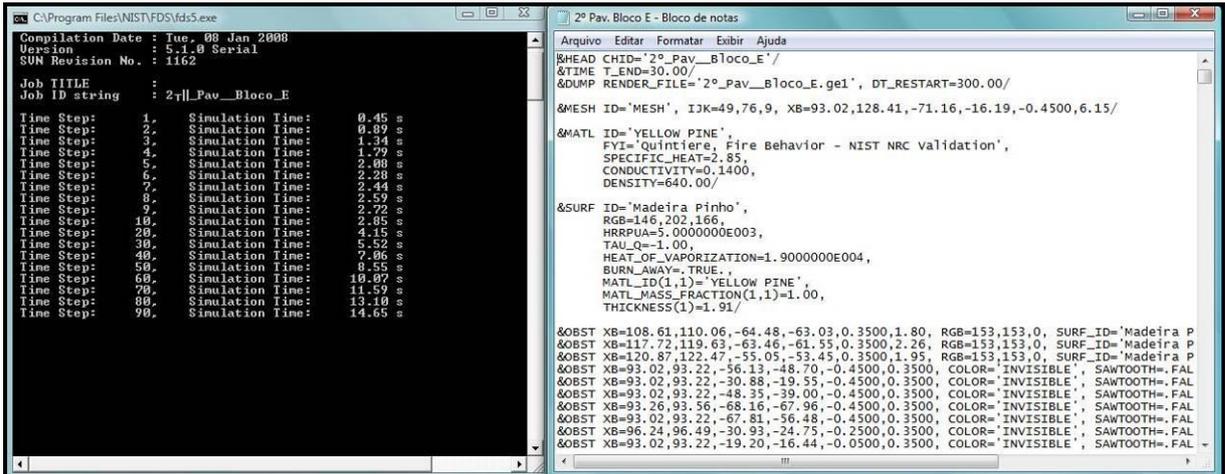


Figura 3.3: Tela de processamento do FDS (à esquerda) e exemplo de arquivo de entrada de dados (à direita).

### 3.2.2 Smokeview

O Smokeview, também do NIST, é o programa que permite visualizar em três dimensões (figura 3.4) os resultados obtidos pelos cálculos do FDS.

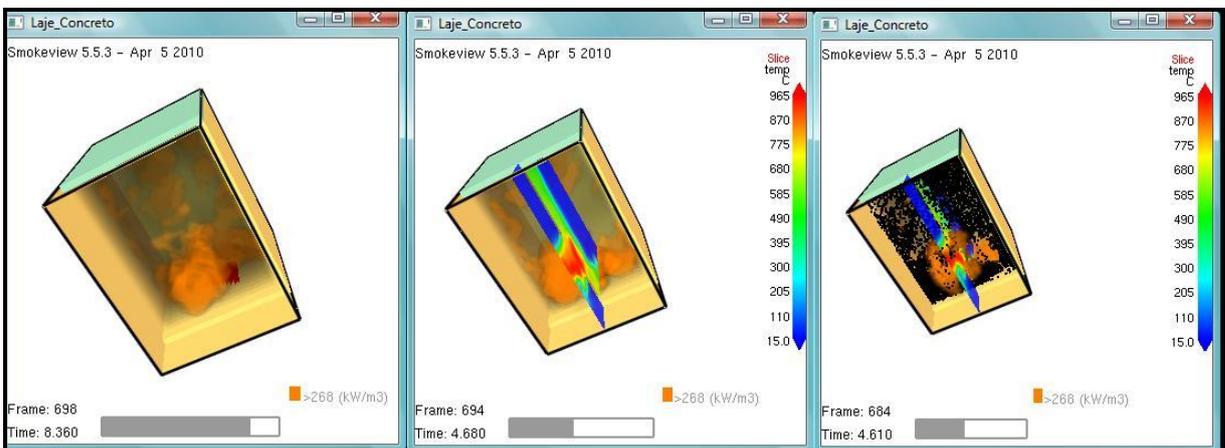


Figura 3.4: Exemplos de visualização no Smokeview.

É importante mencionar que os dois programas (FDS e Smokeview) são gratuitos, livres e de código aberto; permitindo sua adaptação à realidade brasileira, inserindo padrões de materiais para construção adequados ao local de implantação da edificação.

### 3.2.3 Pyrosim

O Pyrosim, desenvolvido pela Thunderhead Engineering, fornece uma interface gráfica (figura 3.5) ao usuário para inserir tanto a geometria do ambiente a ser simulado, como todos os demais dados de entrada necessários para a simulação (carga de incêndio, propriedades dos materiais e critérios adotados).

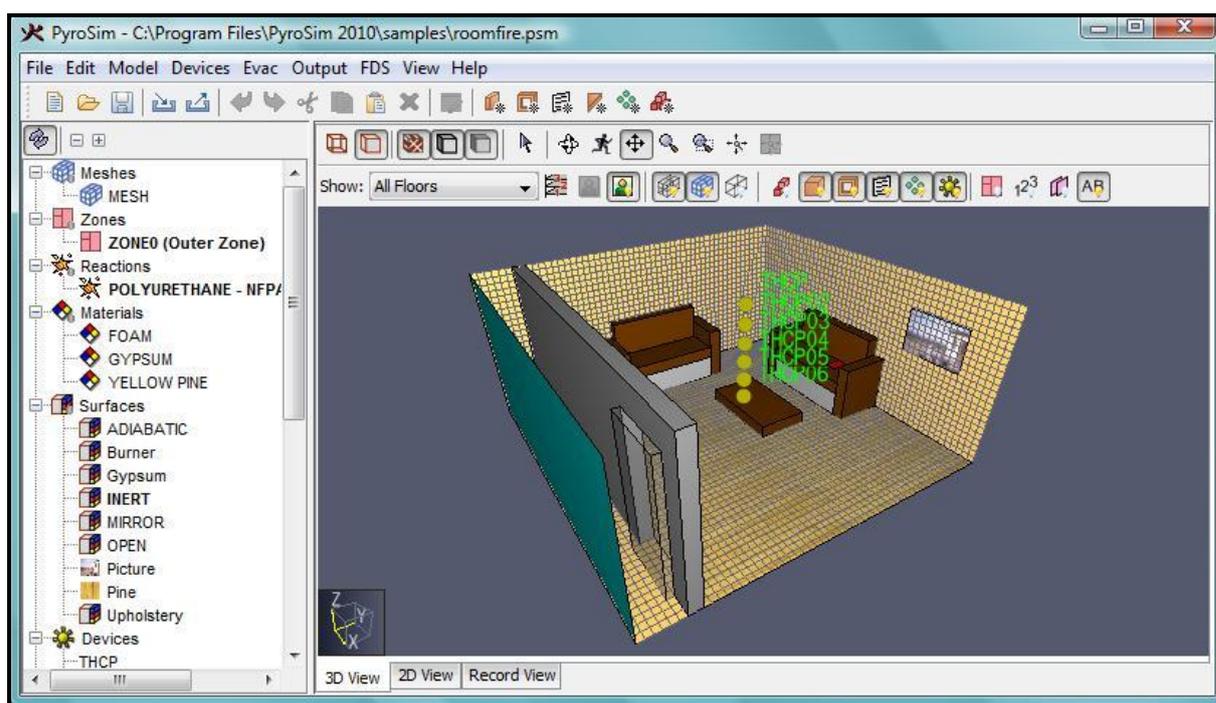


Figura 3.5: Interface gráfica do Pyrosim.

O software permite ainda a importação de arquivos DXF do AutoCad e integra a execução do FDS e Smokeview (é possível rodar o FDS a partir do próprio Pyrosim, não sendo necessária a prévia geração dos arquivos de texto).

### 3.2.4 Revisão de alguns estudos realizados com o FDS

Segundo Braga et al. (2008), atualmente, no Brasil, está começando a se utilizar o FDS e o Smokeview como ferramentas de auxílio à perícia.

Um exemplo interessante envolveu a simulação do incêndio ocorrido em um barraco de madeira no Distrito Federal. O modelo desenvolvido (figura 3.6) foi concebido levando em

consideração a geometria da construção e as propriedades térmicas dos materiais utilizados, permitindo visualizar como pode ter ocorrido o incêndio. O modelo computacional foi comparado com as marcas de queima encontradas na cena do incêndio, sendo que as marcas apresentadas no incêndio real ficaram extremamente próximas às verificadas no caso do cenário com a fonte de calor próxima ao berço (figura 3.7).

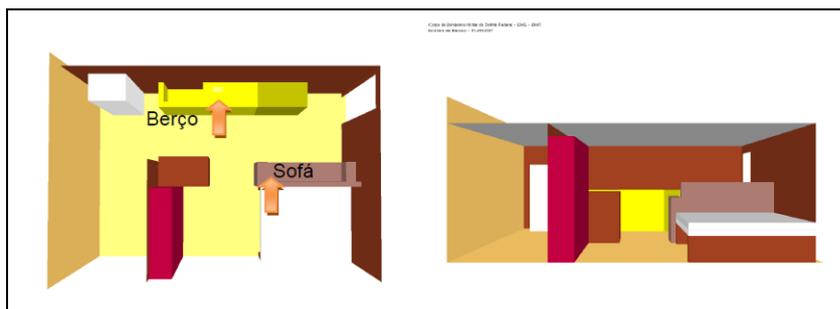


Figura 3.6: Desenho esquemático do barraco, mostrando os possíveis focos (setas na figura à esquerda (vista superior), enquanto à direita é possível visualizar a vista lateral do barraco (BRAGA, 2008).

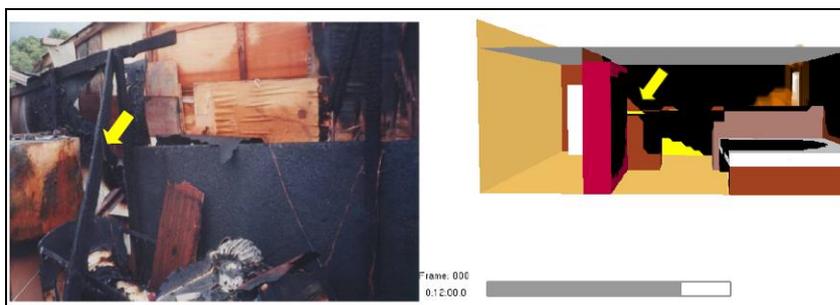


Figura 3.7: Marcas de queima com seta amarela mostrando a mesma posição no local real do incêndio e na simulação computacional (BRAGA, 2008).

Foi possível verificar também que, quando ocorreu a generalização do incêndio, a temperatura pode ter alcançado mais de 1000°C em grande parte do ambiente em um período inferior a dez minutos, conforme figura 3.8.

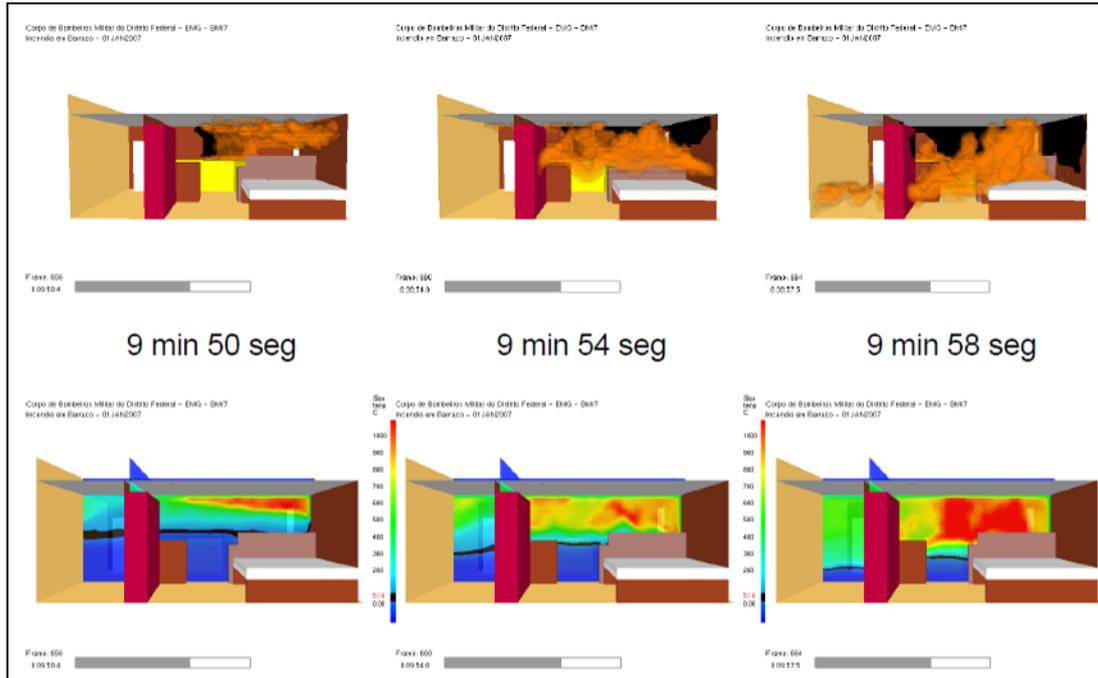


Figura 3.8: Momento em que ocorre a generalização do incêndio (*flashover*), incluindo gráfico da temperatura (BRAGA, 2008).

A sequência da figura 3.8 mostra o modelo de incêndio apresentado no barraco em questão sob dois aspectos de observação. Enquanto a superior mostra o comportamento das chamas, a inferior mostra as temperaturas atingidas no ambiente no mesmo tempo avaliado.

Rodrigues (2009) utilizou o FDS para estudar a eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre as janelas e por implantação de projeções horizontais como continuidade dos pisos. Além das simulações no FDS, onde foram analisados cenários desenvolvidos conforme as exigências normativas nacionais, foram realizados ensaios de campo em escala reduzida para comparação dos resultados obtidos (figura 3.9).

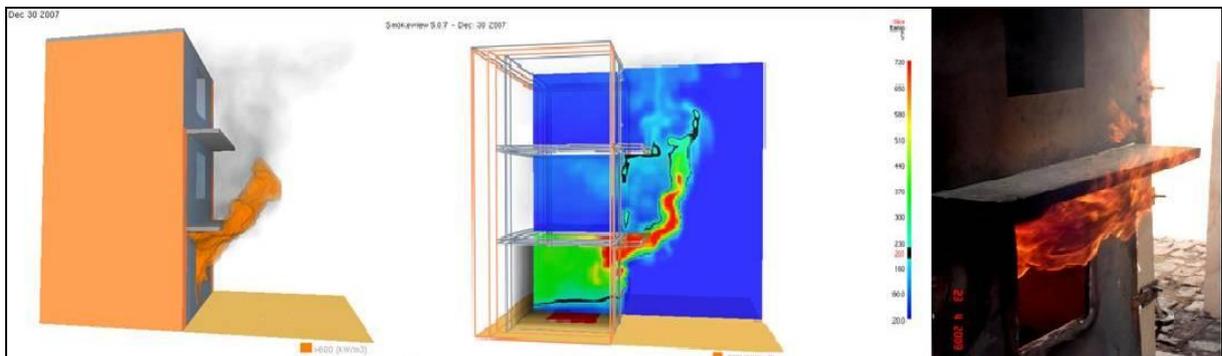


Figura 3.9: Simulação no FDS e ensaio experimental no estudo da compartimentação vertical (RODRIGUES, 2009).

## 4. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO ANALISADO: O SINISTRO DO SHOPPING TOTAL EM PORTO ALEGRE

O Shopping Total é um shopping center localizado no bairro Floresta, em Porto Alegre (figura 4.1). Integrado ao conjunto de prédios tombados da antiga cervejaria Brahma, foi inaugurado em 29 de maio de 2003 e disponibiliza hoje mais de 500 lojas, por onde circulam em torno de 850.000 pessoas/mês (WIKIPÉDIA, 2009b).



Figura 4.1: Vista aérea da área do Shopping Total, Porto Alegre.  
(Fonte: SHOPPING TOTAL, 2009).

### 4.1 O INCÊNDIO

Por volta das 23 horas do dia 20 de Julho de 2007, se iniciou o incêndio no principal prédio do Shopping Total, o edifício 7. Este é o maior dos prédios do complexo, compreendendo dois andares de loja e dois andares de estacionamento.

O fogo teve início em uma loja de brinquedos, a Loja França, localizada no segundo andar do prédio (figura 4.2), que ficou parcialmente destruído, como pode ser visto na figura 4.3.

Segundo informações dos brigadistas de incêndio do shopping, o foco de incêndio se localizava em uma gôndola de brinquedos no meio da Loja França. Ao localizar o foco, os brigadistas adentraram no local com extintores, quebrando a porta de vidro, momento em que o fogo foi alimentado pelo oxigênio vindo do ambiente externo, e se alastrando pelo interior da loja. A carga de incêndio existente na Loja França, com grande quantidade de brinquedos de plástico, que emite fumaça tóxica e produz grande quantidade de calor, aliada à queda do mezanino da loja, dificultando que a água atingisse o fogo diretamente, foram motivos que retardaram a extinção do incêndio.



Figura 4.2: Esquema do 2º pavimento do shopping, indicando o local do foco do incêndio.



Figura 4.3: Vista interna do 2º pavimento durante e após o incêndio.  
(Fonte: Arquivo Corpo de Bombeiros de Porto Alegre 1º CRB).

O desenvolvimento do incêndio provocou rachaduras extensas na estrutura, formada por um conjunto aporticado de pilares e vigas principais pré-moldadas, vigas secundárias e lajes moldadas *in loco* e vedação com blocos de concreto vazados. As chamas, com mais de cinco metros de altura, saíam de vários pontos do prédio. Ver figuras 4.4 e 4.5.



Figura 4.4: Vista externa durante o incêndio.  
(Fonte: Arquivo Corpo de Bombeiros de Porto Alegre 1º CRB).



Figura 4.5: Vista externa após o incêndio.  
(Fonte: Arquivo Corpo de Bombeiros de Porto Alegre 1º CRB).

O fogo atingiu 20 das 490 lojas do estabelecimento e os estacionamentos 1 e 2 (figura 4.6), atingindo cinco veículos. Não houve feridos, já que neste horário o shopping estava fechado e o cinema foi evacuado; apenas os animais de uma *pet shop* morreram no local.



Figura 4.6: Vista interna das garagens do 3º pavimento.  
(Fonte: Arquivo Corpo de Bombeiros de Porto Alegre 1º CRB).

Cerca de cinco horas após o início do incêndio, às 4 horas da manhã, o fogo já havia sido controlado. A ocorrência do sinistro tornou necessário o fechamento de toda a porção do shopping que foi atingida, incluindo algumas lojas que não foram danificadas. Quatro meses depois, as lojas destruídas pelo incêndio foram reinauguradas, após uma operação de recuperação que incluiu a demolição e substituição de alguns elementos e a limpeza de toda a estrutura, muito afetada pela fuligem.

## 4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA SINISTRADA

Após a liberação da estrutura sinistrada, foi agendada pela equipe do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME, da Escola de Engenharia da UFRGS, uma visita inicial ao local com o intuito de definir a área de investigação.

A vistoria técnica foi realizada pelos engenheiros e técnicos do LEME, no período de 07 de setembro a 15 de outubro de 2007. Em novembro de 2007, o LEME emitiu um relatório técnico cujo objetivo foi o de mapear as áreas mais afetadas pela exposição a altas temperaturas, de forma a subsidiar os trabalhos de remoção e reconstrução das partes que tiveram seu desempenho comprometido, por apresentarem deficiência de resistência ou deterioração que compromettesse sua durabilidade e funcionalidade.

### 4.2.1 Descrição da Estrutura Afetada

Como pode ser visto na figura 4.7, o prédio 7, atingido pelo sinistro, é dividido em 5 módulos separados por juntas de dilatação.

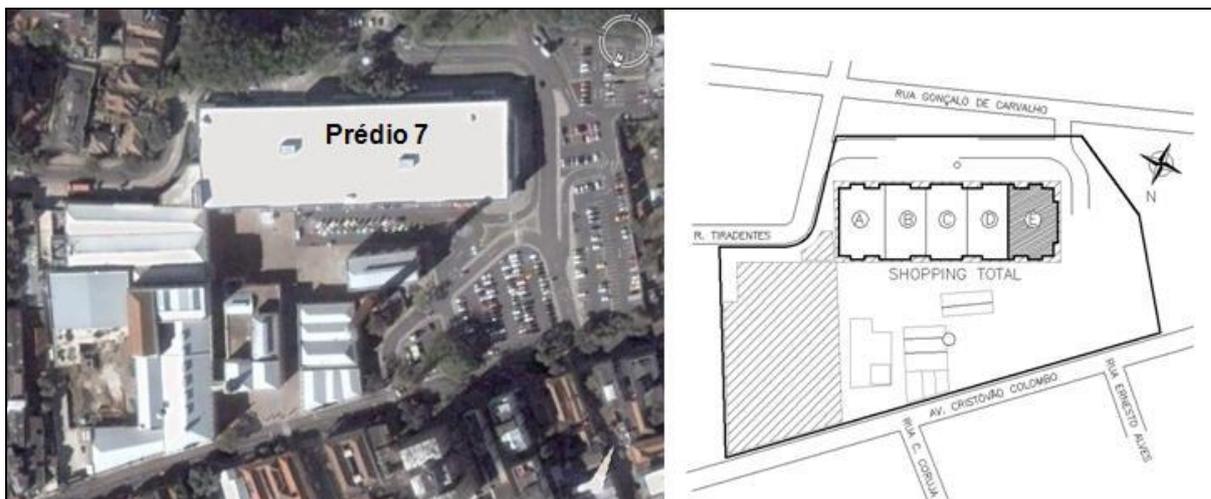


Figura 4.7: Vista aérea e detalhe da modulação do Prédio 7 do Shopping Total (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Como já foi referido, segundo os indícios disponíveis, o incêndio se iniciou no canto noroeste do 2º andar do módulo E do prédio 7, onde estava localizada a loja de brinquedos França (figura 4.8).

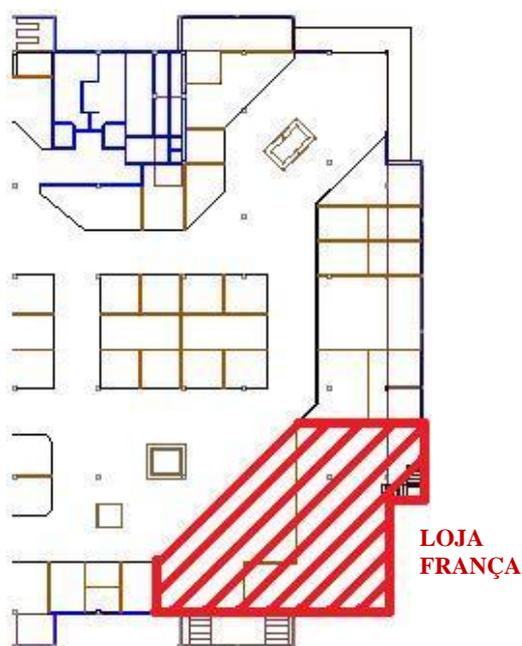


Figura 4.8: Localização da Loja França no 2º pavimento do módulo E.

Todos os módulos apresentam o mesmo conceito estrutural. Vigas principais são apoiadas nos pilares. Vigotas secundárias, pré-moldadas, de seção trapezoidal são apoiadas nestas vigas principais, servindo de sustentação para um sistema especial de formas, que permitia a concretagem de uma capa de concreto moldado *in loco*, que passava sobre as vigas, formando pequenas lajes, com espessura de 5 cm (figura 4.9).

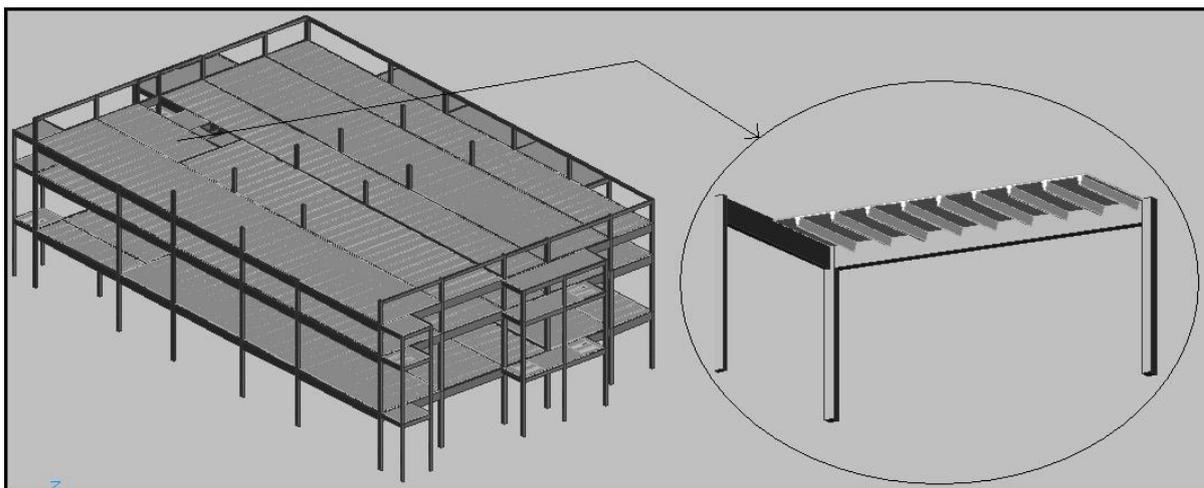


Figura 4.9: Representação da estrutura do prédio: esquema da estrutura do módulo E (à esquerda) e detalhe da laje vista por baixo (à direita).

#### 4.2.2 Inspeção Visual: Mapeamento das Regiões Deterioradas e Reconstituição da Dinâmica do Incêndio

Os indícios coletados evidenciaram que as altas temperaturas na região do foco inicial (Loja França, no 2º pavimento) causaram a deterioração das vigotas e a ruptura das lajes do teto, que formavam o piso do andar superior, por uma combinação de deformações térmicas, expansão do aço e deslocamento explosivo do concreto. Isto permitiu a passagem dos gases quentes e chamas para o 3º pavimento (estacionamento 1).

A figura 4.10 mostra uma vista de um elemento remanescente do mezanino metálico instalado na Loja França e que colapsou durante o incêndio. Este elemento metálico flambou, pois sua dilatação térmica foi impedida pela presença das vigas. É interessante ressaltar que a presença do mezanino parece ter retardado os danos nesta região, pois apesar deste trecho de laje estar posicionado sobre o foco de incêndio, os danos são menores do que os registrados em regiões vizinhas (como pode ser verificado analisando o mapa de danos mostrado na figura A2, no

anexo A), nas quais o efeito da temperatura foi tão violento que causou a ruptura completa de quase todos os segmentos de laje (figura 4.11).



Figura 4.10: Vista do elemento metálico do mezanino da Loja França, flambado devido à restrição de deformação térmica exercida pela ancoragem nas vigas de concreto (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).



Figura 4.11: Zona onde ocorreu ruptura completa da laje, no teto do 2º pavimento (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

O acúmulo de gases quentes continuou a provocar a elevação de temperatura no quadrante noroeste do prédio. Nesta zona havia um depósito de materiais e alguns veículos que se incendiaram.

Eventualmente, como aconteceu no piso inferior, a elevação da temperatura causou a deterioração das lajes entre os dois pavimentos de garagem. O dano típico observado consistiu na ruptura das lajes no seu eixo médio, no qual ficava posicionada a tela de reforço (essa ruptura, como ocorreu no pavimento inferior, foi resultado de um processo de deformação diferenciada entre o aço e o concreto, combinado com o *spalling* do concreto e a expansão do aço). O deslocamento do concreto deixava exposta a armadura, como pode ser visto na figura 4.12. Na figura A3, do anexo A, é apresentado um mapeamento genérico dos danos nestas lajes.



Figura 4.12: Aspecto das lajes de piso do 4º pavimento deterioradas e fragmentos de concreto deslocados das lajes (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

A ruptura das lajes entre os pavimentos de garagem permitiu a passagem do ar quente e das chamas para o quarto pavimento (estacionamento 2), onde a temperatura elevada afetou as treliças metálicas da estrutura de cobertura do pavilhão, como se pode ver na figura 4.13.



Figura 4.13: Vista de elementos com flambagem local na treliça de cobertura (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Tendo a ascensão bloqueada pela cobertura, o ar quente buscou escapar pelas aberturas existentes nos vários andares e pelas fissuras geradas por movimentações térmicas nas paredes de blocos de concreto do prédio (figura 4.14).



Figura 4.14: Escapamento da fumaça pelas fissuras e aberturas  
(Fonte: Arquivo LEME).

A fumaça e o calor se propagaram horizontalmente ao nível do teto de cada andar (sobre o forro de gesso do 2º andar), o que incrementou os danos nos topos dos pilares e vigotas (figuras 4.15 e 4.16).



Figura 4.15: Fissuração no encontro de viga e pilar (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).



Figura 4.16: Desplacamento do concreto e flambagem da armadura no topo dos pilares (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Com o afastamento do foco do incêndio, as temperaturas médias foram caindo, como indica a redução da severidade dos danos. Os elementos mais afetados encontravam-se no módulo E. No módulo D se observaram fissuras de dessecação superficial em vários elementos (figura 4.17) e deformação de algumas vigotas, que tinham menos rigidez e maior área de exposição ao ar quente.



Figura 4.17: Dessecação superficial de elementos de concreto armado do piso do 4º pavimento (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Praticamente todo o prédio foi impregnado de material particulado (fuligem). A massa de ar aquecida, entretanto, se concentrou no canto noroeste da edificação, onde provocou os maiores danos. Dada esta dinâmica de incêndio, decidiu-se concentrar a investigação no módulo E do prédio 7.

### 4.2.3 Extração de Amostras e Ensaio

Com o intuito de obter mais dados sobre os efeitos da temperatura nos materiais componentes da estrutura resistente do prédio sinistrado, foram feitas coletas de amostras (corpos de prova de concreto, amostras de pó e vigotas extraídas) dos elementos estruturais em diversos pontos dos vários pavimentos, com diferentes distâncias em relação ao foco de incêndio.

Para determinação da capacidade resistente residual dos elementos foram realizados ensaios de compressão nas amostras de concreto e ensaios de flexão nas vigotas extraídas (figura 4.18). Os resultados obtidos ratificaram os indícios verificados na inspeção visual, indicando que a degradação aconteceu principalmente nos locais onde se acumularam os gases aquecidos, nas zonas acima do foco principal do incêndio e no topo dos pilares.



Figura 4.18: Extração de corpos de prova e ensaio de flexão em vigota extraída (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Para complementar os ensaios de resistência mecânica, foi extraído um número superior a 50 amostras de pó de vários elementos (figura 4.19), das quais 30 foram selecionadas para posterior ensaio de difratometria de raios-X. Os resultados desses ensaios, que são apresentados a seguir, foram usados para estimar as temperaturas de exposição das amostras e serão comparados, posteriormente, com as temperaturas verificadas na simulação.



Figura 4.19: Extração de amostra de pó para ensaio de difratometria de raios-X (RELATÓRIO TÉCNICO N° 16/2007, LEME).

Como comentado no item 2.4, o ensaio de difratometria de raios-X permite avaliar as mudanças no material cristalino componente do material: com a elevação da temperatura, ocorre a dessecação e transformação dos cristais, o que muda o difratograma. Estas mudanças foram usadas para estimar as temperaturas de exposição dos elementos estruturais de onde foram extraídas as amostras (a posição desses elementos pode ser verificada na figura 4.20).

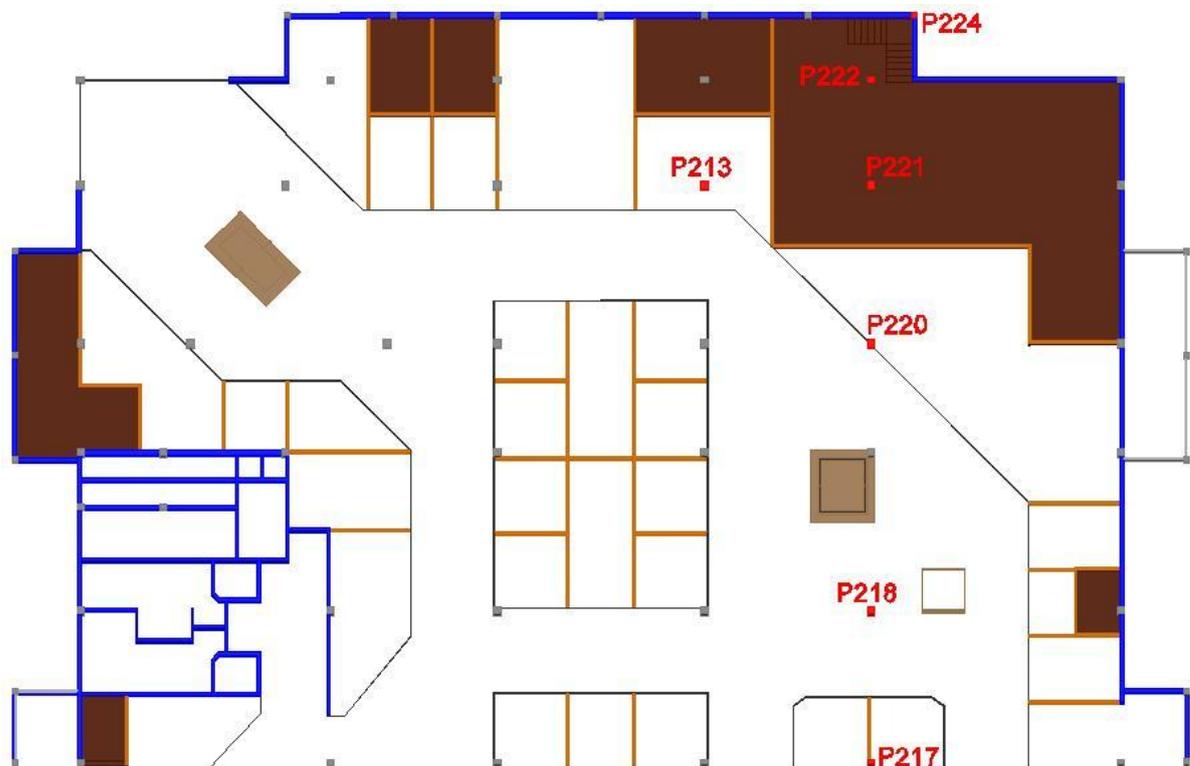


Figura 4.20: Posição dos pilares de onde foram retiradas amostras de pó para ensaio de difratometria de raios-X – Bloco E.

Os resultados dos ensaios de difratometria realizados se mostraram compatíveis com os de resistência mecânica. Os mesmos confirmaram que a degradação aconteceu principalmente nos locais onde se acumularam os gases aquecidos, nas zonas acima do foco principal de incêndio.

O fenômeno pode ser visto na figura 4.21, que mostra os dados relativos ao pilar P213, nos três andares, junto com os resultados de uma amostra de referência, não afetada pela temperatura.

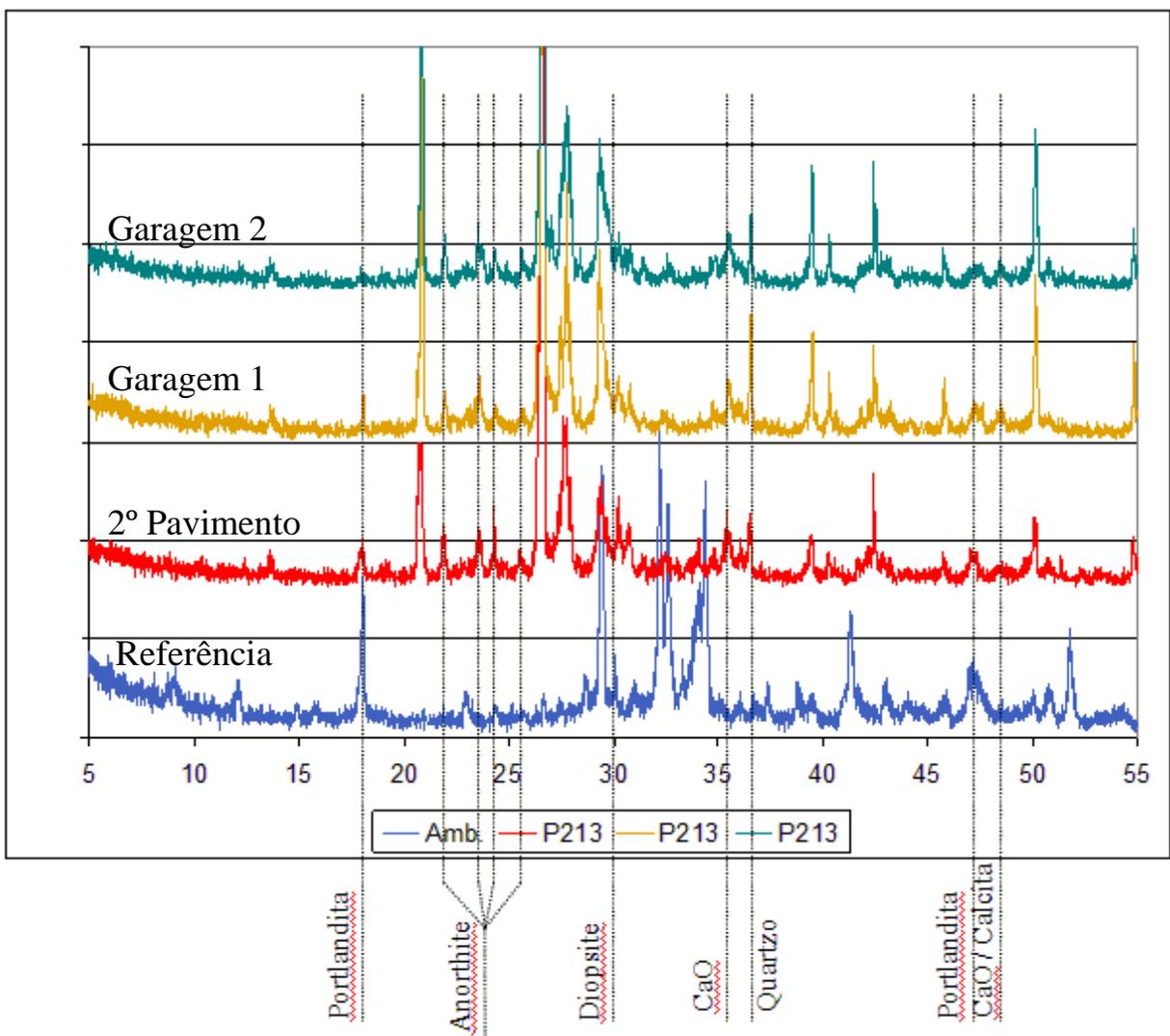


Figura 4.21: Difratograma 1 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X do pilar P213 (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

O efeito da temperatura pode ser verificado pela redução da altura relativa do pico de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), pois este cristal vai perdendo água e se transformando em óxido de

cálcio (CaO). Verifica-se, ainda, que com a decomposição do hidróxido de cálcio ocorre um aumento também dos cristais de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Observa-se que as amostras dos pavimentos superiores se encontram mais deterioradas do que no pavimento do incêndio, devido ao efeito chaminé.

O efeito de concentração de gases quentes junto ao teto do 2º pavimento, o que afetou o concreto do topo dos pilares pode ser claramente visto na figura 4.22. A mesma contém um difratograma com os resultados de ensaios obtidos em três amostras retiradas de diferentes alturas e profundidades do pilar P221, localizado bem no meio da zona afetada pela temperatura.

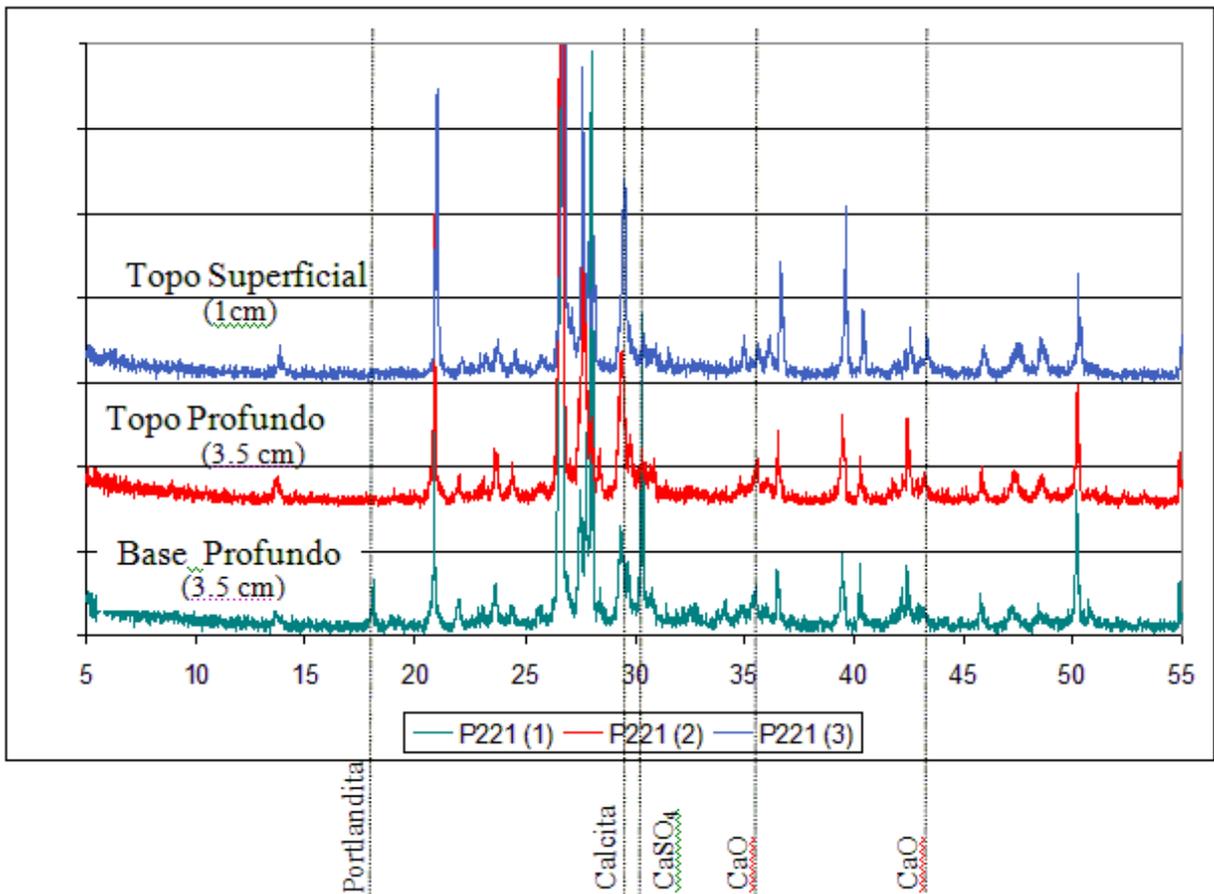


Figura 4.22: Difratograma 2 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X do pilar P221 (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

O exame das mesmas mostra que, na base do pilar, o efeito da temperatura foi bem mais suave, o que justifica a existência de uma quantidade razoável de portlandita. No topo do pilar

este cristal se transformou em óxido de cálcio (CaO) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), evidenciando que esta zona ficou exposta a temperaturas mais elevadas.

Já a figura 4.23 mostra os resultados de uma série de amostras retiradas de alguns pilares do 2º pavimento, localizados no eixo B do prédio 7, com inclusão do pilar de canto P224.

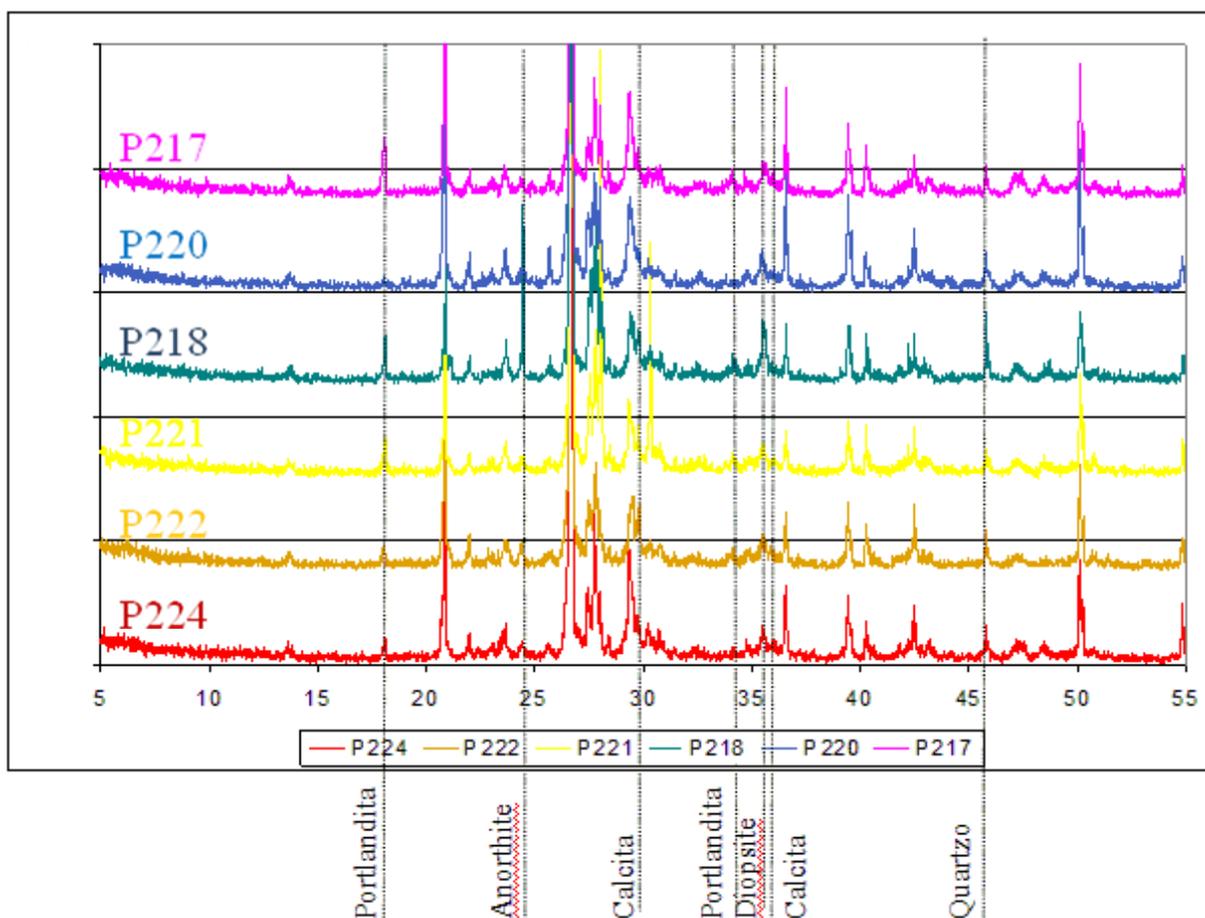


Figura 4.23: Difratograma 3 - Resultados de ensaio de difratometria de raios-X dos pilares do eixo B (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 16/2007, LEME).

Observa-se que, na zona mais afetada pelo efeito chaminé, entre os eixos verticais 23 e 27 e os eixos horizontais A e D (ver anexo A), os resultados são similares, com redução do teor de portlandita e incremento no teor de calcita.

Já na análise da amostra correspondente ao pilar P217, localizado junto à junta de dilatação entre os módulos D e E, verifica-se que o efeito da temperatura foi bem menos intenso, e que ainda observa-se um considerável teor de portlandita remanescente, indicando que o calor não se propagou muito lateralmente, como já discutido.

## 5. MONTAGEM DO MODELO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

Para montagem do modelo a ser utilizado na simulação, foi primeiramente necessário reproduzir a geometria da estrutura e realizar alguns testes para definir a forma de representação da carga de incêndio. Posteriormente, foram estabelecidos os critérios a serem adotados na simulação. Cada uma dessas etapas será descrita a seguir.

### 5.1 REPRODUÇÃO DA GEOMETRIA DA ESTRUTURA

A reprodução da geometria da edificação foi feita com base no projeto executivo estrutural e arquitetônico do shopping, conseguidos junto à Simon Engenharia (responsável pelo projeto estrutural) e à Engenhosul (empresa responsável pela construção do shopping).

De acordo com os projetos obtidos, primeiramente toda a arquitetura do bloco E foi reproduzida em três dimensões no AutoCad (figura 5.1), buscando um melhor entendimento da edificação analisada.

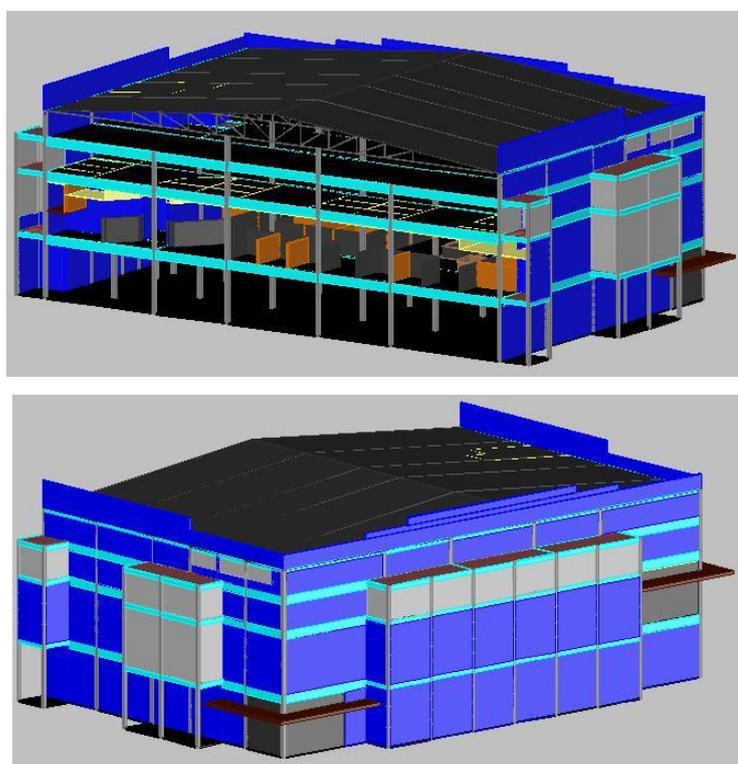


Figura 5.1: Vistas do volume geométrico do bloco E reproduzido no AutoCad.

Feito o detalhamento da geometria no AutoCad, a intenção era importar esse volume já pronto (salvo na extensão .dxf) para o Pyrosim. Verificou-se, no entanto, que o software, apesar de possuir o recurso de importar “volume”, não interpretava de maneira adequada as espessuras e alturas dos elementos sólidos. Então, foram montados gabaritos (novamente no AutoCad), em planta, referentes a cada pavimento e estes foram importados para o Pyrosim. Sobre esses gabaritos foi recriado, no próprio Pyrosim, todo o volume geométrico da edificação.

A figura 5.2 mostra uma comparação entre a estrutura real, antes do sinistro, e o modelo adotado. Para facilitar a visualização, os módulos foram representados usando cores diferentes. O módulo onde ocorreu o incêndio foi representado em azul com cobertura cinza.

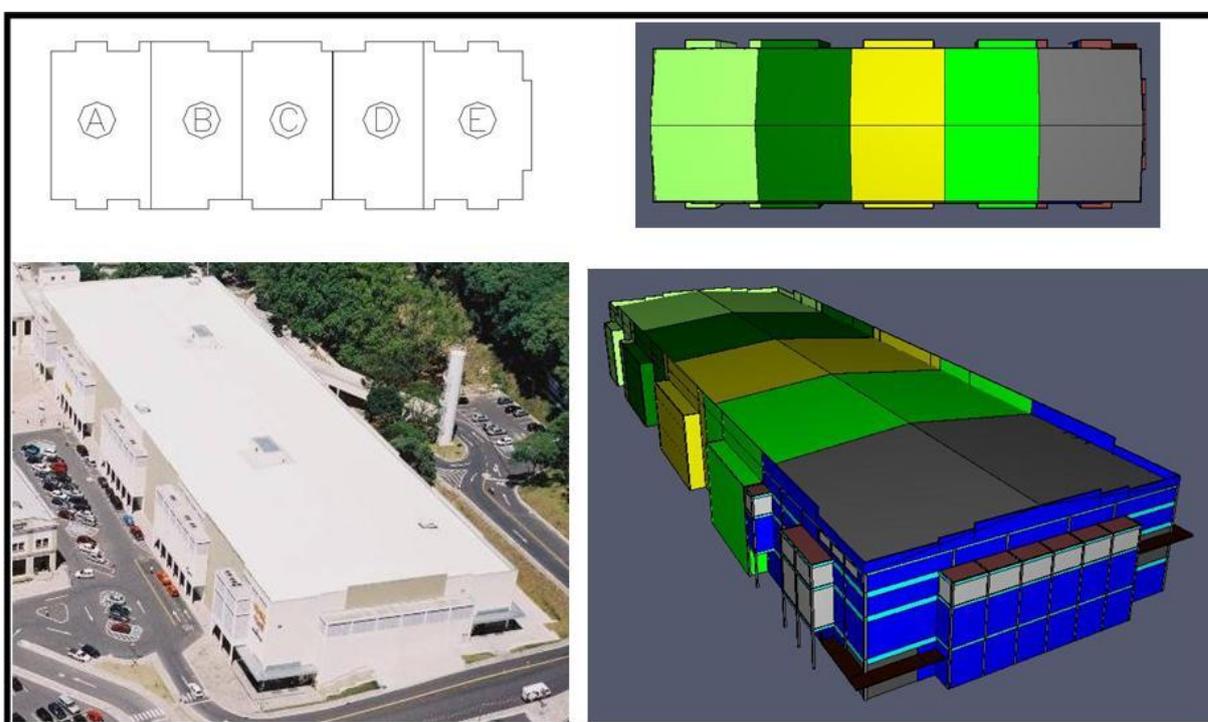


Figura 5.2: Comparação entre a estrutura real e o modelo adotado: foto do prédio antes do sinistro (à esquerda) e modelo a ser utilizado na simulação (à direita).

Como os principais danos encontrados estavam localizados no módulo E, foi feita uma reprodução mais detalhada da geometria da estrutura apenas nessa parte do prédio, sendo que nos demais módulos foram representadas apenas as paredes externas e as lajes. Da mesma forma, foi representada mais detalhadamente apenas a distribuição das lojas e o forro de gesso do 2º pavimento do módulo E (figuras 5.3, 5.4 e 5.5).

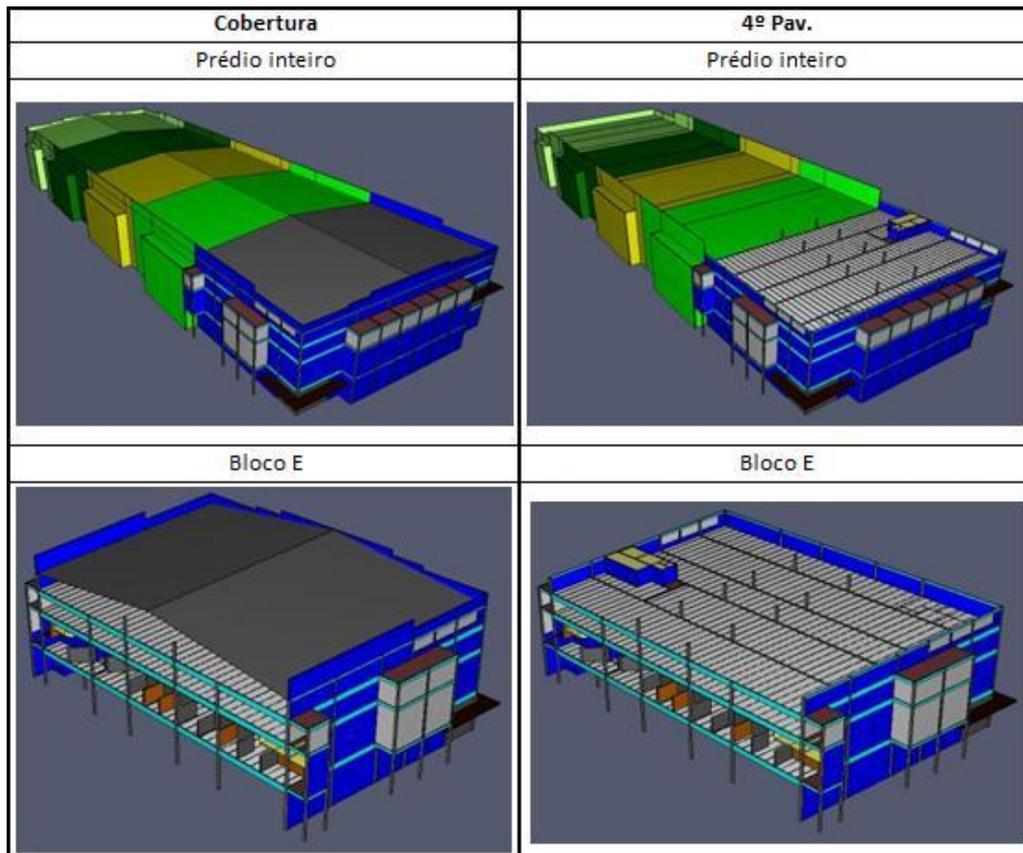


Figura 5.3: Vistas do modelo utilizado (Cobertura e 4º Pavimento).

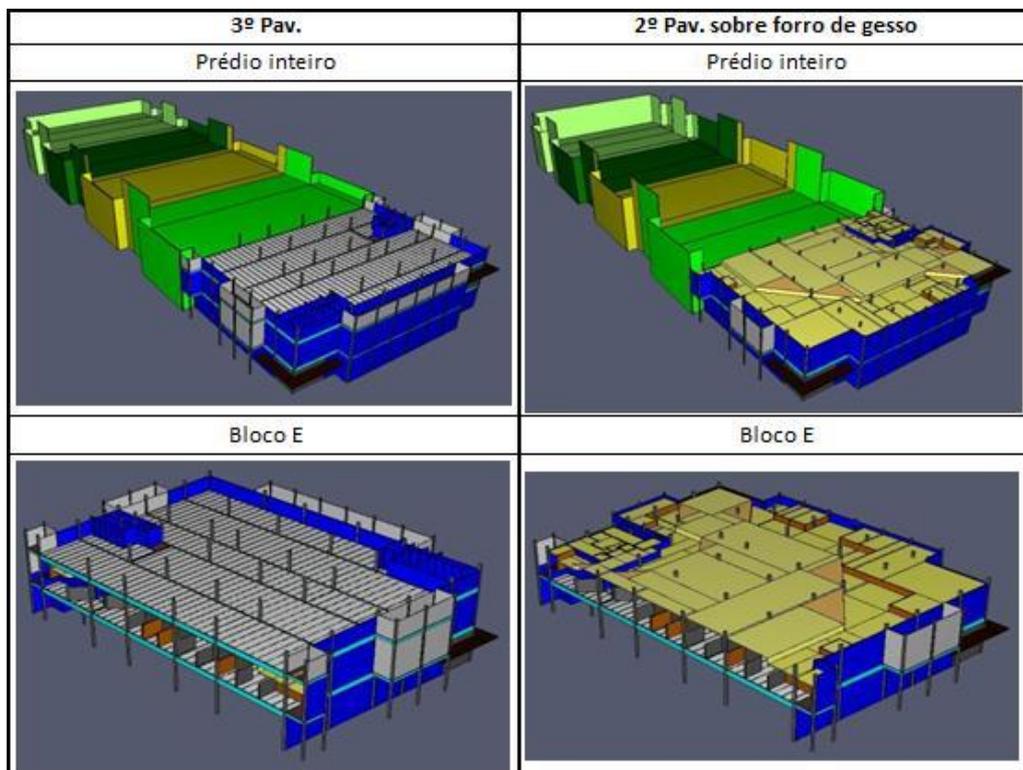


Figura 5.4: Vistas do modelo utilizado (3º Pavimento e 2º Pavimento sobre forro).

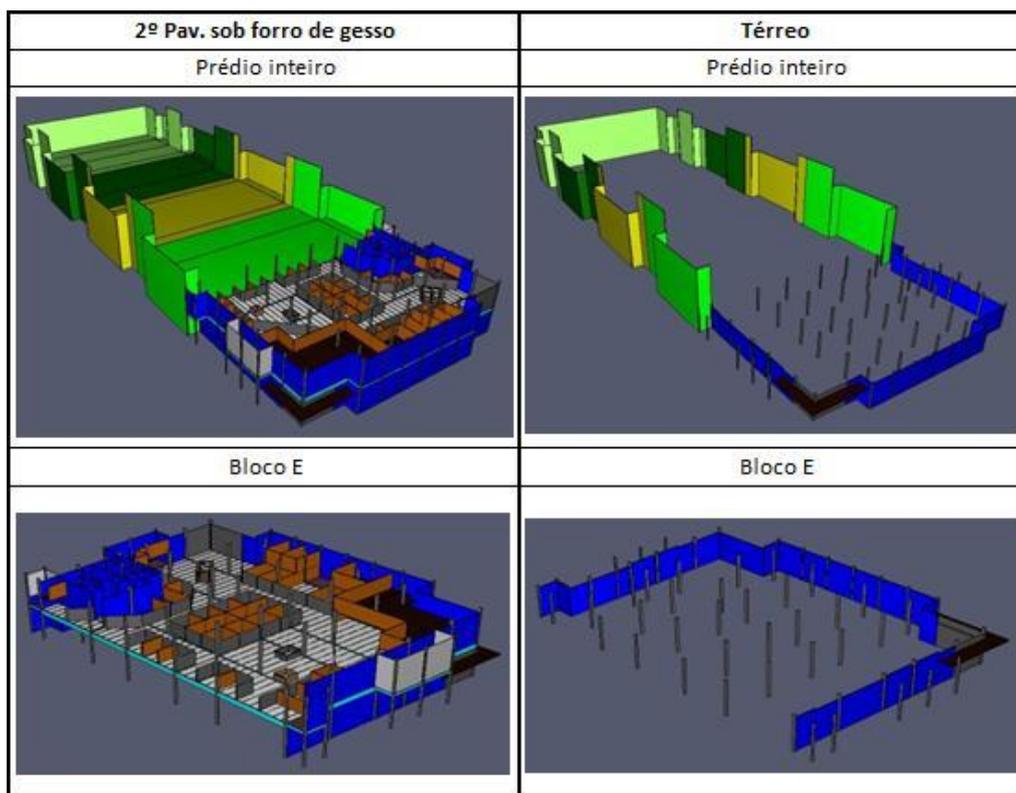


Figura 5.5: Vistas do modelo utilizado (2º Pavimento sob forro e Térreo).

## 5.2 REPRESENTAÇÃO DA CARGA DE INCÊNDIO

Na ausência de dados detalhados acerca da carga de incêndio real, a carga de incêndio específica adotada para a loja de brinquedos foi de  $500\text{MJ}/\text{m}^2$ , correspondente à carga média considerada para esse tipo de estabelecimento, de acordo com a NBR14432:2001.

Foram feitos diversos testes até se chegar à forma adotada para representação da carga de incêndio. Em função da elevada demanda de capacidade computacional para rodar cada simulação, o que torna os tempos de processamento bastante longos, as simulações realizadas para estes testes utilizaram apenas a parte do modelo correspondente ao 2º pavimento do módulo E da edificação, sendo a interface com o módulo D completamente fechada. A seguir, serão apresentados três momentos que marcaram transições de estágios na definição da forma de representação da carga de incêndio, bem como o que foi observado em cada uma delas.

Primeiramente, foi colocado apenas um queimador (do tipo “vent”) de  $1\text{m}^2$  no centro da loja, sendo arbitrada uma taxa de liberação de calor de  $5.000\text{kW}/\text{m}^2$ . Verificou-se que desta forma

o fogo ficava concentrado apenas em torno do queimador, não se propagando nem mesmo pelo interior da loja (figura 5.6).



Figura 5.6: Representação da carga de incêndio através de um queimador tipo “vent”.

Em um segundo teste a carga de incêndio correspondente aos produtos existentes na loja foi dividida em três blocos de madeira posicionados na parte inferior da loja. Esses blocos funcionavam como queimadores imediatos e permanentes (figura 5.7).

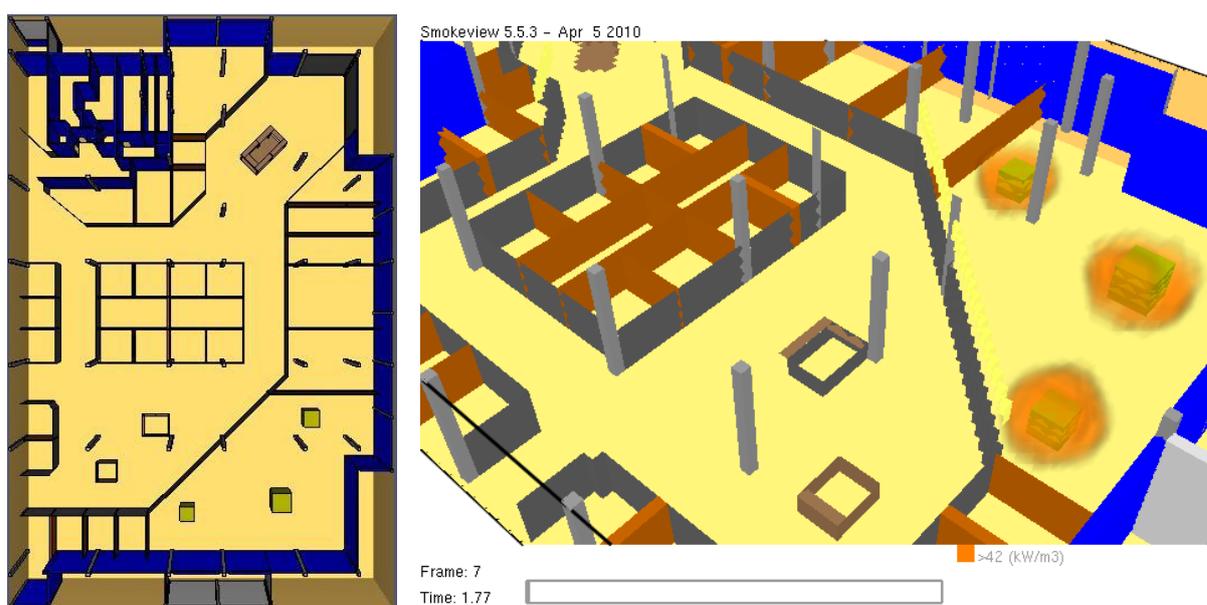


Figura 5.7: Representação da carga de incêndio em três caixas de madeira que funcionavam como queimadores imediatos e permanentes.

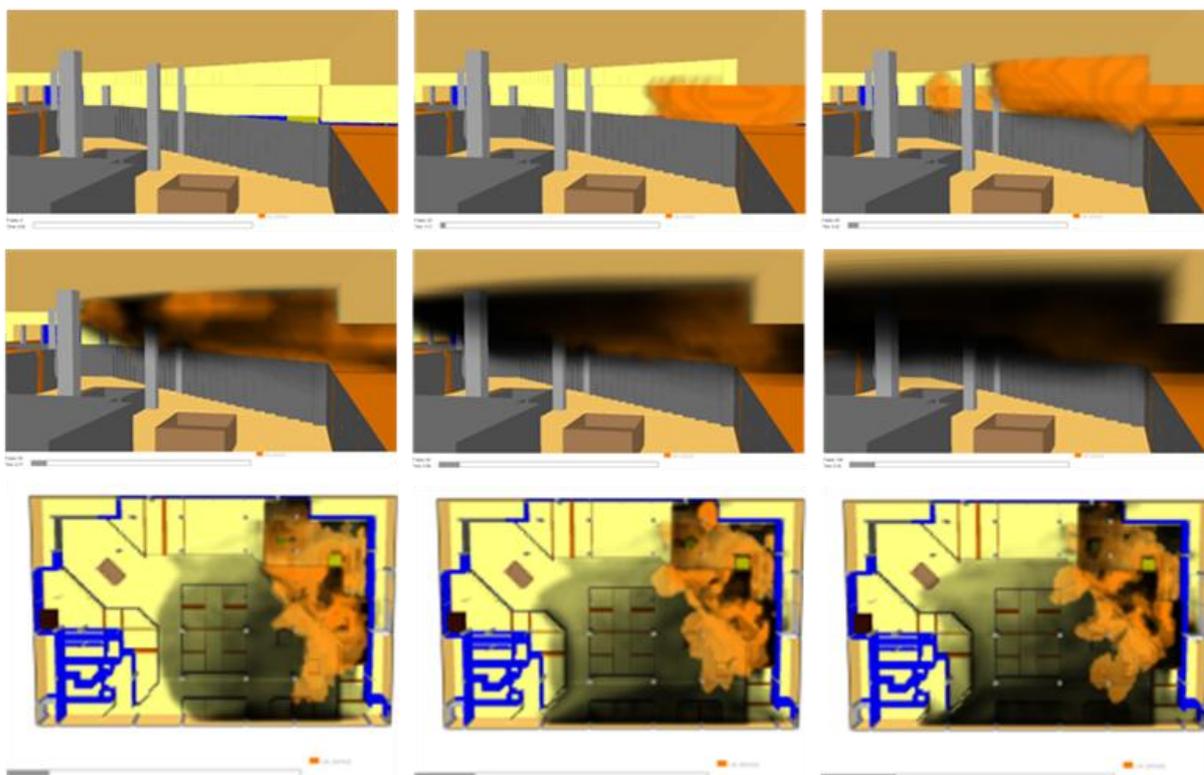


Figura 5.8: Vista interna da segunda simulação: Carga de incêndio em três caixas de madeira.

Durante o teste efetuado usando essa configuração (figura 5.8) foi possível verificar que, mesmo ainda não sendo reproduzido o efeito chaminé, o fogo se mantinha concentrado nas proximidades da loja onde o incêndio começou e se propagando junto ao forro. Foi verificado que a representação da carga dessa maneira não era adequada, pois não representava a queima (consumo) do material combustível e o fogo se desenvolvia de uma forma um tanto abrupta.

Optou-se, então, por distribuir pelo interior da loja diversas caixas de material combustível, as quais foram atribuídas as propriedades da maioria dos produtos ali existentes: plástico (PVC) e espuma (poliuretano), conforme pode ser visto na figura 5.9.

Uma pequena parte da carga (0,001%) foi colocada em um queimador no centro da loja, para provocar o início do incêndio. O restante da carga foi distribuído nas caixas de material combustível espalhadas pelo interior da loja (75% em plástico e 25% em espuma).

A partir do momento que o queimador transmite o fogo para as caixas próximas a ele, este é desativado (foi estabelecido um tempo de 3s) e a propagação do incêndio se dá pela transmissão do fogo entre o material combustível.



Figura 5.9: Vista interna do 2º pavimento do módulo E com a representação adotada para o material combustível no interior da loja (blocos de espuma em verde e de PVC em lilás).

Essa terceira estratégia se mostrou eficiente, pois conseguiu representar o espalhamento gradual do fogo pelo interior da loja, tornando o desenvolvimento do incêndio mais próximo da realidade (figura 5.10).

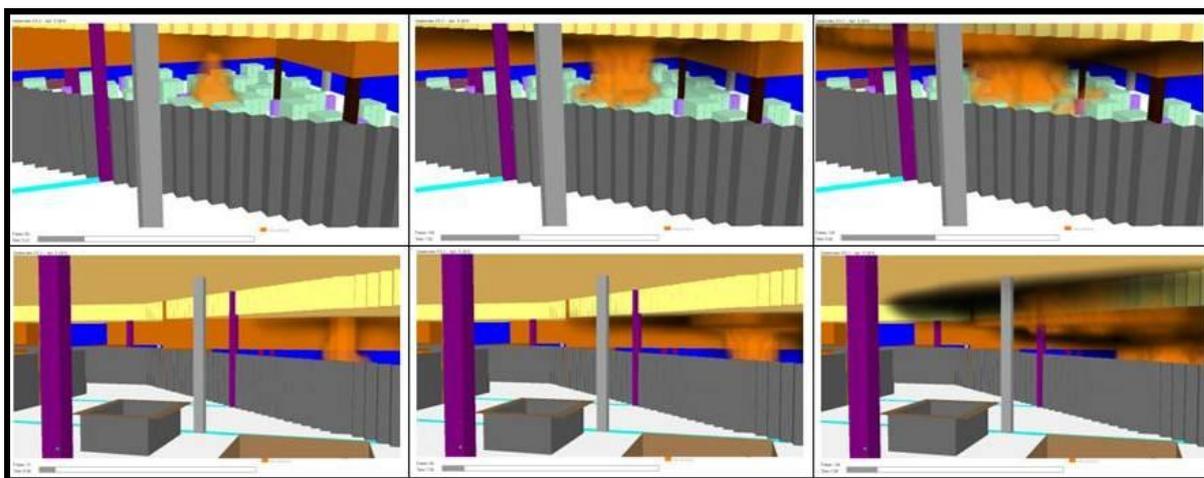


Figura 5.10: Vista interna do 2º pavimento do módulo E no terceiro teste realizado.

### 5.3 CRITÉRIOS ADOTADOS

Com a utilização do Pyrosim fica evidente a infinidade de considerações que o FDS permite que sejam feitas, o que abre uma gama muito grande de estudos a serem realizados.

Durante o ajuste das considerações a serem feitas no modelo, foi percebida uma carência de informações a respeito do desempenho e das características térmicas (taxa de perda de massa, temperatura de ignição, calor de combustão, etc.) de vários dos materiais cuja definição era necessária. Muitas vezes não estava bem claro qual seria exatamente o dado a ser informado, como este deveria ser medido (ex: a unidade informada pelo software para taxa de perda de massa é kg/m.s, sendo que os dados encontrados são em mm/s ou mg/s) e onde encontrar essa referência. Também não foram encontrados outros trabalhos desenvolvidos nessa linha onde se pudessem encontrar referências de critérios a serem adotados, evidenciando a necessidade de realização de mais estudos nessa área. Os dados utilizados encontram-se na tabela 5.1.

Em função dessa dificuldade na obtenção dos dados referentes às propriedades dos materiais para alimentação do modelo, nas simulações realizadas todos os materiais foram considerados inertes, exceto o material combustível no interior da loja.

Tabela 5.1: Propriedades utilizadas para os materiais nas simulações realizadas

Propriedade	PVC	Espuma
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1380	23
Calor específico (kJ/Kg.K)	23°C → 1,29	1
	50°C → 1,35	
	75°C → 1,41	
	100°C → 1,47	
	125°C → 1,53	
	150°C → 1,59	
Condutividade térmica (W/m.K)	23°C → 0,192	0,05
	50°C → 0,175	
	75°C → 0,172	
	100°C → 0,147	
	125°C → 0,141	
	150°C → 0,134	
Emissividade	0,95	0,9
Coef. de Absorção (1/m)	50.000	50.000
Temperatura de ignição (°C)	240	200
Taxa de perda de massa máxima (kg/s)	0,0093	0,2

Para o PVC foram adotadas as propriedades padrão desse material, já fornecidas pelo próprio Pyrosim; à exceção da temperatura de ignição e da taxa de perda de massa máxima que foram obtidas do trabalho desenvolvido por Walters e Lyon (2009). Já as propriedades adotadas para a espuma de poliuretano foram obtidas do trabalho desenvolvido por Prasad et al. (2009).

É importante ressaltar que as taxas de perda de massa dos dois materiais estão majoradas por um fator de  $10^2$  para que fosse acelerado o processo na simulação (dada essa estratégia, as simulações de 2min equivalem a aproximadamente 3:20h de incêndio real).

Tendo resolvido a questão da ignição, era necessário reproduzir o efeito chaminé. Infelizmente, o fenômeno do deslocamento ainda não é considerado pelo software. Dada a importância do mesmo na dinâmica de alguns eventos, fica evidente a necessidade de mais pesquisas na área. Para reproduzir o efeito chaminé, considerando os materiais componentes da estrutura inertes, foram colocados termopares na face inferior de alguns pontos das lajes (determinados de acordo com o mapeamento de danos realizado na estrutura, apresentado no Anexo A), e estabeleceu-se que, quando fosse atingida a temperatura de  $600^{\circ}\text{C}$  naquele local, a respectiva parte da laje seria “consumida”, permitindo a propagação do fogo para os andares superiores (figura 5.11).

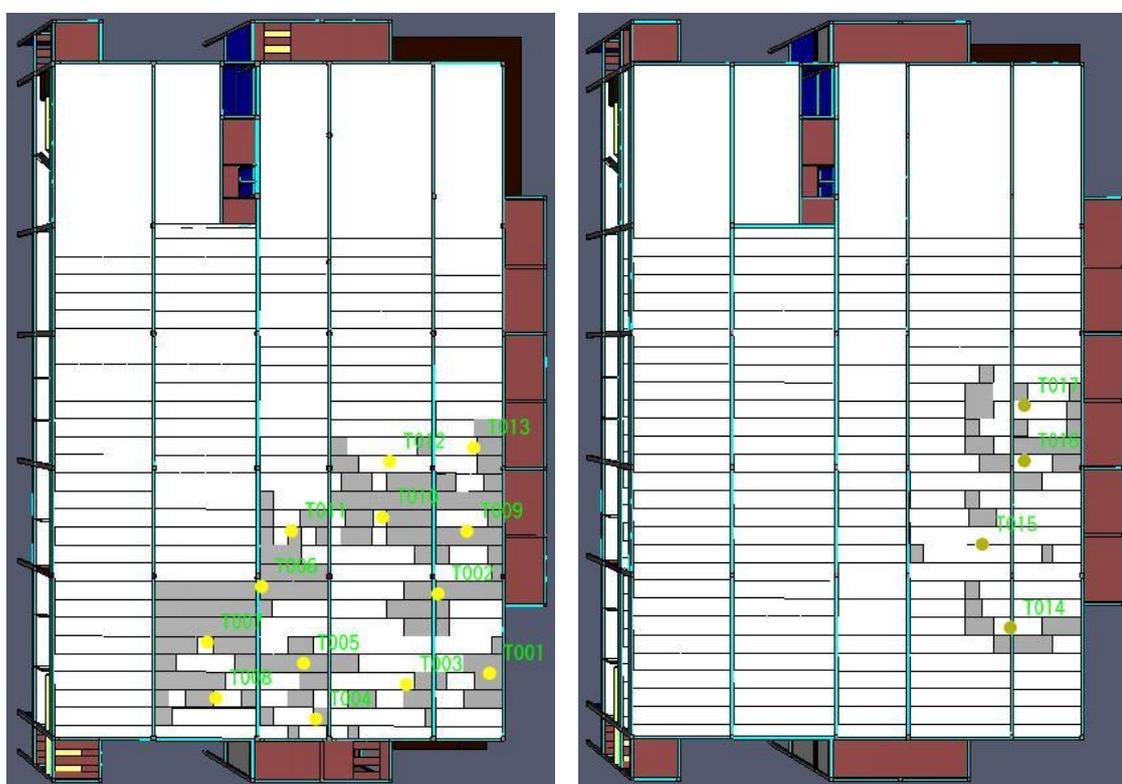


Figura 5.11: Marcação dos locais onde haveria rompimento das lajes e posicionamento dos termopares. À esquerda, laje entre o 2º e o 3º pavimento. À direita, laje entre o 3º e o 4º pavimento.

A adoção do patamar de 600°C como gatilho para a ocorrência de deslocamento foi baseada em estudos anteriores de Lima (2005), que indicaram que, quando a temperatura ambiente atinge esse patamar, a tendência à ocorrência de *spalling* se manifesta de forma clara. Embora Kirchhoff (2010) aponte que a temperatura crítica para o deslocamento explosivo ocorra a partir de 300°C, dependendo de certas condições de equilíbrio entre a umidade e a microestrutura, decidiu-se adotar um patamar mais elevado, devido à ausência de umidade.

Para que as altas temperaturas pudessem atingir as lajes, esse mesmo processo foi feito no forro de gesso do 2º pavimento (figura 5.12), tendo sido estipulada a temperatura de 100°C para que os elementos de gesso fossem “consumidos”.

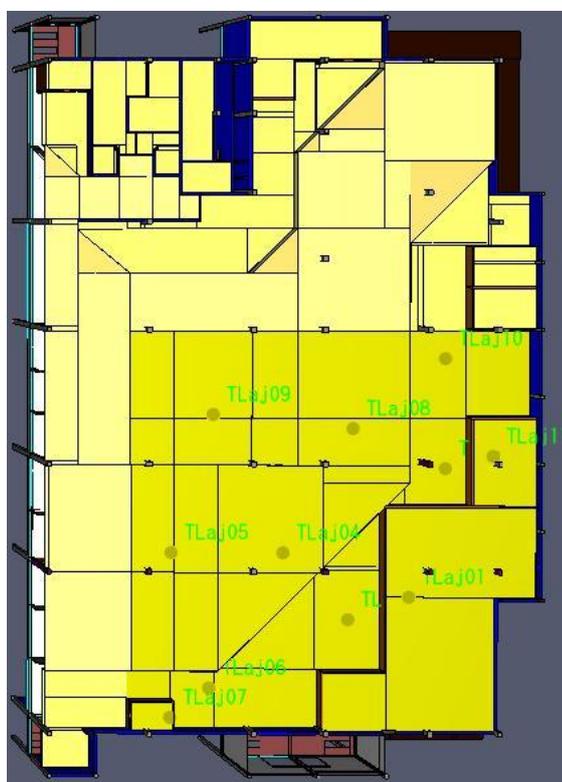


Figura 5.12: Marcação dos locais onde haveria rompimento do forro de gesso e posicionamento dos termopares.

Da mesma forma, para simular as aberturas geradas nas alvenarias externas, seja pelo derretimento das venezianas de alumínio, pela ruptura dos blocos de concreto ou pela abertura de fissuras nos painéis de alvenaria, também foram colocados termopares em pontos estratégicos (definidos de acordo com o que foi verificado na inspeção da estrutura sinistrada, figura 5.13) e estabelecidas temperaturas a partir das quais partes dos elementos eram “consumidas”, como pode ser visto nas figuras 5.14 e 5.15.



Figura 5.13: Vistas externas da fachada frontal (à esquerda) e lateral (à direita) do módulo E.

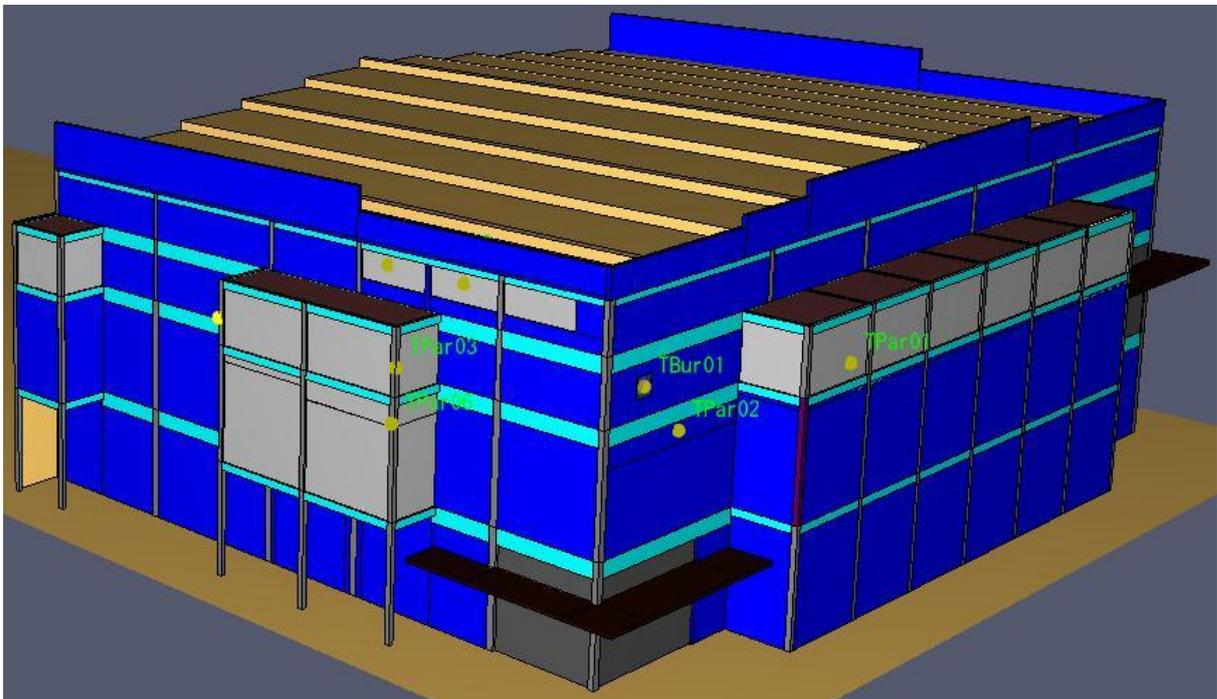


Figura 5.14: Marcação dos locais onde poderia haver aberturas nas fachadas com posicionamento dos termopares.

Para as venezianas de alumínio foi estabelecida a temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$  e para os blocos de concreto da alvenaria adotou-se  $400^{\circ}\text{C}$ . Vale ressaltar que algumas das aberturas que aparecem na fachada frontal da edificação (na figura 5.13) não foram geradas pelas altas temperaturas, mas sim pela ação dos bombeiros no combate ao incêndio (essas aberturas podem ser identificadas pela ausência de marcas de queima em volta delas), por esse motivo tais aberturas não foram programadas na simulação.

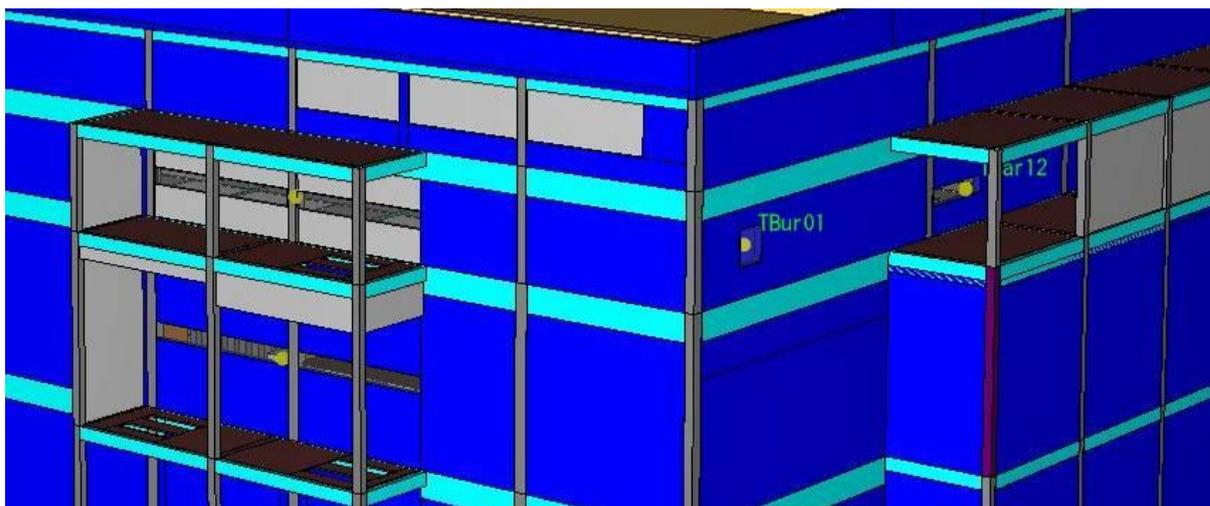


Figura 5.15: Pequenos orifícios demarcados nas paredes por trás das venezianas e termopares correspondentes.

Essa forma de representação não reproduz exatamente o que aconteceu durante o incêndio, pois sabe-se que tais fenômenos não ocorreram de forma instantânea a partir de determinada temperatura. Entretanto, o software utilizado não permite ativar a opção “*burn away*” para materiais que não entrem em ignição, dificultando a reprodução do fenômeno do *spalling* do concreto, assim como da abertura de fissuras na alvenaria e derretimento das venezianas metálicas.

Outros fenômenos que tiveram de ser programados, devido à consideração dos materiais componentes da edificação como inertes, foram a quebra da vitrine da loja mais atingida pelo incêndio e a queda do mezanino desta mesma loja, como já mencionado anteriormente.

A perda da vitrine era um evento importante a reproduzir, para mostrar que mesmo na ausência de barreira horizontal, o fogo se manteve mais concentrado em torno do foco e não se espalhou horizontalmente pelo 2º pavimento. Foi estipulado que esse evento acontecesse razoavelmente no início do incêndio, aos 20s de simulação (as simulações foram realizadas para um período de 2 minutos).

A queda do mezanino da Loja França também era um evento importante, no princípio do incêndio sua presença protegeu de certa forma as lajes acima dele, e logo após a queda provocou o abafamento das chamas, deixando posteriormente a região acima igualmente exposta às elevadas temperaturas. Não foi encontrada uma forma de reproduzir esse efeito de abafamento das chamas logo após a queda do mezanino, porém foi estipulado que o mesmo fosse desativado aos 25s (equivalente a aproximadamente 40min. de incêndio real).

Para o processamento das simulações, o espaço simulado foi dividido em duas malhas. Em função de se necessitar uma maior precisão de resultados no módulo E, uma malha mais refinada foi adotada para esta região (células de 0,48mx0,48mx0,20m), enquanto no restante da edificação foi aplicada uma malha um pouco mais esparsa (células de 1,02mx0,95mx0,20m), afim de diminuir a demanda computacional. Em função da importância da propagação vertical das altas temperaturas neste sinistro, optou-se por adotar um refinamento maior nesta direção (20cm) e utilizar a mesma precisão em toda a edificação. Foi utilizado um número total de 2.232.000 células no modelo.

O uso de duas malhas distintas possibilitou a utilização do recurso de processamento em paralelo ao rodar as simulações, o que foi essencial em função da elevada demanda de capacidade computacional.

É importante mencionar que o processamento das simulações finais, apresentadas no próximo capítulo, foi feito no *cluster* do Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CESUP/UFRGS). O *Cluster Sun Fire* utiliza a arquitetura baseada em *clusters*, que integra diversos processadores, através de redes de alta velocidade e softwares de processamento paralelo e distribuído, ao lado de uma grande capacidade de memória. Dados técnicos do *Cluster Sun Fire* do CESUP/UFRGS:

- Performance de pico: 12,76 Teraflops (64 bits), ou seja 12 trilhões e 760 bilhões de operações por segundo;
- 6 “nós” de processamento com 8 processadores AMD quadcore e 128 GB de RAM cada um, e 30 “nós” com 2 processadores AMD quadcore e 16 GB de RAM cada um;
- 3 unidades de processamento gráfico (GPUs), sendo 2 NVIDIA TESLA e 1 AMD Firestream;
- 1248 GB de memória RAM.
- 84 Terabytes de capacidade total de armazenamento.

## 6. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

A análise de cada simulação foi feita com base em um estudo comparativo entre as temperaturas atingidas nos pilares analisados e os difratogramas obtidos a partir dos ensaios de difratometria de raios-X realizados nas amostras retiradas desses pilares. Na figura 6.1 estão indicados os pilares analisados, sendo que os respectivos difratogramas foram apresentados no item 4.2.3.

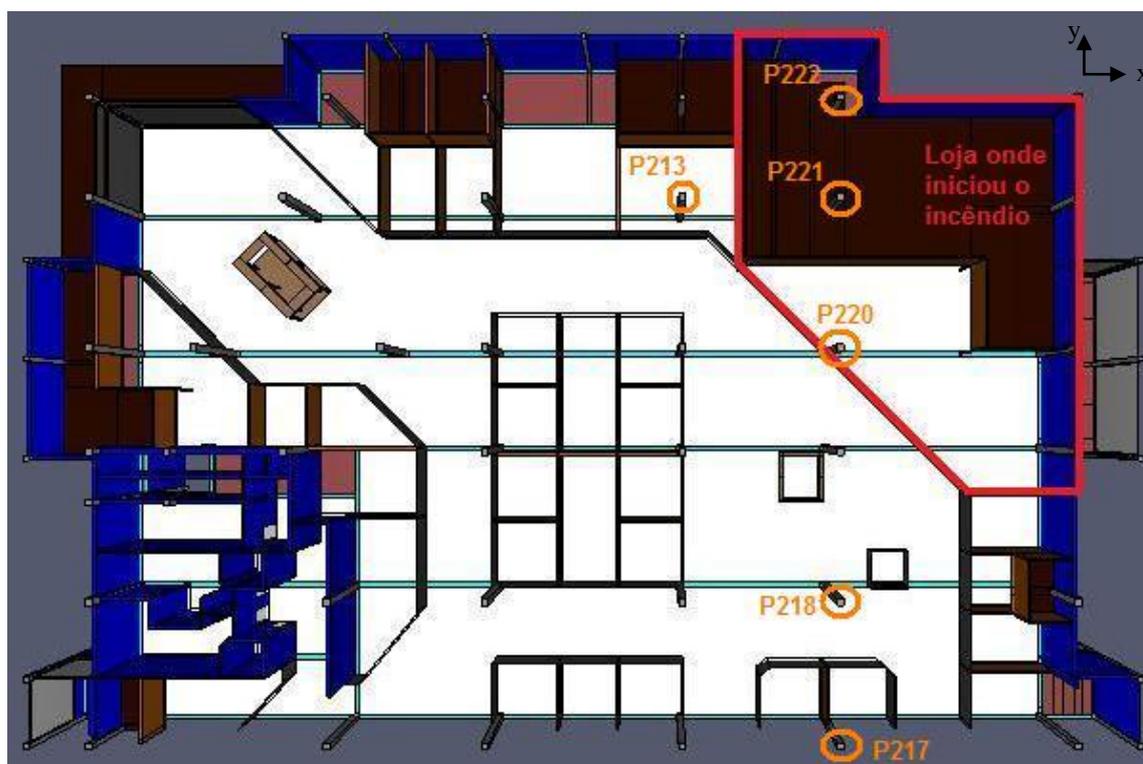


Figura 6.1: Vista, no modelo, do 2º pavimento do módulo E com a indicação da loja onde iniciou o incêndio e dos pilares analisados.

Os dados de temperaturas estimadas, coletados na posição correspondente a cada um dos pilares durante as simulações, correspondem à altura de 1,50m do piso. Apenas no caso do pilar P221 foram colocados, ainda, termopares em alturas de 0,5m e 2,5m. Esses pontos foram definidos em função do local de retirada das amostras de pó para o ensaio de difração.

Para análise das consequências e dinâmica do incêndio, foram escolhidos três cenários distintos a serem simulados:

- cenário original (representação do efeito chaminé e das aberturas na alvenaria externa);

- cenário alternativo 1 (avaliação da presença de sprinklers); e
- cenário alternativo 2 (desprezando a ocorrência do efeito chaminé e das aberturas na alvenaria externa).

A seguir é feita uma descrição do que foi observado na simulação de cada um destes cenários.

## 6.1 CENÁRIO ORIGINAL

Nesse caso a simulação buscou reproduzir as condições reais ocorridas durante o incêndio. Para tanto, foram feitas todas as considerações apontadas no item 5.3.

O tempo de simulação estabelecido foi de 120s (equivalente a aproximadamente 3:20h de incêndio real, conforme a majoração adotada para as taxas de queima dos materiais, já mencionada anteriormente), e o tempo de processamento necessário foi de 117:14h (quase 5 dias).

### 6.1.1 Dinâmica do incêndio verificada

Nas figuras 6.2 a 6.6 podem ser vistas algumas imagens da simulação do Cenário Original. As imagens foram tomadas como se fossem originadas por um observador localizado na interface do módulo E com o módulo D, olhando para o interior do módulo E.

Analisando a dinâmica de incêndio obtida na simulação é possível verificar que o fogo se mantém concentrado nas proximidades da Loja França, não se propagando muito lateralmente ao nível do 2º pavimento, o que confere com os indícios verificados na inspeção da estrutura sinistrada.

Nota-se, também, que as temperaturas elevadas propagam-se ao nível do forro em cada pavimento, afetando principalmente o topo dos pilares. A partir do rompimento das lajes de entrepiso, o fogo passa a propagar-se verticalmente.

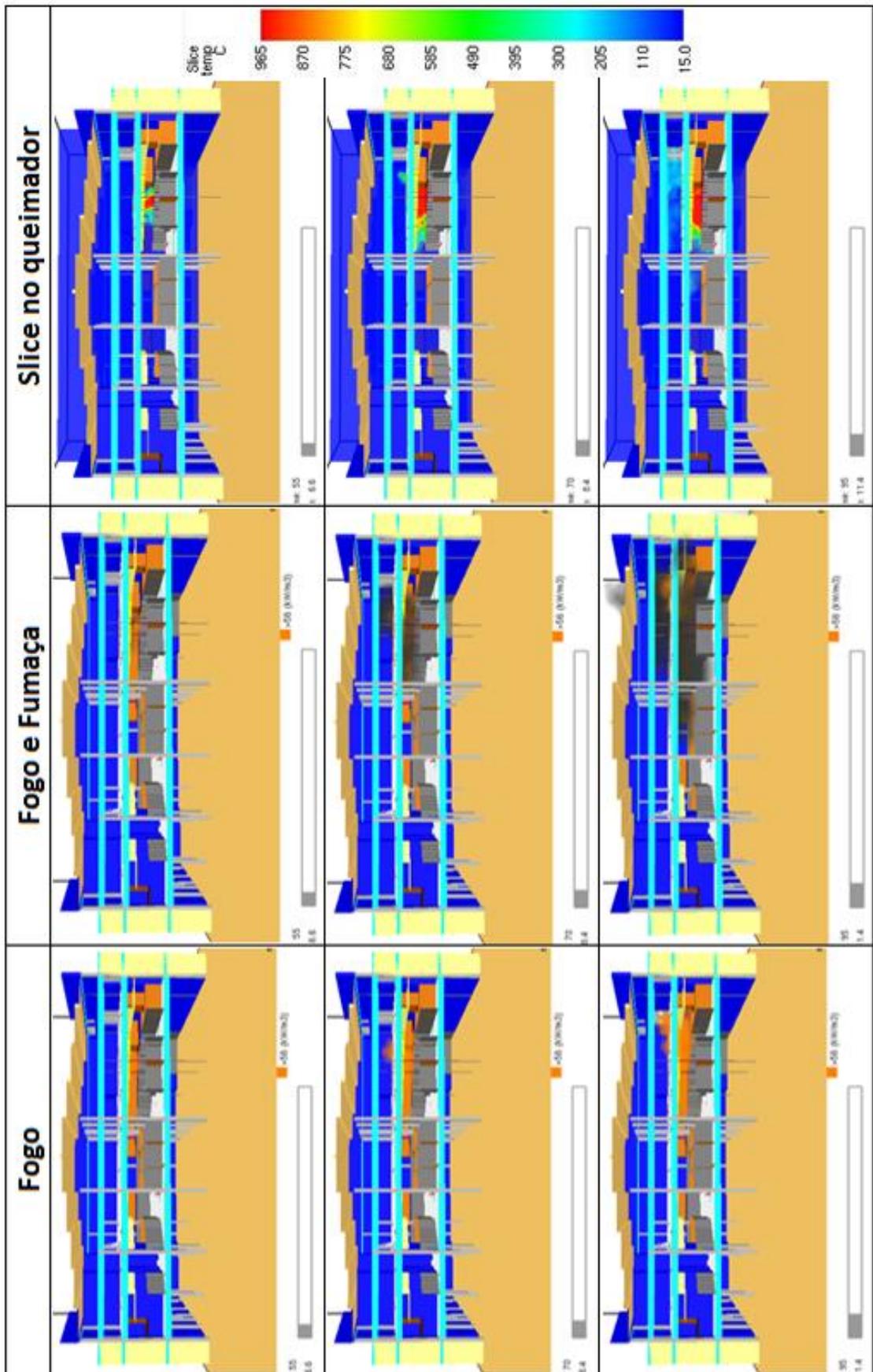


Figura 6.2: Vistas da simulação do Cenário Original aos 6.6s, 8.4s e 11.4s de simulação.

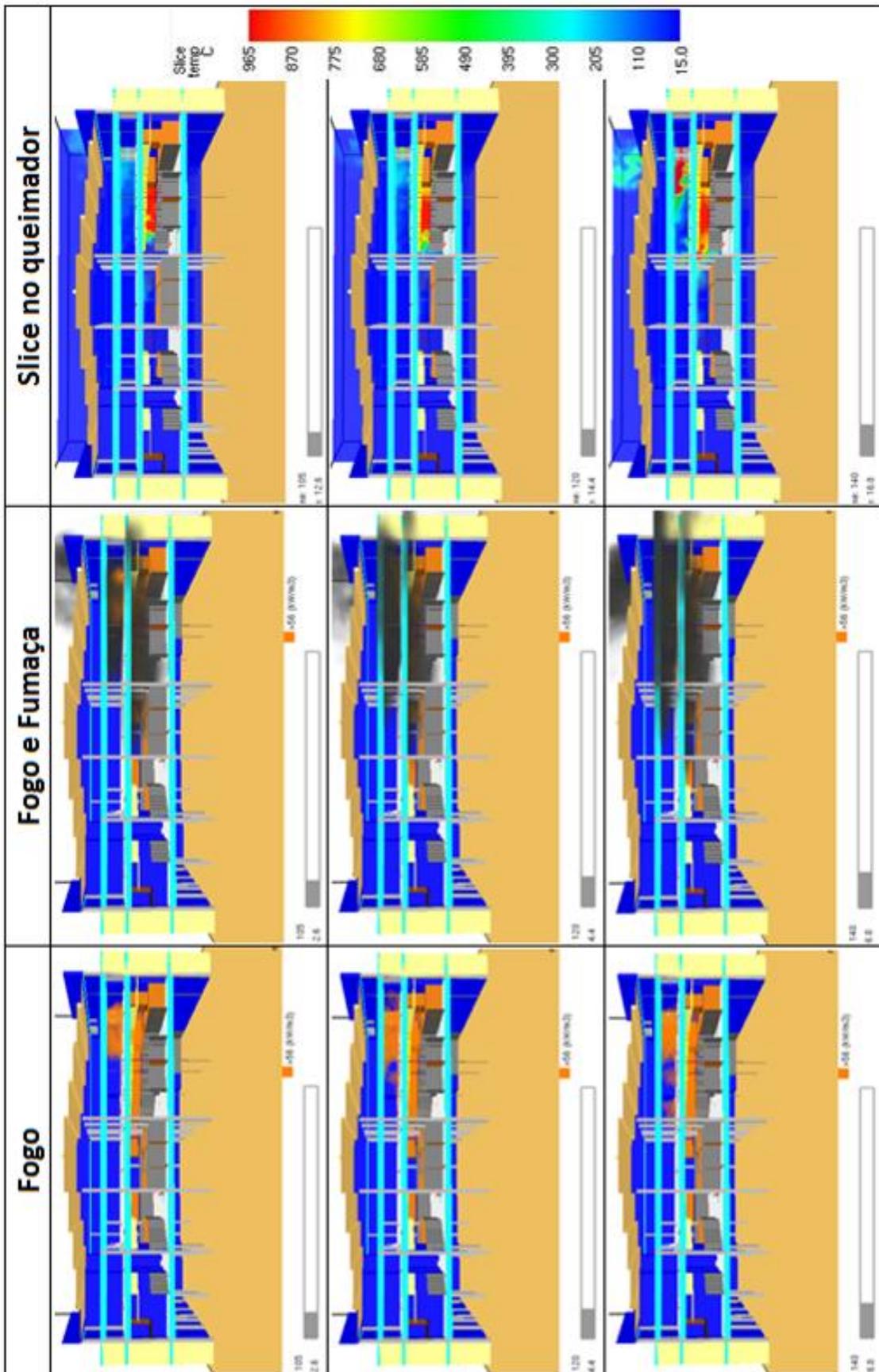


Figura 6.3: Vistas da simulação do Cenário Original aos 12.6s, 14.4s e 16.8s de simulação.

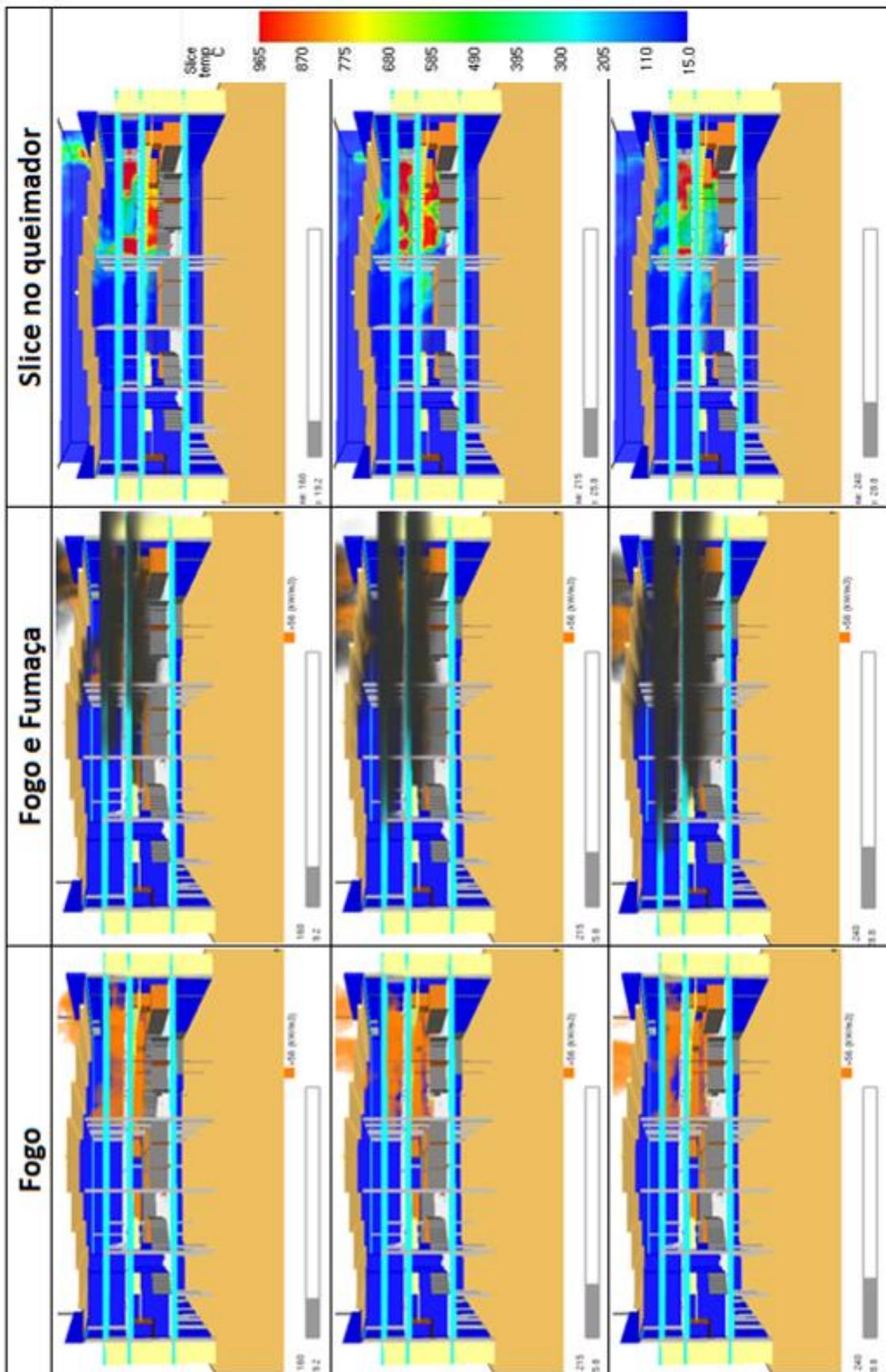


Figura 6.4: Vistas da simulação do Cenário Original aos 19.2s, 25.8s e 28.8s de simulação.

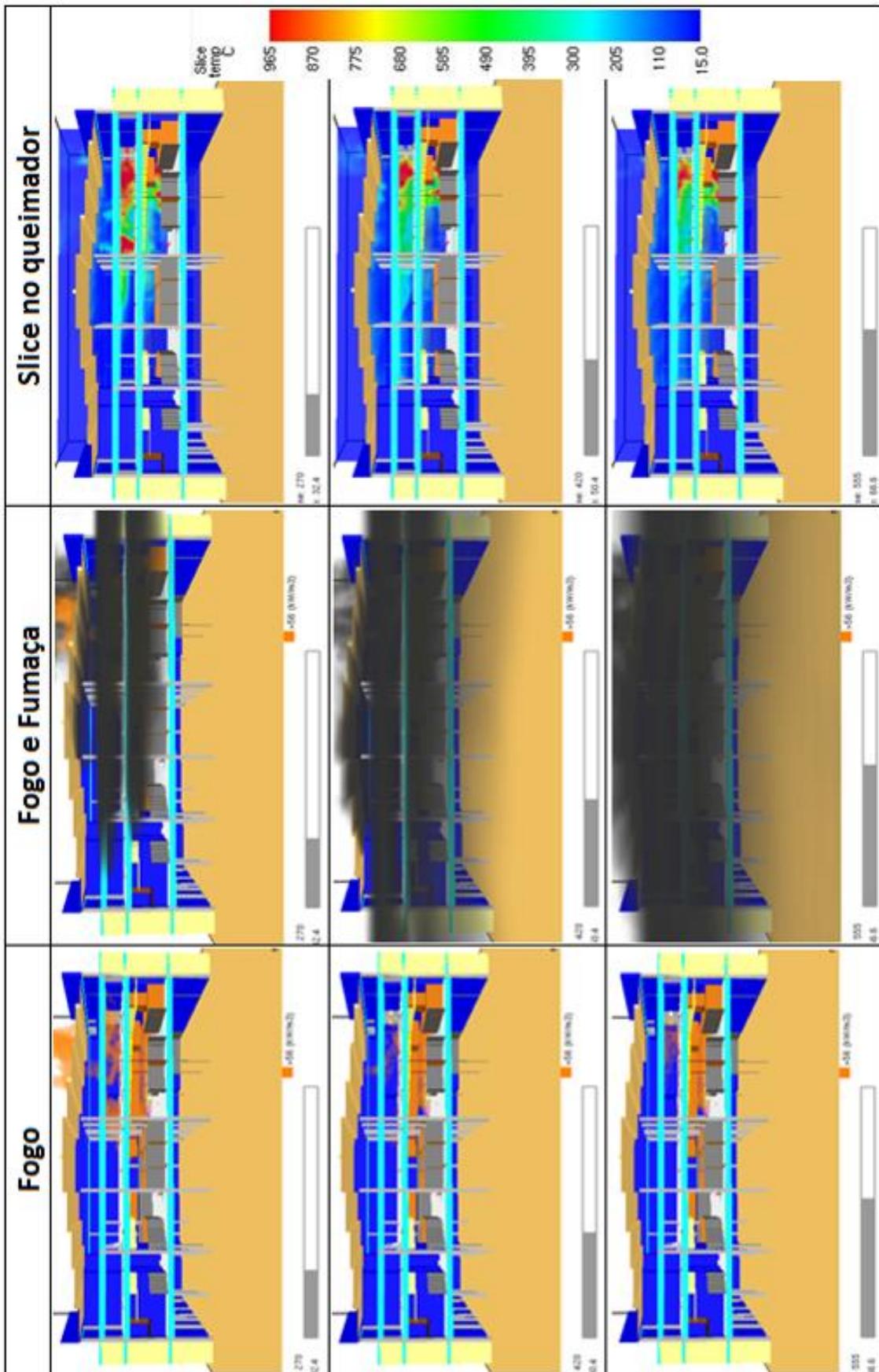


Figura 6.5: Vistas da simulação do Cenário Original aos 32.4s, 50.4s e 66.6s de simulação.

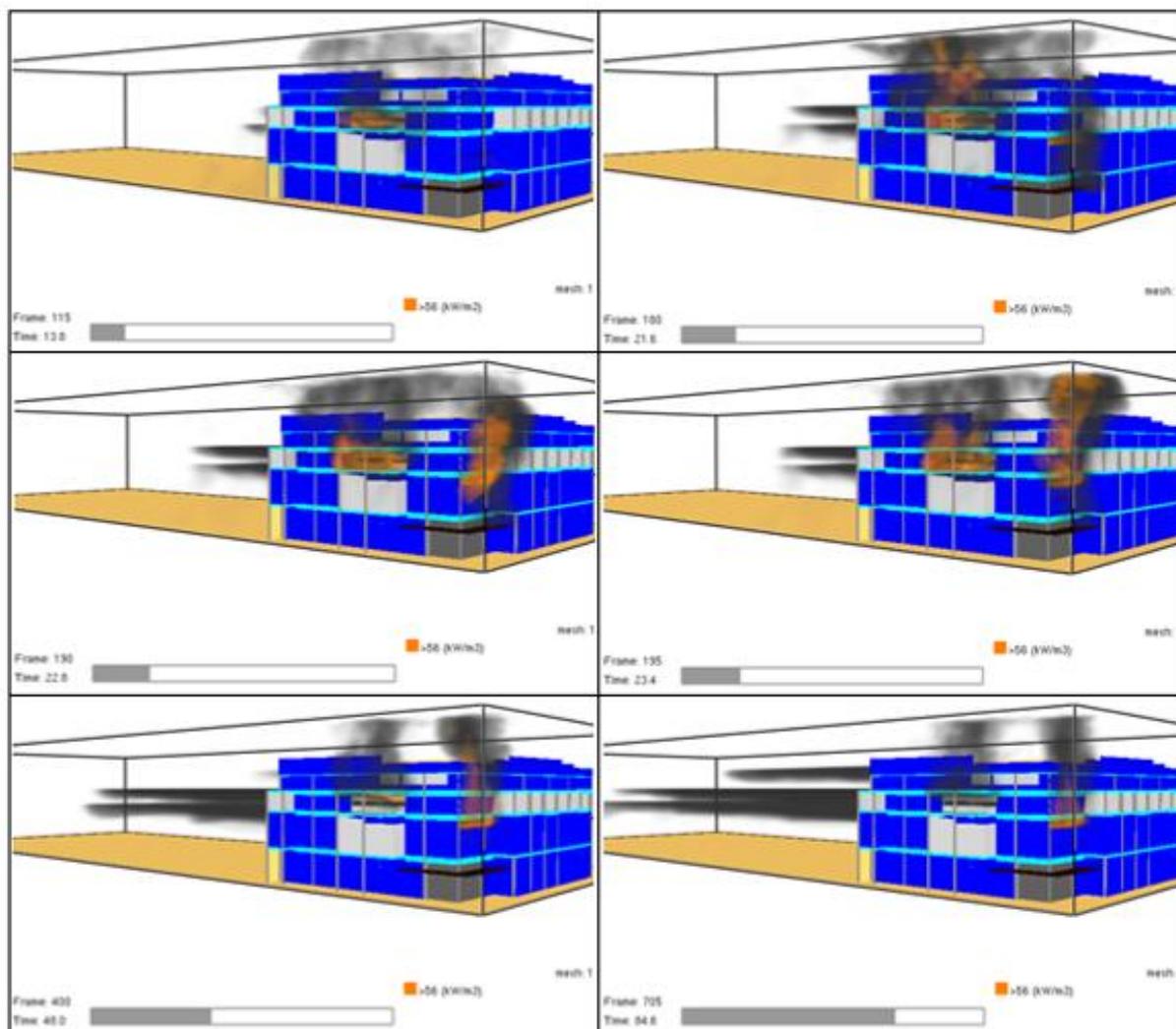


Figura 6.6: Vistas externas da simulação do Cenário Original.

É possível perceber, ainda, que a partir da abertura dos primeiros orifícios nas alvenarias externas, o fogo se desvia de forma bastante acentuada para estes locais. Isso impediu que temperaturas mais altas fossem atingidas no quarto pavimento, tanto que os termopares posicionados junto às venezianas metálicas desse andar não foram ativados, não tendo ocorrido a abertura destas.

Da mesma forma, também não foram ativados os termopares que provocariam a abertura das venezianas metálicas posicionadas no lado direito do terceiro pavimento da edificação. Isso ocorre devido à simplificação utilizada para originar estas aberturas, pois sabe-se que elas não ocorreram instantaneamente a partir de determinada temperatura.

## 6.1.2 Análise das temperaturas atingidas

Buscando uma análise comparativa com o Difratoograma 1 (figura 4.21), foram monitoradas as temperaturas atingidas junto à face do pilar P213, no 2º, 3º e 4º pavimentos (todos os termopares foram posicionados na altura de 1,5m do piso, na face direita do pilar, a mais próxima ao foco, segundo a figura 6.1). O resultado da coleta desses dados pode ser vista nos gráficos apresentados na figura 6.7.

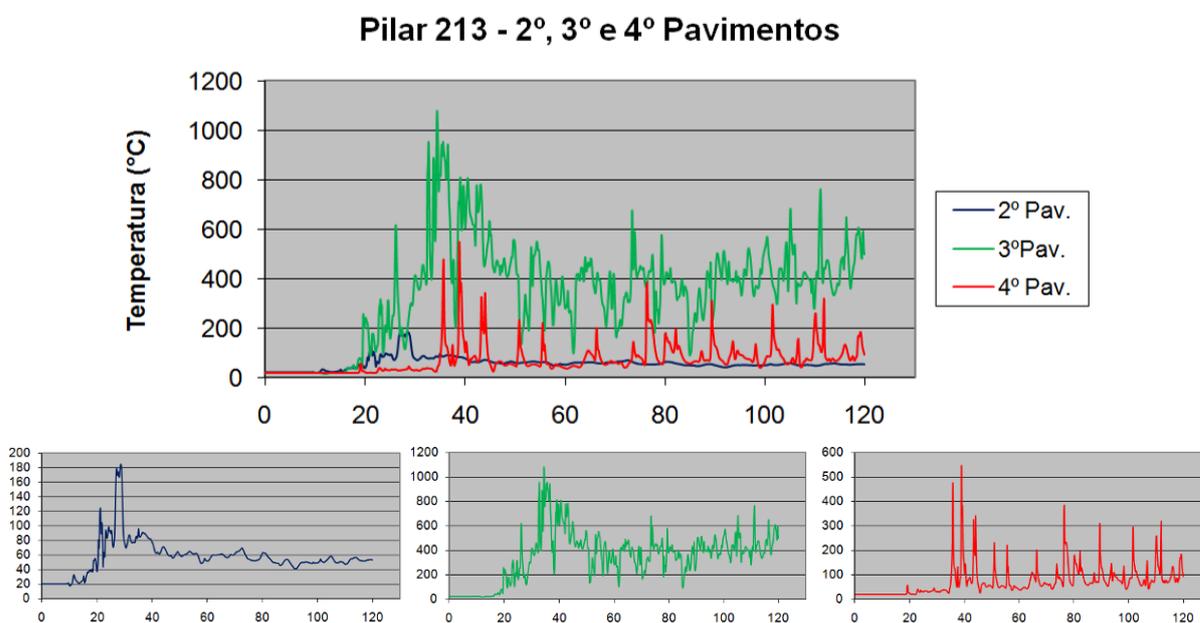


Figura 6.7: Temperaturas atingidas no 2º, 3º e 4º pav. do pilar P213 – h=1,5m.

Analisando os gráficos verifica-se, conforme esperado, que as temperaturas mais elevadas foram atingidas nos pavimentos acima do foco de incêndio, devido ao efeito chaminé.

A temperatura máxima de aproximadamente 200°C no segundo pavimento não condiz com a redução do pico de portlandita verificado para essa amostra no Difratoograma 1. Isso pode ser explicado pela proximidade do pilar P213, no segundo pavimento, em relação à divisória em gesso acartonado (considerada inerte na simulação) que ia até o forro na lateral esquerda da Loja França, o que impediu que temperaturas mais elevadas atingissem o terço médio e baixo desse pilar, conforme pode ser visto na figura 6.8. Nessa figura, são mostradas imagens da *slice* de temperatura posicionada no eixo “x” do pilar P213 em 2 instantes (28,8s e 33,6s), sob dois pontos de vista diferentes; nas imagens de cima são mostradas vistas internas com todos os elementos sólidos, já nas imagens de baixo os mesmos instantes são mostrados utilizando o

recurso de vista *outline* (onde são mostradas apenas as linhas de contorno dos elementos, possibilitando a visão através deles). Analisando as imagens obtidas com o recurso da vista *outline* é possível verificar ainda a propagação dos gases quentes pelo forro de gesso do segundo pavimento.

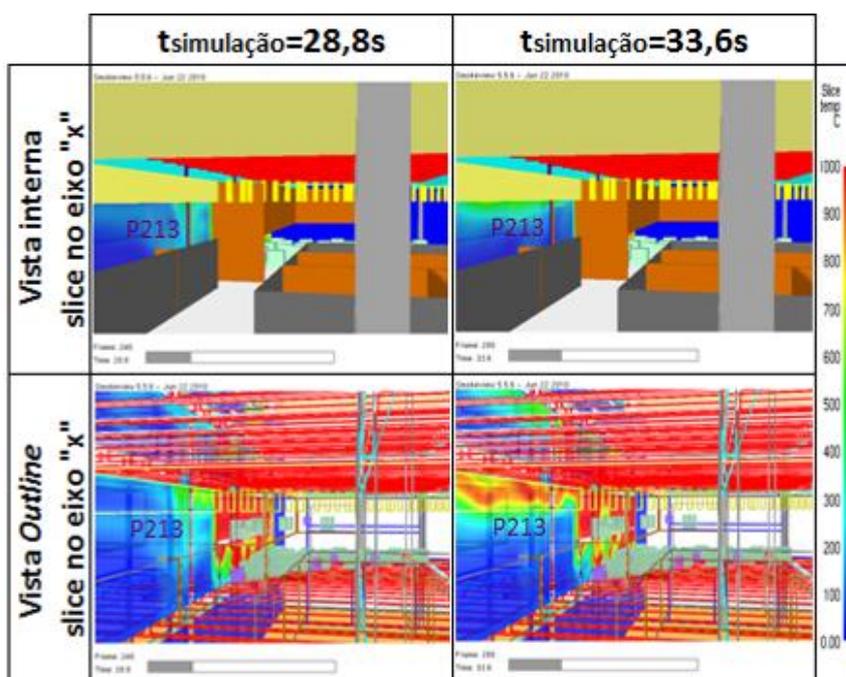


Figura 6.8: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 2º pavimento.

As temperaturas verificadas junto à face do pilar no terceiro pavimento estão coerentes com a correspondente redução do pico de portlandita (e acréscimo dos teores de óxido de cálcio e calcita) verificados para essa amostra no Difratoograma 1. Apesar de ocorrer um pico de temperatura máxima de pouco mais de 1000°C, a temperatura média ficou em torno de 500°C, o que justifica a quantidade de portlandita remanescente. É necessário considerar, ainda, que a amostra utilizada na difratometria continha não apenas material da superfície, mas pelo menos uma pequena parte retirada de certa profundidade (foram extraídas com o auxílio de uma furadeira).

Na figura 6.9 estão representados, através da utilização do recurso de vista *outline*, dois momentos referentes a diferentes níveis de temperatura atingidos (pico de temperatura máxima e temperatura média) no ponto monitorado do pilar P213 no terceiro pavimento.

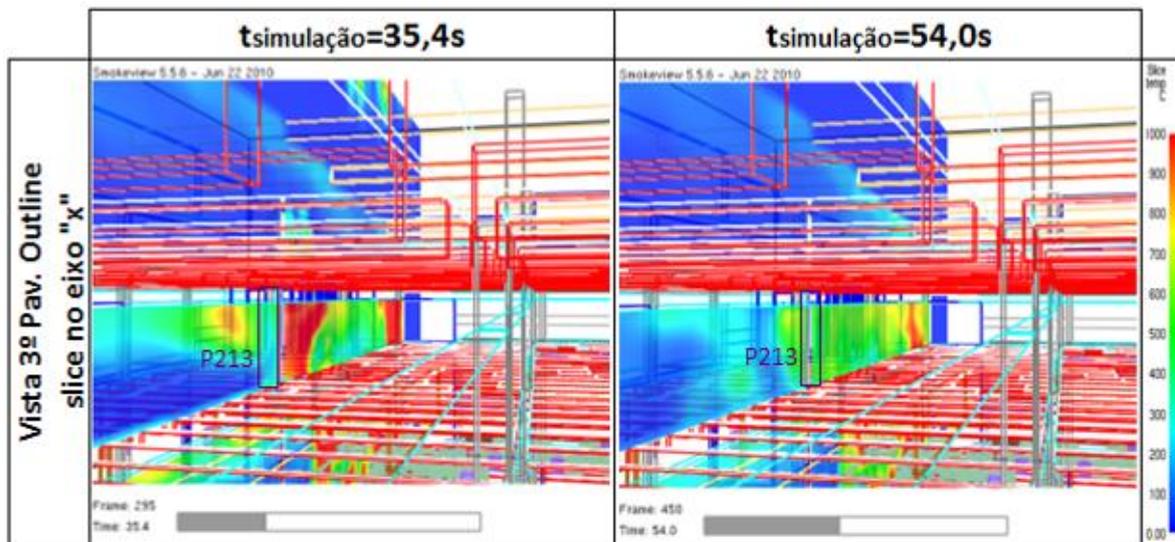


Figura 6.9: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 3º pavimento.

Os picos isolados de temperatura acima dos 400°C, verificados junto à face do pilar no quarto pavimento, não condizem com o completo desaparecimento da portlandita verificados para essa amostra no Difratoograma 1. Isso pode ser explicado pelas simplificações adotadas para o surgimento das aberturas na alvenaria externa (fazendo com que o fogo se desviasse para tais aberturas), o que impediu uma maior elevação da temperatura neste pavimento. Na figura 6.10 estão representados dois momentos (novamente com a utilização do recurso de vista *outline*) referentes aos diferentes níveis de temperatura atingidos no ponto monitorado do pilar P213 no quarto pavimento.

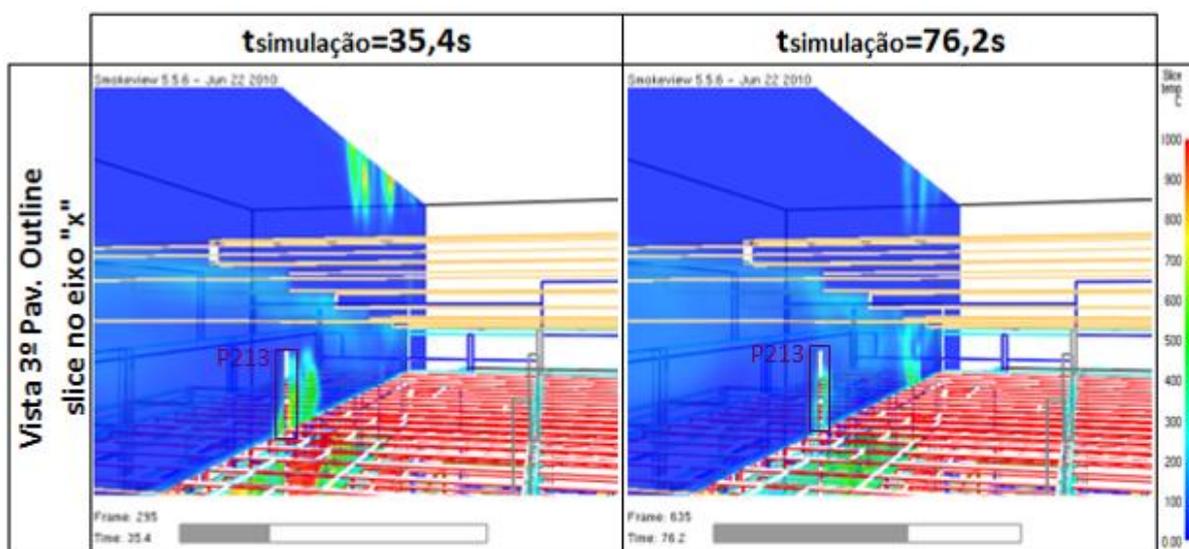


Figura 6.10: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P213, no 4º pavimento.

Para comparação com o Difratoograma 2 (figura 4.22), foram monitoradas as temperaturas atingidas junto à face (os termopares foram posicionados na aresta inferior direita do pilar, segundo a figura 6.1) do pilar P221 em duas alturas diferentes, ambas no segundo pavimento. O resultado da coleta desses dados pode ser vista nos gráficos apresentados na figura 6.11.

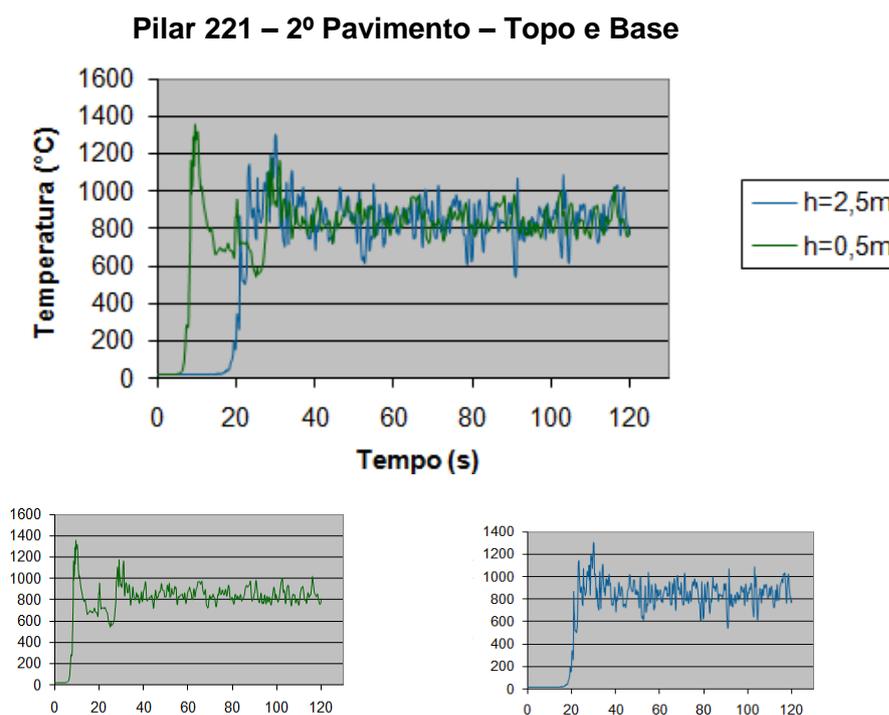


Figura 6.11: Temperaturas atingidas no topo e na base do pilar P221 – 2º pav.

Percebe-se um comportamento bastante semelhante nas duas alturas monitoradas, ocorrendo a elevação da temperatura apenas um pouco mais tarde no topo do pilar. Como este pilar estava posicionado bem no meio da zona mais atingida pelo incêndio, o fato das caixas de material combustível estarem posicionadas junto ao piso fez com que as temperaturas se mantivessem bastante elevadas mesmo nas alturas mais baixas. Isto pode ser observado inclusive na *slice* de temperatura posicionada no eixo deste pilar (figura 6.12).

Ainda assim, analisando os gráficos individualmente, é possível verificar que os picos de temperatura a partir dos 30s de simulação atingem valores levemente mais altos na parte superior do pilar. No entanto, o efeito da concentração de gases quentes junto ao teto do segundo pavimento é melhor demonstrado mais adiante, na representação dos dados nos demais pilares.

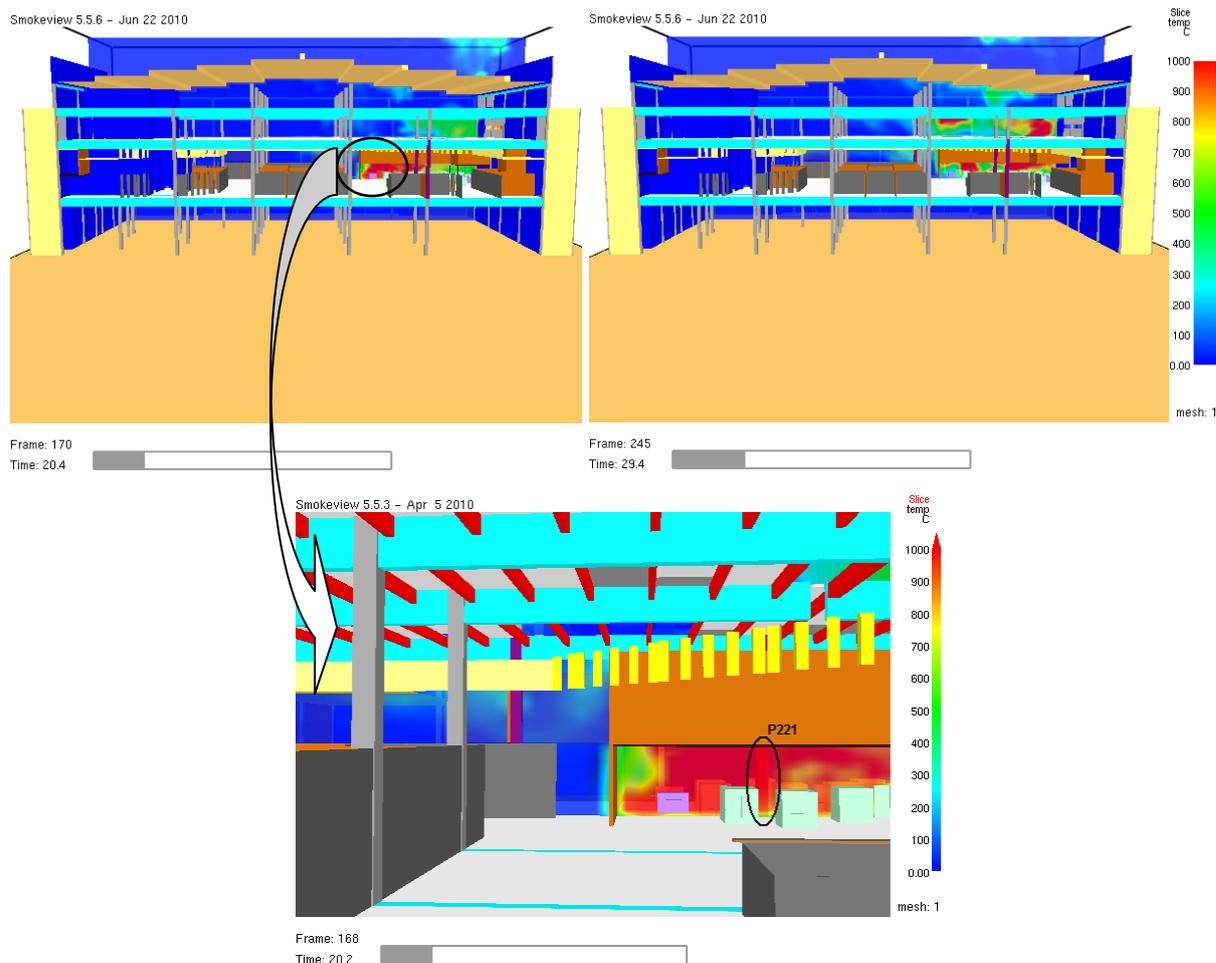


Figura 6.12: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P221.

Como das três amostras submetidas ao ensaio de difração de raios-X, cujos resultados foram representados no Difratoograma 2, duas foram retiradas a certa profundidade, foi considerada apenas a retirada da superfície (topo superficial) para comparar com as temperaturas verificadas na simulação. As temperaturas atingidas (acima de 900°C) condizem com o desaparecimento completo da portlandita e correspondente acréscimo de óxido de cálcio e calcita verificados no difratograma da amostra “Topo Superficial”.

Foram monitoradas ainda as temperaturas atingidas, ao nível do segundo pavimento ( $h=1,5\text{m}$  do piso), nas faces dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 para comparação com o Difratoograma 3 (figura 4.23).

A seguir são apresentados os resultados das temperaturas coletadas em cada pilar (figura 6.13 a 6.24).

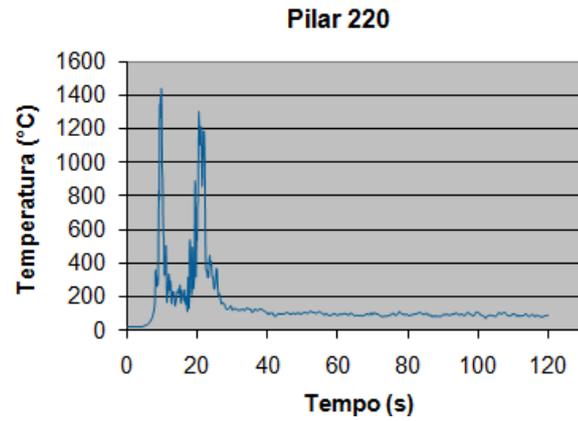


Figura 6.13: Temperaturas atingidas na face do pilar P220: 2º pav. – h=1,5m.

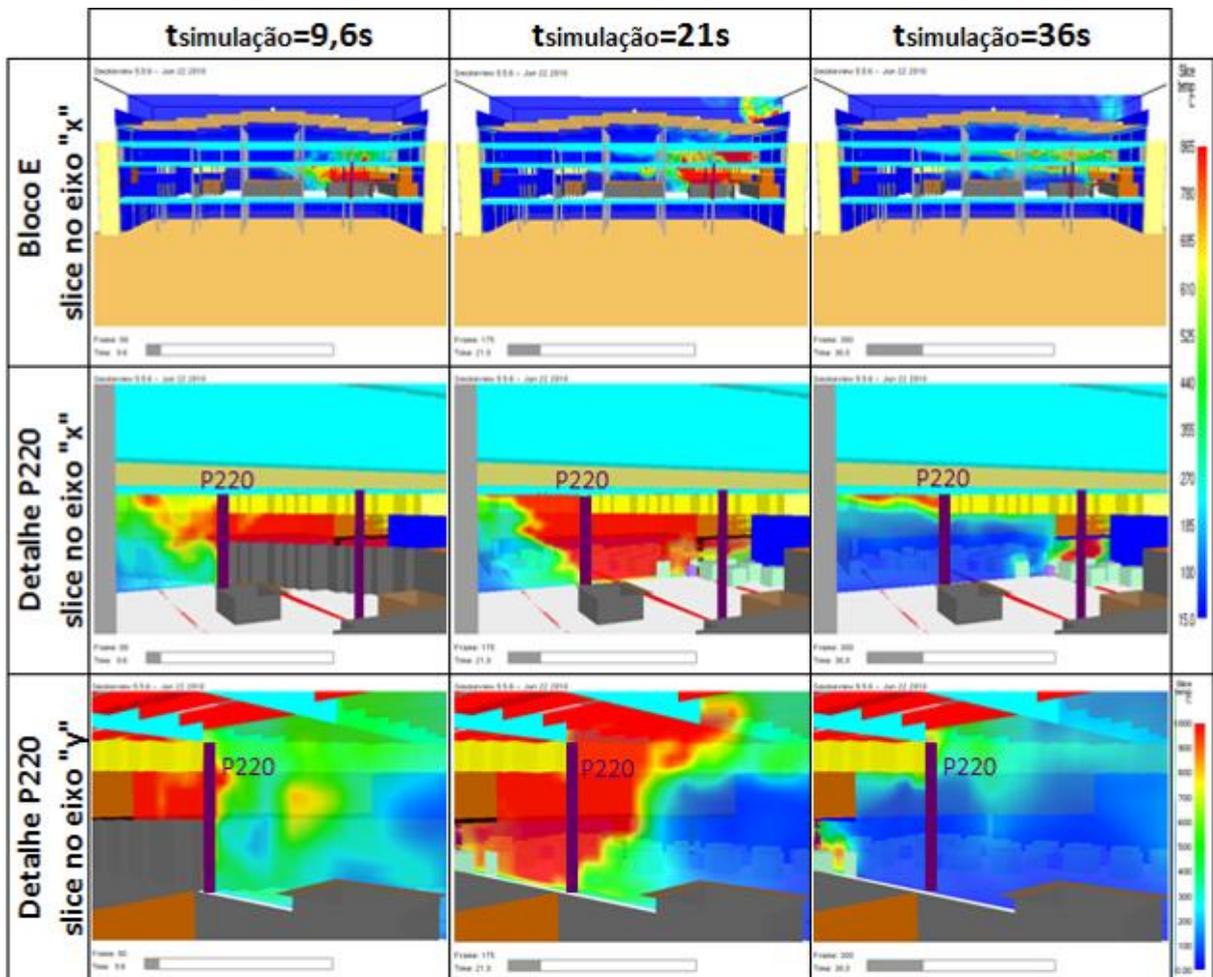


Figura 6.14: Slices de temperatura cruzando o eixo do pilar P220.

No gráfico da figura 6.13 podem ser observados dois picos de temperatura bastante elevada, o primeiro ocorrendo instantes após a ruptura das lajes entre o segundo e terceiro pavimento e o segundo logo após o rompimento da vitrine da Loja França. Após os 30s permanece uma temperatura remanescente de aproximadamente 100°C. Estes momentos estão representados nas *slices* de temperatura que cortam o eixo “x” do pilar P220, apresentadas na figura 6.14. Nesta figura, pode ser verificado ainda que, mesmo após o rompimento da vitrine da Loja França, o fogo não se propaga horizontalmente ao nível do segundo pavimento. Aqui também já é possível verificar que as temperaturas remanescentes se mantêm mais altas junto ao forro.

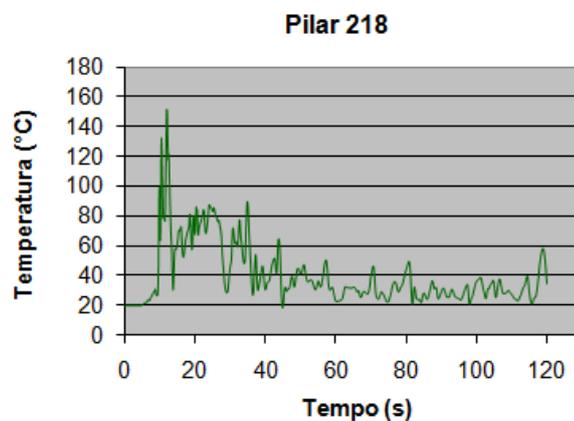


Figura 6.15: Temperaturas atingidas na face do pilar P218: 2º pav. – h=1,5m.

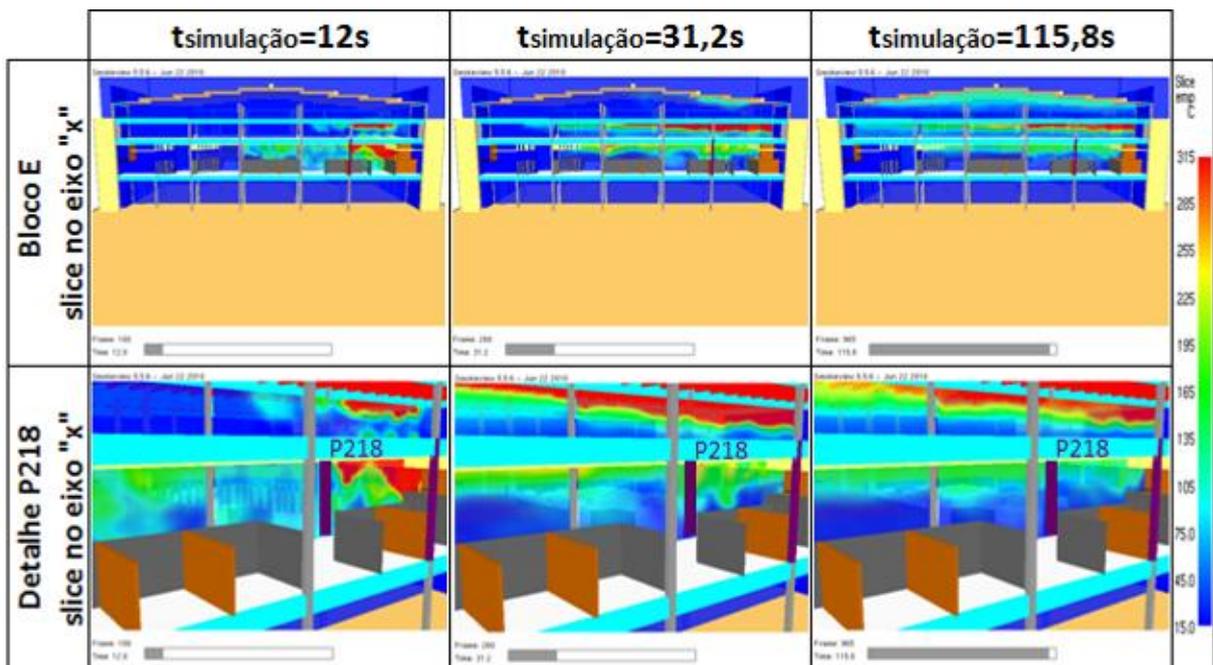


Figura 6.16: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P218.

Na figura 6.16 estão representados três momentos referentes aos diferentes níveis de temperatura atingidos no ponto monitorado do pilar P218 (cujos valores estão plotados no gráfico da figura 6.15). Nessa figura também é possível verificar a propagação dos gases quentes junto ao forro e que as temperaturas remanescentes se mantêm mais elevadas no pavimento acima do foco de incêndio.

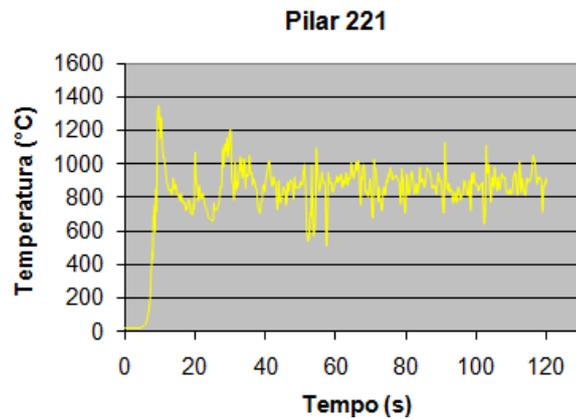


Figura 6.17: Temperaturas atingidas na face do pilar P221: 2º pav. – h=1,5m.

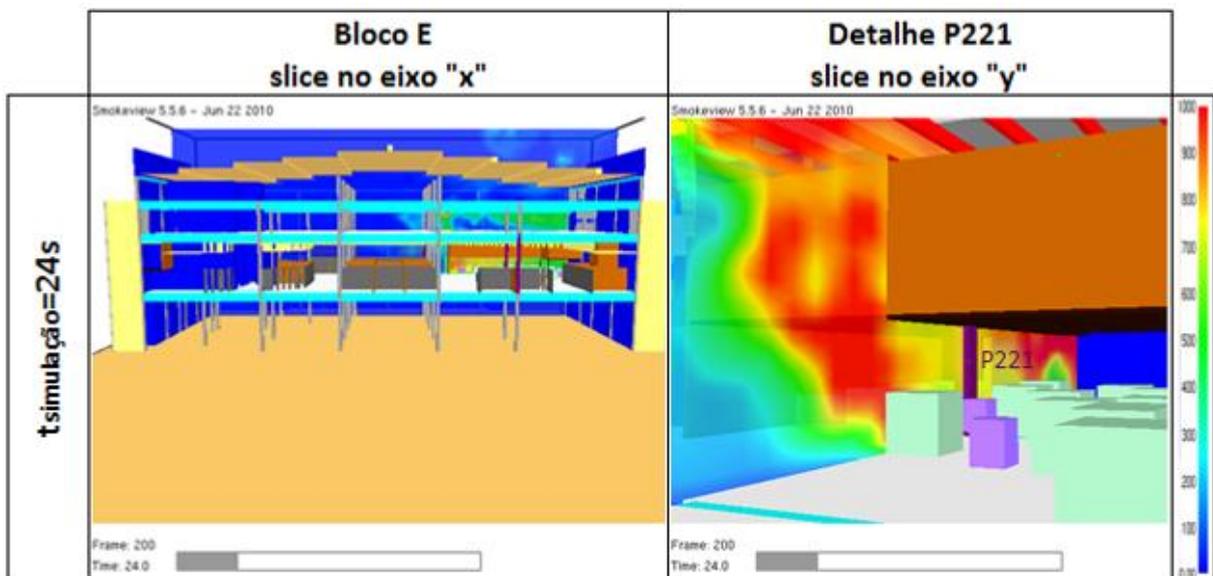


Figura 6.18: Slices de temperatura cruzando o eixo do pilar P221.

Percebe-se que o gráfico apresentado na figura 6.17 (referente aos valores das temperaturas coletadas na altura de 1,5m do pilar P221) é semelhante aos gráficos já mostrados na figura 6.11, referentes às alturas de 0,5m e 2,5m desse mesmo pilar. Essa semelhança se dá em

função da posição deste pilar em relação à carga de incêndio distribuída dentro da loja, como já comentado anteriormente. A ocorrência do pico de temperatura máxima atingida no pilar já foi ilustrada na figura 6.12 e um dos momentos onde foi atingida a temperatura média remanescente está representado na figura 6.18. Nesta figura verifica-se, novamente, que, mesmo após o rompimento da vitrine da Loja França, o fogo não se propaga horizontalmente ao nível do segundo pavimento, em função da ocorrência do “efeito chaminé”.

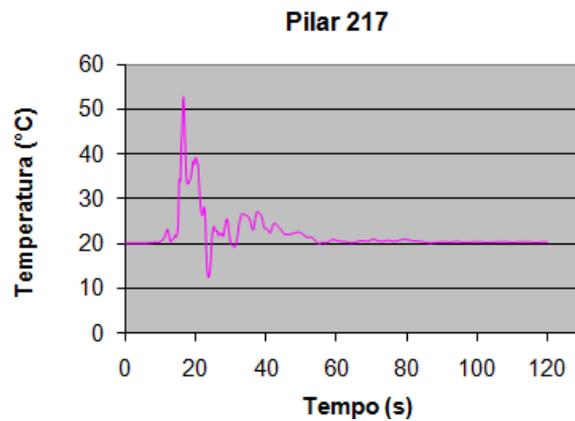


Figura 6.19: Temperaturas atingidas na face do pilar P217: 2º pav. – h=1,5m.

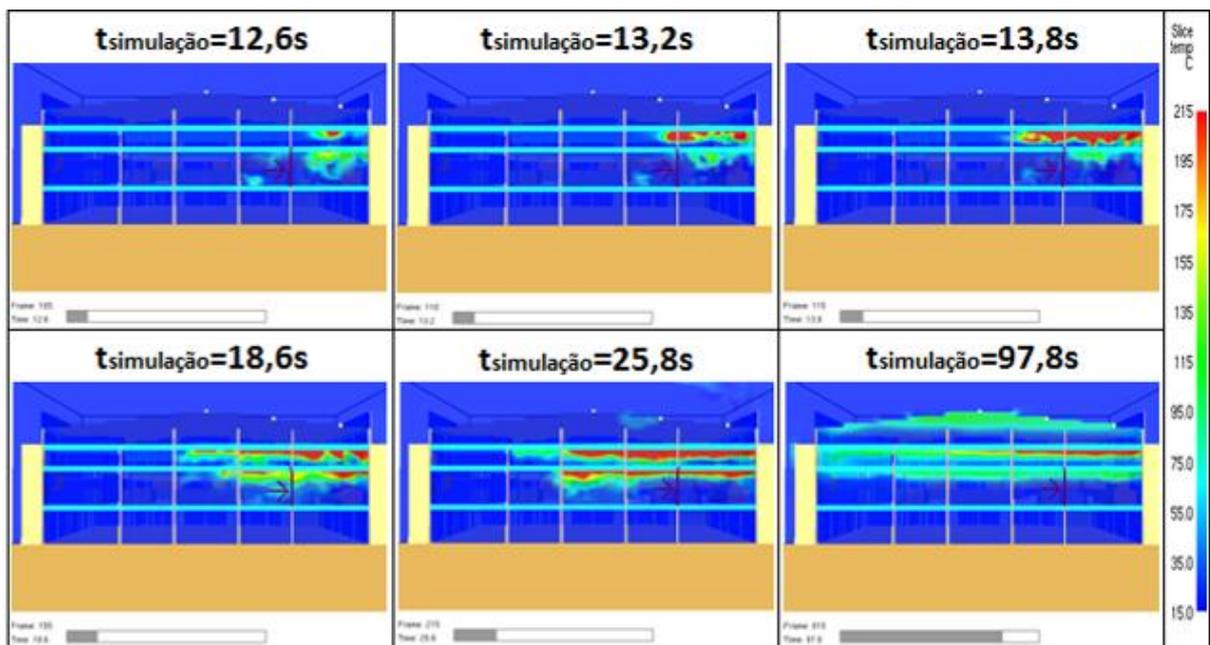


Figura 6.20: Slice de temperatura no eixo “x” do pilar P217.

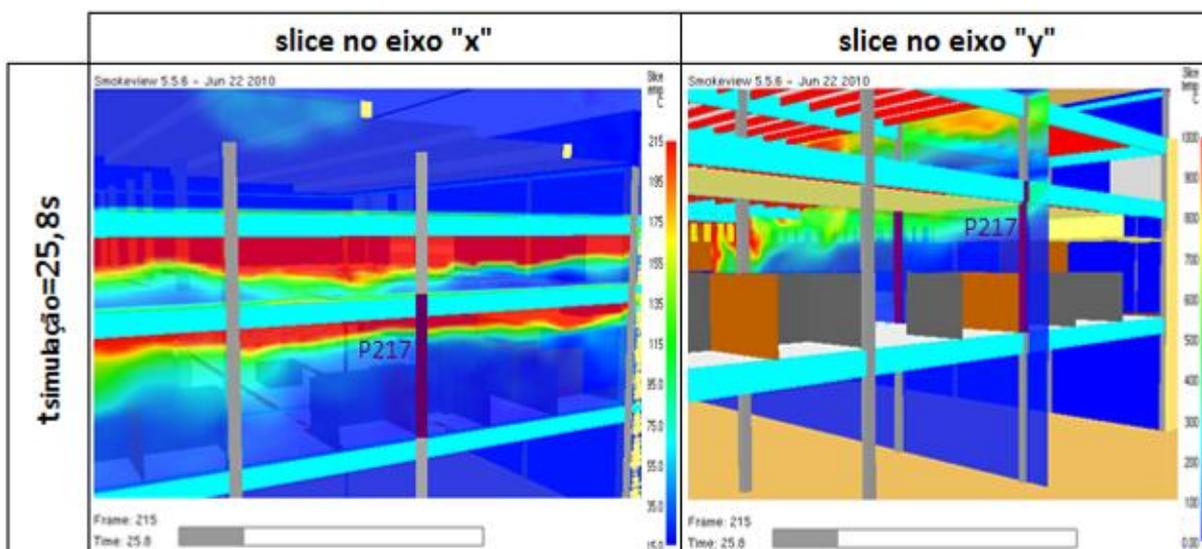


Figura 6.21: Slices de temperatura cruzando o eixo do pilar P217.

Verifica-se, na figura 6.19, que a temperatura máxima atingida no ponto monitorado do pilar P217 ocorreu antes mesmo da quebra da vitrine da Loja França, confirmando, mais uma vez, que, mesmo sem obstáculo, o fogo não se propagou lateralmente no segundo pavimento.

Na figura 6.20 é apresentada uma sequência de imagens da slice de temperatura que corta o eixo “x” deste pilar. Já na figura 6.21 tem-se um detalhe do pilar P217 marcando a slice em “x” e em “y” no mesmo instante. Novamente, verifica-se a propagação dos gases quentes junto ao nível do forro de cada andar, afetando principalmente o topo dos pilares, e as temperaturas remanescentes mais elevadas no pavimento acima do foco de incêndio.

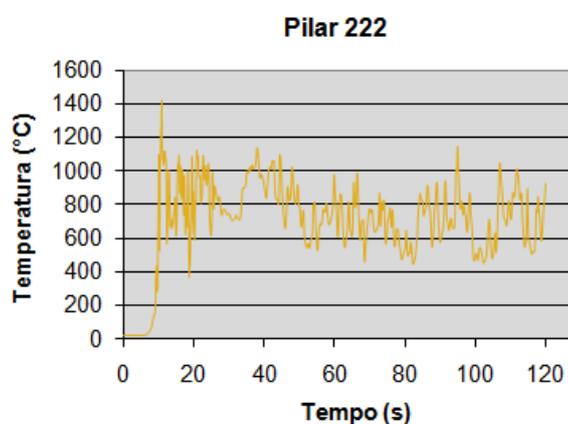


Figura 6.22: Temperaturas atingidas na face do pilar P222: 2º pav. – h=1,5m.

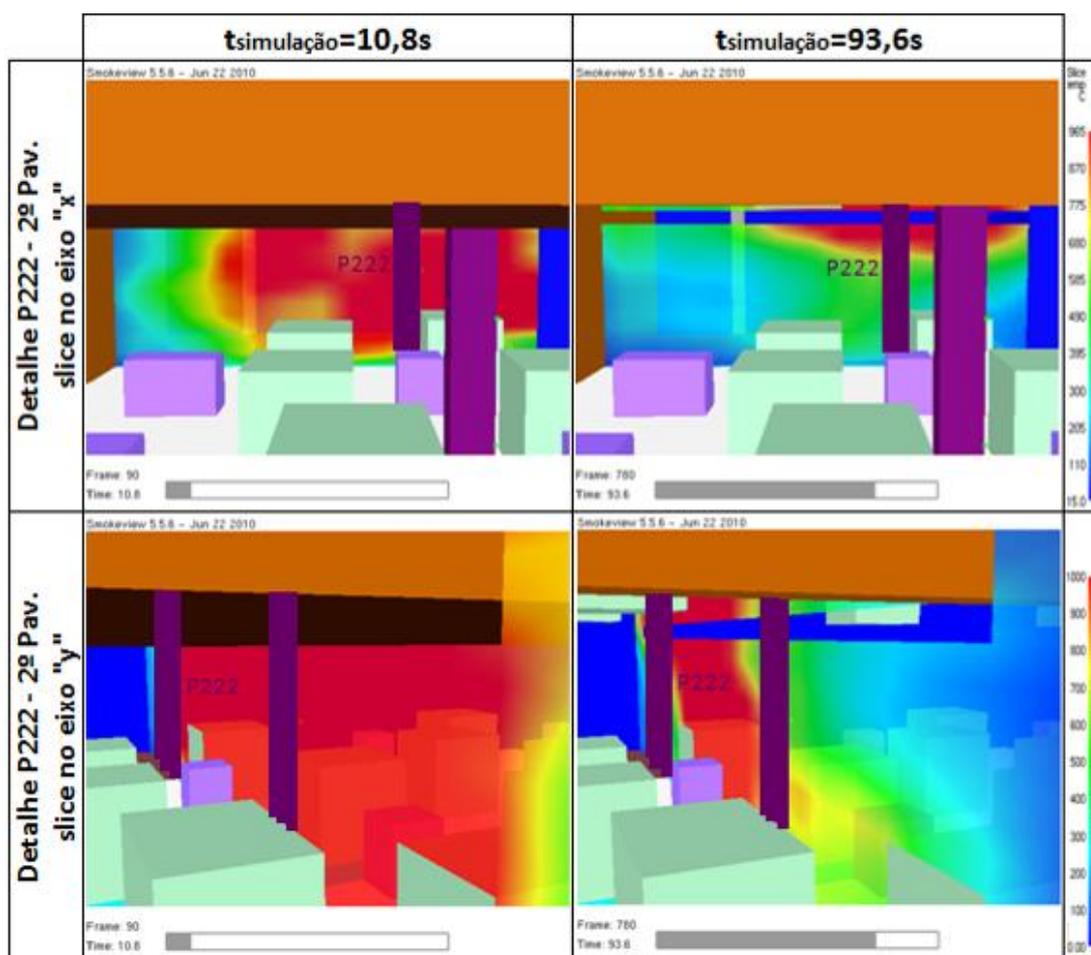


Figura 6.23: Slices de temperatura cruzando o eixo do pilar P222.

Na figura 6.23 estão representados dois momentos referentes aos diferentes níveis de temperatura atingidos no ponto monitorado do pilar P222 (cujos valores estão plotados no gráfico da figura 6.22).

O pico de temperatura máxima atingida ocorre razoavelmente no início do incêndio (equivalendo a mais ou menos 15min de incêndio real) e pode ser considerado como o instante do *flashover*. Vale observar que os demais pilares situados dentro da Loja França (P220 e P221) também apresentam esse pico de temperatura máxima (aproximadamente 1400°C) nesse instante, indicando inflamação generalizada no interior da loja (figura 6.24).

Mais uma vez é possível verificar a ocorrência do efeito chaminé e, conseqüentemente, não ocorre a propagação do fogo horizontalmente ao nível do segundo pavimento.

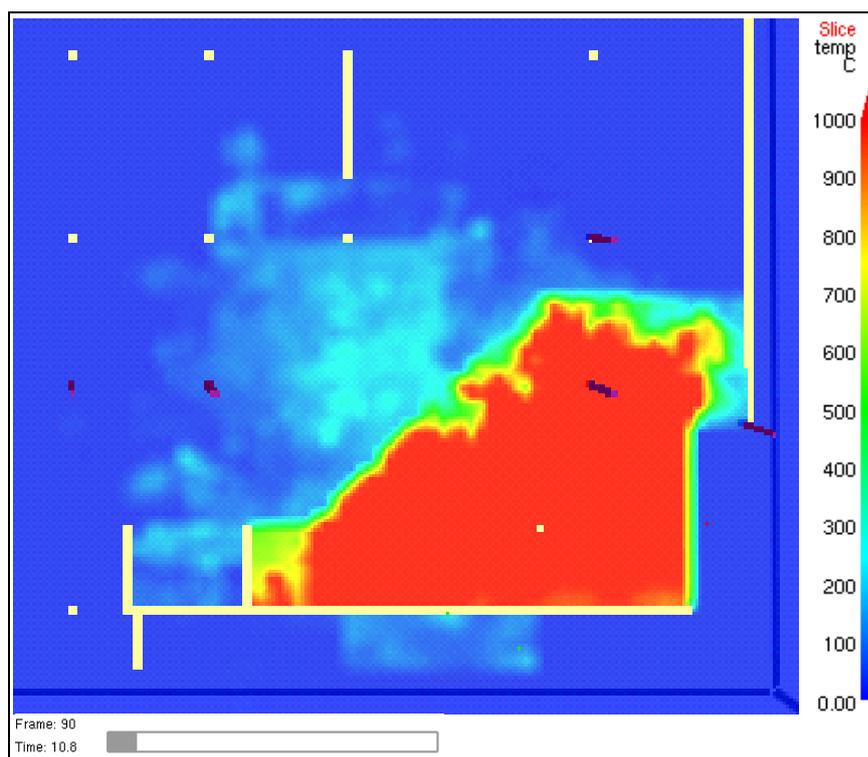


Figura 6.24: *Slice* de temperatura ( $t=10,8s$ ) no eixo “z” em  $h=1,5m$  do piso do 2º pavimento.

Observando as temperaturas verificadas na simulação para os pilares P217, P218, P220, P221 e P222, percebe-se que realmente a zona mais afetada no segundo pavimento ficou concentrada dentro da Loja França.

Os resultados para os pilares P221 e P222, que estavam no centro da zona mais atingida, são bastante similares. No pilar P220, posicionado no centro da vitrine da loja, começa-se a perceber a influência do efeito chaminé, pois ali as temperaturas médias já não são tão altas; à exceção dos dois picos de temperatura máxima, o primeiro no instante do *flashover* e o segundo quando do rompimento da vitrine.

Comparando os dados medidos nestes pilares com o Difratoograma 3, os resultados mostraram-se coerentes. Os difratogramas dos pilares P220, P221 e P222 também são bastante semelhantes e a temperatura atingida (acima de  $900^{\circ}C$ ) corresponde à considerável redução do teor de portlandita e incremento do teor de óxido de cálcio e calcita. Verifica-se ainda que os pilares mais distantes do foco de incêndio (P217 e P218), em cujas amostras foram encontrados consideráveis teores de portlandita remanescente, foram realmente submetidos a temperaturas menos elevadas (inferiores a  $400^{\circ}C$ ).

Finalizando a análise das temperaturas verificadas na simulação do cenário original, são apresentadas, na figura 6.25, mais algumas imagens da propagação dos gases quentes longitudinalmente (através da slice de temperatura posicionada no eixo y dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222) ao prédio 7 do shopping, mostrando os níveis de temperatura atingidos nos demais módulos e a propagação da fumaça.

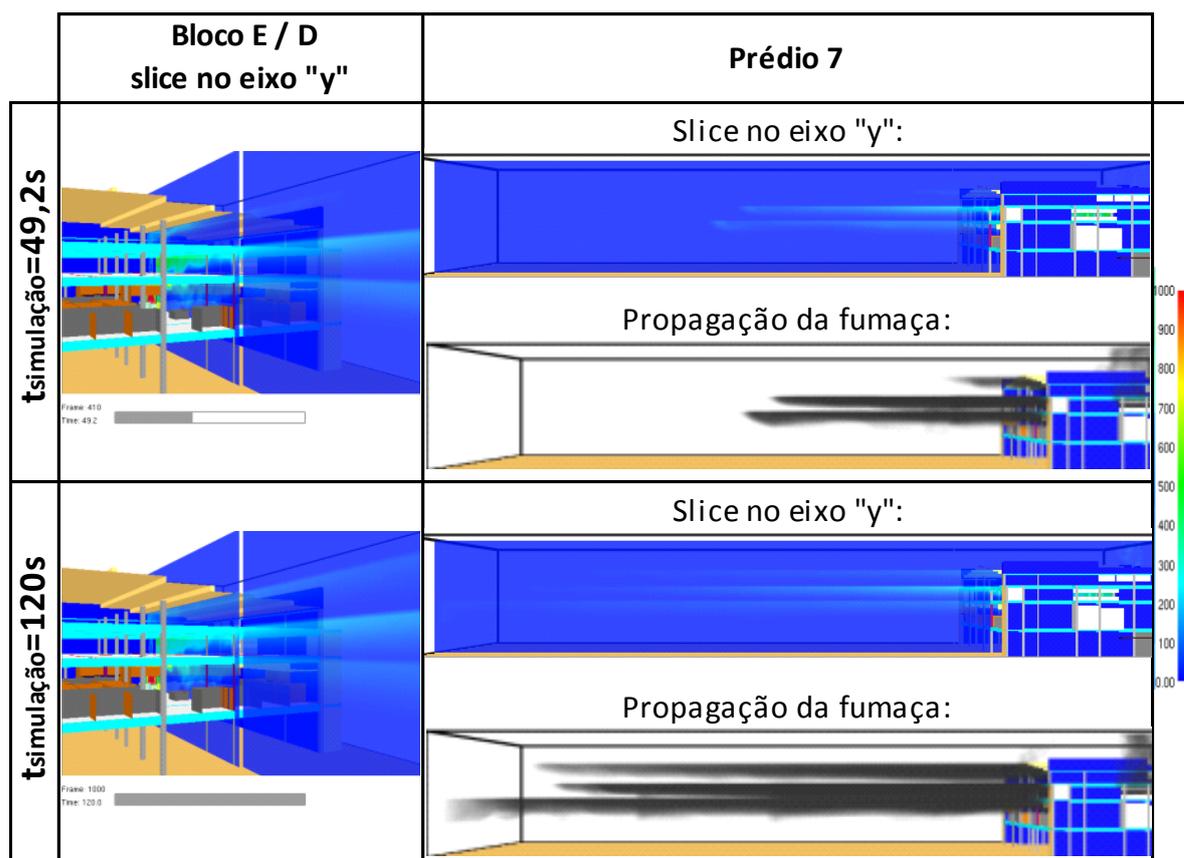


Figura 6.25: *Slice* de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 e propagação da fumaça.

Observa-se que, no módulo D, as temperaturas levemente elevadas junto à laje de piso do quarto pavimento conferem com a ocorrência de fissuras de dessecação superficial verificadas no teto do terceiro pavimento deste módulo.

Percebe-se, ainda, conforme os indícios verificados na inspeção da estrutura sinistrada, que as temperaturas atingidas nos demais módulos conferem com a ausência de danos, embora todo o prédio tenha ficado impregnado de fuligem.

## 6.2 CENÁRIO ALTERNATIVO 1: PRESENÇA DE SPRINKLERS

De acordo com informações obtidas com o corpo de bombeiros – 1º CRB, responsável pelo combate ao fogo no sinistro do Shopping Total, o sistema de sprinklers do shopping não funcionou na ocasião do incêndio.

Para avaliação de um cenário alternativo no qual o sistema tivesse funcionado como desejado, foram então inseridos sprinklers no 2º, 3º e 4º pavimentos do modelo computacional (apenas no módulo E, por simplicidade), posicionados de acordo com o projeto de PPCI aprovado.

A temperatura de ativação dos sprinklers, segundo o projeto, era de 68°C. Para a pressão residual mínima foi utilizado o valor de 140 kPa, recomendado pela NBR10897:2004 para edificações de risco ordinário (shopping center é enquadrado como risco ordinário II, onde a quantidade e combustibilidade do conteúdo é de moderada à alta).

A inclusão dos sprinklers, aliada à elevada quantidade de termopares incluídas no modelo (um para cada sprinkler), gerou uma demanda computacional extremamente elevada para esta simulação. O tempo máximo de simulação conseguido foi de 20,77s, sendo que o tempo de processamento necessário foi de 25:18h, ocorrendo, então, instabilidade numérica.

Apesar do pouco tempo de incêndio simulado (apenas a parte inicial, equivalendo a aproximadamente 34min de incêndio real, onde são atingidas as temperaturas mais elevadas), já foi possível verificar alguns pontos passíveis de comparação com o cenário original, discutidos a seguir.

### 6.2.1 Dinâmica do incêndio verificada

Nas figuras 6.26 e 6.27 podem ser vistas algumas imagens dessa simulação.

Verifica-se que os sprinklers foram ativados em todos os pavimentos, porém só foram acionados aqueles posicionados na região mais afetada (entre os eixos verticais 23 e 27 e os eixos horizontais A e B, segundo o anexo A), evidenciando mais uma vez o comportamento tipo chaminé típico desse sinistro.

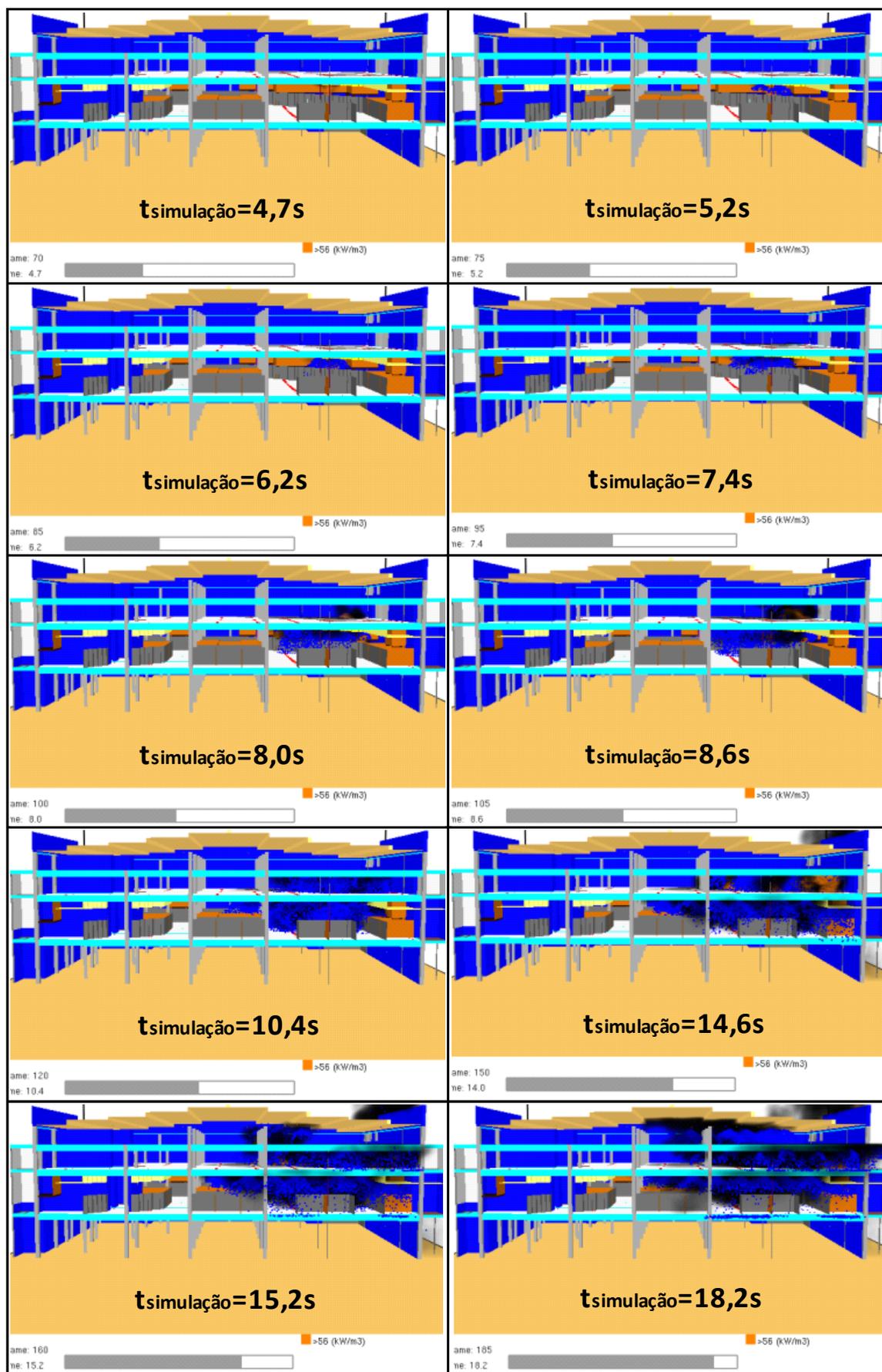


Figura 6.26: Vistas internas da simulação do Cenário Alternativo 1.

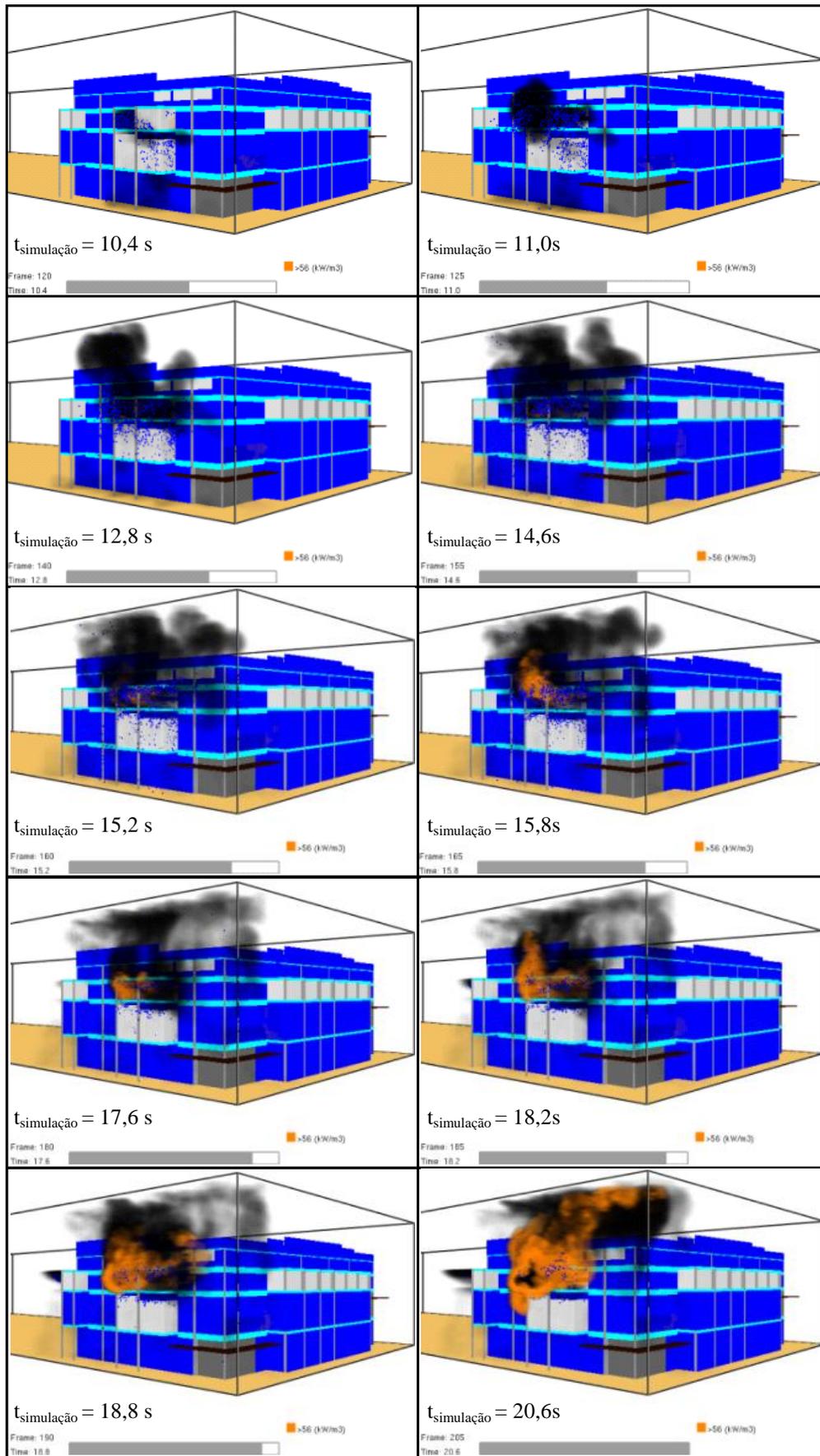


Figura 6.27: Vistas externas da simulação do Cenário Alternativo 1.

Comparando com a simulação original, verificou-se que o fogo começa a sair pelas aberturas externas um pouco mais tarde e em menor intensidade no início. Percebe-se também, que com a presença dos sprinklers no interior do prédio, o fogo se direciona de forma mais acentuada ainda para o exterior da edificação através das aberturas. Nesta simulação não chegou a ocorrer a abertura da alvenaria na lateral do prédio. Porém, considerando o instante em que a simulação foi interrompida não é possível afirmar que ela não ocorreria, pois na simulação original foi exatamente no instante seguinte que essa abertura apareceu.

### 6.2.2 Análise das temperaturas atingidas

Na figura 6.28 estão representadas algumas imagens da *slice* de temperatura posicionada no eixo “x” do queimador.

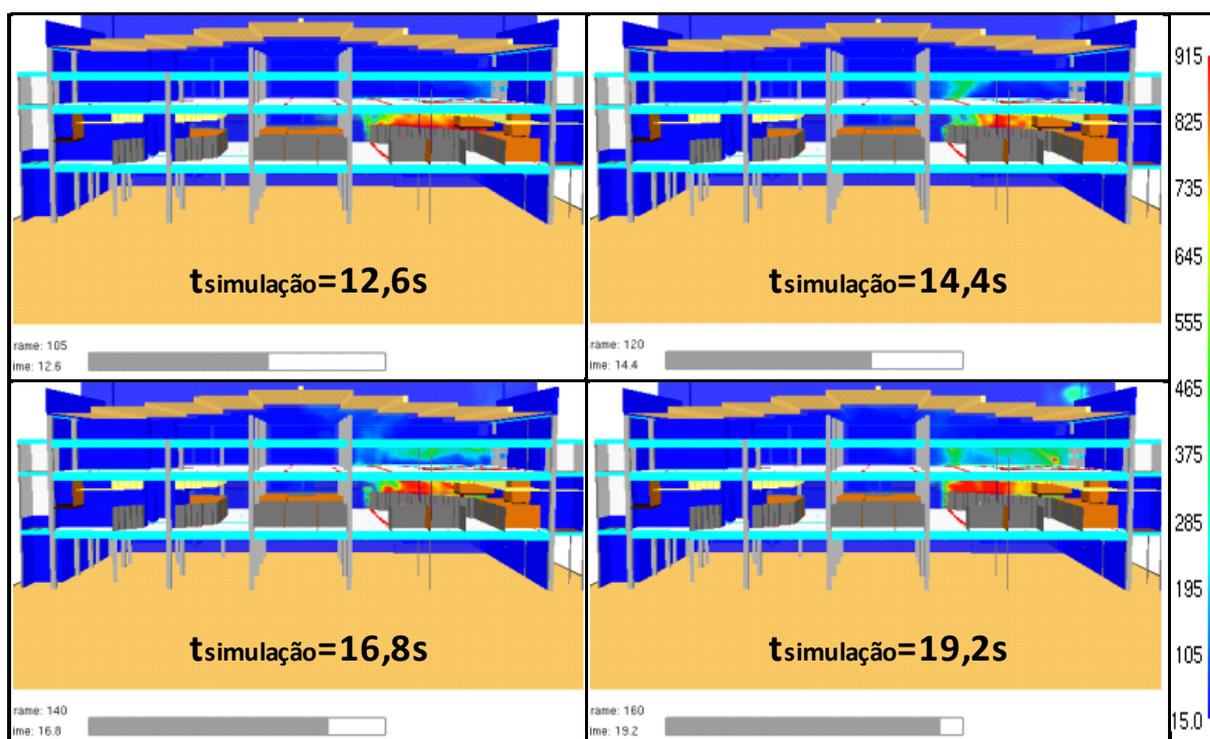


Figura 6.28: *Slice* de temperatura no eixo “x” do queimador.

Imagens referentes a esses mesmos instantes foram apresentadas nas figuras 6.3 e 6.4, de modo a possibilitar uma comparação entre as temperaturas atingidas na simulação do cenário com sprinklers e na simulação do cenário original.

Analisando a figura (e comparando com as imagens dos respectivos tempos na simulação do cenário original) tem-se a sensação de que, com a presença dos sprinklers, foram atingidas temperaturas levemente mais baixas na zona do segundo pavimento mais afetada pelo incêndio (dentro da Loja França), o que se confirma verificando os picos de temperatura máxima atingidos nos pilares P220, P221 e P22 (figura 6.29 e tabela 6.1).

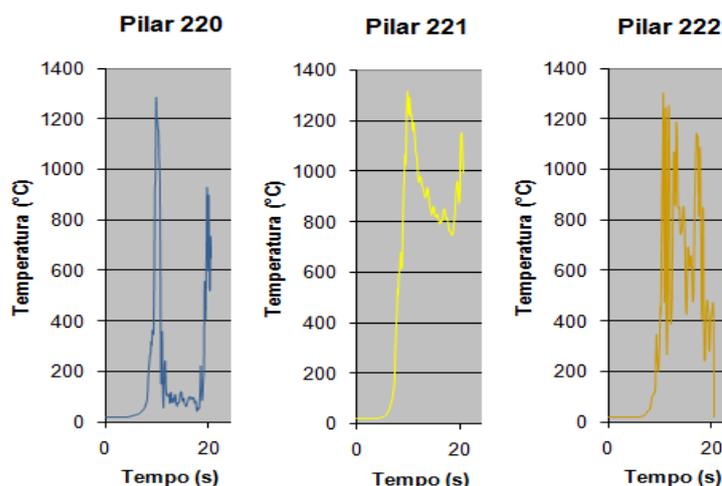


Figura 6.29: Temperaturas atingidas nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.

Tabela 6.1: Picos de temperatura máx. nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.

Pilar	Pico de temperatura máxima atingida	
	Cen. Original	Cen. Alternativo 1
220	1440°C	1280°C
221	1350°C	1320°C
222	1420°C	1300°C

Comparando as imagens nos tempos 16,8s e 19,2s da figura 6.28 com as imagens referentes aos mesmos tempos nas figuras 6.3 e 6.4, é possível verificar que no terceiro pavimento os níveis de temperatura atingidos foram consideravelmente mais baixos na presença dos sprinklers (no cenário original foram atingidas temperaturas na ordem de 965°C, enquanto na presença dos sprinklers as temperaturas ficaram em torno de 555°C).

Ao analisar as temperaturas atingidas nos pilares P218 e P217, mais distantes da Loja França, percebe-se que, com o afastamento do foco de incêndio, a queda nas temperaturas atingidas causadas pela presença dos sprinklers se tornou ainda maior. Ou seja, o dano teria sido hipoteticamente menor e mais localizado.

Na figura 6.30 estão representadas, na *slice* de temperatura que corta o eixo "x" do pilar P218, as temperaturas atingidas no alinhamento horizontal deste pilar no instante de 12s. Já na figura 6.31 estão representadas, na *slice* de temperatura que corta o eixo "x" do pilar P217, as temperaturas atingidas na interface dos módulos E e D em diversos momentos.

Esses mesmos instantes foram apresentados nas figuras 6.16 (no caso da *slice* do pilar P218) e 6.20 (no caso da *slice* do pilar P217), de modo a possibilitar uma comparação entre as temperaturas atingidas na simulação do cenário com sprinklers e na simulação do cenário original.

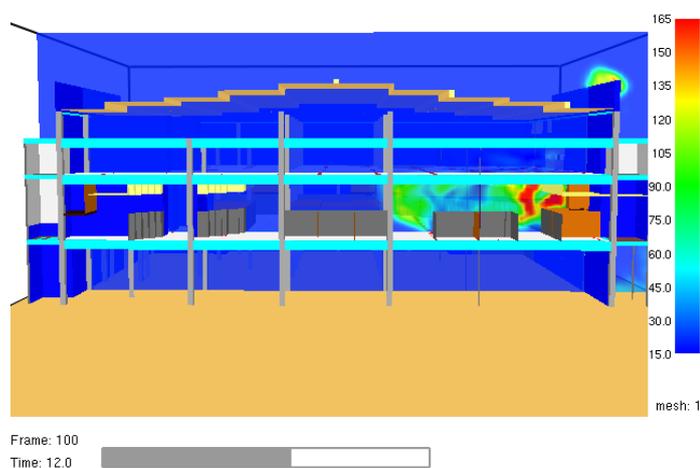


Figura 6.30: *Slice* de temperatura no eixo "x" do pilar P218.

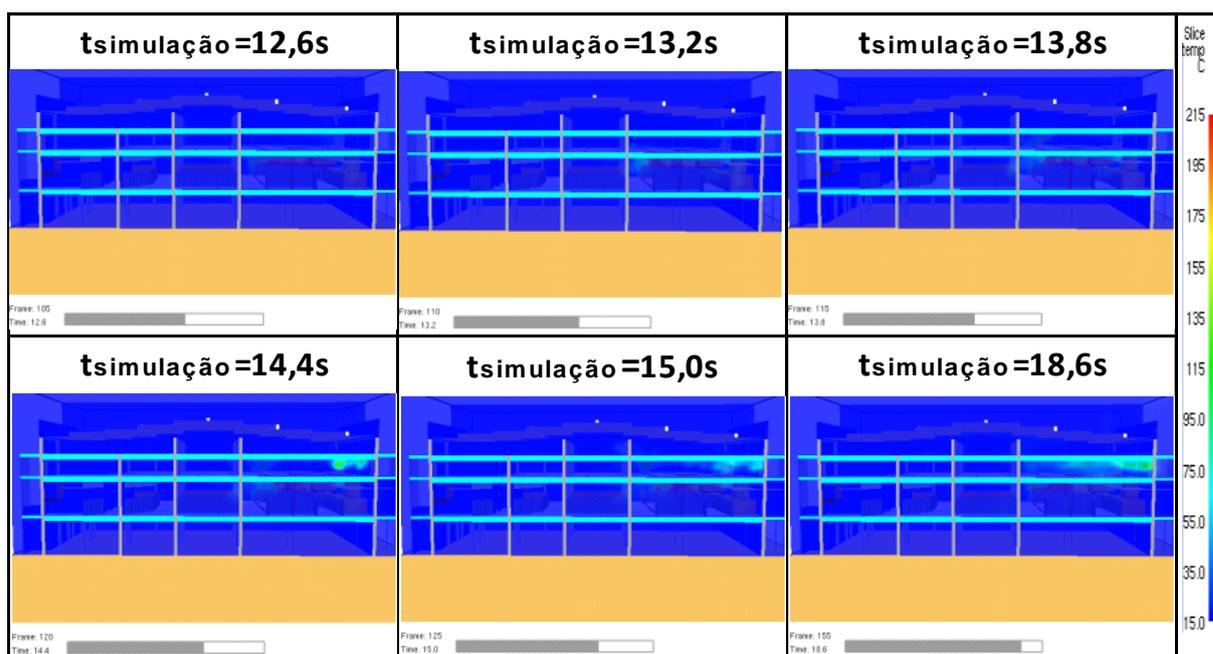


Figura 6.31: *Slice* de temperatura no eixo "x" do pilar P217.

Analisando as figuras fica evidente, mais uma vez, a significativa diferença nos níveis de temperatura atingidos no terceiro pavimento na presença dos sprinklers. Na *slice* posicionada no eixo do pilar P218 (figura 6.30) não há temperatura superior a 20°C neste pavimento aos 12s enquanto no cenário original já eram detectadas temperaturas da ordem de 315°C no mesmo local nesse instante. O mesmo ocorre para os tempos de 12,6s, 13,2s e 13,8s, na *slice* posicionada no eixo do pilar P217 (figura 6.31), sendo que no cenário original as temperaturas detectadas eram da ordem de 215°C.

Observa-se, ainda, que praticamente não há propagação de gases quentes para os demais módulos. Essa queda nos níveis de temperatura observados se confirma verificando os picos de temperatura máxima atingidos nos pilares P217 e P218 (figura 6.32 e tabela 6.2).

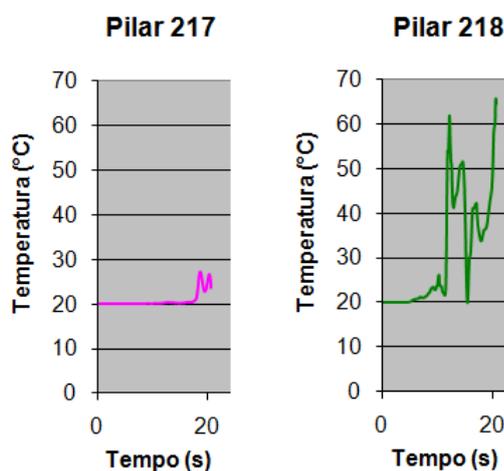


Figura 6.32: Temperaturas atingidas nos pilares P217 e P218: 2º pav. – h=1,5m.

Tabela 6.2: Picos de temperatura máx. nos pilares P217 e P218: 2º pav. – h=1,5m.

Pilar	Pico de temperatura máxima atingida	
	Cen. Original	Cen. Alternativo 1
217	52,6°C	27,2°C
218	151°C	65,5°C

Na figura 6.33 são apresentadas mais algumas imagens da propagação dos gases quentes longitudinalmente (através da *slice* de temperatura posicionada no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222) ao prédio 7 do shopping, mostrando que os níveis de temperatura atingidos no módulo D, com a presença dos sprinklers, foram consideravelmente menores, para o mesmo período de tempo.

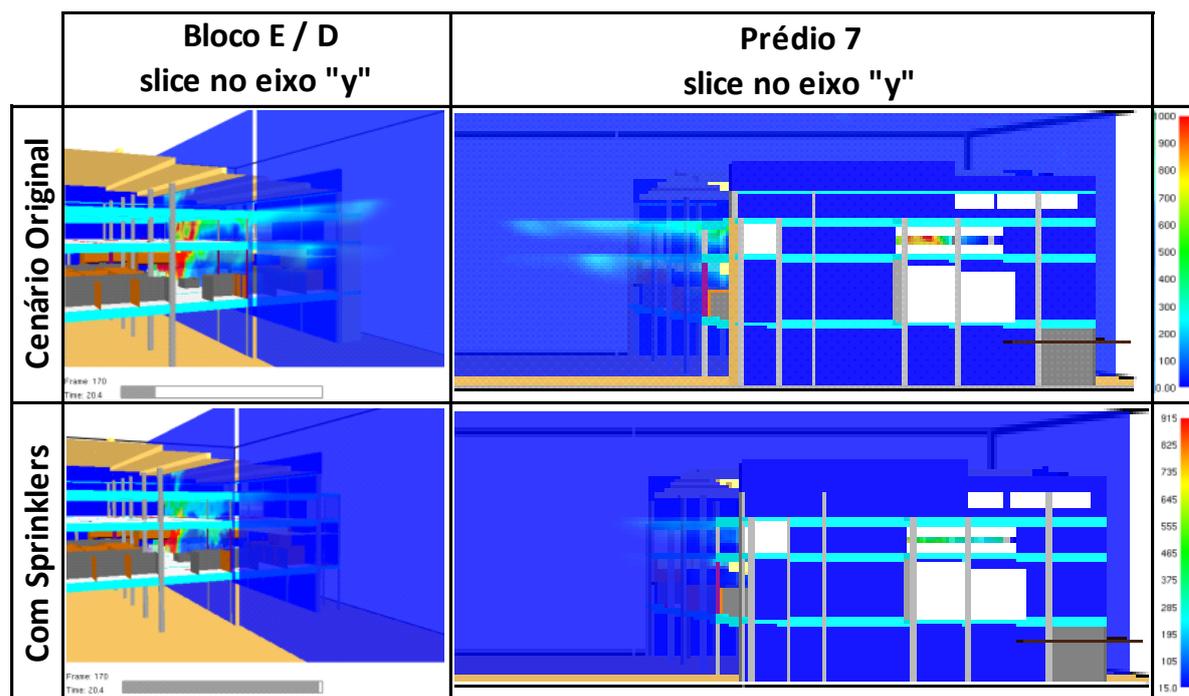


Figura 6.33: *Slice* de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 em  $t=20,4s$ .

### 6.3 CENÁRIO ALTERNATIVO 2: SEM EFEITO CHAMINÉ

Como segundo cenário alternativo foi feita a simulação sem a ocorrência do efeito chaminé, bem como sem a criação das aberturas na alvenaria externa. Ou seja, admitiu-se que a compartimentação seria muito elevada e eficiente.

O objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento do fogo caso o material utilizado nas divisórias externas e entre os pavimentos fosse suficientemente resistente às altas temperaturas, de modo a garantir uma condição de estanqueidade total entre os pavimentos e o meio externo. Para isso foram excluídos os termopares e controles anteriormente posicionados junto às lajes, ao forro e às paredes externas.

Como será demonstrado a seguir, se a compartimentação evitasse a ocorrência das aberturas para os demais pavimentos e para o meio externo, se aumentaria consideravelmente a intensidade e a propagação horizontal do incêndio dentro no segundo pavimento.

Essa simulação provocou uma elevação na demanda de capacidade computacional, mas os resultados se mostraram bastante estáveis. Foi possível obter um tempo total de simulação de

120s, porém o tempo de processamento necessário para tanto foi de 347:14h (ou seja, mais de 14 dias).

### 6.3.1 Dinâmica do incêndio verificada

Nas figuras 6.34 e 6.35 podem ser vistas algumas imagens da simulação do cenário alternativo 2.

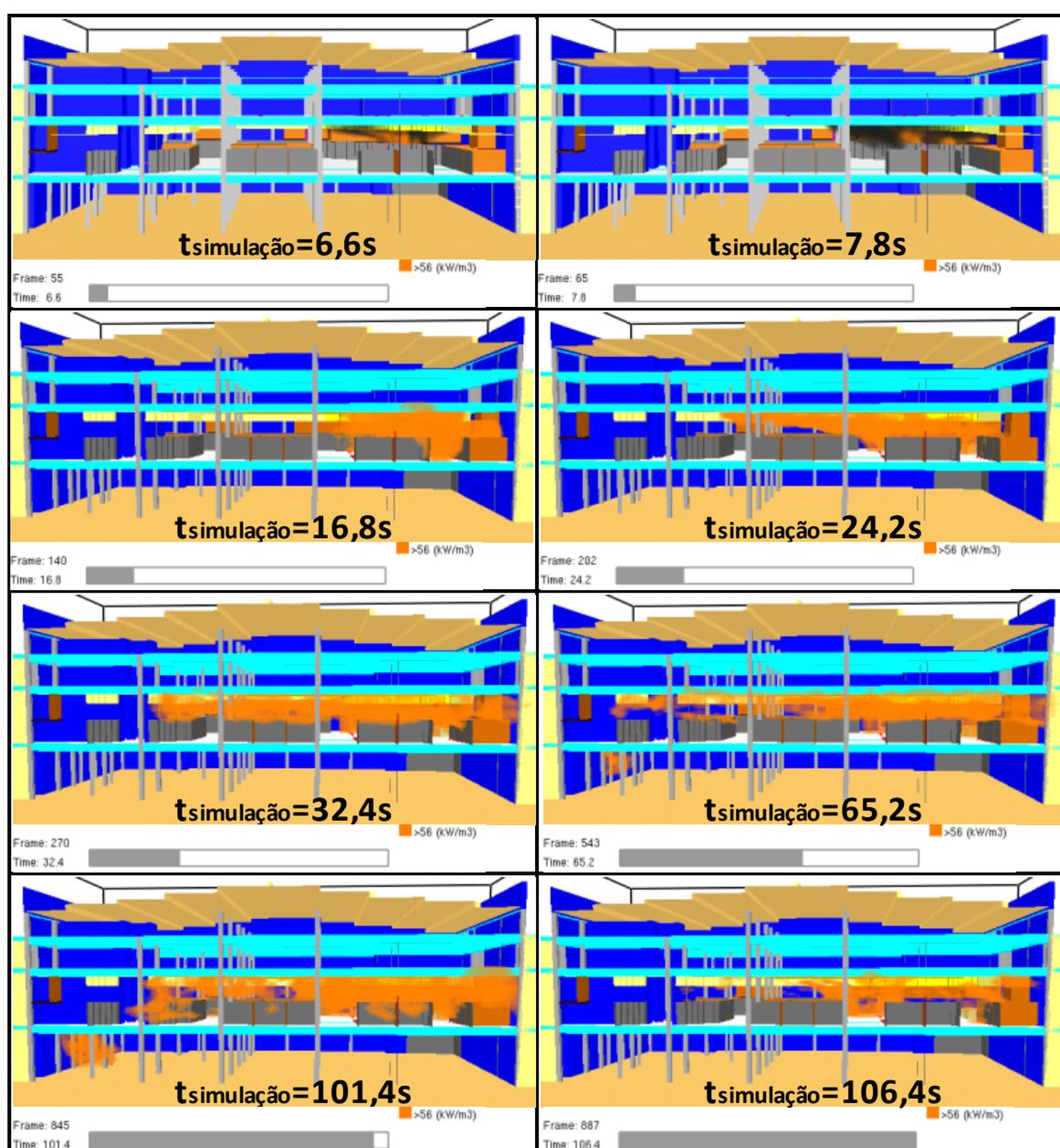


Figura 6.34: Vistas da simulação do Cenário Alternativo 2.

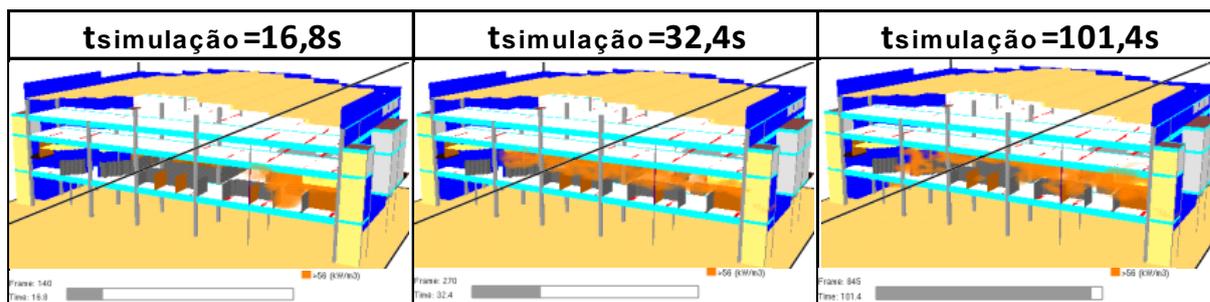


Figura 6.35: Imagens em perspectiva da simulação do Cenário Alternativo 2.

A partir dos 16,8s as imagens foram feitas apenas com a visualização do fogo, pois a fumaça já tomava conta do ambiente de tal forma que não era possível visualizar o interior do modelo. Verifica-se, nas imagens, que, sem a ocorrência do efeito chaminé e das aberturas na alvenaria externa, o fogo deixa de se concentrar apenas no entorno da Loja França e se propaga por todo o pavimento, chegando a atingir inclusive o módulo D em alguns momentos (o que pode ser visto melhor na figura 6.36). Em certo instante, o fogo até mesmo contorna os vãos de porta deixados próximo à escadaria e desce ao pavimento térreo (ver instante de 101,4s na figura 6.34). Tanto o segundo pavimento como o pavimento térreo ficaram completamente impregnados de fuligem, conforme pode ser visto na figura 6.37.

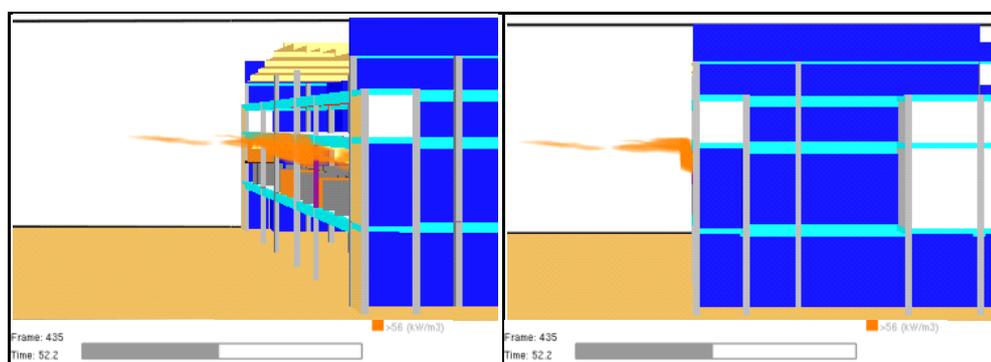


Figura 6.36: Propagação do fogo para o módulo D em  $t=52,2s$ .

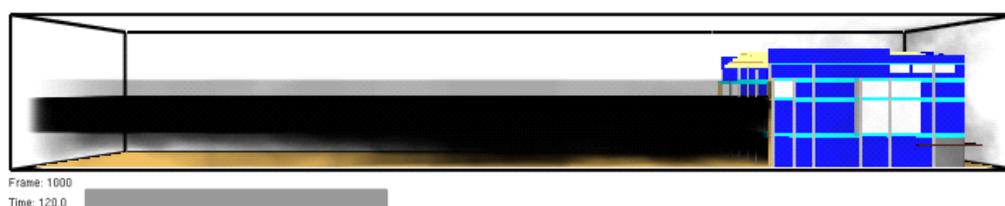


Figura 6.37: Propagação da fumaça no prédio em  $t=120s$ .

### 6.3.2 Análise das temperaturas atingidas

Na figura 6.38 estão representadas algumas imagens da *slice* de temperatura posicionada no eixo “x” do queimador.

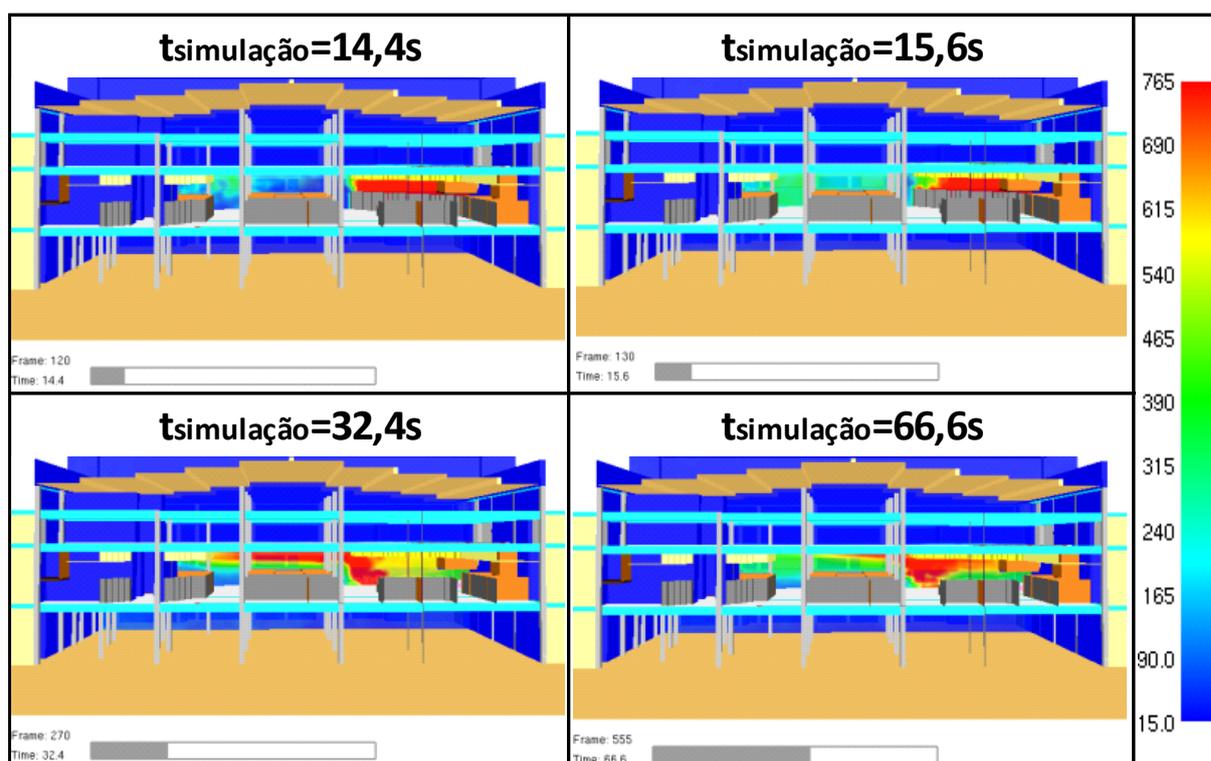


Figura 6.38: *Slice* de temperatura no eixo “x” do queimador.

Analisando as imagens (e comparando com os mesmos instantes nas figuras 6.3 e 6.5) percebe-se que nos instantes iniciais, quando ocorrem os picos de temperatura máxima, a temperatura dentro da Loja França tem aproximadamente os mesmos níveis verificados na simulação original. Porém, à medida que o incêndio se desenvolve, o fogo vai se espalhando pelo pavimento e a temperatura dentro da loja chega a diminuir consideravelmente, principalmente se comparada com a atingida na ocorrência do efeito chaminé. Esse fato se confirma verificando os picos de temperatura máxima atingida e os valores das temperaturas remanescentes nos pontos monitorados dos pilares P221 e P222 (tabela 6.3 e figura 6.39, que pode ser comparada com os gráficos anteriormente apresentados nas figuras 6.17 e 6.22 na simulação do cenário original), localizados bem no interior da loja, região do segundo pavimento mais afetada na simulação original.

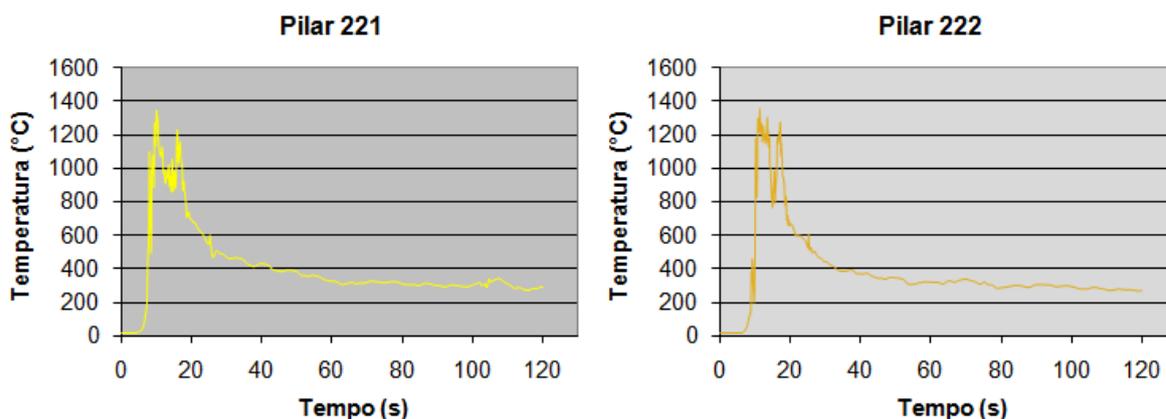


Figura 6.39: Temperaturas atingidas nos pilares P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.

Analisando as temperaturas atingidas no pilar P220 (figura 6.40), localizado na vitrine da Loja França, e comparando com o gráfico de temperaturas apresentado para este pilar na figura 6.13, já se observa que, nos pontos mais afastados do foco do incêndio, as temperaturas no final da simulação, verificadas nesse cenário, são muito mais elevadas do que na simulação do cenário original, pois na ocorrência do efeito chaminé o fogo não se propagou horizontalmente ao nível do segundo pavimento.

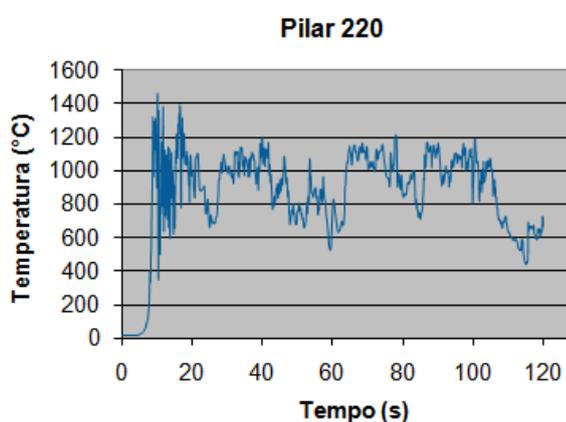


Figura 6.40: Temperaturas atingidas no pilar P220: 2º pav. – h=1,5m.

Tabela 6.3: Comparação das temperaturas atingidas nos pilares P220, P221 e P222: 2º pav. – h=1,5m.

Pilar	Pico de temperatura máx. atingida		Temperatura média remanescente	
	Cen. Original	Cen. Alternativo 2	Cen. Original	Cen. Alternativo 2
220	1440°C	1460°C	≈100°C	≈900°C
221	1350°C	1350°C	≈900°C	≈300°C
222	1420°C	1360°C	≈750°C	≈300°C

Esse aumento considerável nas temperaturas no restante do segundo pavimento fica ainda mais evidente analisando os gráficos das temperaturas atingidas nos pilares P218 e P217 (figura 6.41, que pode ser comparada com os gráficos anteriormente apresentados nas figuras 6.15 e 6.19 na simulação do cenário original) e as imagens referentes às *slices* de temperatura posicionadas no eixo “x” dos pilares P218 (figura 6.42, pode ser comparada com figura 6.16) e P217 (figura 6.43, pode ser comparada com a figura 6.20) e no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222 (figura 6.44).

Enquanto no cenário original a temperatura máxima atingida no ponto monitorado do pilar P218 era de 151°C, no cenário alternativo 2 esse valor passou para 1280°C; já no pilar P217 o valor máximo atingido passou de 52,6°C (no cenário original) para 1010°C (no cenário alternativo 2).

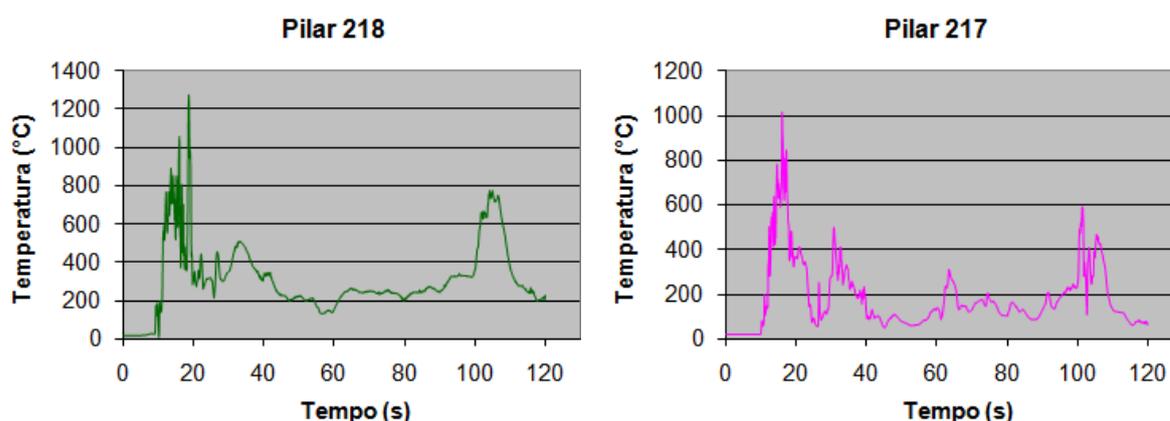


Figura 6.41: Temperaturas atingidas nos pilares P218 e P217: 2º pav. – h=1,5m.

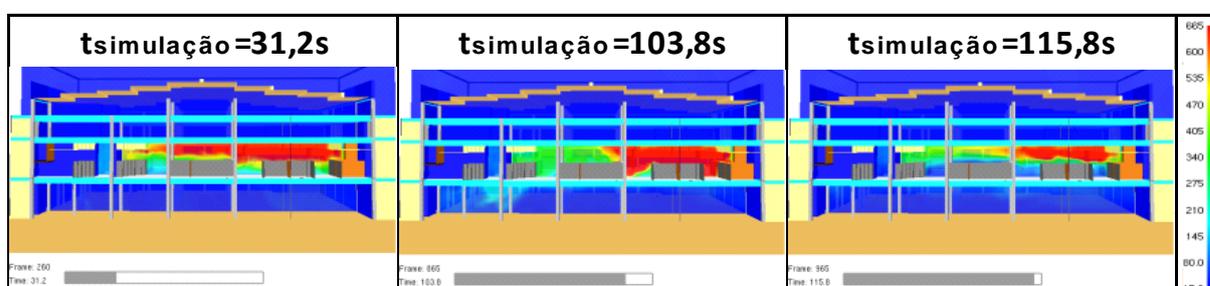


Figura 6.42: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P218.

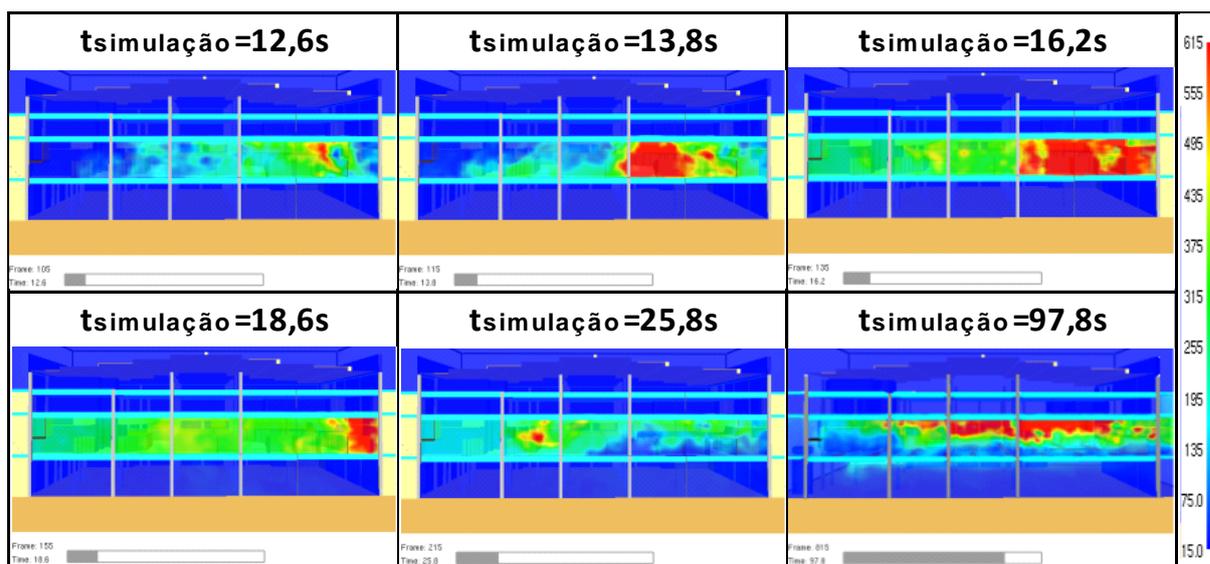


Figura 6.43: *Slice* de temperatura no eixo “x” do pilar P217.

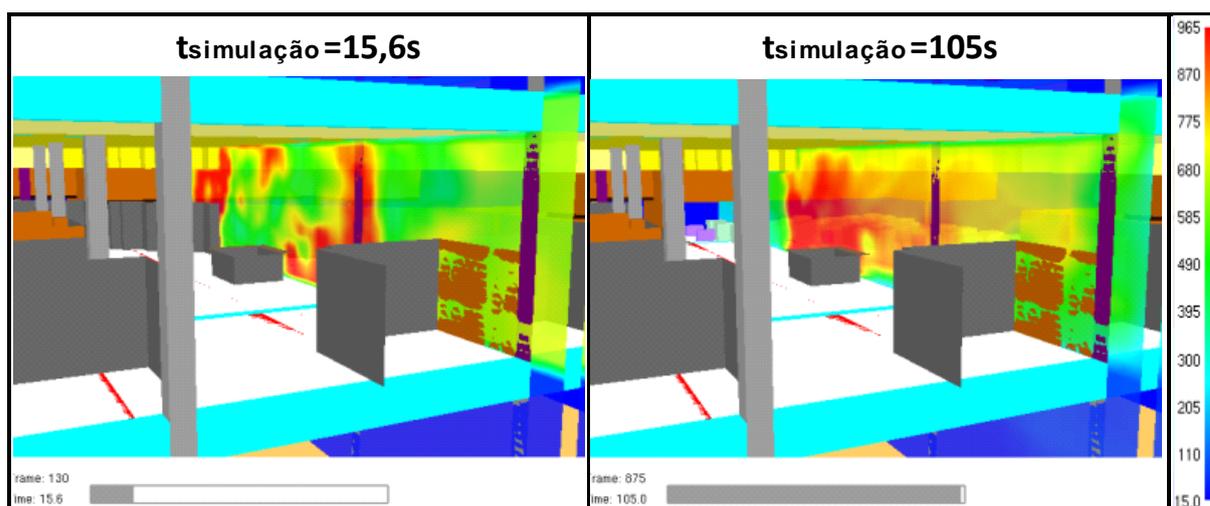


Figura 6.44: *Slice* de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222.

Observa-se, nas figuras 6.43 e 6.44, a ocorrência de temperaturas bastante elevadas junto à interface com o módulo D. Na figura 6.45, são apresentadas mais algumas imagens da propagação dos gases quentes longitudinalmente ao prédio 7 do shopping, mostrando que são atingidos níveis de temperatura extremamente elevados também no módulo D, sendo que os gases quentes se propagam por todo o pavimento nos diversos módulos do prédio.

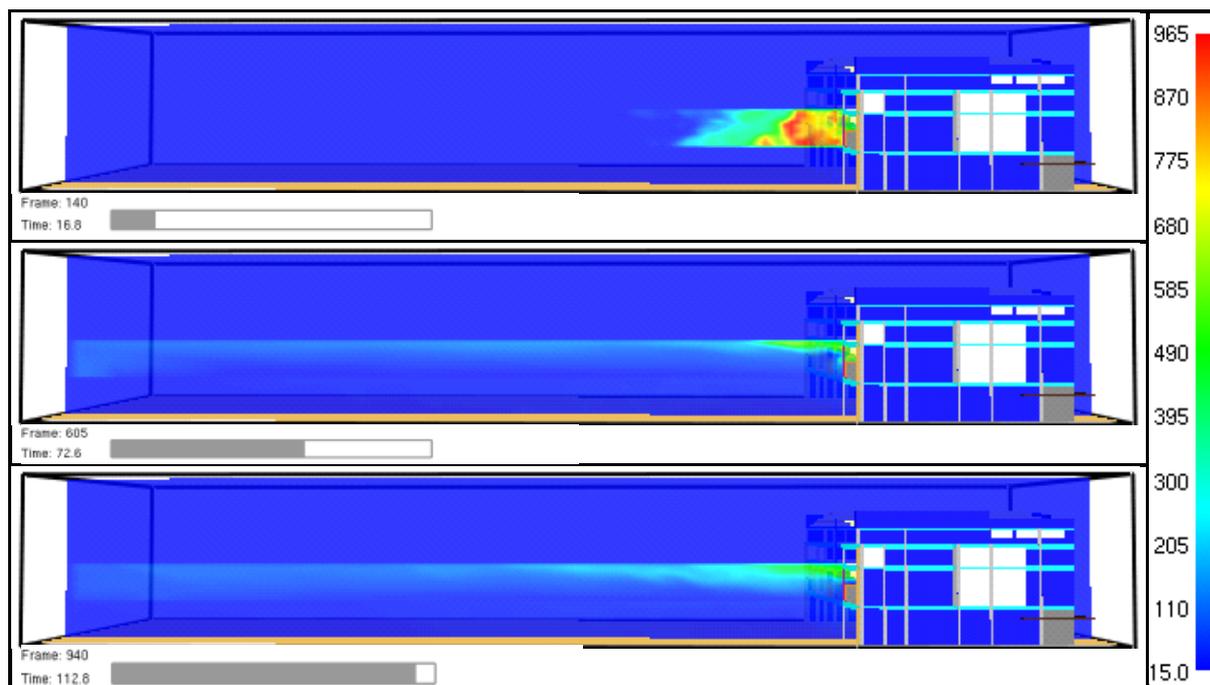


Figura 6.45: Vista externa da *slice* de temperatura no eixo “y” dos pilares P217, P218, P220, P221 e P222.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse capítulo são apresentadas algumas considerações finais sobre o desenvolvimento do presente estudo, que envolveu a mais complexa simulação computacional de um incêndio real efetuada no país. Além dessas reflexões, são enumeradas as principais conclusões do trabalho e apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou reproduzir, através de simulação computacional, as condições a que foram submetidos os elementos integrantes da estrutura de concreto armado do Shopping Total, atingido por um incêndio na noite de 20 de julho de 2007. O software escolhido para fazer as simulações foi o Fire Dynamics Simulator, desenvolvido pelo NIST.

Baseado nos projetos originais do shopping foi montado um modelo reproduzindo a geometria da edificação e, posteriormente, com a utilização do software Pyrosim, foram introduzidas as propriedades necessárias e estabelecidos os critérios a serem adotados para representar a ignição e propagação do incêndio.

A falta de conhecimento inicial a respeito do funcionamento do software utilizado foi uma das principais dificuldades enfrentadas, pois o mesmo permite uma infinidade de considerações, abrindo uma gama muito grande de estudos a serem realizados. No entanto, em raríssimos casos se conhecem os valores necessários para que se possa fazer uso das funções mais avançadas e precisas do software.

A carência de informações a respeito do desempenho e das características térmicas dos materiais cuja definição é necessária, assim como a falta de precisão a respeito dos dados de entrada a serem fornecidos foram obstáculos importantes encontrados que tiveram que ser superados através de simplificações para que se pudesse desenvolver o estudo.

Na simulação do Cenário Original, tanto a dinâmica do incêndio como as temperaturas verificadas nos elementos monitorados, de uma forma geral, se mostraram compatíveis com

os indícios verificados na inspeção da estrutura sinistrada bem como com os ensaios realizados nas amostras coletadas no local.

Além do cenário original do incêndio, foram realizadas simulações de mais dois cenários alternativos. No primeiro cenário alternativo foram avaliadas as alterações no desenvolvimento do incêndio, em função do funcionamento da rede de sprinklers. Já no segundo cenário alternativo foi simulada uma condição hipotética de estanqueidade total entre os pavimentos e o meio externo, impedindo a ocorrência do efeito chaminé, que foi uma característica marcante do Cenário Original.

Analisando o Cenário Alternativo 1 foi possível verificar que, mesmo com o funcionamento dos sprinklers, o incêndio não ficaria restrito ao segundo pavimento, pois ocorreria, ainda, um efeito chaminé, com a conseqüente propagação de gases quentes até o quarto pavimento. Observou-se, no entanto, que a presença dos sprinklers contribuiu de forma considerável para a redução das temperaturas atingidas fora da Loja França (local de início do incêndio), tanto no segundo pavimento como nos demais.

A simulação do Cenário Alternativo 2 mostrou que a estanqueidade total (eficiência máxima do sistema de compartimentação) entre os pavimentos e o meio externo seria, neste caso, até mais catastrófico. Apesar de manter os demais pavimentos preservados, o incêndio tomou proporções extremamente elevadas no segundo pavimento, com a propagação dos gases quentes inclusive para os demais módulos.

Apesar da necessidade de adotar simplificações para poder utilizar o software nas simulações, dada a ausência de dados precisos sobre o sinistro e sobre as características dos materiais existentes no local, os resultados verificados foram bastante satisfatórios. Dessa forma, pode-se afirmar que os objetivos do trabalho foram alcançados.

Porém, como o modelo utilizado foi desenvolvido em escala real, a demanda de capacidade computacional para rodar cada simulação (do porte das que foram feitas nesse estudo) foi extremamente alta, o que tornou os tempos para processamento de cada teste bastante longos. Esta foi uma das principais dificuldades enfrentadas no desenvolvimento do trabalho, pois dificultou um ajuste mais ágil do modelo e impediu que todos os cenários fossem processados de forma completa. Vale ressaltar que as simulações finais, referentes aos cenários apresentados no trabalho, tiveram que ser processadas no Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 7.2 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente estudo foi possível chegar a algumas conclusões, listadas abaixo:

- a) O êxito na reprodução do cenário observado durante o incêndio do Shopping Total indica que pode ser possível usar simulações computacionais para reproduzir sinistros reais, desde que se tenham dados razoáveis sobre a arquitetura, natureza e quantidade de carga de incêndio e resposta dos materiais componentes da estrutura;
- b) A ferramenta computacional FDS, desenvolvida pelo NIST e usada nesse trabalho, em conjunto com seus complementos (PYROSIM e SMOKEVIEW) se mostrou flexível e robusta, mas necessita ser adequadamente validada para casos reais. Verificou-se que, para que a mesma possa funcionar de acordo com o esperado é necessário fornecer uma série de informações que muitas vezes não são conhecidas ou não estão disponíveis;
- c) O incêndio do Shopping Total foi marcado pelo desenvolvimento de um efeito chaminé que limitou fortemente a propagação horizontal do sinistro. As simulações efetuadas sugerem que se a compartimentação vertical fosse mais eficiente os danos nos demais andares seriam menores, mas a propagação horizontal do calor e da fumaça seria muito mais intensa, o que poderia ter inclusive colocado em maior risco as pessoas que estavam no outro pavilhão, na área dos cinemas;
- d) A comparação com os resultados da difratometria por raios-X mostrou que, apesar das simplificações, as simulações estimaram curvas de temperatura que condizem, de forma geral, com os danos observados na estrutura residual.
- e) Na ausência de informações precisas sobre a disposição física e natureza da carga de incêndio no local do sinistro, a técnica desenvolvida e empregada nesse trabalho, de utilizar blocos de material combustível espalhados pela área de interesse, com um pequeno queimador inicial, se mostrou adequada para reproduzir o fenômeno de propagação do incêndio;
- f) O custo computacional associado a simulações de incêndios em estruturas reais de grande porte pode ser um fator limitante para o uso da técnica de simulação;
- g) Não existem bancos de dados contendo as propriedades térmicas e combustíveis da maioria dos materiais usados em construções no Brasil. É fundamental acumular dados dessa natureza para que se tenha uma maior precisão e padronização dos valores utilizados.

- h) É fundamental adaptar os modelos de comportamento do concreto armado para que se possam considerar os efeitos dos deslocamentos, que podem alterar de forma vital a dinâmica do incêndio quando se usam lajes de pequena espessura;

### 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No intuito de dar continuidade a esta pesquisa, deixam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) incluir a consideração das propriedades dos materiais constituintes da edificação (concreto, alvenaria, divisórias internas, gesso, etc), e a existência de material combustível nos demais pavimentos, buscando aperfeiçoar o modelo de forma que fique o mais próximo possível da realidade.
- b) teste e análise de outros cenários alternativos.
- c) estudar outras formas para representação da perda de massa dos elementos, no caso de materiais que não entram em ignição.
- d) fazer a análise estrutural da evolução da degradação térmica dos elementos monitorados.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, W. C. **Incêndio Eletrobrás**, PBase.com. 2004. Disponível em: < [http://www.pbase.com/wcmaguiar/incendio\\_eletrobras](http://www.pbase.com/wcmaguiar/incendio_eletrobras)>. Acessado em: 30 jun. 2009.
- ALVES, A. B. C. G.; CAMPOS, A. T.; BRAGA, G. C. B. Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura. In: Seminário Nacional de Bombeiro, 10., 2008, Pará. **Anais...** Brasília: SENABOM, 2008. 1 CD-ROM
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “**Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**”. E119–2000. ASTM. Philadelphia, 2000.
- ANDERSON, D.A., TANNEHILL, J.C. e PLETCHER, R.H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Taylor & Francis. New York, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10897**: Proteção contra incêndio por chuveiros automáticos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifício em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2004.
- BEITEL, J.; IWANKIW, N. **Analysis of need and existing capabilities for full-scale fire resistance testing**. Springfield, U.S.A.: NIST/NIST, 2002. 96p. (NIST GCR 02-843).
- BLOGSPOT, Repetir Nunca é Repetir. **Architecture Faculty Tu Delft destroyed in Fire**. 13 mai. 2008. Disponível em:< <http://repetir-nunca-e-repetir.blogspot.com/2008/05/architecture-faculty-tu-delft-destroyed.html>> Acessado em: 20 jul. 2009.
- BRAGA, G.C.B. e LANDIM, H.R.O. **Investigação de Incêndio**, em A Segurança contra incêndio no Brasil / coordenação de Alexandre Itiu Seito, et al., São Paulo: Projeto Editora. 2008. Páginas 333-345
- BOMBEIROS EMERGÊNCIA. Revista Eletrônica. Disponível em: < <http://www.bombeiroemergencia.com.br/andraus.htm>>. Acesso em: 11 ago. 2009a.
- BOMBEIROS EMERGÊNCIA. Revista Eletrônica. Disponível em: < <http://www.bombeiroemergencia.com.br/joelma.htm>>. Acesso em: 11 ago. 2009b.
- CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CASTELLOTE, M. et al. Microstructure: solid phases. In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE, Udine, Itália: Internacional Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Engenharia de segurança contra incêndio**. Disponível em: <[http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/noticia\\_visualisar.asp?CodNoticia=3236&Secao=4&Pgn=1](http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/noticia_visualisar.asp?CodNoticia=3236&Secao=4&Pgn=1)>. Acesso em 28 jul. 2009.

CHANA, P; PRICE, B. The Cardington fire test. **Concrete**. London, p.28-33, jan. 2003.

COSTA, C. N. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2002. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília, Universidade Federal de Brasília – UnB, 2002, p. 2.

COSTA, C. N.; ONO, R.; SILVA, V. P. A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2005. 1 CD-ROM

COSTA, C. N.; SILVA, V. P.; STUCCHI, F. R. Estruturas de concreto em situação de incêndio. **Téchne**, São Paulo: PINI, ano 13, nº 99, p.56-61, jun. 2005.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CULLHED, P. The Linköping library fire. **International Preservation News**, Paris, n.31, p. 4-10, 2003.

CUNHA, R. S. **Combate à Violência no Futebol – atuação da Promotoria Especializada**, Fundação Escola Superior do Ministério Público, Porto Alegre. Disponível em: <[http://www.fmp.com.br/2008/img/seminariosfmp/seminario2/Dr\\_Renoir\\_Cunha.pdf](http://www.fmp.com.br/2008/img/seminariosfmp/seminario2/Dr_Renoir_Cunha.pdf)>. Acessado em: 01 ago. 2009.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. ENV 1991-2-2 Eurocode 1 – Basis of Design and Actions on Structures– Part 2.2: Actions on Structures – Actions on Structures Exposed to Fire. Brussels, 1995.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. ENV 1991-1-2 Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Brussels, 1995.

FELLINGER, J.; BREUNESE, A. Fire safe design: make it concrete. In: WORKSHOP “FIRE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES: WHAT NOW? WHAT NEXT?”, 2004, Milan. **Proceedings...** Brescia: Starrylink Editrice Brescia, 2005. P. 313-316.

FORNEY G.P., Modeling And Visualizing Fire Without Getting Burned, In: MCSD Seminar / National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA, 2005.

GORGULHO, A. **Erasmus na Holanda**, Relatório de Atividades, 2º Semestre 2007/2008. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <<http://portfolio.tagus.ist.utl.pt/portfolio/ActividadeForm.aspx?ID=01508FA6-D971-4EF0-BEA2-FFC4F655F0B5>>. Acessado em: 20 jun. 2009.

GROSSHANDLER, W.; BRYNER, N.; MADRZYKOWSKI, D.; KUNT, K. Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA, NISTIR NCSTAR 2: Vol. I, 2005.

HAMBURGUER, R.; BAKER, W.; BARNETT, J.; NELSON, H. WTC 1 and WTC 2. In: MACALLISTER, T. (Ed). **World Trade Center building performance study: data collection, preliminary observations, and recommendations**. New York: FEMA/G&O/ASCE, 2002. Chapt. 2. P. 2.1-2.40.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. “**Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction. Part 1. Part 1: General Requirements**”. ISO 834-1. ISO. Geneva, 1999.

JONES, W.; PEACOCK, R.D.; FORNEY, G.P.; RENEKE, P.A. **CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport**, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA, NISTIR 1026, 2005.

JB ONLINE. **Fogo e desespero no Andorinhas**, 17 fev. 2008. Disponível em: < <http://www.jblog.com.br/hojenahistoria.php?itemid=7096>>. Acessado em: 30 jun. 2009.

JORNAL ELETRÔNICO CONSELHEIRO X, O jornal eletrônico do bairro Jardim Botânico de Porto Alegre, Brasil. **Incêndio do Edifício Andorinha chocou o Brasil**, 04 set. 2008. Disponível em: < <http://conselheirox.blogspot.com/2008/09/incndio-do-edifcio-andorinha-chocou-o.html>>. Acessado em: 30 jun. 2009.

JORNAL ELETRÔNICO CPOVO.NET. **Incêndios que ninguém esquece**. Disponível em: < <http://www.cpovo.net/jornal/especiais/cpespecial/html/SERVICOS.HTM>>. Acessado em: 26 jun. 2009.

KARLSSON, B. e QUINTIERE, J.G. **Enclosure fire dynamics**, CRC Press. Washington, 2000.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MADRZYKOWSKI, D.; VETTORI, R., Simulation of the Dynamics of the Fire at 3146 Cherry Road N.E., Washington, D.C., May 30, 1999, NISTIR 6510, 2000.

MARTINEZ DE ARAGÓN, J. J.; REY, F.; CHICA, J. A. **Part 4: DIFISEK - Software for fire design**. LABEIN Technological Centre, Bilbao, Spain. Disponível em: < <http://www.difisek.eu/UK/Syllabus/WP4-UK-Syllabus.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2009.

McGRATTAN, K. **Fire Dynamics Simulator (version 4) – technical reference guide**, NIST Special publication 1018. Washington, 2006.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2. Ed. São Paulo: Pini, 1997. Tradução de Salvador E. Giammusso.

PEARSON, B.; DELATTE, N. Ronan Point apartment tower collapse and its effect on building codes. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. Renston, v. 19, n. 2, p. 172-177, 2005.

PORTAL DO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Incêndio na Eletrobrás**, Governo do Rio de Janeiro – Subsecretaria de Defesa Civil, 12 mar. 2004. Disponível em: <<<http://www.defesacivil.rj.gov.br/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=219>>>. Acessado em: 01 ago. 2009.

PRASAD, K.; MARSH, N.; NYDEN, M.; OHLEMILLER, T.; ZAMMARANO, M. “**Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs**”. Annual Fire Conference, 2009.

PURKISS, John A. “**Fire safety engineering design of structures**”. Butterworth Heinemann. Oxford, 1996.

RAMALHO, M. **Fogo**. Texto publicado em 02 jan. 2008. Disponível em <<http://www.godess.com.pt/blog/6900/>>. Acessado em: 01 abr. 2009.

REHM, R.G. e BAUM, H.R. **The equations of motion for thermally driven, buoyant flows**, Journal of Research of the National Bureau of Standards **83** n° 3 (1978) 297-308.

RELATÓRIO TÉCNICO N° 16. **Análise da estrutura de concreto armado do Shopping Total após sinistro - Portoshop S/A**, 2007. 39 p. Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

REVISTA VEJA SÃO PAULO. **Um mico na Paulista**, Abril.com. Disponível em: <<http://vejasaopaulo.abril.com.br/revista/vejasp/edicoes/2106/mico-paulista-cesp-430941.html>>. Acessado em: 26 jun. 2009.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas Brasileiras**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; SILVA, R. O. S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SHOPPING TOTAL. Disponível em: <<http://www.shoppingtotal.com.br/site/releases/aerea.jpg>>. Acessado em 27 jun. 2009.

SILVA, V.P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001

SILVA, V.P. **Fire in buildings**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: < [http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/?page\\_id=16](http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/?page_id=16)>. Acessado em: 01 ago. 2009.

SILVA, L. C. M. **O Fogo - Sala de Física**. Disponível em: < <http://br.geocities.com/saladefisica/planos/fogo.htm>>. Acessado em: 20 mai. 2009.

SOUZA JUNIOR, V. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

STUTZMAN, P. E. **Guide for x-ray powder diffraction analysis of Portland cement and clinker**. Gaithersburg: NIST, 1996. (NISTIR 5755 Technology Report).

VULCAN SOLUTIONS LIMITED. Specialists in Structural Fire Engineering. The University of Sheffield. Disponível em: < <http://www.vulcan-solutions.com/software.html>>. Acessado em: 30 jun. 2009.

WALRAVEN, Joost C. “**La evolución del hormigón**”. Structural Concrete. P1. No. 1. Fédération Internationale du Béton. Lausanne, 1999.

WALTERS, R. N.; LYON, R. E. “**Heat of Combustion of Pyrolysis Gases**”. NIST Fire Conference, 2009.

WIKIPÉDIA. **A enciclopédia livre**. Disponível em: < [http://pt.wikipedia.org/wiki/Edif%C3%ADcio\\_Grande\\_Avenida](http://pt.wikipedia.org/wiki/Edif%C3%ADcio_Grande_Avenida)>. Acessado em 26 jun. 2009a.

WIKIPÉDIA. **A enciclopédia livre**. Disponível em: < [http://pt.wikipedia.org/wiki/Shopping\\_Total](http://pt.wikipedia.org/wiki/Shopping_Total)>. Acessado em 15 jun. 2009b.

## **ANEXO A – Estrutural Bloco E com Mapeamento dos Danos**

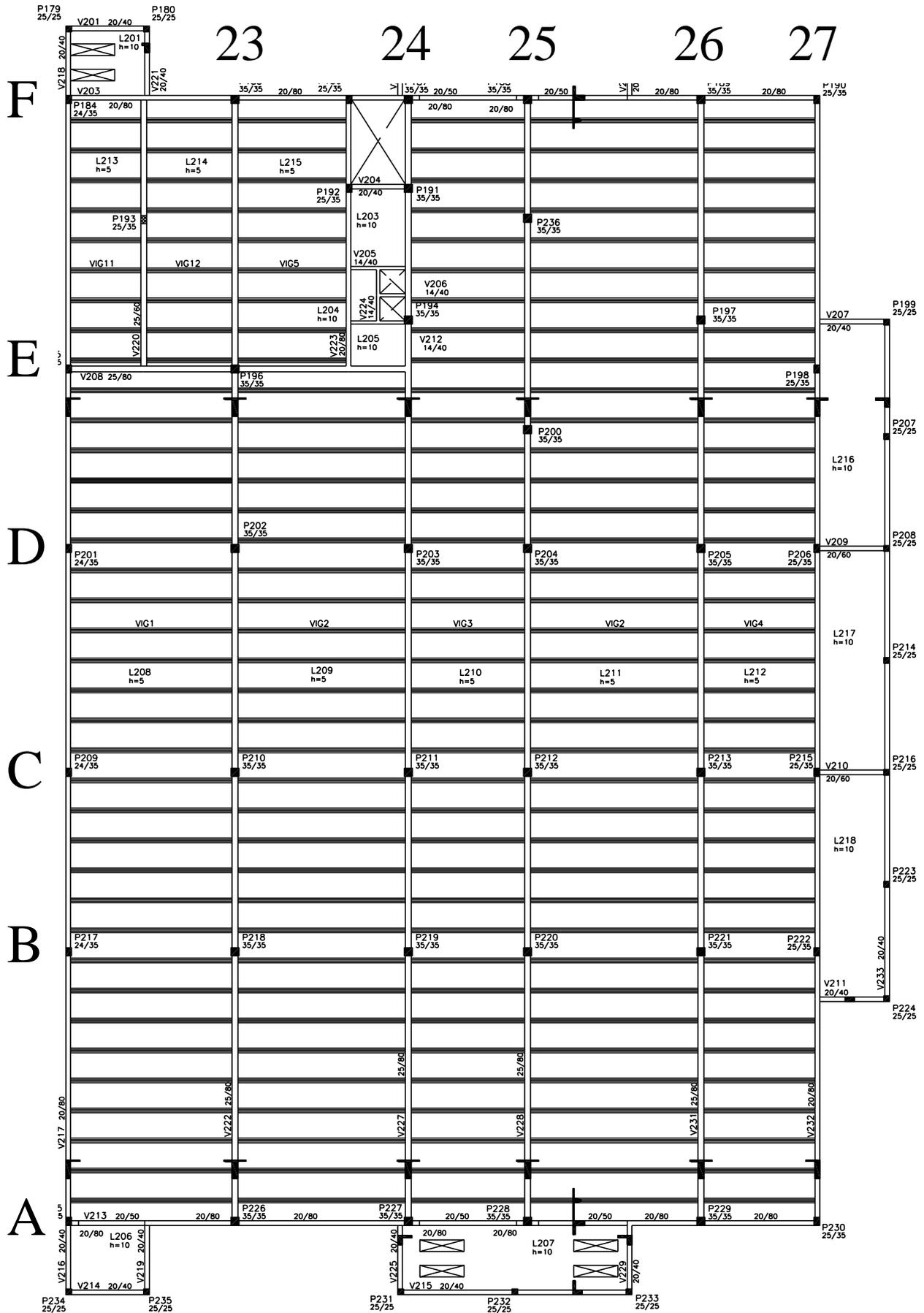


Figura A1:Planta padrão do 2º pavimento.

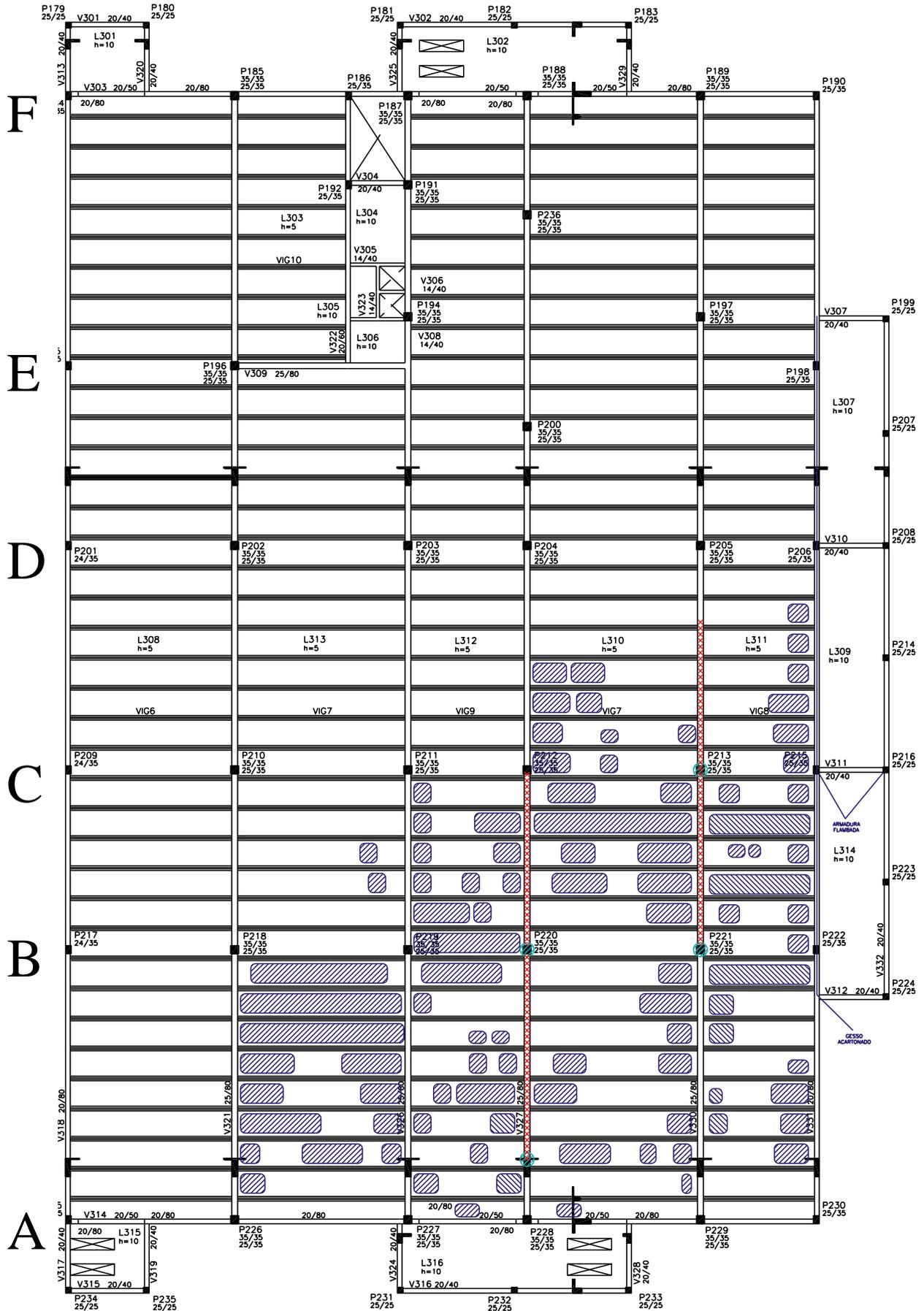


Figura A2: Mapeamento de danos no 3º pavimento.

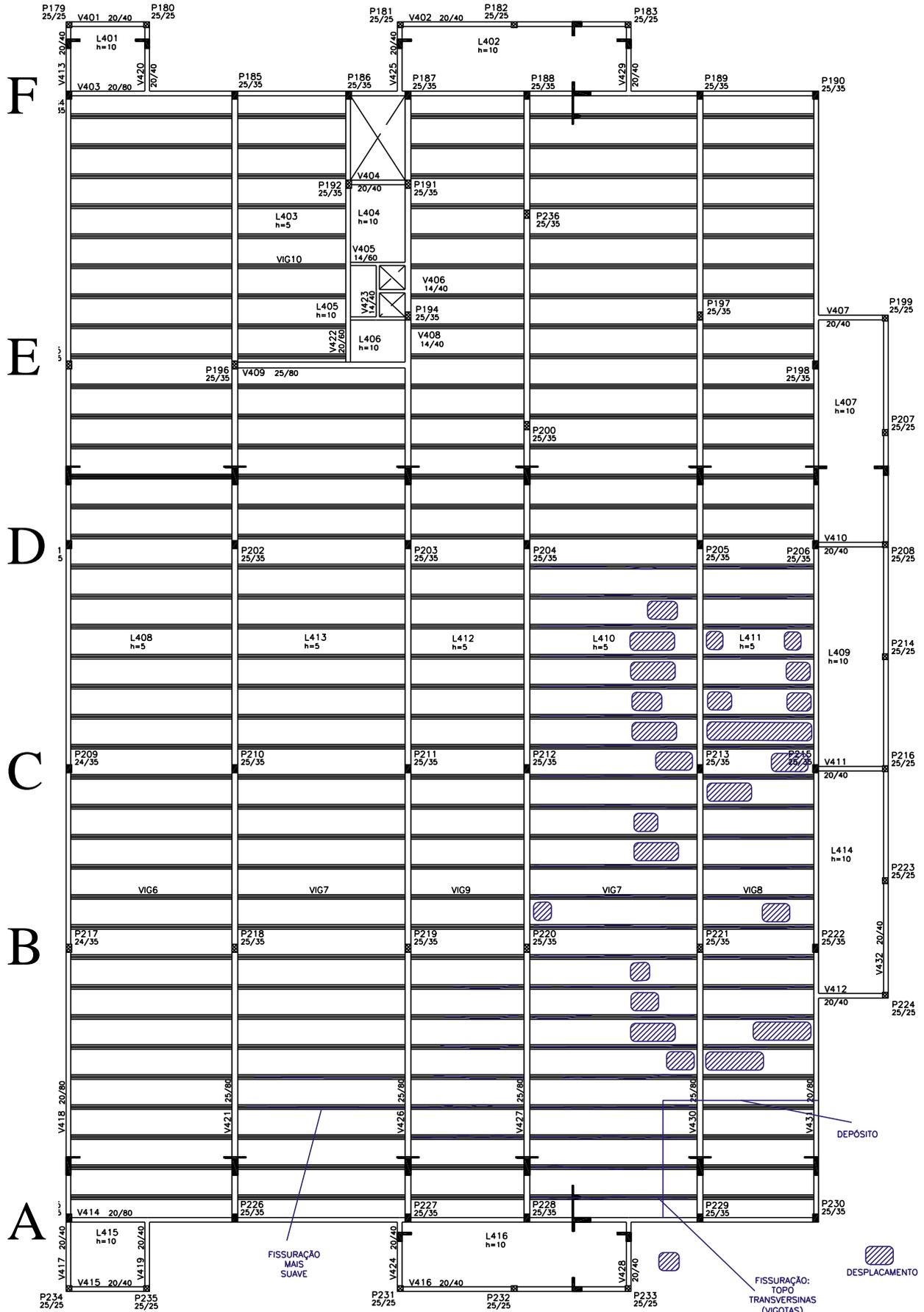


Figura A3: Mapeamento de danos no 4º pavimento.