

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Filipe Mazzone

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS:
APLICAÇÃO NO CASO DO CONDOMÍNIO EDIFÍCIO
CACIQUE EM PORTO ALEGRE-RS**

Porto Alegre
junho 2010

FILIPPE MAZZONI

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS:
APLICAÇÃO NO CASO DO CONDOMÍNIO EDIFÍCIO
CACIQUE EM PORTO ALEGRE-RS**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Dario Lauro Klein

Porto Alegre
junho 2010

FILIPPE MAZZONI

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS:
APLICAÇÃO NO CASO DO CONDOMÍNIO EDIFÍCIO
CACIQUE EM PORTO ALEGRE-RS**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2010

Prof. Dario Lauro Klein
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph.D. pela University of Leeds, Reino Unido

Capitão Eduardo Estêvam Camargo Rodrigues (BM/RS)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dario Lauro Klein (UFRGS)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Antonio e Silvia, que sempre me apoiaram e me permitiram sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dario Lauro Klein, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos, por todo apoio e estímulo constante a essa idéia que surgiu em uma conversa nos corredores da Universidade e assumiu grande valor.

A professora Carin Maria Schmitt, pelo acompanhamento neste trabalho, dedicação além do profissional, e pelas orientações nos momentos de incerteza.

Aos meus pais, Antonio e Silvia, que sempre acompanharam meus tropeços e conquistas com amor e dedicação. Sou eternamente grato por tudo que me proporcionaram e pelas virtudes que me ensinaram desde criança!

A minha irmã Graziela, por sempre acreditar mais em mim, do que eu próprio acreditava...

A minha querida Roberta, minha maior incentivadora, não permitindo que eu desistisse nos momentos difíceis, e pelas inúmeras vezes que provou que estava ao meu lado. Só tenho a agradecer por ter conhecido uma pessoa tão especial!

Agradeço a bolsista do LEME/UFRGS Juliane pelo auxílio em entender o uso dos softwares.

E a Deus, por permitir que pessoas tão especiais cruzassem o meu caminho!

Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto.

Albert Einstein

RESUMO

MAZZONI, F. **Simulação Computacional de Incêndios:** aplicação no caso do Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre/RS. 2009. 67 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre a aplicação da simulação computacional de incêndio para análise de sinistros objetivando um maior grau de segurança contra incêndios em edificações aliado ao princípio da economia. O risco de incêndio e seus prejuízos às vidas humanas e ao patrimônio tornaram-se cada vez maiores com o desenvolvimento urbano e a evolução da construção civil. Assim, os meios de proteção contra incêndio tornam-se fundamentais, tanto os meios ativos (*sprinklers*, alarmes de incêndio, etc.), quanto os meios passivos (proteção térmica de estruturas, etc.). Em situação de incêndio, a proteção à vida e ao patrimônio deve ser garantida pelos meios de proteção das edificações evitando-se o colapso de parte ou de toda estrutura. A possibilidade de ocorrência de um incêndio não deve ser descartada sendo sinônimo de economia em um aspecto abrangente: proteção à vida, ao patrimônio e à atividade econômica desenvolvida na edificação. Neste trabalho, está incluído o tema simulação computacional de incêndios em edificações, abordando aspectos de análise de risco incêndio, o fenômeno incêndio e suas variáveis, meios de proteção térmica das estruturas, efeitos provocados no concreto armado devido às altas temperaturas e técnicas de análise de edificações sinistradas. No plano experimental, analisou-se a dinâmica de incêndio e o perfil de temperaturas obtido através de simulação computacional do incêndio que atingiu o prédio que abriga o Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre/ RS, e testou-se a hipótese apontada no Relatório Técnico N°08/96 do LEME/UFRGS para a sua ocorrência, e verificou-se que os resultados gerados na simulação são condizentes com as informações constantes no Relatório Técnico.

Palavras-Chave: altas temperaturas; simulação computacional; incêndio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da pesquisa	15
Figura 2 – Triângulo do fogo	16
Figura 3 – Incêndio no Edifício Joelma	20
Figura 4 – Incêndio no Edifício Andraus	21
Figura 5 – Incêndio no Edifício Grande Avenida	22
Figura 6 – Incêndio das Lojas Renner	23
Figura 7 – Parâmetros de proteção contra incêndios em projetos	26
Figura 8 – Fluxograma das etapas de análise de estruturas sinistradas	31
Figura 9 – Curva-padrão ISO-834 para materiais celulósicos	34
Figura 10 – Relação entre a cor e a perda de resistência à compressão do concreto	37
Figura 11 – Fachada do Condomínio Edifício Cacique.....	39
Figura 12 – Fachada posterior do Condomínio Edifício Cacique após o sinistro.....	42
Figura 13 – Planta baixa do 5. pavimento.....	44
Figura 14 – Planta baixa do 6. ao 10. Pavimento.....	44
Figura 15 – Perspectiva isométrica do Condomínio Edifício Cacique.....	45
Figura 16 – Primeira importação das plantas.....	46
Figura 17 – Planta baixa do 5. pavimento alterada para linhas.....	47
Figura 18 –Planta baixa do 6. ao 10. pavimento alterada para linhas.....	48
Figura 19 – Planta baixa do 11. pavimento alterada para linhas.....	48
Figura 20 – Planta baixa do 12. pavimento alterada para linhas.....	49
Figura 21 – Planta baixa do 13. ao 16. pavimento alterada para linhas.....	49
Figura 22 – Processo montagem do modelo em três dimensões.....	50
Figura 23 – Detalhe da fachada com janelas e sem laje.....	51
Figura 24 – Fachada posterior do modelo.....	52
Figura 25 – Ambiente pronto para a simulação.....	56
Figura 26 – Desenvolvimento inicial do incêndio.....	57
Figura 27 – Desenvolvimento do incêndio no térreo.....	58
Figura 28 – Desenvolvimento pleno do incêndio.....	59
Figura 29 – Perfil de Temperaturas na fachada posterior.....	60
Figura 30 – Gráfico do pico de temperatura por pavimento.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Transformações sofridas pela pasta de cimento durante aquecimento.....	27
Quadro 2 – Relação entre demanda e execução de laudos nos Corpos de Bombeiros Militares.....	29
Quadro 3 – Número de laudos concluídos pelos Corpos de Bombeiros Militares segundo o tipo de conclusão.....	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 MÉTODO DE PESQUISA	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	13
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	13
2.2.1 Objetivo Principal	13
2.2.2 Objetivos Secundários	13
2.3 HIPÓTESE	14
2.4 PRESSUPOSTO	14
2.5 PREMISA	14
2.6 DELIMITAÇÃO	14
2.7 LIMITAÇÃO	14
2.8 DELINEAMENTO	15
3 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	16
3.1 O FENÔMENO COMBUSTÃO	16
3.1.1 Fases de um Incêndio	17
3.1.1.1 Fase inicial de elevação da temperatura	17
3.1.1.2 Fase de incêndio generalizado	18
3.1.1.3 Fase de Extinção	18
3.1.2 Incêndio Controlado pela Ventilação	18
3.1.3 Incêndio Controlado pelo Combustível	19
3.1.4 Propagação do Fogo	19
3.2 INCÊNDIOS HISTÓRICOS NO BRASIL	19
3.3 LEGISLAÇÃO DE PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO	23
3.4 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO	24
3.5 DIRETRIZES PARA PROJETOS	25
3.6 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	26
4 ANÁLISE DE INCÊNDIOS	29
4.1 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DISPONÍVEIS	32
4.1.1 Simulação Experimental de Incêndio	32
4.1.2 Curvas de Incêndio	33
4.1.3 Análise Numérica	34
4.1.4 Análise Computacional	34
4.1.5 Análise Colorimétrica	36

4.2 ENSAIOS COMPLEMENTARES	37
5 AMBIENTE SIMULADO	39
5.1 RELATÓRIO TÉCNICO LEME/UFRGS n. 08/96	40
5.2 SIMULAÇÃO DO INCÊNDIO	42
5.2.1 Montagem do Cenário	43
5.2.2 Determinação dos Parâmetros para Simulação	53
5.2.3 Desenvolvimento do Incêndio	56
6 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Os materiais têm suas características de resistência mecânica alteradas quando estes sofrem efeitos das altas temperaturas, além de surgirem tensões térmicas no material. Um grande número de trabalhos científicos vêm sendo desenvolvido nesta área, porém na grande maioria, estão focados no estudo da degradação dos materiais.

Os efeitos causados sobre as estruturas de concreto armado devem ser avaliados sob dois pontos de vista: danos causados às propriedades dos materiais integrantes e danos causados à estabilidade estrutural da edificação. Sendo o concreto armado constituído de dois materiais distintos, o concreto e o aço, a ação do fogo sobre esses materiais produz transformações nos mesmos, originando, geralmente, danos irreversíveis.

As propriedades físicas e mecânicas do concreto e do aço sofrem uma deterioração durante sua exposição ao fogo e esta perda de capacidade resistente aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura. Tais fatos provocam perdas financeiras muito significativas, bem como a perda de um grande número de vidas humanas.

Incêndios são fenômenos influenciados por um grande número de parâmetros, muitos dos quais aleatórios, o que faz com que cada fenômeno seja único. O estudo através de ensaios experimentais requer instalação de equipamentos e envolve alto custo. A adoção de parâmetros e a criação de modelos são os melhores recursos que a Engenharia dispõe para avançar na tecnologia.

A alternativa que surge é o estudo com o uso de simulações computacionais que permitem analisar o comportamento do fogo e testar hipóteses para suas causas. O uso da simulação computacional é uma ferramenta para analisar a dinâmica do fogo, assim como os efeitos causados pela elevada temperatura. É possível obter de forma rápida e econômica importantes dados como temperatura, concentração de gases, tempo para acionamento dos detectores de fumaça e calor e dos *sprinklers*, tempo de queima, entre outros.

A proposta da pesquisa é comparar o perfil de temperatura gerado por um *software* baseado em modelos matemáticos e de mecânica dos fluidos com as evidências apresentadas em um

Relatório Técnico produzido a partir de um sinistro real, ocorrido no prédio do Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre/RS em 1996. O material utilizado será o mesmo recolhido pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da Universidade do Rio Grande do Sul (LEME/UFRGS) no momento em que realizou a perícia no prédio incendiado.

Neste trabalho foram utilizados dois *softwares*. Um deles é o *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, um modelador de incêndio que resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriada para baixa velocidade, com fluxo termicamente dirigido e com ênfase no transporte de calor e fumaça. O outro é o Pyrosim que fornece uma interface gráfica facilitando a importação de dados do AutoCad para o FDS, com a geometria do ambiente a ser simulado.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro contém a apresentação do tema da pesquisa, bem como as justificativas para a realização do trabalho. O segundo capítulo apresenta o método de pesquisa, com a questão de pesquisa, os objetivos do trabalho, sua hipótese, pressuposto, suas premissas, a delimitação, a limitação e o delineamento indicando os métodos que foram utilizados para a realização da pesquisa. No terceiro capítulo apresentam-se generalidades sobre a dinâmica dos incêndios, bem como os efeitos que sua ação provoca sobre os materiais que compõe o concreto armado. O quarto capítulo é dedicado a análise de incêndios, seus métodos e ensaios. O capítulo cinco apresenta o programa experimental desenvolvido neste trabalho, procedimentos adotados e materiais utilizados. O sexto capítulo engloba as conclusões decorrentes da realização da pesquisa.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: com base em Relatório Técnico, é possível afirmar, por meio de simulação computacional, que a origem do incêndio ocorrido no prédio do Condomínio Edifício Cacique teve início no 11º pavimento?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação da origem do sinistro no 11º pavimento, frente ao perfil de temperaturas obtido em simulação computacional.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) apresentação das diretrizes de aplicação da simulação computacional de incêndios utilizada neste estudo;
- b) apresentação da sistemática de análise do perfil de temperaturas através dos *softwares*.

2.3 HIPÓTESE

Sim, é possível afirmar que o incêndio teve início no 11º andar da edificação.

2.4 PRESSUPOSTO

O pressuposto deste trabalho é que as informações sobre o sinistro, constantes no Relatório Técnico N° 08/96 do LEME/UFRGS, representam o ambiente simulado.

2.5 PREMISSA

A premissa desse trabalho é o reconhecimento de quando uma edificação é atingida por um incêndio, seus usuários ficam expostos a um elevado risco de vida e a estrutura pode sofrer danos consideráveis, sendo importante a realização de estudos que auxiliem o conhecimento da origem e dinâmica do incêndio.

2.6 DELIMITAÇÃO

A delimitação deste trabalho é o estudo da situação de incêndio ocorrida no Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre/RS, no ano de 1996.

2.7 LIMITAÇÕES

As limitações deste trabalho são:

- a) foram utilizados os *softwares Fire Dynamics Simulator* e o Pyrosim;
- b) os pavimentos não atingidos pelo incêndio não apresentam detalhamentos dos ambientes internos, e são considerados na modelagem um volume único;
- c) as medidas do prédio correspondem aproximadamente às dimensões de projeto;

- d) a carga de incêndio utilizada é a definida em Norma brasileira para o tipo de ocupação.

2.8 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrange as seguintes etapas, apresentadas em diagrama na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica,
- b) modelagem do prédio em AutoCad 3D,
- c) simulação para determinação do perfil de temperaturas,
- d) considerações finais e conclusões.

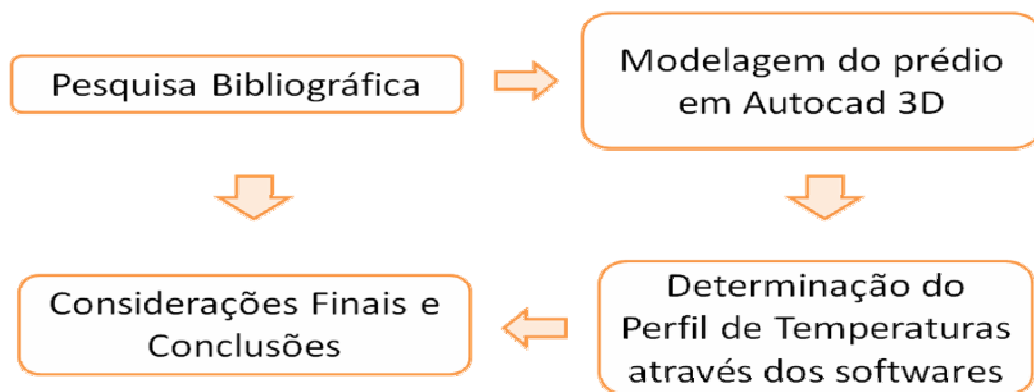


Figura 1: diagrama da pesquisa

Na etapa de pesquisa bibliográfica, foram desenvolvidos os fundamentos teóricos para a elaboração do trabalho e entendimento da temática da pesquisa. Foram estudados métodos de ensaios e avaliações de estruturas sinistradas propostos na bibliografia, bem como parâmetros de análise da degradação dos materiais. Na modelagem da edificação foram consideradas as informações presentes no Relatório Técnico nº08/96 do LEME/UFRGS, permitindo a modelagem virtual do prédio no Autocad. A determinação do perfil de temperaturas por meio da simulação computacional foi desenvolvida importando-se o modelo da edificação em Autocad para o Pyrosim, e simulando o incêndio no FDS a partir do foco de incêndio estimado no Relatório Técnico. Em considerações finais e conclusões foram comparadas as considerações apresentadas no material técnico, e os dados obtidos com o perfil de temperaturas gerado no *software*.

3 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

Incêndios são indesejáveis e sua ocorrência leva a sanções econômicas ou jurídicas e atribuição de responsabilidades. Para Brentano (2007) as exigências legais e de fiscalização têm sido a principal fonte de fortalecimento da cultura de segurança no Brasil. Neste capítulo serão apresentadas algumas noções importantes para o entendimento da dinâmica dos incêndios em edificações, bem como disposições normativas pertinentes ao assunto.

3.1 O FENÔMENO COMBUSTÃO

A combustão, ou simplesmente o fogo, produz inúmeras substâncias durante sua ocorrência, mostrando-se um fenômeno complexo. O processo de combustão, mesmo quando considerado de uma substância simples, não é perfeitamente conhecido (LANDI, 1986).

Drysdale (1998¹ apud CUOGHI, 2006) define o fogo como resultado de uma reação química oxidante e exotérmica. Oxidante, pois consome oxigênio, e exotérmica por liberar energia na forma de calor durante o processo. O triângulo do fogo da figura 2 apresenta de maneira simplificada os elementos necessários para o desencadeamento da combustão.

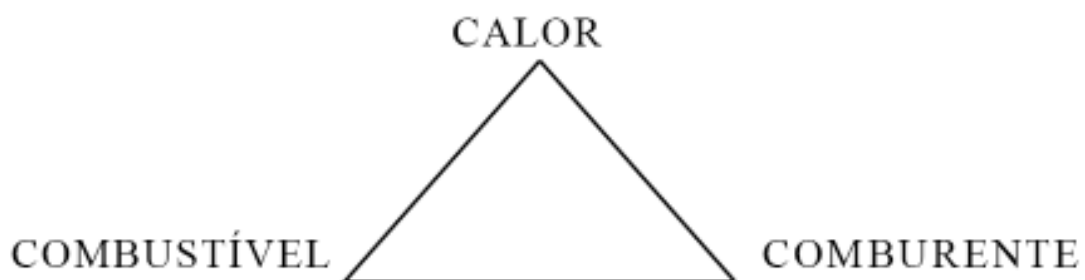


Figura 2 – Triângulo do fogo (BRASIL, 1995, p.29)

¹ DRYSDALE, D. **An introduction fire dynamics**. London: Jonh Wiley & Sons., 1998.

De modo geral, a combustão ocorre na fase gasosa dos materiais. Quando o combustível é líquido, a reação ocorre com a concentração dos vapores do combustível em contato com o oxigênio, enquanto que nos combustíveis sólidos, a parcela mais importante é devida a queima dos gases que foram originados da destilação dos constituintes voláteis do material, a chamada pirólise (CUOGHI, 2006).

Lima² (2005) indica que para interromper a reação em cadeia é necessário retirar um dos elementos que compõem o triângulo do fogo (combustível, comburente e fonte de calor) de modo que a mistura inflamável seja transformada em uma mistura não inflamável. Normalmente, a fonte de calor é o próprio incêndio, o que faz com que o controle do fogo seja dado pelo volume de ventilação no ambiente, ou pelo combustível. Para conter a evolução do incêndio é preciso limitar a oferta de oxigênio, ou reduzir a quantidade de material combustível disponível.

3.1.1 Fases de um Incêndio

Para o entendimento da dinâmica dos incêndios é importante o entendimento do processo de desencadeamento do mesmo. Durante um incêndio pode ser observadas três fases distintas:

- a) inicial;
- b) incêndio generalizado;
- c) resfriamento.

3.1.1.1 Fase inicial de elevação da temperatura

Landi (1986) aponta a fase inicial como sendo o início de aquecimento dos materiais, neste momento ainda existe pouco combustível sendo efetivamente queimado e conseqüentemente pouca energia térmica é liberada. Cuoghi (2006) ressalta que a temperatura deve aumentar à medida que se aproxima da temperatura de ignição dos materiais combustíveis. A quantidade de oxigênio ainda é baixa em função da menor ventilação e correntes de convecção

² O autor menciona a apostila utilizada no curso sobre plano de prevenção e proteção contra incêndio (PPCI) de autoria de Dario Lauro Klein, realizado pelo Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2001.

relativamente pequenas. Não existe influência do compartimento em chamas na propagação do incêndio, e os riscos à estrutura e aos ocupantes da edificação é muito baixo.

3.1.1.2 Fase de incêndio generalizado

A fase de incêndio generalizado inicia quando existem muitos gases combustíveis no ambiente e pouca concentração de oxigênio. A temperatura no ambiente fica em torno de 100°C e, de uma maneira geral, as aberturas rompem, permitindo uma farta entrada de oxigênio que alimenta o processo. Nesse momento podem ocorrer explosões devido as grandes quantidades de gases combustíveis e é quando ocorre o chamado *flashover*. O *flashover* é o fenômeno que ocorre a liberação de gases combustíveis que queimam com grande facilidade, ocorrendo uma mudança súbita de temperatura atingindo faixas em torno de 600°C quando muitos materiais sofrem combustão espontânea (CUOGHI, 2006).

3.1.1.3 Fase de Extinção

Durante esta fase, a quantidade de combustível tende a ser reduzida, devido ao consumo e a ventilação passa a atuar, não mais como contribuinte ao processo de combustão, mas sim como agente de resfriamento do material (LANDI, 1986).

3.1.2 Incêndio Controlado pela ventilação

São incêndios com baixa taxa de ventilação, caracterizados pela existência de muita fumaça e poucas chamas, além de possuir duração elevada (LANDI, 1986). Para Cuoghi (2006), são os incêndios com maior potencial destrutivo com grandes probabilidades de alastramento, mesmo com menores cargas de incêndio, ou seja, menores quantidades de combustível.

3.1.3 Incêndio controlado pelo combustível

São incêndios caracterizados por abundância de chamas, maiores picos de temperatura e menores tempos de duração. Assemelham-se a incêndios a céu aberto, pois o oxigênio é mais abundante que o combustível durante a reação (LANDI, 1986).

3.1.4 Propagação do Fogo

Para Lima (2005) é importante conhecer os mecanismos de transferência de calor para o entendimento da dinâmica dos incêndios. Brentano (2007) define o fogo como uma reação complexa cujas formas de propagação são três: condução, convecção e radiação térmica.

A condução é a forma de propagação caracterizada pelo contato direto entre as labaredas ou por meio de contato físico direto entre elementos (BRENTANO, 2007). Conforme Lima (2005) a transferência de energia ocorre através dos elétrons livre, de modo que bons condutores elétricos normalmente serão bons condutores térmicos.

Lima (2005) explica que a convecção ocorre por meio do movimento dos fluidos. Este movimento transporta gases quentes durante o sinistro, permitindo o aquecimento de materiais que não estão em contato direto com a labareda, aumentando sua temperatura até atingir o ponto de combustão deste.

O processo de radiação térmica é devido às ondas de calor geradas pelo corpo aquecido. Os raios infravermelhos são irradiados em todas as direções no espaço como uma onda luminosa (BRENTANO, 2007).

3.2 INCÊNDIOS HISTÓRICOS NO BRASIL

No século passado, entre os anos de 1970 e 1990, houve sinistros de grandes proporções em edifícios altos, lojas de departamentos e prédios públicos. Estes acontecimentos deram início a uma preocupação maior quanto ao nível de segurança das edificações, que não apresentavam soluções passivas de proteção ao fogo. Foram perdas humanas, materiais e

documentais enormes que fizeram as autoridades e os profissionais despertar para o assunto (BRENTANO, 2007).

O centro de São Paulo já foi palco de uma das maiores tragédias do País. O incêndio do Edifício Joelma, figura 3, ocorrido em fevereiro de 1974 deixou cento e setenta e nove pessoas mortas e trezentas feridas. O incêndio foi causado por uma sobrecarga elétrica no sistema de refrigeração localizado no 12. andar. A falta de equipamentos de segurança do prédio fez com que helicópteros utilizassem o heliponto da Câmara Municipal, que fica nas proximidades, para tentar resgatar vítimas que aguardavam no teto do edifício. O incêndio motivou a implantação de uma legislação com normas de segurança para prédios que havia sido elaborada após outro incêndio ocorrido dois anos antes no edifício Andraus, figura 4, que fica na Avenida São João. Na ocasião, dezessete pessoas morreram e trezentas e quarenta e cinco ficaram feridas. O fogo começou em cartazes de publicidade que estavam instalados na marquise e atingiu ainda cinco prédios vizinhos (BOMBEIROS EMERGÊNCIA, 2009a).



Figura 3 – Incêndio do Edifício Joelma (BOMBEIROS EMERGÊNCIA, 2009b)

Em 1978, quarenta minutos de incêndio destruíram o acervo do Museu de Arte Moderna (MAM) do Rio de Janeiro. Duas telas de Pablo Picasso, outras duas de Joan Miró e centenas de obras de artistas brasileiros viraram cinzas, além de todos os trabalhos presentes em uma grande retrospectiva de Joaquin Torres García, que ocupava o Museu no momento do

incêndio. O vigia percebeu que o segundo andar do salão de exposições estava em chamas, mas não pôde fazer nada já que o extintor de incêndio estava quebrado. Os bombeiros demoraram a chegar e o trabalho ainda foi prejudicado pela falta de água. Só restaram cinquenta peças das mais de mil que estavam no museu (TRAGÉDIA..., 2008).



Figura 4 – Incêndio no Edifício Andraus (BOMBEIROS EMERGÊNCIA, 2009a)

Em 1981, na Avenida Paulista, o incêndio no Edifício Grande Avenida, figura 5, matou dezessete pessoas e deixou mais de cem feridas. O prédio possuía vinte andares, sendo que apenas os três últimos não foram destruídos pelo fogo. Uma sobrecarga de energia e a rede elétrica antiga deram início ao fogo. Em 1987, parte de um edifício que pertencia à Companhia Energética de São Paulo foi implodida após um incêndio. O fogo teve origem no superaquecimento das luminárias do 5. andar (SAIBA..., 2005).



Figura 5 – Incêndio no Edifício Grande Avenida (WIKIPÉDIA, 2009)

Na tarde de 27 de abril de 1976 aconteceu o maior incêndio que já atingiu a cidade de Porto Alegre. Sete andares do prédio das Lojas Renner foram tomados pelo fogo, como mostra a figura 6. Um resultado trágico com quarenta e um mortos e mais de sessenta feridos. Antes disso, em 29 de dezembro de 1973, as chamas que consumiram as Lojas Americanas matando cinco pessoas quando o local já estava fechando. Em 1967, um incêndio consumiu em pouco mais de três horas o edifício Marechal Mallet, um dos prédios históricos do centro da Capital, pois das sacadas do prédio durante os movimentos revolucionários de 1923 e 1930, discursaram Assis Brasil, Osvaldo Aranha e Getúlio Vargas. No âmbito das perdas de materiais históricos é importante citar que no dia 19 de novembro de 1949 o prédio do Tribunal Superior do Rio Grande do Sul, hoje Tribunal de Justiça, tornou-se ruínas enquanto milhares de processos e o acervo da biblioteca do tribunal foram completamente aniquilados. Entre os materiais perdidos estavam volumes raros e coleções de jornais antigos (INCÊNDIOS..., 2009).



Figura 6 – Incêndio das Lojas Renner (INCÊNDIOS..., 2009)

O fato é que estes sinistros trouxeram para o foco a importância do tema, pois muitas pessoas perderam a vida, houve uma perda imensurável de patrimônio histórico e cultural, além das perdas financeiras enormes. Tudo isso fez a legislação evoluir, assunto que será abordado no próximo tópico deste trabalho.

3.3 LEGISLAÇÃO DE PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO

Na esfera Federal não existe um Código ou uma Lei que estabeleça parâmetros de proteção contra incêndio no projeto de edificações ficam a encargo dos estados e municípios criar suas normas específicas (BRENTANO, 2007).

Com a ocorrência dos incêndios catastróficos dos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974), no município de São Paulo, ficou notório que a legislação preventiva estava falha, seguindo um Código de Obras dos anos 30. Em 1983, foi publicado o Decreto Estadual n. 20.811, referente a Especificações para Instalação de Proteção Contra Incêndios, substituído, posteriormente, pelo Decreto Estadual n. 38.069, em 1993. A última publicação foi o Decreto

Estadual 46.076, de 31 de agosto de 2001, que institui o Regulamento de Segurança contra Incêndio das Edificações e Áreas de Risco (CUOGHI, 2006).

No Rio Grande do Sul, a Lei 874, de 1949, atribuiu a prevenção de incêndios à Brigada Militar. O Decreto Estadual n. 23.245, de 1974 no seu Artigo 36, estabelece que o Comando do Corpo de Bombeiros da Brigada Militar é o órgão responsável, perante o Comando-Geral, pelo planejamento e execução de todas as atividades de prevenção, proteção e combate contra incêndios, de socorros, busca e salvamento, bem como a de instrução especializada. A Lei n. 10.987/97 estabelece as Normas de proteção e prevenção de incêndios e atribui ao Corpo de Bombeiros a competência para aprovação dos planos de proteção contra incêndio, cujas normas técnicas foram definidas no Decreto Estadual 37.380/97, posteriormente alterado pelo Decreto 38.273/98 (informação verbal³).

Em 1976, após o incêndio das Lojas Renner, a Câmara de Vereadores de Porto Alegre reavalia e aprova as Leis Complementares n. 20/76, 28/76, 30/76 e 32/77, as quais especificavam algumas normas de prevenção e proteção contra incêndios.

Em 1979, o primeiro Código Municipal de Prevenção de Incêndio, Lei n. 3.382, é aprovado em Rio Grande, com base nas leis de Porto Alegre e na regulamentação do Instituto de Resseguros do Brasil. A partir deste Código, outros foram criados, como no município de São Borja em 1988, no ano seguinte em Tramandaí, Santa Maria em 1991, Novo Hamburgo em 1992, Ijuí em 1993, em 1994 foi Santiago e Pelotas. Giruá, Santa Rosa e Santo Ângelo aprovaram seus códigos em 1995 e Sapucaia do Sul em 1996. Já em 1998 foi aprovado o Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre (Lei 420) (informação verbal⁴).

3.4 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO

Os sistemas de proteção de uma edificação podem ser divididos em passivos e ativos. Os ativos, são equipamentos que necessitam acionamento, seja pelos usuários ou por dispositivos automáticos como chuveiros automáticos ou detectores de fumaça (LIMA, 2005). Conforme

³ informação colhida na apresentação do Comandante do Corpo de Bombeiros Luiz Fernando Puhl na Mercofire 2009.

⁴ Idem.

Brentano (2007) proteção ativa é toda medida que tem como objetivo facilitar o combate ao incêndio, bem como, o controle do seu crescimento.

Sistemas passivos são, conforme definido por Buchanan (2002⁵ apud LIMA, 2005), como dispositivos que não necessitam operação externa. Brentano (2007) aponta que os sistemas passivos de proteção devem ser planejados na fase de projeto da edificação e visam evitar e minimizar o acontecimento de um sinistro e seu alastramento.

Para a escolha de um sistema de proteção contra incêndio adequado, é importante uma minuciosa avaliação de risco. Não basta avaliar o dano provável à estrutura devido a um incêndio, mas avaliar a extensão do dano que pode ser suportado. Ou seja, é preciso conhecer o risco, sua probabilidade de ocorrência e os danos possíveis (CUOGHI, 2006).

3.5 DIRETRIZES PARA PROJETO

Com a aplicação do concreto armado na engenharia, foi viabilizada uma maior verticalização das construções e uma maior concentração de pessoas em menores espaços. Com isso, as operações de resgate às vítimas e combate ao incêndio ficaram mais complexas. Tornou-se importante o aumento do conhecimento no que diz respeito à dinâmica do fogo, visando uma melhora do projeto arquitetônico quanto a segurança em incêndios (BRENTANO, 2007).

O projeto é a etapa onde são tomadas as decisões estratégicas para controle de incêndios em edificações por meio de proteção ativa e passiva. É quando são determinadas a vulnerabilidade e a resistência natural da edificação ao fogo, que mais tarde reflete nas operações de fuga e combate ao fogo (LIMA, 2005).

Cuoghi (2006) aponta que o tipo de material utilizado na construção, as pessoas e o uso da edificação determinam o nível mínimo de segurança que deve ser exigido pela legislação para o prédio. A figura 7 ilustra os parâmetros de segurança que devem ser considerados na etapa de projeto da edificação

Para Brentano (2007) existe uma dificuldade em caracterizar perfeitamente o risco de uma edificação de acordo com uma classificação abrangente e define três parâmetros que devem

⁵ BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

ser considerados pelo projetista com o objetivo de implantar os sistemas de proteção contra incêndios. São eles:

- a) proteção à vida humana;
- b) proteção ao patrimônio;
- c) continuidade do processo produtivo.

Nos três objetivos listados fica evidente a importância de conhecer os efeitos que as altas temperaturas exercem sobre o concreto para, então, minimizar os possíveis danos.

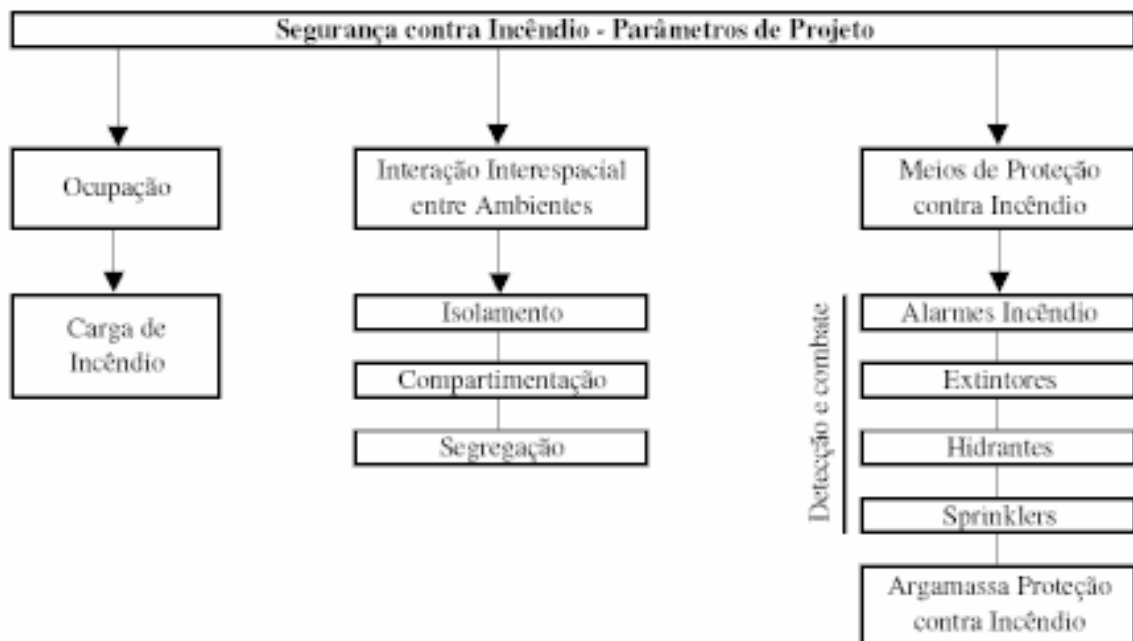


Figura 7 – Parâmetros de proteção para incêndios em projetos
(CUOGHI, 2006, p. 72)

3.6 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

O concreto armado tem um excelente desempenho com relação a sua resistência ao fogo. O concreto é incombustível, não libera gases tóxicos e é capaz de manter boa resistência mecânica por períodos relativamente longos, permitindo ações de resgate durante a ocorrência de sinistros (METHA; MONTEIRO, 1994).

A pasta de cimento e o agregado também influenciam no comportamento do concreto, pois os mesmos podem sofrer transformações e degradação devido às altas temperaturas. Isso depende da composição mineralógica e da porosidade do agregado. O quadro 1 apresenta um resumo das principais transformações na pasta de cimento durante o processo de aquecimento (LIMA, 2005).

Temperatura (°C)	Transformações
20-80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Marco no aumento da permeabilidade a água
80-200	Aumento na taxa de perda d' água capilar e fisicamente combinada
80-850	Perda da água quimicamente combinada
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H
300+	Marco no aumento da porosidade e micro-fissuras
350	Decomposição de alguns tipos de agregados de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400-600	Dissociação do C-S-H em CaO e água
573	Transformação da fase dos agregados quartzosos e ligeira expansão
550-600+	Marco no aumento dos efeitos térmicos
700+	Dissociação do CaCO ₃ em CaO e CO ₂ (pasta e agregados carbonáticos)
720	Segundo pico da decomposição do C-S-H em C ₂ S e CS
800	Alteração das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica
1060	Início do derretimento de alguns componentes

Quadro 1 – Transformações sofridas pela pasta de cimento durante aquecimento (LIMA, 2005, p. 72)

Outros fatores importantes são: o grau de hidratação e o teor de água presentes na pasta de cimento. Ambos possuem papel fundamental no desempenho do concreto sob ação do fogo. Isso ocorre pois até que toda água evaporável seja removida pelo aquecimento do ambiente, a temperatura não terá aumento significativo. Porém, caso a quantidade de água evaporável seja grande, pode ocorrer excesso de poro pressão interna no concreto, o que provoca lascamento superficial e decorrente exposição da armadura deixando de agir como barreira térmica do aço (METHA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1997), o módulo de elasticidade do concreto é fortemente influenciado pela temperatura, o que reflete diretamente no comportamento estrutural do material. Para temperaturas de até 300°C, o concreto apresenta valores de resistência próximos aos valores iniciais. Em temperaturas maiores, sua capacidade resistente decresce progressivamente.

Lima (2005) salienta que o comportamento térmico de concretos de resistência convencional e de alta resistência é distinto, devido à estrutura mais densa do segundo frente ao primeiro. Para concretos de alta resistência diante de aquecimentos mais severos, podem ocorrer deslocamentos explosivos, conhecidos pelo termo em inglês *spalling*. Para o autor, é possível observar o fenômeno de forma intensa nos agregados, na superfície do concreto e de forma explosiva em todo o elemento. Outra forma, não violenta, pode ser encontrada nos cantos e quinas dos elementos de concreto e ainda durante o resfriamento da estrutura.

4 ANÁLISE DE INCÊNDIOS

A análise dos incêndios permite o aperfeiçoamento da legislação, bem como das técnicas de proteção e combate aos incêndios. O quadro 2 mostra a relação entre o número de incêndios registrados e o número de laudos concluídos, enquanto que o quadro 3 apresenta o número dos laudos que obtiveram a apuração das causas dos incêndios. Apenas cinco por cento dos incêndios tiveram seus laudos concluídos, e destes, pouco mais da metade tiveram suas causas identificadas, ou seja, em torno de 2,7% dos incêndios registrados tiveram as causas elucidadas.

Eventos	Ocorrências
Incêndios Registrados	55.294
Laudos Concluídos	2.842
% de Laudos Concluídos	5,1%

Quadro 2 – Relação entre demanda e execução de laudos nos Corpos de Bombeiros Militares (adaptado de BRASIL, 2006, p. 31)

Laudos Concluídos	2006	
	Ocorrências	Percentual
Sem Identificação das Causas	1.323	46,55
Com Identificação das Causas	1.519	53,45
Total de Laudos	2.842	100

Quadro 3 – Número de laudos concluído pelos Corpos de Bombeiros Militares segundo o tipo de conclusão (adaptado de BRASIL, 2006, p. 31)

De acordo com Klein (2008), a análise dos efeitos da ação das altas temperaturas sobre uma edificação deve ser realizada sob dois pontos de vista: os danos causados aos materiais e a estabilidade da estrutura. O concreto armado, conforme já citado, sofre redução da sua capacidade de resistência com o aumento da temperatura. Portanto, as capacidades residuais

do aço e do concreto dependem, entre outros fatores, da temperatura atingida e do nível de tensões atingido durante a ação do fogo. A estabilidade da estrutura do prédio depende diretamente da degradação dos elementos estruturais. Existem diversas ferramentas disponíveis para analisar os efeitos dos sinistros nas edificações. A figura 8 apresenta um diagrama de análise de edificações sinistradas, de modo a sistematizar o processo e obter um diagnóstico final confiável.

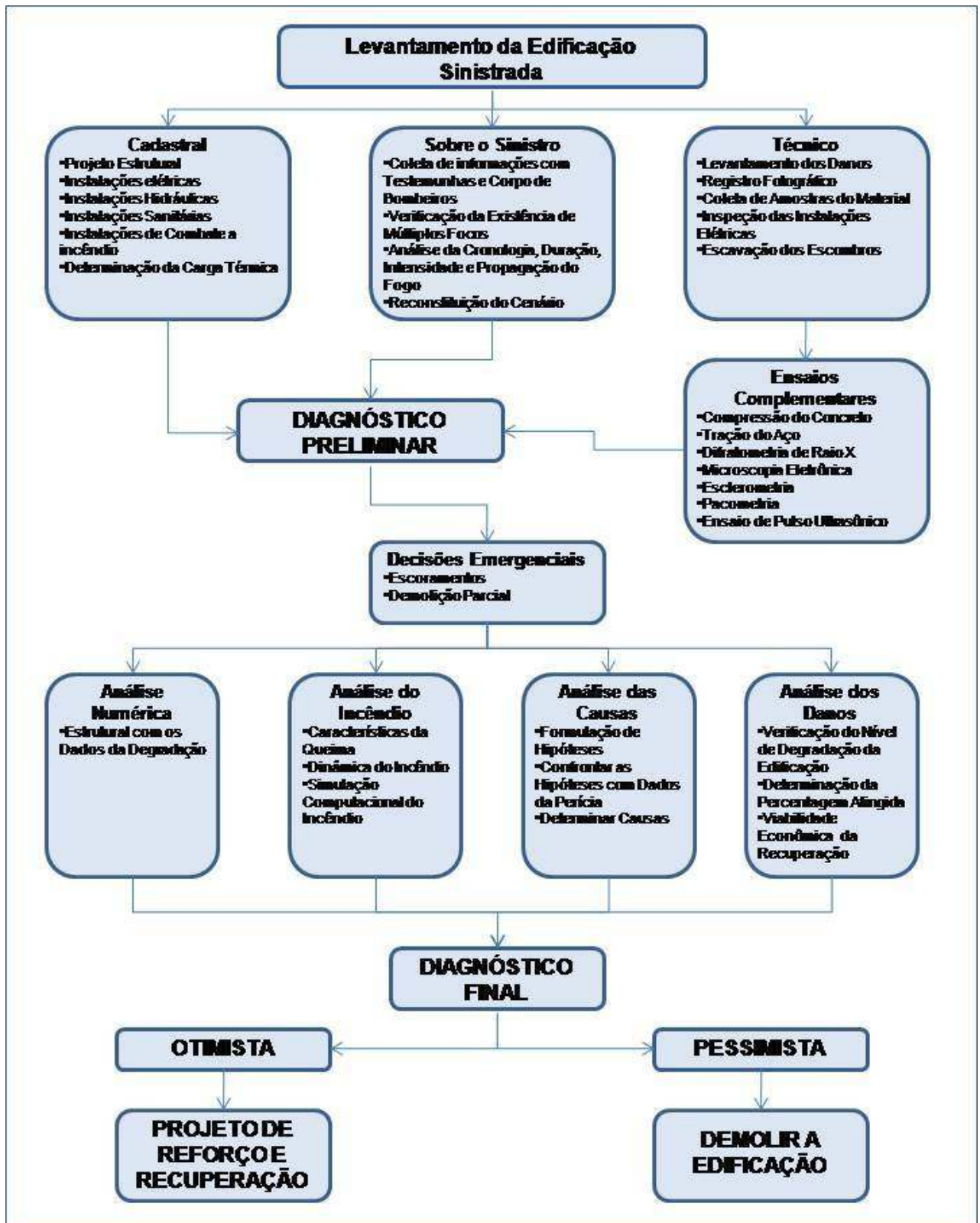


Figura 8 – Diagrama das etapas de análise de estruturas sinistradas (KLEIN, 2009)

4.1 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DISPONÍVEIS

O Engenheiro dispõe de algumas ferramentas que possibilitam encontrar soluções eficientes para os mais diversos problemas. Podem ser utilizados métodos analíticos, numéricos ou experimentos em laboratório para reconstituir ou simular uma situação real. Os métodos numéricos e analíticos são métodos teóricos fundamentados em leis físicas diferenciados apenas na complexidade que cada método deve ser aplicado. Experimentos em laboratório são capazes de reproduzir com maior fidelidade situações reais.

Para realizar uma perícia na estrutura, é importante iniciá-la o mais rápido possível, antes mesmo da remoção dos entulhos. Neste momento, deverá ser estimada a severidade do incêndio, por meio de inspeção visual, e dos danos em cada elemento estrutural. Com o uso de simulações computacionais poderá ser estimada a temperatura máxima atingida durante o sinistro (ANDERBERG, 2003⁶ apud LIMA, 2005).

Para usar as ferramentas de análise adequadamente, é importante entender cada um dos métodos e os ensaios complementares, que serão apresentados a seguir.

4.1.1 Simulação experimental de incêndio

Maliska (1995) aponta que o experimento em laboratório trata-se de uma configuração do problema mais próxima da realidade. Na maioria das vezes ele implica em altos custos e tempos de realização demasiados. É cada vez maior o uso de experimentos sofisticados para modelagem numérica de problemas e para o entendimento de fenômenos físicos. O uso de simulação experimental é mais utilizado para a calibração de métodos numéricos ou computacionais, considerando seu alto custo e elevado tempo de realização.

⁶ ANDERBERG, Y. Design methods & structural performance. In: **COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE**, 2003, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 27p. Apostila.

4.1.2 Curvas de incêndio

As curvas de incêndio são utilizadas por diversos países com a finalidade de criar uma referência para os níveis de temperatura atingidos relacionados ao tempo de queima. É certo que incêndios padrão não ocorrem na prática, porém seus resultados são próximos aos reais, o que permite que seja possível padronizar ensaios no mundo todo. As expressões que relacionam a temperatura dos gases dentro de uma edificação com o tempo de duração do incêndio permitem a padronização dos tempos de resistência ao fogo de materiais constituintes (CUOGHI, 2006).

A NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000), com o título Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento tem como objetivo aumentar a segurança durante a fuga dos ocupantes e atividades de combate ao incêndio além de minimizar os danos a estrutura e seu colapso. Outro aspecto importante é a determinação dos tempos requeridos de resistência ao fogo de elementos (TRRF), que deve ser estabelecido de acordo com a ocupação ou uso da edificação, por meio de um incêndio padrão. Este incêndio padrão corresponde a uma elevação da temperatura descrita pela fórmula 1:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

θ_g = a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

θ_0 = a temperatura ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada como 20°C;

t = o tempo, em minutos;

Com a aplicação da fórmula 1, é possível obter a temperatura do ambiente a partir do tempo de queima e da temperatura inicial do compartimento. A figura 9 representa a curva-padrão ISO-834 cuja carga de incêndio é formada por materiais celulósicos. É possível observar um acréscimo de temperatura acentuado nos primeiros instantes, decorrente da natureza do material combustível.

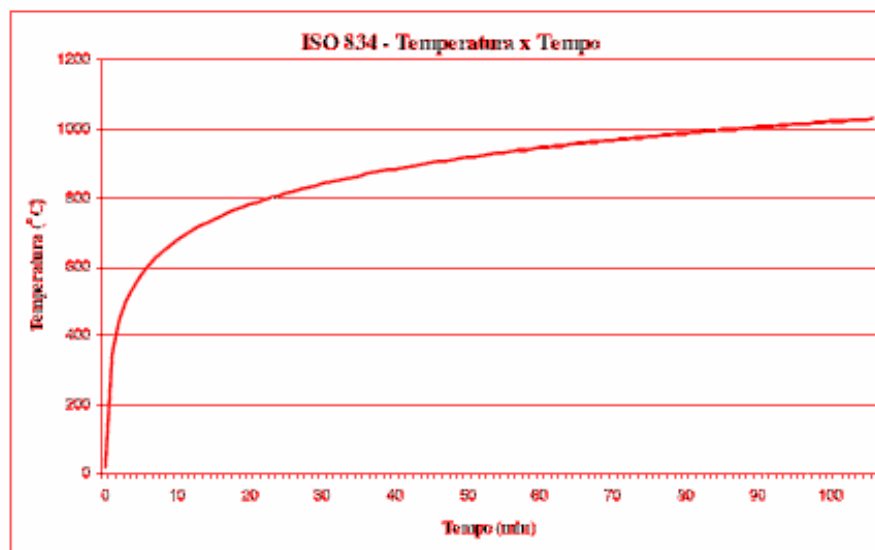


Figura 9 – Curva-padrão ISO 834 para materiais celulósicos (CUOGHI, 2006, p. 70)

4.1.3 Análise Numérica

Para conhecer o comportamento das estruturas atingidas por um incêndio, deve ser analisada a estrutura como um todo e não apenas os elementos isolados. Isso é devido a redistribuição das cargas na estrutura que irá depender da rigidez dos elementos e suas conexões. Isto pode ser comprovado por inúmeros casos de edificações que sofrem incêndio generalizado e não desabam (KLEIN, 2008).

4.1.4 Análise Computacional

A simulação computacional de incêndio é uma importante ferramenta para conhecimento da dinâmica do fogo nas edificações, bem como dos efeitos da temperatura e da fumaça. Por meio dela, pode-se contribuir para a minimização dos efeitos danosos do incêndio antes mesmo que eles ocorram. A simulação permite compreender como os aspectos estruturais, ambientais e de materiais utilizados no processo construtivo influenciam no desenvolvimento do fogo, favorecendo a melhoria na criação das normas técnicas, na preservação do meio-ambiente e no maior controle dos materiais empregados na construção civil.

Dentre os *softwares* conhecidos para simular computacionalmente um incêndio, o mais utilizado, devido à sua precisão, é o *Fire Dynamics Simulator* (FDS), desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*). O modelo resolve uma forma de equações de Navier-Stokes apropriado para baixa velocidade, termicamente conduzido com um fluxo que dá ênfase no transporte de calor e fumaça. As derivadas parciais das equações de conservação de massa, momento e energia são aproximadas como diferenças finitas. A radiação térmica é calculada utilizando uma técnica de volumes finitos (MCGRATTAN et al., 2009).

O *Smokeview* é um programa de visualização que é usado para mostrar os resultados da simulação do FDS. É importante salientar que ambos os programas são gratuitos e livres, permitindo sua adaptação à realidade brasileira, inserindo padrões de materiais para construção adequados ao local onde o edifício será implantado. Além disso, existem aplicações produzidas por terceiros para facilitar a entrada de dados no FDS e a importação de arquivos de CAD. Pode-se destacar o Pyrosim, que fornece uma interface gráfica ao usuário para inserir a geometria (MCGRATTAN et al., 2009).

Segundo Maliska (1995), os escoamentos de fluidos são altamente não lineares e problemas de elasticidade não possuem termos convectivos e são parecidos com problemas de transferência de calor. O método das diferenças finitas é comumente aplicado em problemas de escoamentos de fluidos, enquanto o método dos elementos finitos (MEF) foi difundido na área estrutural, para problemas de elasticidade.

A ponderação entre os efeitos difusivos – com o aprimoramento do método dos volumes finitos (MVF), no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação da propriedade envolvida no volume elementar – e convectivos, que passaram a empregar outras funções de interpolação para permitir o tratamento adequado dos termos convectivos não-lineares, possibilitaram um expressivo avanço do MEF na área de escoamento de fluidos (MALISKA, 1995).

Mas é importante ressaltar algumas limitações como Lima (2005, p. 44):

[...] os danos ocasionados ao concreto de forma aleatória e inesperada, provenientes de deslocamentos explosivos, têm levado a inexatidão dos projetos de prevenção contra incêndios e a redução dos níveis de segurança das estruturas de concreto neste tipo de sinistro. A falta de conhecimentos suficientes que permitam prever o fenômeno, tem sido um fator limitante para a formulação de modelos robustos

destinados a avaliar o comportamento das estruturas de concreto em incêndios. Enquanto o *spalling* continuar sendo um fenômeno aleatório, os cálculos de segurança ao fogo e as simulações computadorizadas de resistência ao fogo não serão possíveis. Atualmente, os modelos que estão sendo utilizados determinam a resistência ao fogo de elementos de concreto ignorando os efeitos do *spalling*, mas os resultados obtidos podem não ser seguros. Esta possibilidade está sendo reconhecida pelos projetistas que, por não serem capazes de determinar se ocorrerá este fenômeno, estão adotando medidas preventivas contra as suas consequências.

4.1.5 Análise Colorimétrica

Os agregados do concreto têm sua coloração alterada quando expostos as altas temperaturas, da mesma forma, ocorre uma perda de resistência do concreto com o aumento da temperatura, sendo possível relacionar a perda de resistência do elemento de concreto com a sua mudança de cor (WENDT, 2006).

A figura 10 apresenta uma relação entre a redução da capacidade de suporte do concreto e a mudança de cor observada no material. Esta escala, demonstra uma compatibilidade com os efeitos observados de perda de resistência em relação a temperatura atingida, como descrito no quadro 1. Este fato indica que a análise colorimétrica da estrutura pode trazer informações importantes durante a inspeção da edificação sinistrada.

No gráfico é possível observar que até a faixa entre 200°C e 300°C ocorre uma perda de resistência em torno de 10%. Entre 300°C e 600°C o concreto torna-se avermelhado e tem sua capacidade de suporte reduzida de até 50%. Quando a temperatura atinge 1000°C a resistência é praticamente nula e o material assume uma tonalidade amarelada. É importante ressaltar, que essa mudança de cor pode ser observada no concreto exposto a altas temperaturas, e não considera a fuligem resultante da queima de certas substâncias e transportada pela fumaça.

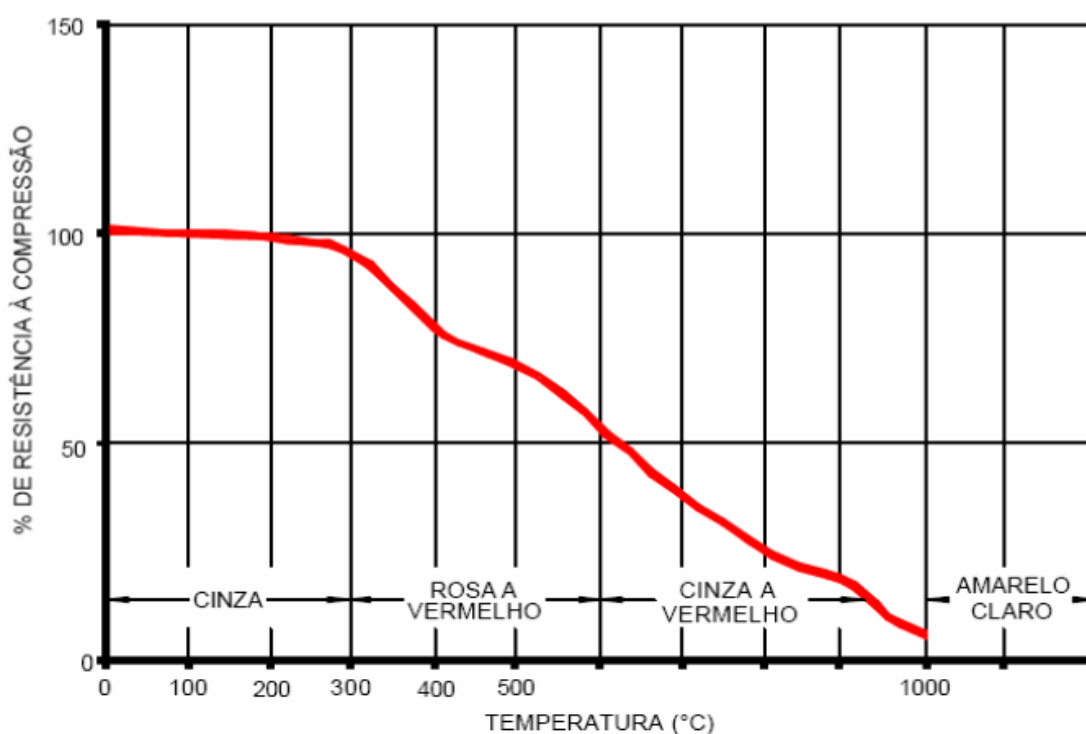


Figura 10 – Relação entre a cor e a perda de resistência à compressão do concreto (CÁNOVAS, 1988⁷ apud WENDT, 2006, p. 44)

4.2 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Os ensaios complementares são utilizados para auxiliar na formulação do diagnóstico final sobre o sinistro. Esta análise permite uma avaliação mais precisa do problema e da viabilidade econômica da recuperação da edificação.

Com a difratometria de raio X é possível identificar os cristais presentes no material e acompanhar as mudanças ocorridas nos mesmos. Para tanto, devem ser analisados materiais colhidos em pontos onde houve o sinistro e onde não houve contato com o fogo, para comparar os resultados (LIMA, 2005). Uma das principais vantagens deste ensaio é seu aspecto não destrutivo. As amostras de pó de concreto, retiradas de diferentes pontos da estrutura sinistrada e em diferentes profundidades, no mesmo ponto, são utilizadas no ensaio com a finalidade de avaliar as alterações no material cristalino do concreto, quando esse sofreu com os efeitos das altas temperaturas (KLEIN, 2008).

⁷ CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

Para Lima (2005), a microscopia eletrônica permite identificar alterações morfológicas, físicas e biológicas dos materiais componentes do concreto submetidos a elevadas temperaturas. Pode ser considerado um dos métodos mais versáteis para análises microestruturais.

A esclerometria é um ensaio utilizado para análise da homogeneidade dos materiais em regiões danificadas ou não do concreto, permitindo comparar as diferenças entre essas regiões. É uma técnica não destrutiva de obtenção de resistência superficial do elemento de concreto (KLEIN, 2008).

Para analisar a perda de resistência à compressão do concreto, Klein (2008) explica que para a extração de corpos de prova do concreto, pode-se utilizar o pacômetro. Este equipamento é capaz de identificar as armaduras do elemento estrutural, evitando assim, o corte da mesma por ocasião da extração do corpo de prova. Portanto, é um procedimento que orienta a extração dos corpos de prova sem danificar a estrutura que será analisada.

Outra técnica não destrutiva, o ensaio de pulso ultra-sônico, é utilizada para estimar a profundidade da capa de concreto atingida pelas altas temperaturas. Neville (1997) ressalta que este ensaio não deve ser usado para medir a resistência do concreto, pois o mesmo não preenche os requisitos físicos para isso. Porém é possível avaliar a densidade do concreto, bem como fissuras e deterioração por fogo.

5 AMBIENTE SIMULADO

O ambiente simulado corresponde ao prédio que abriga o Condomínio Edifício Cacique no centro de Porto Alegre. A edificação sofreu danos devido a um incêndio ocorrido em 26 de junho de 1996. O imóvel possui 26 pavimentos constituídos por estrutura de concreto armado formada por pilares, vigas e lajes, sendo que a partir do décimo terceiro pavimento as lajes foram construídas com tijolos armados (trabalho não publicado⁸).

Na figura 11 é possível observar uma das principais características arquitetônicas do imóvel, o escalonamento da fachada frontal. Nesta fachada a edificação apresenta dois recuos, um no décimo segundo pavimento e outro no décimo sexto pavimento. Os recuos da fachada frontal desempenharam importante papel, não permitindo que o fogo se propagasse verticalmente, atingindo os andares superiores.



Figura 11 – Fachada do Condomínio Edifício Cacique

⁸ Material técnico que compõe o acervo privado do LEME/UFRGS.

O prédio abrigava, por ocasião do sinistro, escritórios, residências, sindicatos, federações e diretórios de partidos políticos no corpo principal, sendo que nos fundos, em um pavilhão anexo, localizavam-se os ambientes que anteriormente funcionaram os cinemas Cacique e Scala (trabalho não publicado⁹).

5.1 RELATÓRIO TÉCNICO LEME/UFRGS n. 08/96

O Relatório Técnico LEME/UFRGS n. 08/96, neste trabalho denominado somente Relatório Técnico, apresenta os dados correspondentes à vistoria técnica realizada no prédio do Condomínio Edifício Cacique e uma descrição das condições encontradas na edificação após o sinistro. Essas vistorias ocorreram entre os dias 28 de junho e 1 de julho de 1996.

O material técnico coloca a seguinte dinâmica de incêndio (trabalho não publicado¹⁰):

- a) houve durante o sinistro, duas áreas com intensidade de calor diferente: no 11º pavimento, grande intensidade, e, no cinema Cacique, média intensidade;
- b) as chamas produzidas por materiais localizados nestas duas áreas causaram uma destruição ascendente. Sendo que a intensidade das chamas diminui com a altura, observa-se que o foco do térreo produziu danos de forma decrescente até o 10º pavimento e o foco do 11º pavimento ocasionou danos decrescentes até o 16º pavimento;
- c) em função da forma arquitetônica do edifício, que apresenta nos pavimentos 6º ao 10º e 13º ao 16º, um corredor central, o fogo, que atingiu os fundos do prédio, não atingiu os conjuntos da frente, pois o corredor funcionou como câmara de isolamento;
- d) no 11º pavimento, a inexistência deste corredor central e devido à grande área livre interna existente, o fogo atingiu toda a área do pavimento, saindo as chamas pela fachada da Rua dos Andradas;
- e) no 12º pavimento, que encontrava-se em reforma, observou-se danos localizados nas esquadrias da fachada dos fundos, sendo que, no interior do pavimento, não houve danos em virtude da inexistência de materiais inflamáveis;
- f) devido ao recuo apresentado pelo prédio no 12º pavimento, as chamas do 11º não alcançaram os andares superiores pela fachada da Rua dos Andradas, somente o calor provocou e quebra de vidros de algumas janelas dos andares superiores ao 11º pavimento;
- g) o fogo progrediu, então, pela fachada dos fundos e foi perdendo intensidade até atingir o 16º pavimento, onde parou;

⁹ Idem.

¹⁰ Material técnico que compõe o acervo do LEME/UFRGS.

h) a progressão do sinistro, em forma ascendente foi interrompida no 16º pavimento, pois novamente a forma arquitetônica do prédio colaborou para esta interrupção. Observa-se que a partir do 17º pavimento até o 23º pavimento, o prédio apresenta um corredor externo aos apartamentos que funcionou como um isolador. Observou-se a ação, nos pavimentos 17 e 18, do calor produzido pelo incêndio, ocasionando o derretimento dos espelhos de plástico dos interruptores, campainhas e pintura das portas.

As considerações a respeito do sinistro apontam grande probabilidade do fogo ter apresentado o foco inicial no décimo primeiro andar. Um segundo foco de incêndio teria ocorrido no térreo, decorrente da queda de materiais ou equipamentos em chamas. Os danos provocados no décimo primeiro pavimento foram apontados pelo Relatório Técnico como de maior intensidade, em relação os danos encontrados nos andares inferiores. Não constam no Relatório Técnico as plantas das áreas não atingidas pelo sinistro, ou seja, dos pavimentos abaixo do quinto e acima do décimo sétimo.

É possível observar na figura 12 as marcas provocadas pelo incêndio, evidenciando uma agressividade maior do décimo primeiro pavimento, em relação ao décimo pavimento, imediatamente abaixo. Outro aspecto que pode ser observado é a existência da circulação externa do décimo sétimo pavimento ao vigésimo terceiro pavimento que evitou a propagação do incêndio para os andares superiores.



Figura 12 – Fachada posterior do Condomínio Edifício Cacique após o sinistro (trabalho não publicado¹¹)

5.2 SIMULAÇÃO DO INCÊNDIO

A reconstituição do incêndio foi realizada com base nos dados da geometria da edificação constantes no Relatório Técnico. Foram reproduzidas as plantas dos pavimentos que sofreram ação do incêndio. O Relatório Técnico apresenta um corte longitudinal da edificação, que define os andares abaixo do quinto pavimento com a mesma área, exceto pela presença de uma sacada existente no quinto pavimento que permitia o acesso à cobertura do pavilhão anexo. A modelagem dos pavimentos não afetados foi baseada nas informações colhidas deste corte longitudinal, sendo estes, considerados volumes fechados, já que sua configuração interna não teve influência na dinâmica do incêndio.

¹¹ Material técnico que compõe o acervo do LEME/UFRGS.

5.2.1 Montagem do Cenário

Para reproduzir o cenário do incêndio, foram desenhadas as plantas baixas existentes no Relatório Técnico previamente, utilizando a ferramenta de desenho técnico AutoCad 2009. Posteriormente foi criado um modelo de três dimensões para avaliação das proporções de cada um dos volumes que compõem o corpo principal do prédio. Com isso, as dimensões puderam ser quantificadas, a fim de auxiliar o processo de importação do modelo para o Pyrosim, que fornece a interface gráfica dos arquivos em formato CAD para a linguagem do FDS.

A figura 13 mostra a planta do quinto pavimento, apresentando elementos da estrutura principal da edificação, além da marcação das vigas e vazios. Nota-se a presença de uma adição ao volume principal, marcada por uma sacada localizada na fachada posterior. A figura 14 mostra a planta do andar tipo correspondente do sexto ao décimo pavimento que permanece estruturada de forma idêntica a planta do quinto pavimento, subtraindo a sacada.

O décimo primeiro pavimento e o décimo segundo pavimento foram representados com uma grande área livre, sem as divisões internas existentes nos demais andares. No caso do décimo segundo pavimento, que estava em reformas, não havia nenhum tipo de divisão, enquanto que no décimo primeiro pavimento, as divisórias eram de material combustível, que foi consumido durante o incêndio. Essas divisórias internas foram representadas na forma de carga de incêndio, sendo um importante fator, que contribuiu para a propagação do fogo.

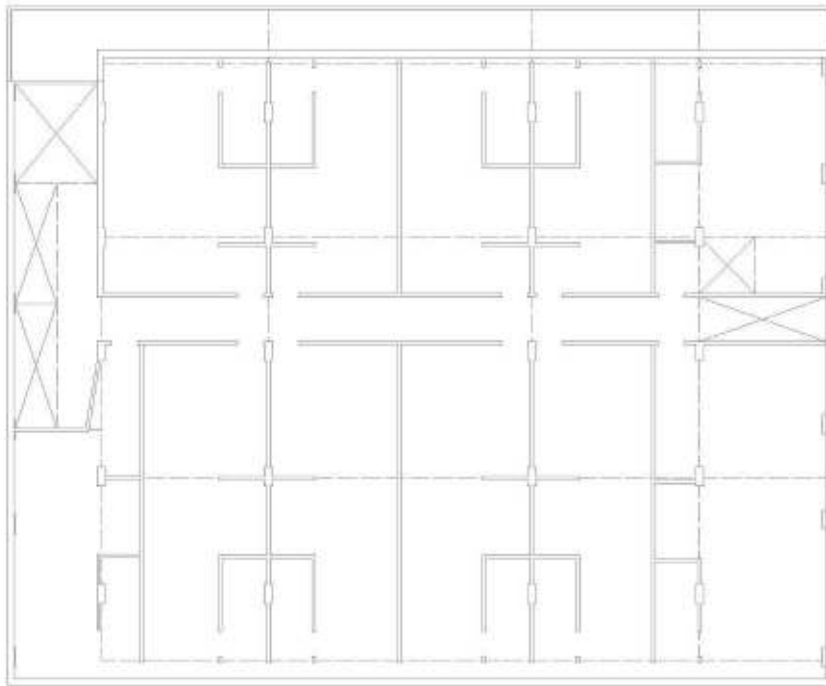


Figura 13 – Planta baixa do 5. pavimento (trabalho não publicado¹²)

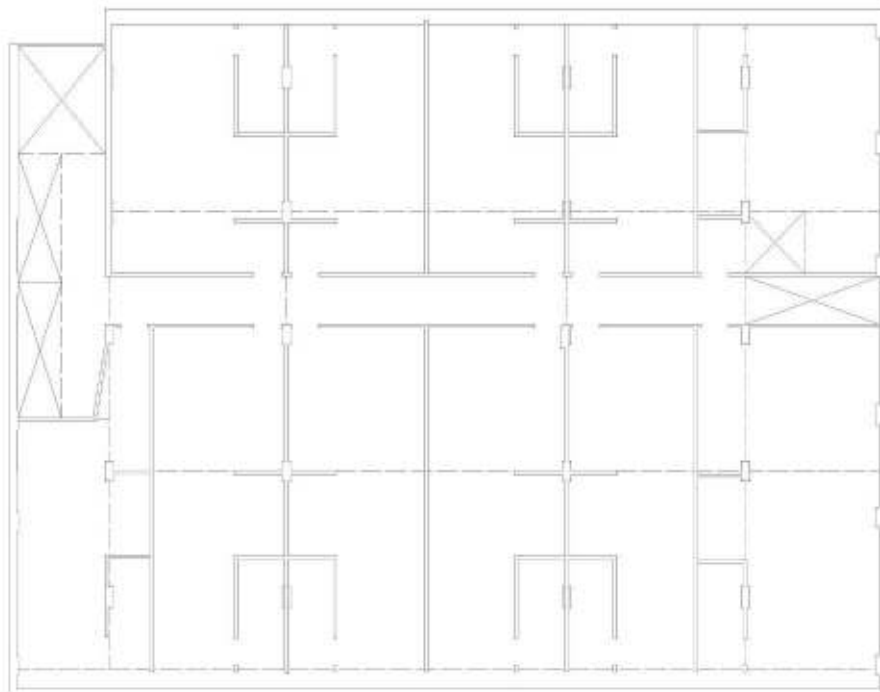


Figura 14 – Planta baixa do 6. até o 10. pavimento (trabalho não publicado¹³)

¹² Material técnico que compõe o acervo do LEME/UFRGS.

¹³ Idem.

As plantas do décimo segundo ao décimo sexto pavimento revelam o primeiro recuo presente na volumetria da edificação, que se projeta na fachada frontal. O segundo recuo é localizado a partir do décimo sétimo pavimento e estende-se ao vigésimo sexto pavimento.

A figura 15 ilustra o perfil da edificação com seus recuos na fachada frontal, a circulação externa existente no décimo sétimo pavimento, bem como o pavilhão, e sua ligação com a edificação na parte posterior.

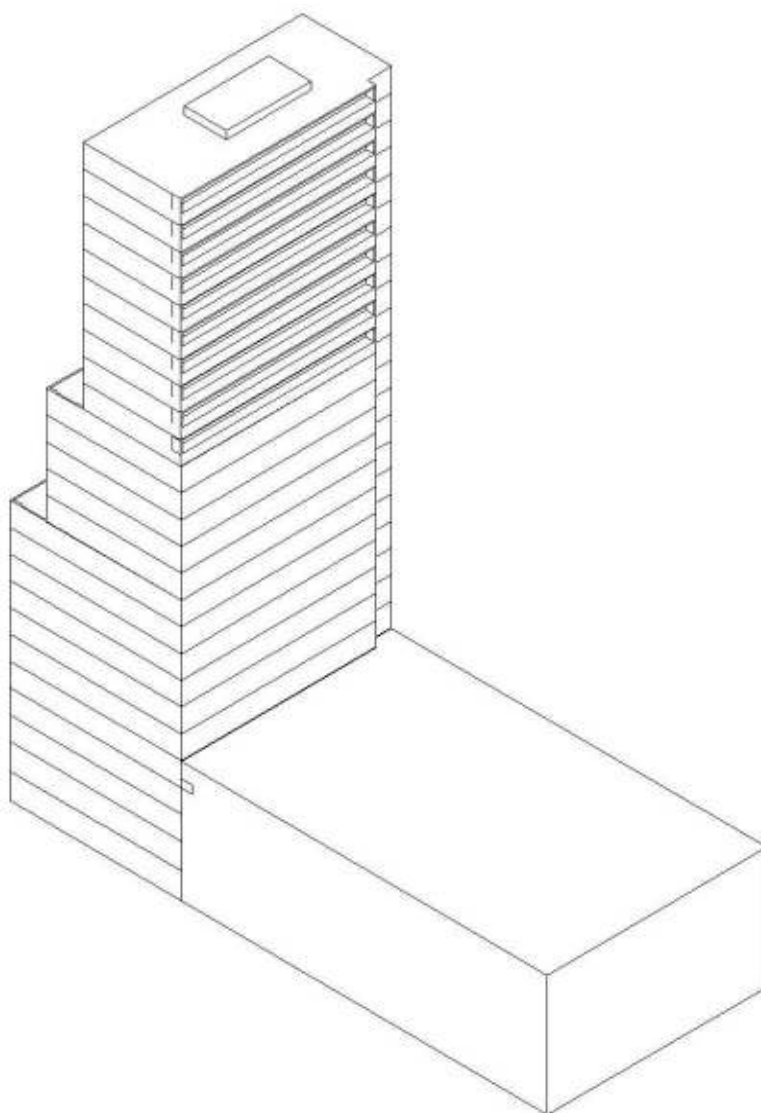


Figura 15 – Perspectiva isométrica do Condomínio Edifício Cacique

Durante o processo de importação das plantas para o Pyrosim, esse, solicita a espessura e altura das paredes. O resultado, é que as paredes, que são compostas por duas faces, foram

transformadas durante a conversão em quatro volumes, um para cada face, e um para cada extremidade, como pode ser observado na figura 16. Isso implica na necessidade de excluir os volumes que foram criados a mais pelo programa. Além de aumentar a carga de trabalho, corre-se o risco de excluir algum item importante do modelo. Com isso, todas as plantas foram refeitas transformando as paredes em linhas, para indicar a espessura das mesmas, durante a modelagem no Pyrosim, reduzindo o trabalho e gerando um volume mais próximo do modelo real.

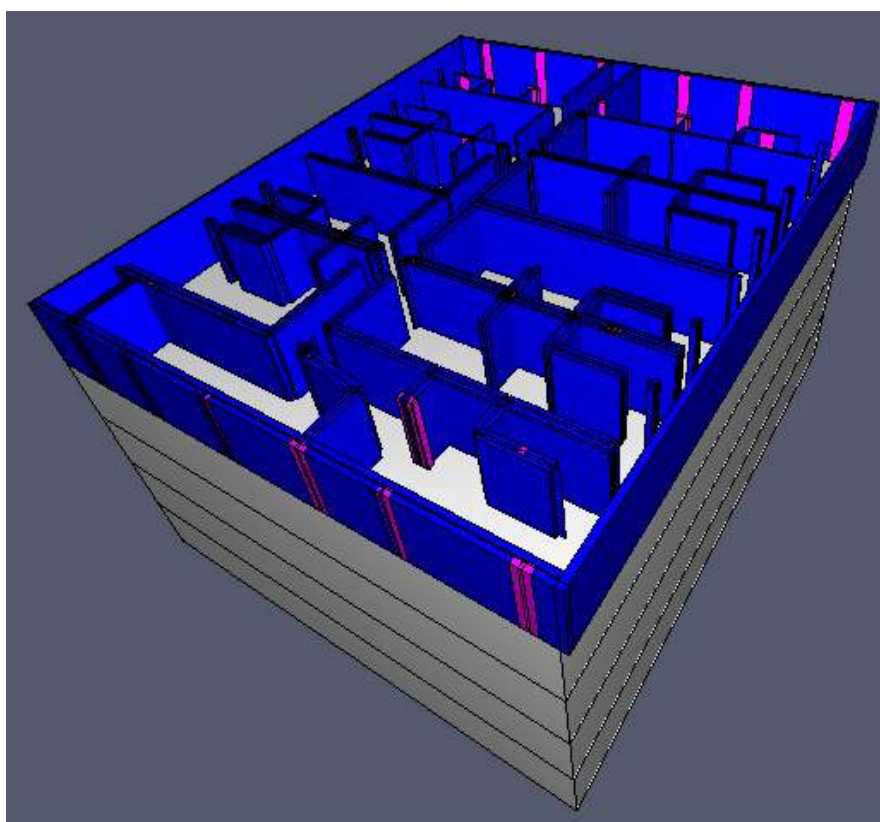


Figura 16 – Primeira importação das plantas (PYROSIM, 2010)

A transformação das paredes em linhas foi realizada de modo que as plantas dos pavimentos, adotassem as mesmas coordenadas, e com isso, o processo de sobreposição dos pavimentos foi simplificado, pois o Pyrosim baseia-se no mesmo sistema de coordenadas do arquivo modelado no Autocad. Outro aspecto importante é o cuidado em deixar o espaço que será ocupado pela laje durante o posicionamento dos pavimentos. A figura 17 indica a planta baixa do quinto pavimento, já com os detalhes que compunham a fachada do Edifício Cacique.

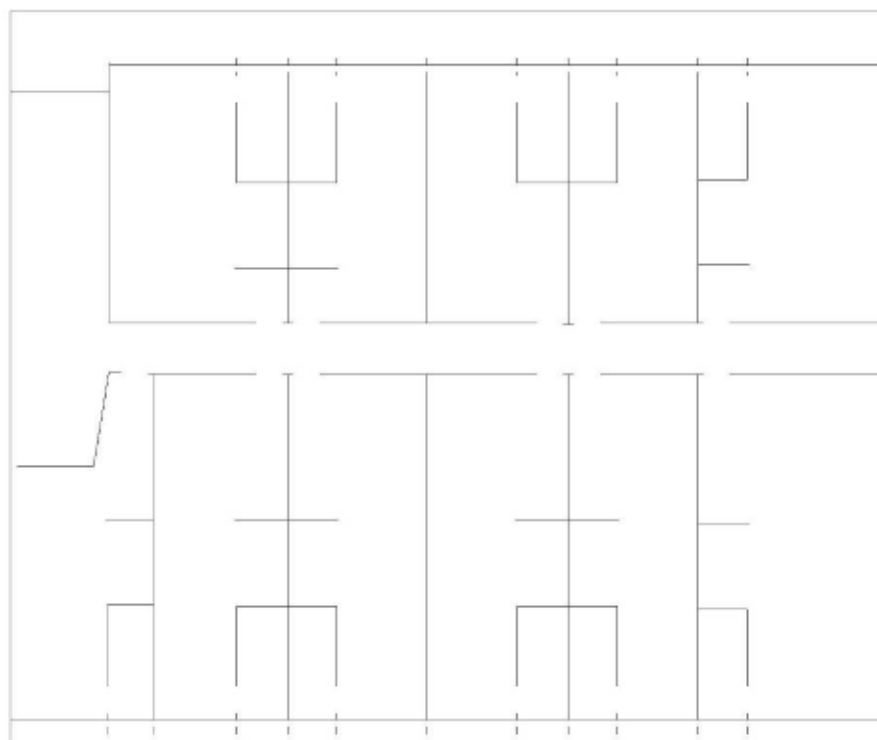


Figura 17 – Planta baixa do quinto pavimento alterada para linhas

Com a figura 18 nota-se que o novo formato da planta do sexto andar manteve as mesmas características do anterior, apenas foram substituídas as paredes por linhas. Na figura 19 nota-se que foram representados por linhas, somente os pilares existentes no décimo primeiro pavimento, as divisões internas do andar foram aplicadas como carga de incêndio devido a sua composição, o que permitiu que sem barreiras, o fogo tomasse o andar e tenha atingido, inclusive, a fachada frontal. A figura 20 apresenta a planta alterada do décimo segundo pavimento, onde fica localizado o primeiro recuo da fachada do prédio. As plantas do décimo terceiro ao décimo sexto pavimento podem ser observadas na figura 21, com as alterações realizadas e prontas para a importação para o Pyrosim. Outro aspecto importante sobre a importação do material gráfico é o fato de ser possível realizar a importação dos *layers*, individualmente, de acordo com o interesse, tornando importante, que cada espessura de parede tenha um único *layer*. Importante salientar, que as cargas já podem ser incluídas nas plantas baixa, com *layer* próprio, facilitando assim, sua inserção no interior da edificação.

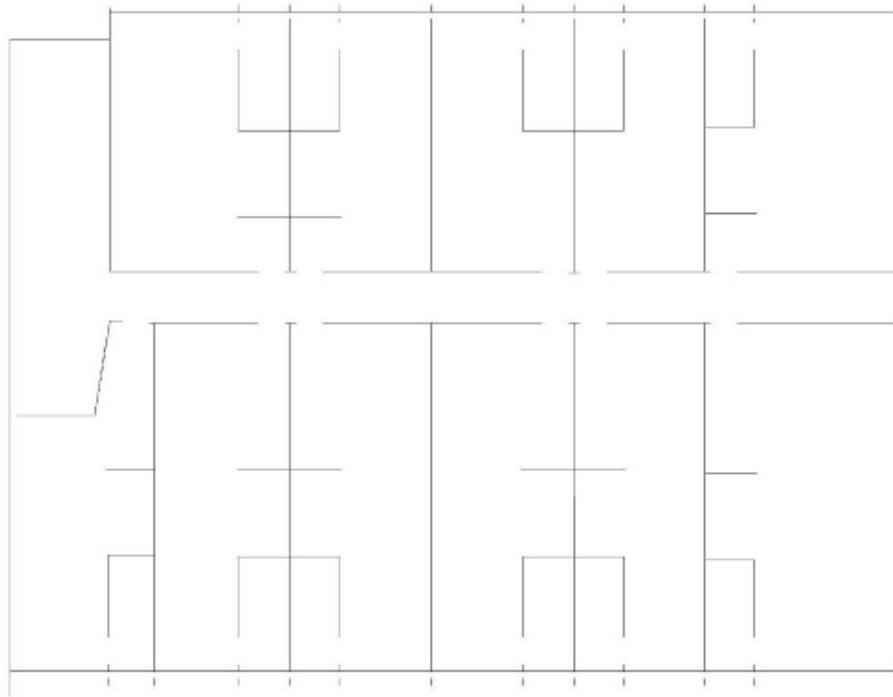


Figura 18 – Planta baixa do sexto ao décimo pavimento alterada para linhas

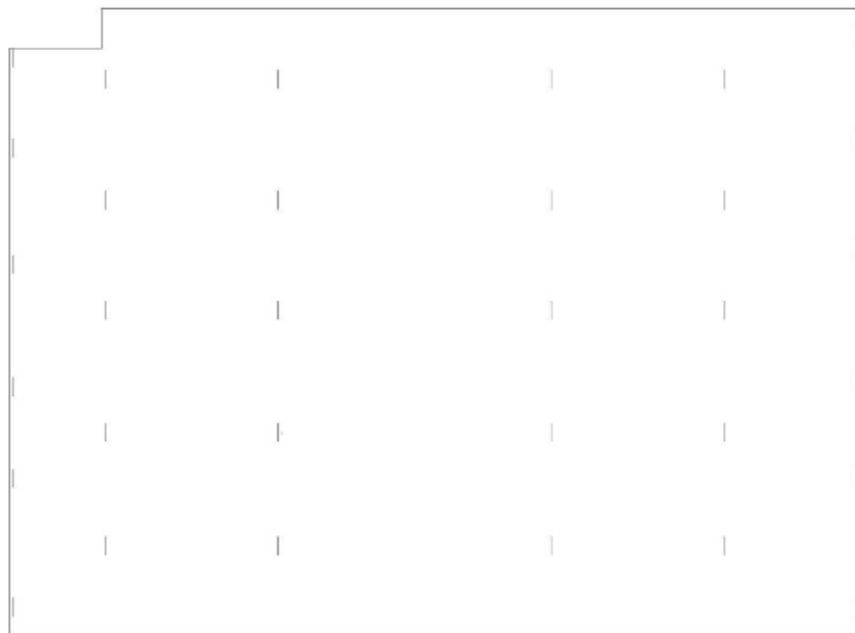


Figura 19 – Planta baixa do décimo primeiro pavimento alterada para linhas

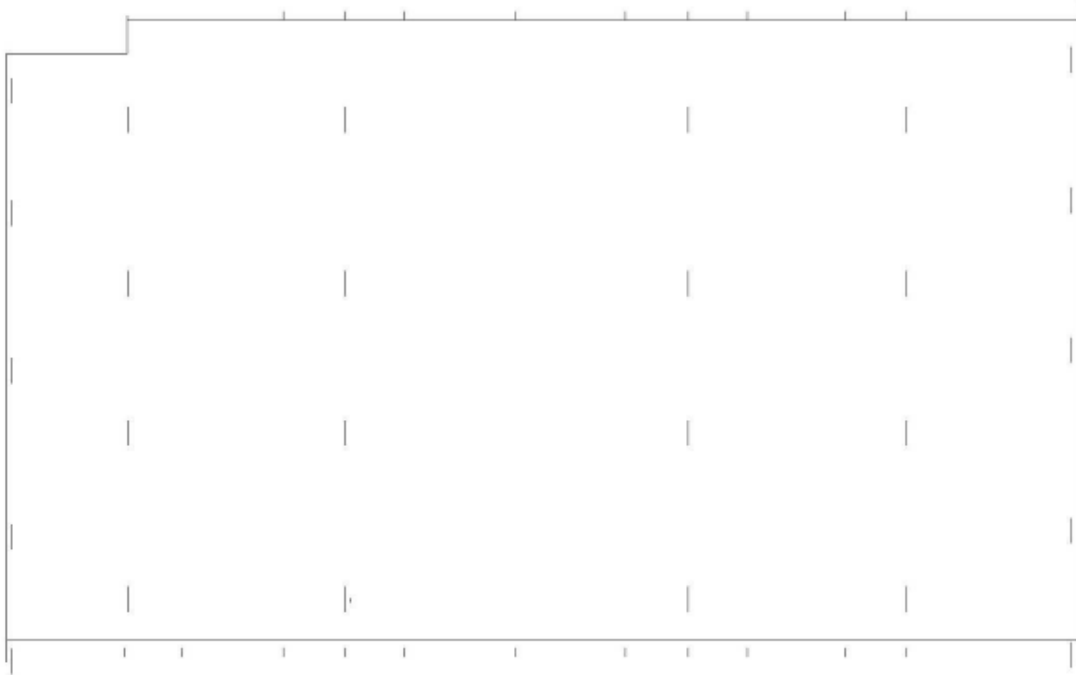


Figura 20 – Planta baixa do décimo segundo pavimento alterada para linhas

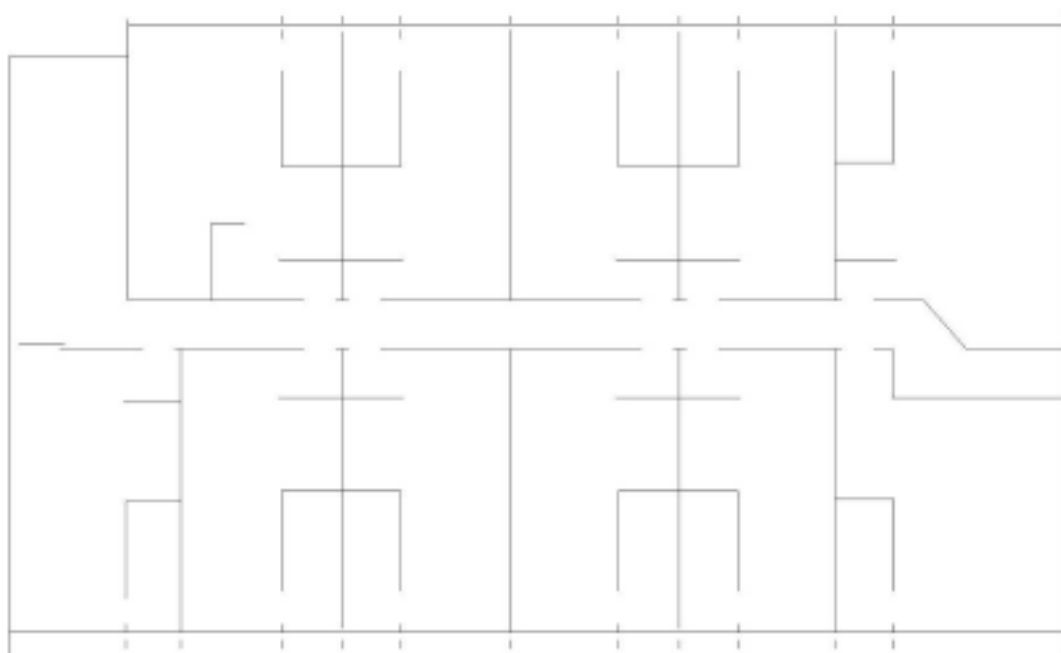


Figura 21 – Planta baixa do décimo terceiro ao décimo sexto pavimento alterada para linhas

Para a reprodução das características da fachada do prédio, conforme mostra a figura 22, foram deixados espaços de quinze centímetros entre pavimentos, para acoplar a laje

posteriormente. Importante ressaltar que a laje é projetada na fachada da edificação criando nichos no entorno das janelas. Esta característica foi preservada podendo ter grande influência na dinâmica do incêndio, permitindo que o calor fique acumulado em espaços confinados, e também redirecionando o fluxo térmico.

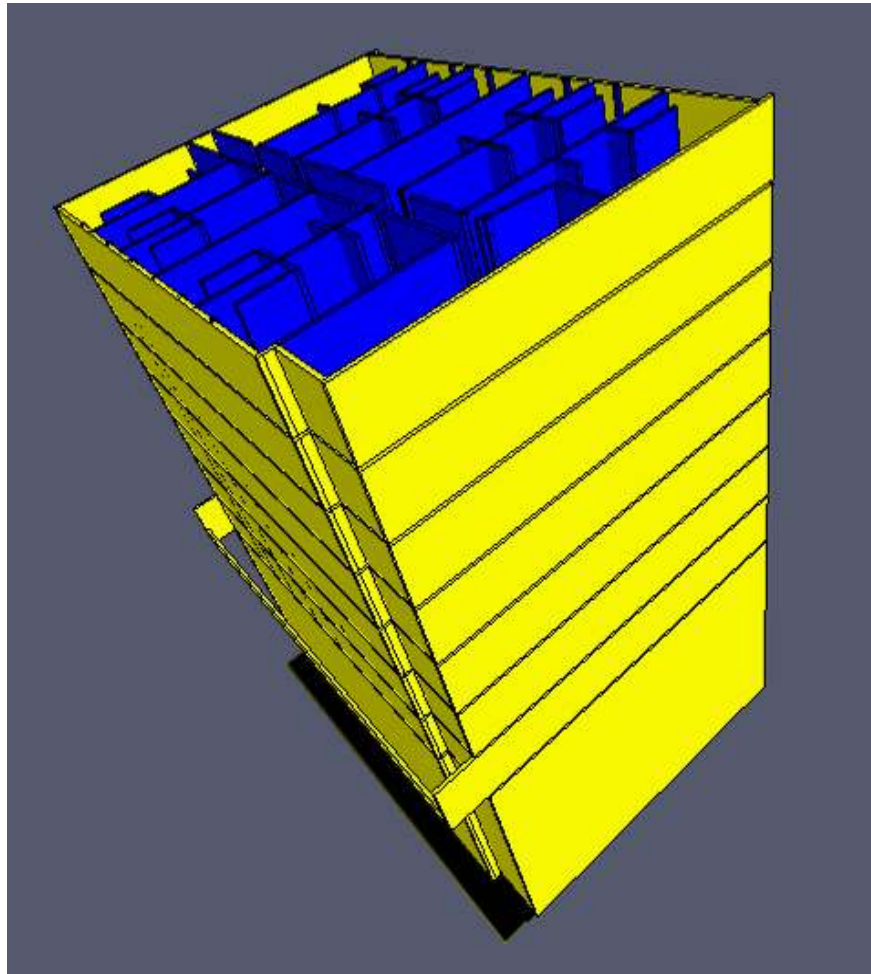


Figura 22 – Processo montagem do modelo em três dimensões (PYROSIM, 2010)

Após a importação e a transformação do material gráfico dentro do programa Pyrosim, foram incluídos os vazios referentes às aberturas. Cada janela foi aplicada ao modelo individualmente por meio de coordenadas. Como não existem informações no Relatório Técnico sobre a condição de ventilação da edificação, as janelas foram consideradas abertas, tendo em vista o fato de que muitas delas foram quebradas pelas altas temperaturas. O resultado é o modelo apresentado na figura 23. Nesta etapa as lajes ainda não estão aplicadas ao volume.

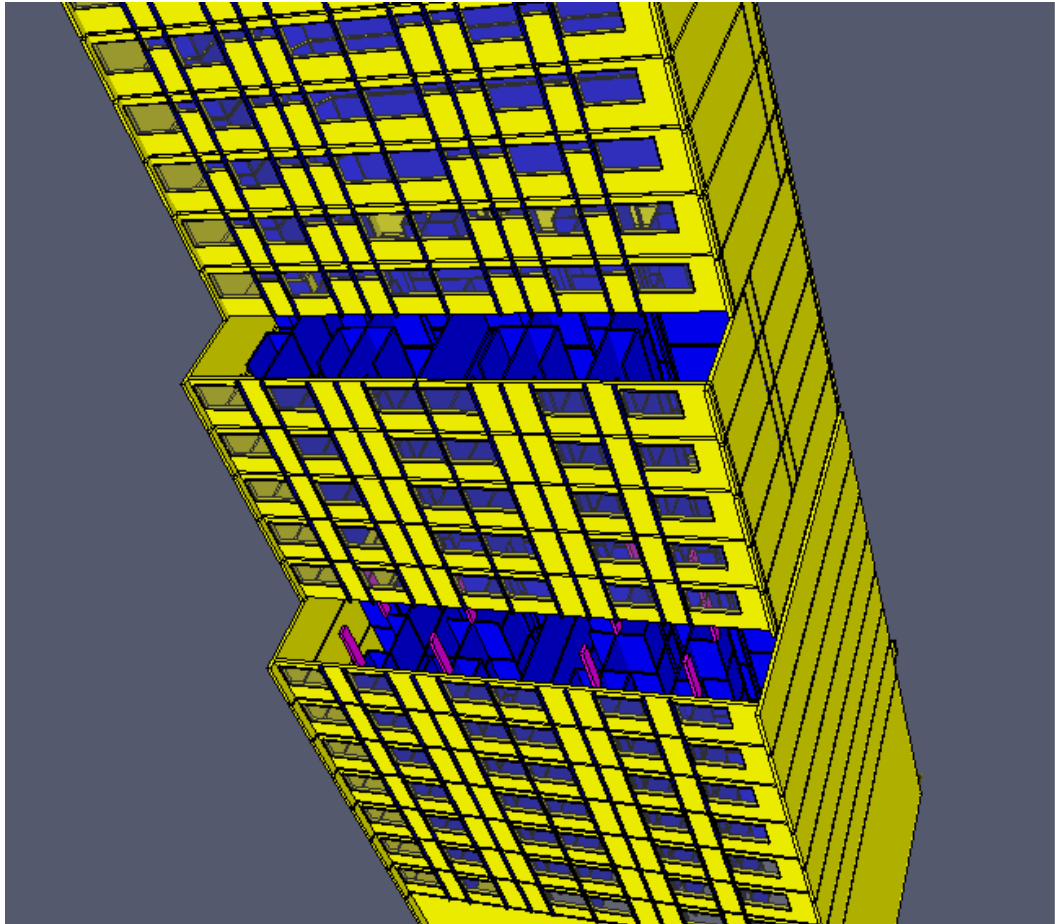


Figura 23 – Detalhe da fachada com janelas e sem laje (PYROSIM, 2010)

A figura 24 mostra a fachada posterior da edificação do Condomínio Edifício Cacique já com as lajes entre os pavimentos, e com o pavilhão anexo já incluído no volume. Um dos aspectos importantes do modelo criado dentro do programa Pyrosim, é a manutenção de alguns detalhes da fachada em relação ao original, que possam servir de compartimentação externa durante a simulação do incêndio, de forma a garantir ao ambiente simulado as características relevantes encontradas na edificação danificada pelo incêndio.

Simulações realizadas utilizando o *Fire Dynamics Simulator*, onde foram modelados três compartimentos sobrepostos, demonstraram que a presença de sacadas evitou a propagação vertical do incêndio, e saliências na fachada contribuem para o afastamento da chama e redução da temperatura na superfície da parede (RODRIGUES, 2009).

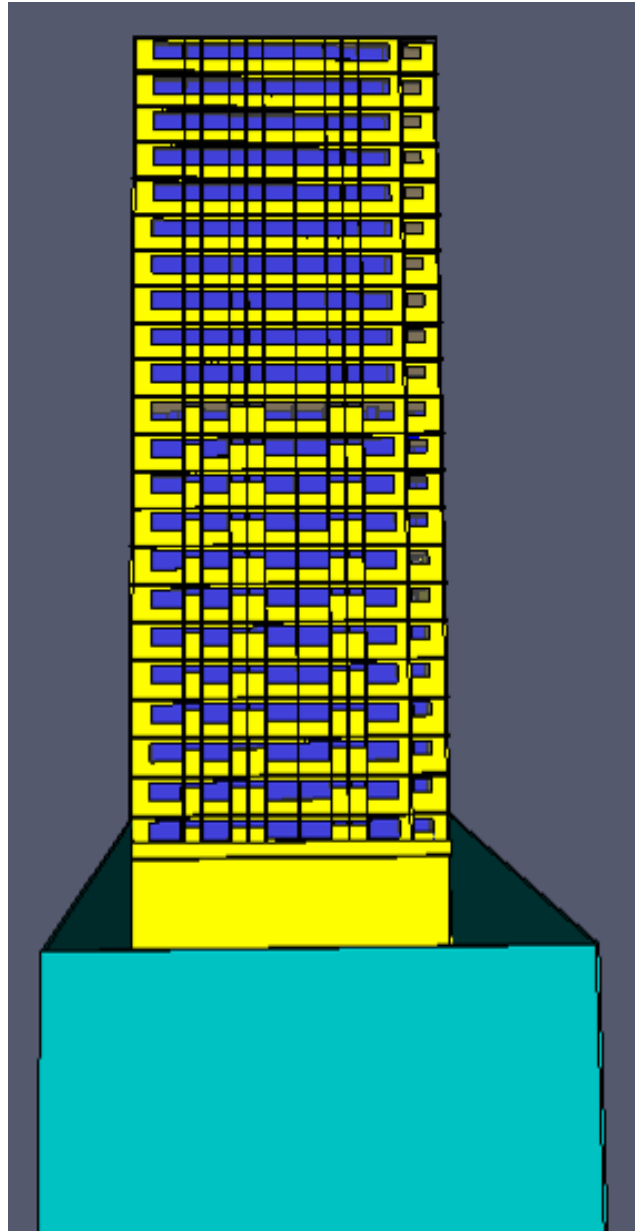


Figura 24 – Fachada posterior do modelo (PYROSIM, 2010)

Em relação à compartimentação vertical, o estudo das chamas ao serem ejetadas pela janela ao exterior do prédio, e dos riscos de propagação do incêndio para os andares acima, tiveram início na década de 60, com base em experimentos de escala real. Com isso, conclui-se que, a partir dos dados obtidos com o uso de simulação computacional, a dinâmica do incêndio é influenciada pela localização e configuração das aberturas, pelo perfil da fachada da edificação, pela carga de incêndio e localização do fogo. Em aberturas retangulares, as máximas temperaturas obtidas na parede da fachada ocorrem acima da abertura, pois a fumaça ascendia próximo à parede (RODRIGUES, 2009).

5.2.2 Determinação dos Parâmetros para Simulação

Para realizar a simulação do incêndio, é preciso definir alguns parâmetros que caracterizam a queima. São eles:

- a) a carga de incêndio,
- b) a localização dos queimadores,
- c) o número de células de cálculo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000) define a carga de incêndio como sendo o potencial de liberação de calor que o material existente no ambiente possui, caso este, entre em combustão. Também fazem parte deste parâmetro os materiais presentes em forma de revestimentos.

Para determinar a carga de incêndio, é necessário levar em consideração a ocupação do imóvel. No caso do Condomínio Edifício Cacique, nos andares atingidos pelo sinistro a ocupação era, basicamente, de escritórios e o pavilhão anexo foi considerado como um local de reunião pública. A NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000) estabelece a carga de incêndio específica para escritórios de 700 MJ/m², enquanto que para locais de reunião pública, como cinema e teatro, fica estabelecido 600 MJ/m². Os materiais adotados foram madeira e papel para os andares tipo, e madeira e espuma para o pavilhão. No caso dos andares tipo o combustível era basicamente composto pelo mobiliário e documentos, enquanto que para as dependências do térreo o mobiliário era bastante significativo com cadeiras de madeira e revestimento de espuma. As características de queima e pirólise para cada material são as pré definidas no *software*, sendo que a madeira utilizada foi a *yellow pine*.

O *software* permite inserir superfícies conhecidas como *burners*, ou queimadores, onde deve ser inserido um potencial calorífico para desencadear o processo de incêndio, sendo que o desenvolvimento do incêndio ocorreu apenas com a queima das cargas de incêndio que representavam o material inflamável existente na edificação, e os queimadores foram desligados logo após o início do processo de queima. Os queimadores foram aplicados ao modelo no décimo primeiro pavimento e no térreo. De acordo com o Relatório Técnico, ocorreu um primeiro foco de incêndio no décimo primeiro pavimento e, posteriormente, um segundo foco no térreo. O segundo queimador foi defasado em relação ao primeiro

queimador, pois ele representa o foco do incêndio no térreo, provocado pela queda de materiais em alta temperatura provenientes dos andares que estavam sendo afetados pelo incêndio. É importante que o queimador não receba uma carga muito elevada, pois pode provocar distorção no desenvolvimento do sinistro, alterando a dinâmica natural do incêndio. Neste trabalho foi aplicada aos queimadores uma carga equivalente a 0,01% da carga de incêndio definida ao ambiente onde este estava inserido.

Para isso, é preciso aplicar o valor normalizado da carga de incêndio específica na fórmula 2 apresentada por Rodrigues (2009) para transformação das unidades de MJ/m² em MW, para um tempo de queima de vinte minutos de duração.

$$Q = (A_f \times q) / 1200 \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

Q = a carga de incêndio, em MW;

A_f = a área do piso atingido, em m²;

q = a carga de incêndio, em MJ/m².

A fórmula 2 permite que as unidades utilizadas na Norma sejam convertidas para as unidades que o FDS trabalha. Os materiais foram considerados inertes, para que não houvesse perda de calor para as paredes, tendo em vista que o foco principal era observar a dinâmica do fogo. E avaliar as temperaturas na superfície dos materiais.

Outro parâmetro importante, diz respeito ao refinamento de cálculo que é a quantidade de células onde as equações serão aplicadas. Deve ser definido o tamanho dos volumes de controle, ou volumes finitos. Com relação ao número de células de cálculo, denominadas *mesh* dentro do *software*, podemos dizer que são dependentes do equipamento disponível para o processamento da simulação, e também das características do ensaio. Ensaios que analisam a temperatura na superfície dos materiais e visam observar a dinâmica do incêndio, não necessitam um grande número de células, sendo importante apenas que elas sejam moduladas com o ambiente simulado. Outro aspecto importante considerado pelo *software*, no que se refere ao número de células, aponta que estas devem ter dimensões semelhantes nas três

direções, e o número de células deve ser um valor fatorável por 3, 4 e 5. Neste trabalho definiu-se uma dimensão de célula de 46 centímetros. As células de cálculo foram aplicadas em uma área maior do que a área ocupada pela edificação, permitindo a avaliação do desenvolvimento do fogo pela fachada frontal.

Para que haja alimentação do fogo com oxigênio no ambiente simulado é preciso criar superfícies abertas, chamadas *open vents*, que permitem esta comunicação do ambiente interno com o externo. A área ocupada por estas superfícies tem relação direta com o volume de cálculo realizado pelo computador, para o desenvolvimento da simulação.

O tempo requerido para a simulação também influencia o volume de processamento, e consequentemente, na capacidade necessária do equipamento utilizado no estudo. Em contrapartida, tempos reduzidos aumentam a velocidade de queima, e pode resultar em uma taxa de liberação de energia maior do que a real. Por outro lado, tempos de simulação demasiados, pode gerar tempos de processamento elevados.

Para determinar a temperatura resultante em cada um dos pontos de interesse, é preciso posicionar dispositivos chamados termopares. Neste trabalho foi disposto um termopar em cada uma das lajes acima do quinto pavimento. A partir destes é possível observar em quais pavimentos foram desenvolvidas as maiores temperaturas, e compará-las com os dados apresentados no Relatório Técnico. Além dos termopares, foi determinada uma lâmina denominada no programa de *slice*, onde é possível observar a temperatura ocorrida em cada instante por meio de uma escala de cores. Esta lâmina foi posicionada exatamente no alinhamento da fachada posterior, onde foram descritos os principais danos.

A figura 25 apresenta o modelo da edificação pronto para a simulação, com as cargas de incêndio posicionadas nos pavimentos e no pavilhão, as superfícies abertas na parte superior e frontal do prédio, as células de cálculo e os queimadores posicionados no décimo primeiro pavimento e no pavilhão.

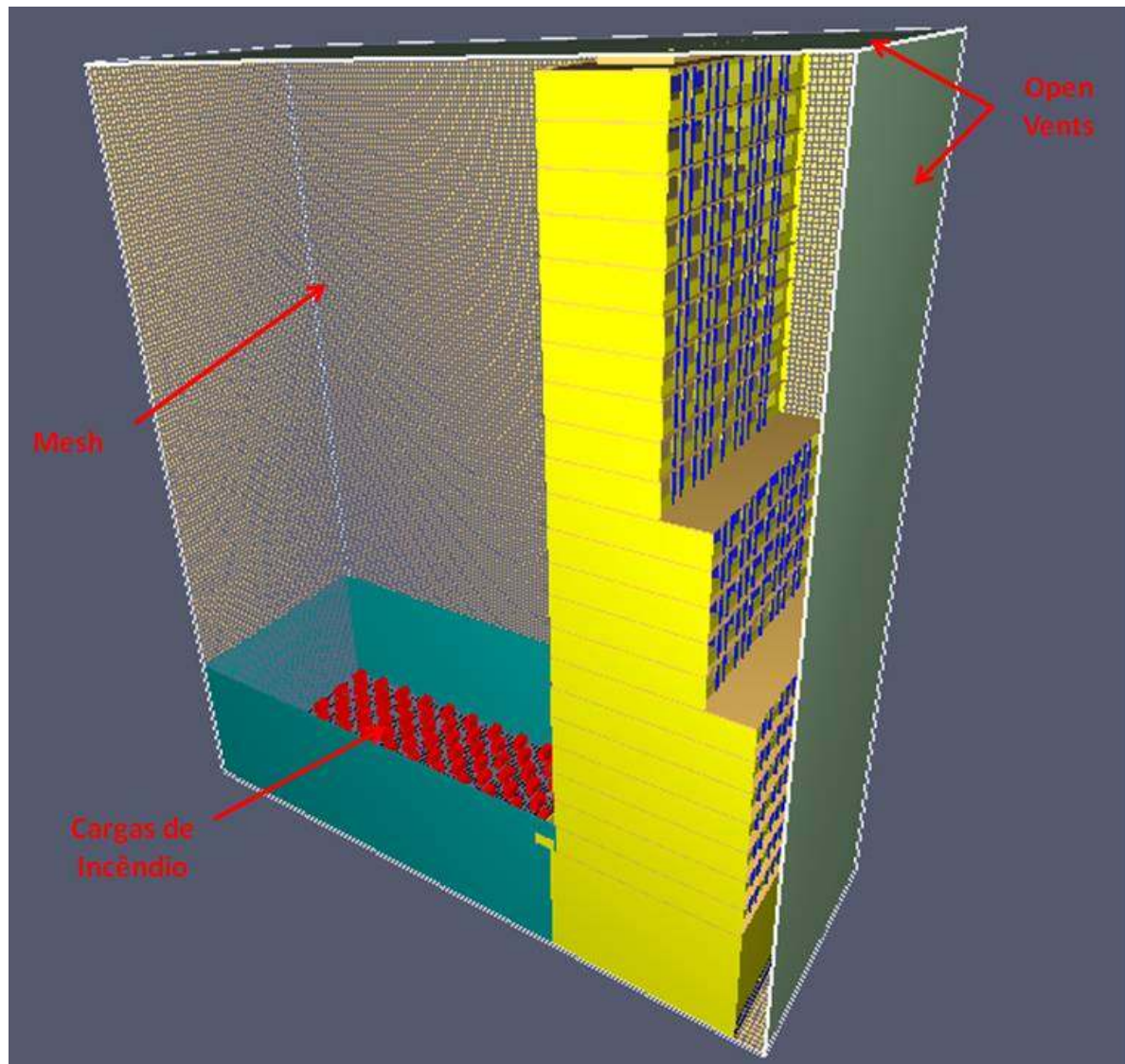


Figura 25 – Ambiente pronto para a simulação (PYROSIM, 2010).

5.2.3 Desenvolvimento do Incêndio

Foi realizada uma simulação com tempo de 1200 segundos. As múltiplas interações realizadas pelo aplicativo até o término do processo alcançou um tempo de 142 horas e 25 minutos, realizadas em um computador com quatro núcleos de processamento e 1,7 Gigahertz.

O desenvolvimento do fogo durante a simulação permitiu observar que o foco que teve início no décimo primeiro pavimento provocou um desenvolvimento vertical apenas para os andares superiores, não interferindo nos andares abaixo. Os recuos da fachada frontal não permitiram a propagação do fogo por esta fachada, desviando as chamas e não possibilitando o contato

destas com o prédio. Somente com o início do fogo no térreo, houve a propagação para os andares situados abaixo do décimo primeiro pavimento.

A figura 26 apresenta um corte da edificação durante o desenvolvimento do sinistro, com as chamas em desenvolvimento vertical pela parte frontal e posterior da edificação. É possível observar o recuo da fachada frontal agindo como dispositivo de compartimentação vertical, impedindo a entrada das chamas no décimo segundo pavimento.

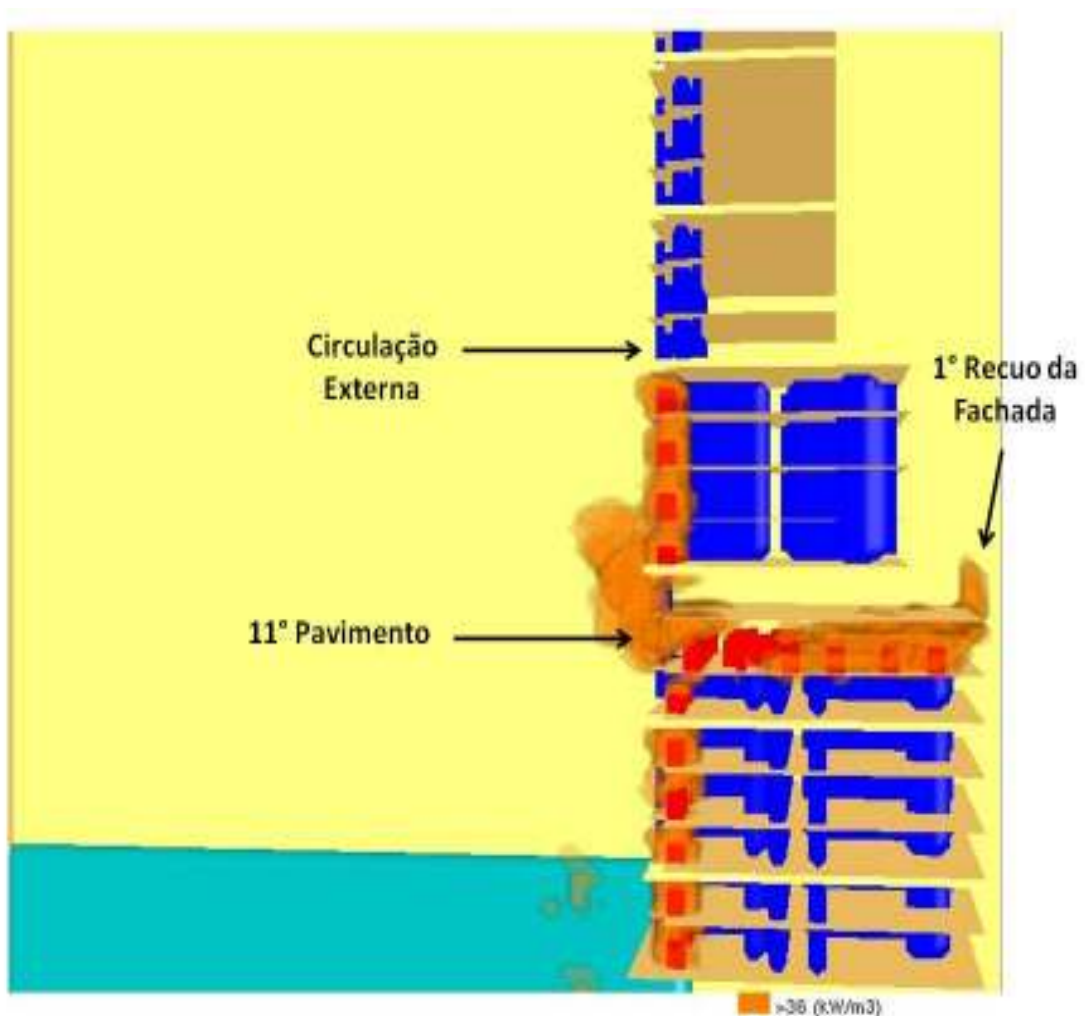


Figura 26 – Desenvolvimento inicial do incêndio (NIST, 2009).

Já na fase de extinção do incêndio no décimo primeiro pavimento, o desenvolvimento das chamas no térreo atinge alturas mais elevadas, dando início ao incêndio dos andares inferiores, como é mostrado na figura 27.

Quando as chamas que estavam em elevação no térreo entraram na faixa de maior temperatura, presente no décimo primeiro pavimento, elas apresentaram um incremento de altura, até os andares mais altos do prédio. A presença da circulação externa a partir do décimo sétimo pavimento contribuiu para o afastamento das chamas, evitando que estas invadissem as economias existentes.

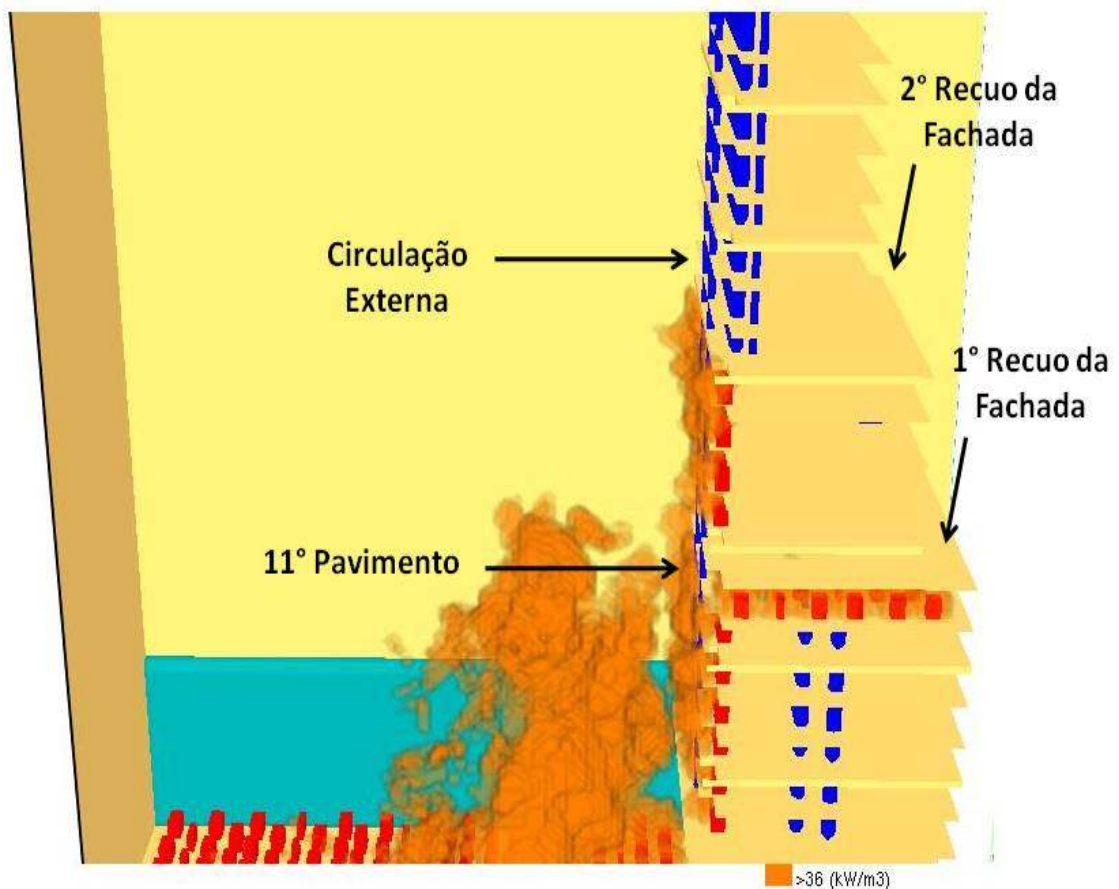


Figura 27 – Desenvolvimento do incêndio no térreo (NIST, 2009).

A figura 28 ilustra o desenvolvimento pleno do sinistro na fachada posterior. Nesta fase é possível perceber um desenvolvimento elevado de correntes convectivas que permitiram que as chamas atingissem os pavimentos acima do décimo sexto, onde não havia material combustível para ser queimado. É possível perceber que esta circulação cria um espaço que afasta as chamas, e o calor foi transmitido apenas por radiação.

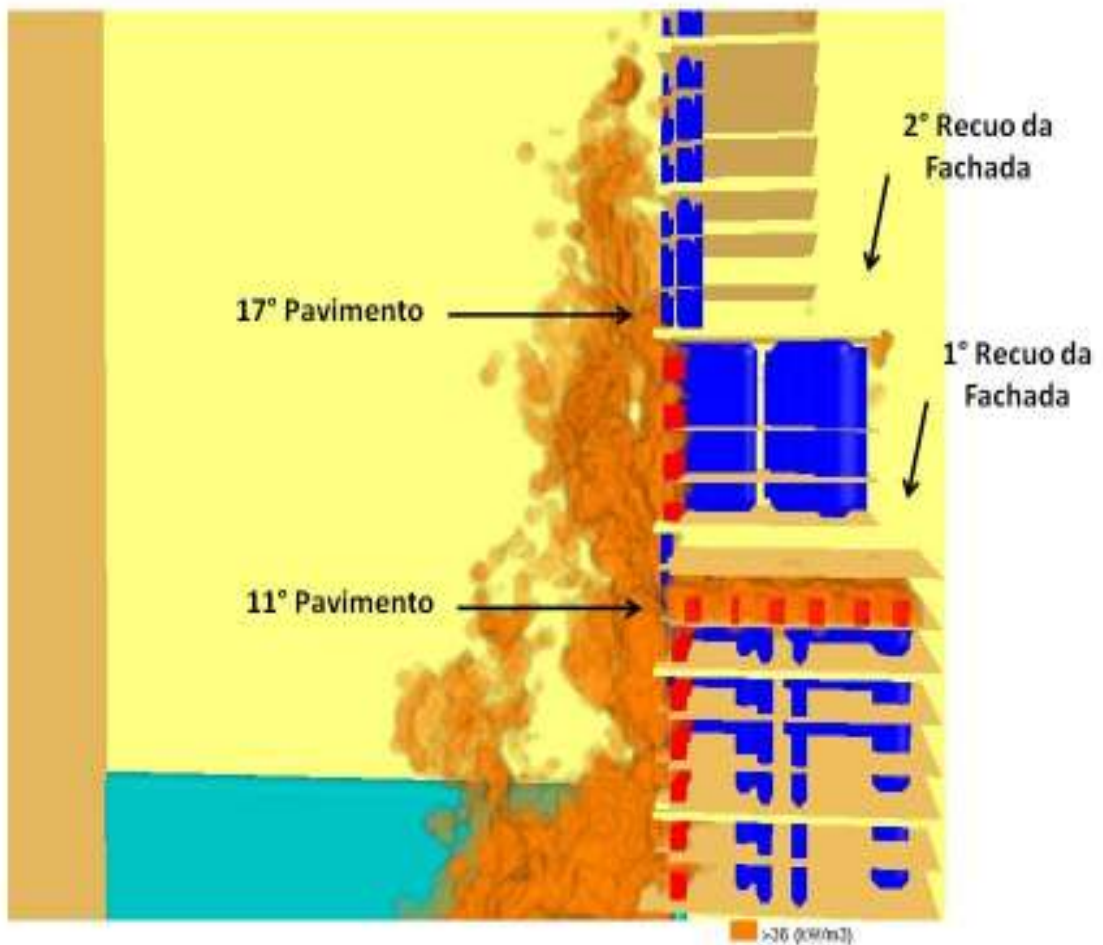


Figura 28 – Desenvolvimento pleno do Incêndio (NIST, 2009).

A figura 29 inclui ao modelo a superfície *slice*, onde é possível visualizar as diferenças de temperaturas que ocorreram na fachada posterior nos primeiros instantes de queima e durante a fase de extinção do sinistro. É possível perceber que a temperatura no décimo primeiro andar atingiu picos maiores em relação às temperaturas ocorridas nos andares imediatamente abaixo, o que indica que esta temperatura teve como componente principal, a contribuição do incêndio ocorrido no próprio pavimento.

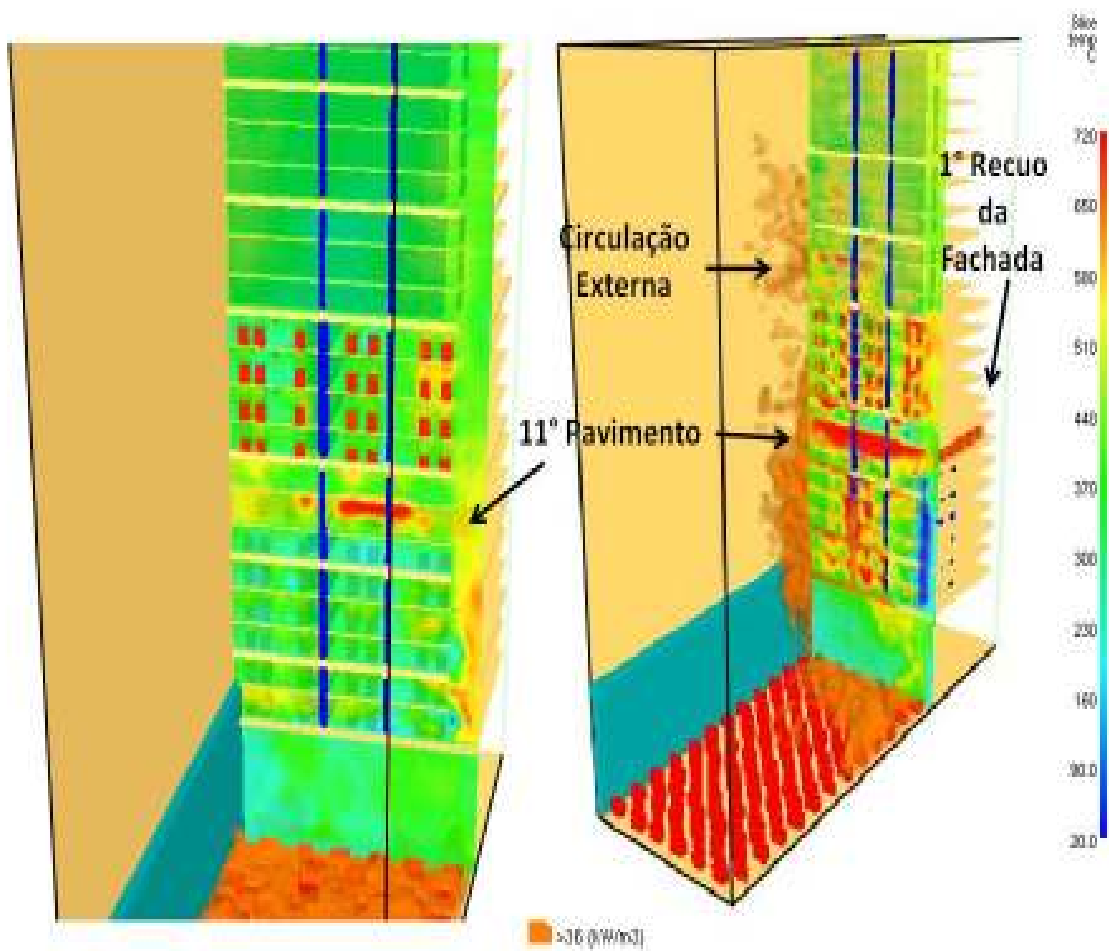


Figura 29 – perfil de temperaturas da fachada posterior (NIST, 2009).

Na situação em estudo, a temperatura alcançada na superfície da fachada posterior da edificação, é uma informação importante, considerando que esta é a interface entre os dois focos de incêndio. Este comportamento permite comparar os possíveis danos provocados por cada um destes com as informações presentes no Relatório Técnico

O gráfico ilustrado na figura 30 foi gerado a partir das informações de saída do FDS, e apresenta as temperaturas mais elevadas atingidas em cada um dos termopares instalados na fachada posterior da edificação. Os valores obtidos em cada termopar permitem apontar que ocorreu o pico de temperatura na laje de piso do décimo segundo pavimento e temperaturas mais baixas nas lajes do décimo e décimo primeiro pavimento.

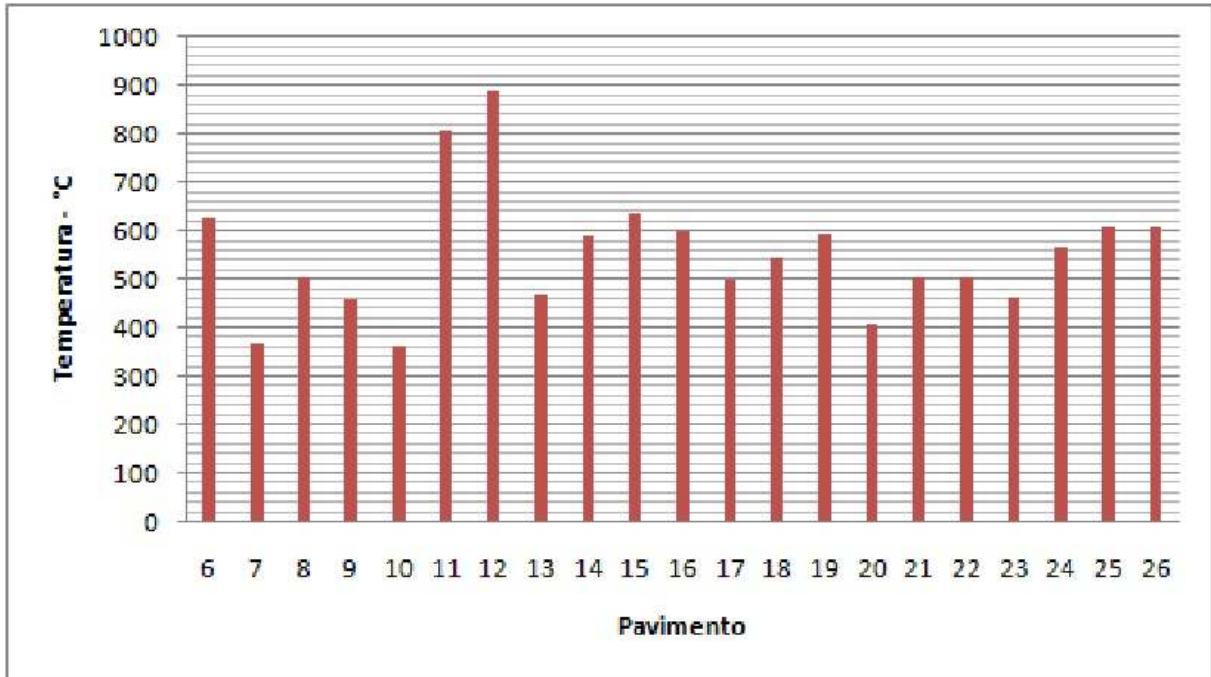


Figura 30 – Gráfico do pico de temperatura por pavimento.

Os resultados obtidos por meio da simulação computacional apontam uma relação próxima com os dados apresentados no Relatório Técnico, que sinalizou danos mais severos no décimo primeiro pavimento. A simulação computacional apresentou-se como uma ferramenta de análise de incêndios, reproduzindo virtualmente as afirmações apresentadas no Relatório Técnico.

6 CONCLUSÃO

Para atingir o objetivo principal deste trabalho foi realizada uma intensa pesquisa bibliográfica que tratou dos principais aspectos referentes ao tema, servindo como subsídio para o desenvolvimento da pesquisa. No campo prático, foi aplicado o uso da ferramenta de análise computacional para estudar a dinâmica do incêndio ocorrido no Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre/RS, e testar a hipótese de início do mesmo, conforme apontada pelo Relatório Técnico N. 08/96 do LEME/UFRGS, no décimo primeiro pavimento. Com isso é possível apresentar a simulação computacional de incêndios como uma ferramenta de análise da eficiência de sistemas de proteção contra incêndios.

A simulação da hipótese com o uso do FDS foi efetiva, sendo possível visualizar o comportamento do incêndio e apontar que a hipótese é condizente com a situação de incêndio estudada. A comparação dos resultados obtidos com a ferramenta computacional está de acordo com o registro fotográfico do ambiente sinistrado.

Ao longo do trabalho foram apresentadas as diretrizes para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional e a sistemática de análise do sinistro através do *Fire Dynamics Simulator*. Foi possível observar que os recuos existentes na fachada frontal da edificação funcionaram como compartimentação vertical, não permitindo o desenvolvimento do incêndio por esta fachada, assim como a circulação externa, presente no décimo sétimo pavimento, contribuiu para o afastamento das chamas evitando a propagação para os pavimentos acima deste.

O material visual produzido pelo FDS facilita a assimilação das informações geradas pelo *software* e oferece operacionalidade na produção de laudos técnicos desenvolvendo subsídios. A simulação do comportamento do incêndio em função do tempo permite uma comparação das informações colhidas junto às testemunhas. Um fator importante é a visualização dos resultados em formato gráfico facilitando a análise da hipótese.

Os resultados obtidos reforçam a premissa deste trabalho, de que o conhecimento da dinâmica dos incêndios e suas origens, podem auxiliar no desenvolvimento de técnicas ativas e passivas

de proteção contra incêndio em edificações, preservando vidas e reduzindo as perdas econômicas decorrentes de um sinistro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde. **Condições de Segurança Contra Incêndio**. Brasília, DF, 1995. Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/servicosaude/manuais/incendio.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2009.

_____. Ministério da Justiça. Secretaria Nacional de Segurança Pública. Relatório Descritivo: perfil das organizações de segurança pública. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <<http://www.mj.gov.br/data/Pages/MJCF2BAE97ITEMIDCE30F9D21D9E4AF8A12C409459A7DB27PTBRIE.htm>>¹⁴. Acesso em: 18 nov. 2009.

BRENTANO, T. **A Proteção Contra Incêndios no Projeto de Edificações**. Porto Alegre: T, 2007.

BOMBEIROS EMERGÊNCIA. Incêndio do Edifício Andraus 1972 - São Paulo-SP. São Paulo, 2009a. Disponibiliza materiais sobre incêndios. Disponível em: <<http://www.bombeirosemergencia.com.br/andraus.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

_____. Incêndio Edifício Joelma. São Paulo, 2009b. Disponibiliza materiais sobre incêndios. Disponível em: <<http://www.bombeirosemergencia.com.br/joelma.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

CUOGHI, R. S. **Aspectos de Análise de Risco das Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**. 2006. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-02042008-180545/>>¹⁵. Acesso em: 16 out. 2009.

INCÊNDIOS que ninguém esquece. **Jornal Eletrônico Correio do Povo**, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.cpovo.net/jornal/especiais/cpespecial/html/servicos.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

KLEIN, D. L. Ação do fogo em edificações: metodologia de análise In: CONGRESSO REGIONAL DE GESTÃO DA QUALIDADE, 2. 2008, Montevideu. **Anais...** Montevideu: ALCONPAT, 2008. 1 CD-ROM.

_____. Metodologia para investigação de sinistros In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E I CONFERÊNCIA LIVRE REGIONAL DE ENGENHARIA PARA A DEFESA CIVIL, 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ALCONPAT, 2009. 1 CD-ROM.

¹⁴ Clicar no <relatório 2006> na linha <Bombeiros Militares>.

¹⁵ Clicar em: <Dissertacao_Ricardo_Cuoghi_Revisado_apos_Defesa.pdf>.

- LANDI, F. R. **Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1986. Boletim técnico n. 1. Disponível em: <http://publicacoes.pcc.usp.br/PDF/BTs_Petreche/BT01-%20Landi.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2009.
- LIMA, R. C. A. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.qprocura.com.br/dp/26396/Investigacao-do-comportamento-de-concretos-em-temperaturas-elevadas.html>>. Acesso em: 16 out. 2009.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J. **Fire Dynamics Simulator: user's guide**. Washington: NIST, 2009. Programa de simulação de incêndios. Disponível em: <http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/All_PDF_Files/FDS_5_User_Guide.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2009.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.
- NIST. **Fire Dynamics Simulator and Smokeview (FDS-SMV)**. Official Website, Hosted at the National Institute of Standards and Technology. Department of Commerce. Gaithersburg, MD, USA, 2009. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/fds/>>. Acesso em: 19 nov. 2009.
- PYROSIM, **Revision 2010.1.0928: a model construction tool for Fire Dynamics Simulator (FDS)**. [S.l.]: Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 2010. Disponível em: <<http://www.thunderheadeng.com/trial.php?product=pyrosim>>. Acesso em: 16 abril. 2010.
- RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SAIBA sobre outros grandes incêndios em prédios ocorridos no centro de SP. **Folha Online**, São Paulo, 10 jan 2005. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u104000.shtml>>. Acesso em: 15 nov. 2009.
- TRAGÉDIA, MAM arde em chamas. **Jornal do Brasil Online**. Rio de Janeiro, 8 jul. 2008. Disponível em: <<http://www.jblog.com.br/hojenahistoria.php?itemid=9240>>. Acesso em: 16 nov. 2009.
- WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WIKIPÉDIA. Incêndio no Grande Avenida. Disponível em:
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:IncGrandeAv2.jpg>>. Acesso em: 16 nov. 2009.