SILVIO BURRATTINO MELHADO

Engenheiro Civil, Escola Politécnica da USP, 1984

**EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA DE AÇO:
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO
E SISTEMAS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil

ORIENTADOR: Prof. Dr. VAHAN AGOPYAN

São Paulo, 1989

Por um Brasil
e por uma Engenharia civil brasileira
menos repletos de falsos e ultrapassados mitos
e de estereotipados - mas úteis - preconceitos.

AGRADECIMENTOS:

Aos amigos a quem tenho faltado nestes últimos meses, por sua compreensão, com a manifesta vontade de retomar um agradável convívio.

Ao orientador Professor Vahan Agopyan, detentor de minha elevada estima, e a quem eu gostaria de ter recorrido muito mais.

Aos professores Francisco Ferreira Cardoso e Ubiraci Espinelli Lemes de Souza, por terem me proporcionado, com o convite a participar do grupo de pesquisadores que originou o Núcleo de Tecnologia da Construção Metálica, a oportunidade de empreender a pesquisa da qual derivou a presente dissertação.

Ao amigo Ubiraci, em especial, pelo fato de ter sempre compartilhado tanto as suas dúvidas quanto as suas certezas, e creio com isto termos aprendido muito mais do que teríamos alcançado individualmente. Hoje é difícil distinguir entre o que é meu e o que é seu nestes tantos trabalhos conjuntos e nestes mais de dez anos de convivência.

Ao Professor Orestes Marracini Gonçalves, acima de um Chefe de Departamento, um grande incentivador em todos os momentos e instâncias.

Ao Professor Fernando Henrique Sabbatini, conhecido pela capacidade técnica, seriedade e rigor, mas também pela amizade e companheirismo.

Ao Professor Francisco Romeu Landi - hoje o honrado Diretor da Escola Politécnica, após ter sido o artífice maior do crescer rumo à modernidade que se imprimiu a este Departamento - pelo apoio e estímulo, colocados de forma participante e decisiva, sempre que necessários.

Ao Professor Aluizio Fontana Margarido, como pessoa e como profissional uma rara combinação de competência e gentileza, pelos esclarecimentos quanto a aspectos do comportamento das estruturas de aço.

À engenheira Suely Matsuguma, amiga de várias outras horas, que contribuiu com os desenhos para o primeiro trabalho de simpósio com o qual iniciei o estudo do tema, e que constam desta dissertação.

Aos companheiros de trabalho, Maria Aparecida Leandro Chamelet, Luciana Girelli, Marina de Fátima Vieira, Paulo Heitzmann e arquiteto Luiz Abreu, pela boa vontade e inestimável colaboração para a apresentação final do trabalho.

Por último, mas com ênfase, agradeço à Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, pelo apoio ao desenvolvimento desta e de várias outras pesquisas na Universidade, demonstrando com isso enxergar um dos mais importantes caminhos para a revitalização dos setores produtivos do país.

RESUMO

Dois aspectos importantes são levantados quanto ao tema: o universo de problemas de segurança vinculados aos incêndios em edifícios, e o uso de estruturas de aço, diante deste universo.

Apresenta-se uma abordagem global dos problemas de segurança contra incêndio nos edifícios, onde o fenômeno do incêndio é analisado visando compreender os parâmetros de seu desenvolvimento, e o papel da estrutura situado no contexto geral, sendo destacadas particularidades relativas ao emprego do aço.

Dentro das medidas de segurança no projeto de edifícios de estrutura de aço, são enfocados o desempenho da estrutura na situação de incêndio, e os "aspectos arquitetônicos da segurança contra incêndio" que envolvem medidas importantes na concepção dos edifícios, para o controle do crescimento e propagação do fogo.

As exigências de resistência ao fogo de códigos e normas de construção para as estruturas são colocadas em pauta, traçando-se um confronto entre as exigências brasileiras e as de alguns outros países do mundo.

Discorre-se acerca dos sistemas de proteção mais usados em vários países para incrementar a resistência ao fogo da estrutura de aço, quando se fazem necessários, e são apresentados aqueles em uso entre nós.

O trabalho conclui com uma afirmação quanto à confiabilidade e a segurança das estruturas de aço, quando adequadamente projetadas, mostrando-as como alternativa válida e importante para a construção de edifícios no Brasil.

ABSTRACT

Two approaches may be adopted: the problems related to fire in buildings, and the problem of use of steel in building structures due to fire hazard.

The general view of a fire in building is presented, with emphasis of the structure role in the building during the fire. The fire process itself is analysed in order to understand the parameters related to fire development in a building, and the steel behaviour is specially discussed.

Fire safety measurements during a steel-framed building design is considered with two focus: the performance of structure during a fire and the architectural measures to the prevention or control of fire spread.

The fire resistance requirements in the standards and codes are presented trying to compare the Brazilian requirements with same of the other countries.

The most useful fire protection systems adopted in several countries are discussed as to improve the fire safety of the steel structure, and the systems in use in this country are presented.

In conclusion, the steel structure for buildings is showed as a reliable and safe structure when properly designed, and it is a valuable alternative to other structures in use in Brazil.

SUMÁRIO:

	página
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
 2. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DOS EDIFÍCIOS	
2.1. O Significado das Exigências de Segurança	11
2.2. Os Diferentes Aspectos do Problema	14
2.3. Fatores de Segurança Contra Incêndio	16
2.4. Uma Tentativa de Sistematização	20
2.5. Avaliação do Potencial de Risco dos Edifícios	28
2.5.1. Seguro Contra Incêndio e Segurança Contra Incêndio	28
2.5.2. A Segurança ótima contra Incêndio	30
2.5.3. O Método Gretener ("Swiss Insurance Method")	36
2.5.4. Avaliação do Potencial de Risco Considerando a Segurança da Vida Humana	36
2.5.5. O Problema do Seguro Contra Incêndio de Edifícios no Brasil	42
 3. O INCÊNDIO COMO FENÔMENO	
3.1. Importância do Estudo do Fenômeno	50
3.2. Transmissão de Calor	51
3.2.1. Conceitos Preliminares	51
3.2.2. Mecanismos de Transmissão de Calor	55
3.2.2.1. Condução	55
3.2.2.2. Convecção	61
3.2.2.3. Radiação	66

3.3. Combustão dos Materiais em um Incêndio.....	76
3.4. A Duração e a Severidade dos Incêndios.....	82
3.4.1. Curva Tempo-Temperatura do Incêndio.....	82
3.4.2. A Curva Normalizada de Incêndio e o Conceito de Severidade.....	88
3.4.3. Duração do Incêndio.....	98
3.5. Potencial Calorífico nos Ambientes.....	103
3.6. Duração Estimada do Incêndio: Exemplos de Cálculo.....	110
3.7. O Incêndio e os Materiais do Edifício.....	116
3.7.1. Classificação dos Materiais Segundo Seu Comportamento ao Fogo: Comportamento do Aço.....	116
3.7.2. Geração de Fumaça.....	122
 4. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO PROJETO DE EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA DE AÇO	
4.1. Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço.....	125
4.1.1. O que é Resistência ao Fogo da Estrutura.....	125
4.1.2. Ensaios de Resistência ao Fogo.....	129
4.1.3. Cálculo Analítico da Resistência ao Fogo.....	140
4.1.4. A Utilização de Estruturas de Aço sem Proteção.....	154
4.1.5. Comportamento de Vigas e Colunas Quanto à Ruptura.....	163
4.1.6. Comportamento de Estruturas Planas Quanto à Ruptura.....	172

4.1.7.	Alternativas para Aumentar a Resistência ao Fogo.....	174
4.1.8.	A Possibilidade de Recuperação de Estruturas de Aço Atingidas pelo Incêndio.....	177
4.2.	Aspectos Arquitetônicos da Segurança Contra Incêndio.....	182
4.2.1.	Interferência na Concepção do Edifício.....	182
4.2.2.	Confinamento e Compartimentação do Incêndio.....	184
4.2.3.	Ventilação do Incêndio.....	202
4.2.3.1.	Influência no Desenvolvimento do Incêndio.....	202
4.2.3.2.	Projeto de Dispositivos para a Ventilação do Incêndio.....	205
5.	EXIGÊNCIAS DE RESISTÊNCIA AO FOGO PARA AS ESTRUTURAS DOS EDIFÍCIOS	
5.1.	Os Critérios Internacionalmente Adotados.....	211
5.2.	Exigências de Norma na Alemanha Ocidental	214
5.3.	Exigências de Legislação na França.....	216
5.4.	Códigos de Construção nos Estados Unidos.....	220
5.5.	Panorama das Exigências no Brasil.....	222
5.5.1.	O Contexto Atual.....	222
5.5.2.	Disposições de Segurança do Código de Edificações do Município de SP.....	224
5.5.2.1.	Classificação dos Riscos de Incêndio...	224
5.5.2.2.	Exigências de Compartimentação e Resistência ao Fogo.....	226
5.5.3.	Exigências das Seguradoras Quanto a Proteção de Estruturas de Aço.....	230
5.6.	O Código Proposto por Malhotra e Read.....	231

6. SISTEMAS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA DE AÇO

6.1. A Utilização de Materiais de Proteção.....	234
6.1.1. Aspectos Gerais.....	234
6.1.2. Propriedades Desejáveis.....	237
6.1.3. Dimensionamento Analítico da Proteção Contra Fogo.....	240
6.1.4. Os Esquemas-Padrão.....	249
6.2. Os Sistemas de Proteção: Classificação e Tipos.....	251
6.2.1. Classificação.....	251
6.2.2. Concretos.....	253
6.2.3. Argamassas.....	256
6.2.4. Alvenarias.....	257
6.2.5. Revestimentos com Fibras Minerais.....	259
6.2.6. Revestimentos com Fibras Cerâmicas.....	260
6.2.7. Revestimentos Intumescentes.....	261
6.2.8. Placas Rígidas.....	265
6.2.9. Forros Resistentes ao Fogo.....	268
6.2.9.1. Forros Moldados no Local.....	269
6.2.9.2. Forros de Placas Fixadas em uma Grelha.....	271
6.2.10. Pré-Moldados com a Forma do Perfil.....	274
6.2.11. Outros Sistemas de Proteção.....	276
6.3. Caracterização dos Produtos Existentes no Mercado Nacional.....	280
6.3.1. Situação Atual do Mercado.....	280
6.3.2. Produtos à Base de Vermiculita.....	280
6.3.3. Revestimentos Intumescentes.....	284
6.3.4. Produtos à Base de Fibras Cerâmicas.....	285
6.3.5. Outros Materiais.....	288

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	291
7.1. Acerca da Viabilização e Confiabilidade das Estruturas de Aço.....	291
7.2. Acerca da Formulação de Exigências de Resistência ao Fogo.....	295
7.3. Acerca da Verificação de Resistência ao Fogo.....	298
7.4. Acerca dos Sistemas de Proteção da Estrutura Contra Fogo.....	300
7.5. Acerca do Ensino, Formação e Treinamento de Profissionais.....	301
BIBLIOGRAFIA.....	304
ANEXO: FOTOS DE ENSAIOS E SISTEMAS DE PROTEÇÃO (10 páginas)	

LISTA DE FIGURAS

página

Figura 2.1	19
Exemplo esquemático de edifício onde concorrem vários itens de segurança contra incêndio.	
Figura 2.2	22
Ramos principais da árvore de decisões de segurança contra incêndio criada pela comissão da NFPA. O sinal (+) assinala os pontos em que cada um dos caminhos abaixo do mesmo constitui uma solução independente.	
Figura 2.3	23
Componentes dos ramos da árvore de decisões da NFPA.	
Figura 2.4	25
Exemplo de aplicação de rede CPM-PERT em decisões de projeto de segurança contra incêndio.	
Figura 2.5	27
Exemplo de modelo estocástico aplicado à segurança contra incêndio (caso de indústrias têxteis no Reino Unido, citado na tabela 2.1).	
Figura 2.6	29
Confronto entre os níveis técnico e institucional na avaliação do potencial de risco da edificação.	
Figura 2.7	31
Fatores a se considerar na determinação da resistência ao fogo ótima (sob o prisma econômico do seguro).	
Figura 2.8	33
Relação entre o fator de segurança adotado e as perdas econômicas esperadas em caso de incêndio somadas ao investimento na proteção da estrutura.	
Figura 2.9	41
Avaliação de risco para várias alternativas de proteção contra incêndio em um Shopping Center - aplicação do método ERIC.	

Figura 3.1	51
Aumento da energia interna de um gás aprisionado por êmbolo deslocável.	
Figura 3.2	52
Transferência de energia interna: do corpo de maior para o de menor temperatura.	
Figura 3.3	55
Transmissão de calor por condução - modelo.	
Figura 3.4	56
Analogia elétrica para a transmissão de calor por condução.	
Figura 3.5	58
Condução de calor em placa composta por dois materiais distintos.	
Figura 3.6	60
Condução em regimes estacionário e variável.	
Figura 3.7	62
Movimentação de um fluido em um ambiente sob a ação de chamas localizadas.	
Figura 3.8	63
A variação de temperaturas ao longo da camada de interface meio-superfície.	
Figura 3.9	64
Coeficiente de convecção do ar junto a superfícies de vários materiais.	
Figura 3.10	66
Variação, ao longo do tempo, da temperatura de uma superfície cedendo calor por convecção ao meio adjacente.	

Figura 3.11	67
Espectro das ondas eletromagnéticas.	
Figura 3.12	68
Poder emissivo de um corpo a uma temperatura T .	
Figura 3.13	69
A reação do corpo receptor a uma radiação incidente.	
Figura 3.14	70
Dissipação da energia absorvida.	
Figura 3.15	71
Efeito da radiação sobre o fluxo de calor através de um corpo opaco.	
Figura 3.16	79
O fenômeno da combustão.	
Figura 3.17	83
Curva Temperatura — Tempo representativa de um incêndio.	
Figura 3.18	86
As trocas gasosas com o meio externo na ocorrência de um incêndio.	
Figura 3.19	89
Curvas temperatura-tempo para incêndios de vários tipos: a) combustíveis distintos; b) potenciais caloríficos distintos para um mesmo combustível.	
Figura 3.20	90
Curvas normalizadas de incêndio segundo várias normas.	
Figura 3.21	92
Definição de severidade em função da energia liberada no fenômeno.	

Figura 3.22	93
Definição da severidade de um incêndio, por equivalência com um tempo de incêndio normalizado.	
Figura 3.23	96
Temperaturas atingidas em ambientes incendiados com diferentes características térmicas das vedações, mostrando a influência do isolamento térmico das superfícies de contorno.	
Figura 3.24	97
Tempo equivalente de duração do incêndio para elementos estruturais de aço.	
Figura 3.25	104
Distribuições de potencial calorífico obtidas em levantamentos efetuados por vários países.	
Figura 3.26	106
Distribuição do potencial calorífico em edifícios de escritórios (JAPÃO).	
Figura 3.27	111
Plantas esquemáticas do andar-tipo dos três casos a serem estudados: b) e c) edifícios residenciais; a) edifício comercial.	
Figura 3.28	114
Relações entre duração estimada do incêndio e tempo equivalente de ensaio normalizado, para várias condições de ventilação.	
Figura 3.29	116
Curvas de incêndios com diferentes condições de ventilação e mesmo potencial calorífico (20 kg de madeira por m ²).	
Figura 3.30	118
Variação das propriedades mecânicas do aço ASTM A-36 com a temperatura proporcionalmente em relação aos valores a temperatura ambiente (equação simplificada, ajustada a partir de ensaios de tração).	

Figura 3.31	120
Comportamento do limite de escoamento com a temperatura, para o aço fogo-resistente, comparado aos aços estruturais normais.	
Figura 4.1	131
Ilustração do equipamento utilizado para ensaio de resistência ao fogo de elementos estruturais, em laboratório, segundo uma exposição normalizada.	
Figura 4.2	133
Procedimento de projeto de estruturas de aço utilizando dados de ensaios de resistência ao fogo.	
Figura 4.3	141
Deformação de partes da estrutura do edifício devido à dilatação diferencial, por aquecimento gerado a partir de focos de incêndio.	
Figura 4.4	143
Relação entre fator de forma e tempo de aquecimento normalizado para atingir a temperatura de 550 °C.	
Figura 4.5	145
Verificação analítica da resistência ao fogo de elementos estruturais.	
Figura 4.6	146
Variação do calor específico do aço ASTM A-36 com a temperatura.	
Figura 4.7	151
Características do perfil de aço submetido ao incêndio (exemplo de aplicação).	
Figura 4.8	156
Temperaturas do ambiente em ensaios com incêndios naturais, para diferentes tipos de combustíveis e condições de ignição.	

Figura 4.9	157
Temperaturas máximas médias de vigas e colunas de aço, em função do fator de forma dos perfis, medidas em várias condições de potencial calorífico e ventilação.	
Figura 4.10	158
Temperaturas máximas médias de vigas de aço em função do fator de forma do perfil, para várias condições de potencial calorífico e ventilação - compartimento revestido com tijolos refratários.	
Figura 4.11	159
Temperaturas máximas médias de vigas de aço em função do fator de forma do perfil, para várias condições de potencial calorífico e ventilação - compartimento revestido com placas de gesso.	
Figura 4.12	163
Formação de rótulas plásticas em componentes submetidos à flexão: a) simplesmente apoiado; b) contínuo; c) bi-engastado.	
Figura 4.13	165
Diagramas de momentos solicitantes em uma viga hiperestática, antes e durante a ocorrência de um incêndio.	
Figura 4.14	166
Deformação de colunas de aço sujeitas a aquecimento não-uniforme ao longo da seção transversal.	
Figura 4.15	169
Comprimentos de flambagem l_{fl} para diversas condições de vínculo das extremidades da coluna.	
Figura 4.16	171
Efeito da temperatura na carga crítica de flambagem e no índice de esbeltez de colunas de aço.	
Figura 4.17	173
Diagrama de momentos fletores em um pórtico, ao longo da evolução de um incêndio.	

Figura 4.18	173
Deformação de um pórtico ao longo da evolução de um incêndio.	
Figura 4.19	175
Embutimento parcial da viga em laje moldada no local, isolando o calor na aba superior e aumentando o tempo de resistência ao fogo.	
Figura 4.20	176
Embutimento parcial do elemento de aço em sistema usando lajes pré-moldadas.	
Figura 4.21	177
Proteção da estrutura de aço externamente disposta em relação ao edifício incendiado.	
Figura 4.22	179
Relação entre tensão de escoamento residual do aço submetido a um incêndio, após o resfriamento, e a dureza Brinell (faixa para vários aços estruturais).	
Figura 4.23	180
Relação entre tensão de escoamento residual do aço submetido a um incêndio, após o resfriamento, e a temperatura máxima do aço atingida no incêndio (faixa para vários aços estruturais).	
Figura 4.24	186
Possibilidades de propagação do incêndio devido a pontos falhos de um forro falso.	
Figura 4.25	191
Detalhes construtivos associados a fachadas de vidro, para minimizar a propagação vertical do incêndio.	
Figura 4.26	192
Evolução das exigências de barreiras contra a propagação de chamas entre andares.	

Figura 4.27	194
Dispositivo de obturação de dutos ("fire damper").	
Figura 4.28	196
Radiação emitida por um ponto e radiação emitida por uma superfície (associação de pontos): a forma influi na intensidade de radiação recebida.	
Figura 4.29	197
Ilustração esquemática relacionando dimensões das fachadas dos edifícios incendiados e intensidade de radiação emitida.	
Figura 4.30	201
Exemplo de esquema construtivo para isolamento corta-fogo entre partes de uma construção.	
Figura 4.31	201
Exemplo de esquema construtivo para parede corta-fogo auto-portante usada entre edifícios ou como junta entre partes de uma construção.	
Figura 4.32	203
Relação típica entre a área de ventilação e as temperaturas máximas do incêndio.	
Figura 4.33	204
Utilização de sistemas de ventilação do incêndio em edifícios de múltiplos pavimentos.	
Figura 4.34	206
Dispositivo de ventilação de incêndio acionado por mecanismo contido por um elemento fusível térmico.	
Figura 4.35	207
Corte esquemático de edifício industrial mostrando a importância da ventilação no trabalho de combate ao incêndio.	

Figura 4.36	209
Utilização de sistemas de ventilação do incêndio nos edifícios.	
Figura 5.1	211
Relações esquemáticas entre características dos edifícios e tempos de resistência ao fogo das estruturas exigidos por códigos e normas.	
Figura 5.2	227
Exigências do Código de Edificações de São Paulo quanto à colocação de elementos de fachada acima e abaixo de pavimentos não compartimentados - os parapeitos e abas devem resistir, no mínimo, a 2 horas de fogo.	
Figura 6.1	235
Encapsulamento de viga de aço por concreto, formando conjunto monolítico com a laje de piso.	
Figura 6.2	241
Transferência de calor do incêndio (curva normalizada ISO R 834) a um perfil de aço protegido.	
Figura 6.3	242
Fatores de forma P_s/A_s para várias seções de aço protegidas.	
Figura 6.4	244
Características do perfil de aço (exemplo de aplicação).	
Figura 6.5	248
Gráfico comparativo de temperaturas atingidas por um perfil leve de aço na exposição à curva ISO R 834, para os casos de perfil sem proteção e perfil revestido - perfil 3" X 11,2 kg, características da proteção dadas na figura.	
Figura 6.6	250
Esquema-padrão para vigas W8 X 28 com especificações de proteção segundo o Underwriters Laboratories.	

Figura 6.7	252
Proteção de colunas e vigas de aço, tipo "contorno" e tipo "caixa".	
Figura 6.8	255
Relação entre resistência ao fogo de colunas de aço e espessura de concreto de proteção, para vários agregados.	
Figura 6.9	258
Condutibilidade térmica de tijolos cerâmicos em função da temperatura para diversas densidades.	
Figura 6.10	258
Variação do calor específico de tijolos cerâmicos com a temperatura para diferentes tipos de tijolos.	
Figura 6.11	260
Processo de fabricação de componentes à base de fibras cerâmicas.	
Figura 6.12	266
Aplicação de sistemas de placas rígidas de gesso à proteção de vigas.	
Figura 6.13	267
Proteção por placas rígidas - aplicação à proteção de elementos estruturais treliçados.	
Figura 6.14	268
Proteção de vigas por forros resistentes ao fogo: o forro pode, além de funções de acabamento e acústica, substituir a proteção que seria aplicada à viga.	
Figura 6.15	270
Sistemas de forros moldados no local, para proteção de vigas de aço.	
Figura 6.16	272
Sistemas de forros de placas fixadas em uma grelha, para proteção de vigas de aço.	

Figura 6.17	273
Tipos de forros sustentados por placas, quanto ao grau de embutimento da estrutura de sustentação das placas: (A) perfis expostos; (B) parcialmente embutidos; (C) embutidos.	
Figura 6.18	274
Detalhes dos perfis de sustentação de forros fogo-resistentes, destinados a permitir a dilatação livre quando submetidos ao calor do incêndio.	
Figura 6.19	275
Sistema de proteção pré-moldado para vigas e colunas.	
Figura 6.20	277
Proteção de colunas vazadas através do preenchimento com água.	
Figura 6.21	278
Troca de calor que proporciona proteção à coluna de seção vazada preenchida com água.	
Figura 6.22	279
Vigas de aço falsamente desprotegidas.	
Figura 6.23	279
Colunas de aço falsamente desprotegidas.	
Figura 6.24	286
Variação da condutibilidade térmica das mantas "Kaowool" com a temperatura.	
Figura 6.25	287
Fixação de proteção por mantas cerâmicas, em vigas de aço.	
Figura 6.26	290
Resistências ao fogo obtidas em ensaios para diferentes espessuras de "Pyrocret", em colunas e vigas de aço.	

LISTA DE TABELAS

página

Tabela 1.1	5
Estimativa anual de perdas devido a incêndio (EUA).	
Tabela 1.2	6
Ocorrências de incêndio por classes de edifícios e pessoas vitimadas no ano de 1983.	
Tabela 1.3	8
Produção de estruturas de aço no ano de 1986 -dados da Associação Brasileira da Construção Metálica - ABCEM.	
Tabela 2.1	26
Dados relativos a evolução de incêndios em levantamentos de ocorridos em indústrias têxteis do Reino Unido.	
Tabela 2.2	40
Fatores relativos aos meios de extinção, utilizados pelo Método ERIC.	
Tabela 2.3	44
Distância mínima entre edifícios para separação de riscos.	
Tabela 2.4	47
Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 1 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).	
Tabela 2.5	47
Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 2 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).	
Tabela 2.6	48
Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 3 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).	

Tabela 2.7	48
Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 4 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).	
Tabela 3.1	53
Calor específico de alguns materiais e substâncias a temperatura ambiente (valores típicos).	
Tabela 3.2	59
Condutibilidade térmica de alguns materiais e substâncias a temperatura ambiente (valores típicos).	
Tabela 3.3	74
Emissividade de alguns materiais a temperatura ambiente (baixa frequência) e a luz solar (alta frequência).	
Tabela 3.4	80
Poder calorífico de alguns materiais.	
Tabela 3.5	102
Valores de potencial calorífico que correspondem à transição de regime em um incêndio.	
Tabela 3.6	105
Potenciais caloríficos nos edifícios - EUA.	
Tabela 3.7	106
Potenciais caloríficos nos edifícios - Japão.	
Tabela 3.8	109
Fator de correção para o potencial calorífico calculado segundo norma DIN 18230.	
Tabela 3.9	113
Durações do incêndio em um pavimento (em minutos), calculadas para os exemplos da figura 3.27.	

Tabela 3.10	124
Densidade ótica de fumaça produzida por alguns materiais quando submetidos a radiação ou a chama.	
Tabela 4.1	132
Principais alterações do ensaio BS-476: Part 8 desde sua criação.	
Tabela 4.2	138
Dimensões das amostras a serem empregadas e condições particulares no ensaio de resistência ao fogo de elementos estruturais, segundo a ASTM E-119.	
Tabela 4.3	139
Ensaio de elementos estruturais com uso do conceito de temperatura crítica (alternativa permitida pela ASTM E-119).	
Tabela 4.4	153
Evolução da temperatura em um perfil de aço ASTM 3" x 11.2 kg submetido a incêndio normalizado.	
Tabela 4.5	161
Valores limites do fator de forma para perfis de aço, obtidos a partir de dados de ensaios com incêndios naturais - combustível utilizado: madeira.	
Tabela 4.6	162
Valores limites do fator de forma para perfis de aço, obtidos a partir de dados de ensaios com incêndios naturais - combustíveis utilizados: madeira e plástico.	
Tabela 4.7	198
Distância mínima de separação entre edifícios.	
Tabela 4.8	199
Áreas máximas de fachada com aberturas não-protegidas em função de áreas de fachada e de distâncias de afastamento entre o edifício e os limites do terreno.	

Tabela 4.9	210
Fatores para dimensionamento de dispositivos de ventilação.	
Tabela 5.1	215
Fator do edifício para determinação do potencial calorífico calculado (DIN 18230).	
Tabela 5.2	215
Categorias de proteção contra incêndio (DIN 18230).	
Tabela 5.3	216
Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais (DIN 18230).	
Tabela 5.4	219
Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais (França).	
Tabela 5.5	221
Tipos de construção e exigências de resistência ao fogo (Uniform Building Code - EUA).	
Tabela 5.6	232
Classificação dos edifícios segundo sua utilização.	
Tabela 5.7	233
Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais ou de compartimentação, segundo a classificação mostrada na tabela 5.6.	
Tabela 6.1	239
Propriedades térmicas típicas de alguns materiais e componentes utilizados em proteção contra fogo.	
Tabela 6.2	246
Cálculo de temperaturas em perfil de aço protegido.	

Tabela 6.3	257
Propriedades de argamassas de cimento e vermiculita.	
Tabela 6.4	264
Resultados de ensaios de diferentes revestimentos intumescentes aplicados sobre perfil de aço tipo W 10 X 49 (segundo a ASTM E-119).	
Tabela 6.5	281
Resistência à compressão de argamassas de cimento e vermiculita.	
Tabela 6.6	284
Resistência ao fogo de colunas protegidas com Vermimassa.	
Tabela 6.7	286
Características das mantas "Kaowool" disponíveis no Brasil.	
Tabela 6.8	288
Resistência ao fogo de perfis de aço protegidos com mantas cerâmicas "KAOWOOL" segundo ensaio ASTM E-119.	
Tabela 6.9	289
Propriedades do PYROCRET.	

ABREVIATURAS UTILIZADAS

ABCEM	Associação Brasileira da Construção Metálica	Brasil
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	Brasil
AISI	American Iron and Steel Institute	EUA
ANSI	American National Standards Institute	EUA
ASTM	American Society for Testing Materials	EUA
BFPC	British Fire Protection Committee	R. Unido
BOCA	Building Officials and Code Administration	EUA
BS	British Standards (British Standards Institution)	R. Unido
CIB	International Council for Building Research Studies and Documentation	internac.
COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista	Brasil
CONSTRADO	Constructional Steel Research and Development Organisation	R. Unido
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	França
DIN	Deutsche Industrie Normen	R.F. Alemã
ECSS	European Convention for Constructional Steelwork	internac.
FDTE	Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia da Escola Politécnica da USP	Brasil
FRS	Fire Research Station of the Building Research Establishment (Department of Environment)	R. Unido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	Brasil

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo	Brasil
IRB	Instituto de Resseguros do Brasil	Brasil
ISO	International Organization for Standardization	internac.
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil	Portugal
MIC/STI	Ministério da Indústria e Comércio - Secretaria de Tecnologia Industrial	Brasil
NFPA	National Fire Protection Association	EUA
NBS	National Bureau of Standards	EUA
UBC	Uniform Building Code	EUA
UL	Underwriters Laboratories	EUA

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Com a evolução do mundo civilizado e da vida urbana, evolução esta especialmente intensa ao longo do nosso século, o projeto de edifícios converteu-se em um processo muito complexo, envolvendo muitos conhecimentos especializados e o emprego de novos materiais e tecnologias.

Paralelamente, grande número de catastróficos incêndios foram registrados ao longo desta história da vida do homem nas cidades, desde a Antigüidade até os dias atuais, com extensas e importantes repercussões para a organização das sociedades urbanas. Landi [1987] ¹ cita como exemplos os grandes incêndios das cidades de Sodoma, Gomorra e Roma (na Antigüidade), destacando ainda, já neste século, o incêndio que destruiu 28.000 edifícios na cidade de São Francisco. Em função destes catastróficos incidentes, foram surgindo e crescendo o número de restrições e obrigações relativas à construção e utilização das edificações, visando maior controle dos riscos de incêndio.

A engenharia de segurança contra incêndio encontrou dentro desse processo uma participação cada vez mais importante. Em termos atuais, dada a importância das perdas econômicas e de vidas humanas envolvidas, os países desenvolvidos ampliaram muito o investimento em pesquisas e investigações na área, nas últimas décadas. Esta preocupação com a segurança, em países como Estados Unidos,

1 - Ao longo deste trabalho, as referências bibliográficas serão apresentadas através do(s) nome(s) do(s) autor(es) seguido(s) do ano ou data de publicação, remetendo com tais dados à referência completa apresentada ao final. Na hipótese de ser necessária, uma terceira informação será acrescentada, por exemplo, para identificar um dentre os trabalhos de mesma autoria publicados em um mesmo ano. Este formato poderá, porém, sofrer alguma alteração formal, mas sempre preservando a clareza e unicidade do que for citado.

principalmente, mas também Canadá, Japão, Alemanha, Inglaterra, França, dentre outros, pode ser atestada pela constatação de um elevado número de trabalhos técnicos ou científicos dedicados aos temas relacionados com o incêndio.

O Brasil, na sua condição de "país em desenvolvimento", possui problemas similares, posto que possui atividade econômica e emprego de energia intensos, e algumas de suas cidades, como São Paulo, estão entre as maiores do planeta.

Em contrapartida, por maiores que sejam os danos reais, sendo o Produto Interno Bruto Brasileiro proporcionalmente baixo em relação ao dos países do Primeiro Mundo, é até natural que os assuntos ligados à segurança não sejam contemplados com fatias do orçamento público tão expressivas quanto naqueles países, aumentando cada vez mais a distância entre o contexto do Brasil e o de outras nações.

A deficiência dos códigos e normas brasileiros reflete o problema, que se agrava, ainda, pela falta de consciência dos usuários dos edifícios, somada à formação deficiente dos profissionais da construção civil, sejam estes ligados ao projeto, à produção, ou à manutenção. Dados ingleses, citados por Rosso [1975], apontam como principais causas da eclosão de incêndios as falhas nas instalações e equipamentos elétricos, a piromania ou intenção dolosa e os cigarros. Segundo o mesmo autor, "nos maiores sinistros causados pelo fogo, negligência e ignorância estão presentes não somente nas causas como também nos efeitos".

Diante do quadro apresentado, pode-se criticar a atitude do profissional que considera segurança contra incêndio um simples problema de atendimento mínimo às legislações em vigor, atitude

esta bastante generalizada, e até mesmo compreensível, dentro da realidade brasileira. Em vez da simples observância dos requisitos de segurança impostos, caberia aos profissionais da área, arquitetos e engenheiros, um perfeito domínio dos conceitos básicos de segurança contra incêndio, que lhes permitiria projetar cada edifício, com suas particularidades características.

Por outro lado, os órgãos competentes, sempre que se manifestam situações extremas, apressam-se em revisar os códigos de construção. Diante de eventos ocorridos em um incêndio de grandes proporções, pressionados pela opinião pública, surgem de pronto propostas de modificações, geralmente bastante parciais e específicas, incluindo exigências mais severas, enfatizando alguns aspectos, ou alterando certas recomendações, sem no entanto resolver efetivamente o problema.

Ideal seria um trabalho conjunto, efetivo e permanente, para congregar a evolução natural das exigências sociais com o conhecimento tecnológico disponível.

Para ilustrar melhor o dito acima, vale citar um evento relatado pela "National Commission on Fire Prevention and Control" [1973]: "Na tarde de 5 de agosto de 1970, irrompeu um incêndio no 33.º pavimento do "New York Plaza", em Nova Iorque (EUA). O sistema de ar condicionado espalhou a fumaça produzida por todo o edifício. Mas o fato mais grave foi representado pela morte de duas pessoas no elevador. Elas foram automaticamente levadas ao andar do incêndio, o que se deu a partir do acionamento, provocado pela produção de calor e gases, do botão de chamada". Além disso, neste mesmo incêndio, "no 33.º pavimento, as vigas de aço do piso apresentaram-se ao final torcidas ou fletidas várias polegadas, e

seus conectores arrancados, levando a que as vigas de piso afetadas se apoiassem na mesa inferior das vigas principais. Isto apesar de tais vigas estarem protegidas por amianto projetado, que no entanto apresentou pouca aderência e havia sido removido em alguns pontos para fixação de instalações" [segundo publicação da NFPA, de 1973].

Efeitos tragicamente imprevistos como os ocorridos no incêndio relatado acima, mostram a complexidade dos problemas que surgem na situação excepcional de operação do edifício que é o incêndio. Como exemplos nacionais de grande notoriedade, vale lembrar os incêndios ocorridos em São Paulo ao longo das décadas de setenta e oitenta: edifícios Andraus (1972), Joelma (1974), CESP (1987), todos incêndios de grande gravidade, além de outros casos de relativa gravidade (edifícios Grande Avenida e Conjunto Nacional). A cada novo incêndio, descobre-se que ainda não se tem o problema sob controle. As novas situações acabam servindo para reacender a mobilização em torno do assunto.

No dossiê do Congresso Nacional norte-americano, preparado pela "National Commission on Fire Prevention and Control", publicado no ano de 1973, foram citados uma série de aspectos preocupantes, relacionados com o projeto de edifícios altos: acumulação do calor gerado no incêndio, favorecendo combustões súbitas e explosões; produção de fumaça e gases tóxicos pela queima de materiais de acabamento; existência de dutos e espaços confinados que levam fumaça e gases quentes ao resto do edifício; as saídas de emergência podem ser insuficientes e ficar rapidamente saturadas; o trabalho dos bombeiros encontra inúmeras dificuldades.

Quanto aos prejuízos advindos de incêndios, a citada comissão do Congresso Norte-americano, afirmava, à época, que 12 mil vidas

humanas e mais de 11 bilhões de dólares são sacrificados anualmente, nos Estados Unidos (ver tabela 1.1).

TIPOS DE PERDAS DEVIDO A INCÊNDIO

Perdas materiais	US\$ 2,7 bilhões
Corpo de bombeiros	2,5
Tratamento de feridos	1,0
Custo de seguro	1,9
Perda de produtividade	3,3

TOTAL DE PERDAS ECONÔMICAS	11,4 bilhões
-----------------------------------	---------------------

Feridos	300 mil pessoas
Perdas de vidas humanas	12 mil pessoas

TOTAL DE PESSOAS VITIMADAS	312 mil pessoas
-----------------------------------	------------------------

Tabela 1.1 - Estimativa anual de perdas devido a incêndio (EUA).
[FONTE: National Commission on Fire Prevention and Control, 1973.]

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, citados por Alberio [1986] e parcialmente reproduzidos na tabela 1.2 revelam a extensão do problema (35.443 incêndios, 308 mortes e 695 feridos no ano de 1983). Acredita-se, porém, que os danos relatados pelo IBGE sejam numericamente inferiores aos realmente acontecidos.

NATUREZA DOS BENS ATINGIDOS		NÚMERO DE INCÊNDIOS	
COMERCIAL		3324	
INDUSTRIAL		2590	
RESIDENCIAL		10116	
AGROPECUÁRIO		415	
EDIF. PÚBLICO		450	
DEPÓSITOS EM GERAL		864	
TOTAL		17759	

PESSOAS VITIMADAS	FERIDOS	MORTOS
PERTENCENTES AO CORPO DE BOMBEIROS	47	05
ESTRANHAS AO CORPO DE BOMBEIROS		
homens	447	208
mulheres	201	95
TOTAIS DE MORTOS E FERIDOS	695	308

Tabela 1.2 - Ocorrências de incêndio por classes de edifícios e pessoas vitimadas no ano de 1983.
[FONTE: ALBERO, 1986.]

Os dados compilados demonstram a gravidade do problema e a extensão dos prejuízos. E, apesar das dificuldades enumeradas anteriormente quanto à compreensão e previsão dos fenômenos associados ao incêndio, resta a países como o Brasil, dentro do melhor de suas possibilidades, saber assimilar e adaptar o conhecimento acumulado pelos países mais adiantados, bem como aprender o máximo possível com suas próprias experiências. Qualquer que seja o caminho adotado, são certas, porém: a necessidade de oferecer, aos usuários dos edifícios, maiores e melhores informações que lhes permitam

postura mais consciente quanto à problemática do incêndio; a importância da mobilização constante por parte dos órgãos legislativos e normativos que orientam os cuidados necessários nas fases de projeto, construção e utilização e manutenção dos edifícios; a utilidade de se formar profissionais mais capazes para enfrentar o problema.

Quanto aos edifícios de estrutura de aço, sofrem os mesmos problemas de segurança, no que concerne ao risco de incêndio e suas conseqüências, que quaisquer outros edifícios. Talvez a única particularidade, mas que não se configurou (ainda) no caso brasileiro, seja o seu potencial de construir edifícios mais altos, dada a resistência mecânica do material - os edifícios mais altos do mundo, com mais de cem pavimentos, foram construídos com estruturas de aço, como descreve o trabalho de Cardoso et alii [1988].

Em relação ao comportamento da estrutura em especial, os requisitos a serem atendidos, na situação de incêndio, são genericamente também os mesmos, seja esta estrutura feita do material que for (ainda que os mesmos requisitos possam ser observados a partir do emprego de processos de proteção específicos).

O trabalho em questão se justifica a partir da observação de que no universo brasileiro da construção civil é relativamente restrita a utilização de estruturas de aço em edifícios, especialmente naqueles cujo uso e tipologia não sejam de galpões industriais, para produção ou estocagem (observe-se os dados apresentados na tabela 1.3). E, no total, o emprego de aço na construção civil atinge apenas 1,7 % da produção brasileira, cerca de sete a dez vezes inferior ao de países desenvolvidos [segundo Souza, 1989].

Acredita-se que grande parte dos obstáculos para um emprego mais intensivo do aço naqueles casos tem origem em circunstâncias de mercado mas também deficiências de conhecimento técnico (ainda que tais deficiências possam estar intimamente vinculadas ao próprio pouco emprego do aço).

TIPO DE ESTRUTURA	PRODUÇÃO ANUAL (t)
Edifícios de múltiplos andares	1.563
Edifícios industriais	39.378
Plataformas "off-shore"	16.925
Pontes, viadutos e passarelas	8.452
Torres de transmissão e subestações	28.720
Torres de outros tipos	18.800
Caldeiraria em geral	7.739
Coberturas e fechamentos	39.924
Perfis dobrados para terceiros	12.300
Perfis soldados para terceiros	12.874
Diversas	59.993
TOTAL GERAL	240.668

observações:

- (1) estima-se que o total da produção de estruturas de aço em 1986 tenha sido de 370.000 t.
- (2) a produção brasileira de aço bruto, para todos os fins, no ano de 1986 foi de 21,2 milhões de toneladas.

Tabela 1.3 - Produção de estruturas de aço no ano de 1986 - Associação Brasileira da Construção Metálica - ABCEM. [FONTE: SOUZA, 1989.]

Foi dentro do quadro apresentado que se estabeleceu a necessidade de, prioritariamente, investir em pesquisas que levassem a uma maior divulgação do conhecimento tecnológico disponível para o emprego de aço na construção de edifícios, pois acredita-se que este é o caminho mais curto e seguro como base de uma expansão de mercado dentro do atual contexto brasileiro. Tornou-se quase consensual no setor da construção metálica a importância de investir em capacitação tecnológica, o que do lado de quem projeta e especifica, significa superar a inércia devido às deficiências de conhecimento técnico e profissional, abrindo novos horizontes, e uma perspectiva de melhor e mais extenso emprego de aço, para os fabricantes. A Universidade pode, portanto, contribuir para ambos.

Dentre estas deficiências um dos pontos mais obscuros é a **segurança contra incêndio da estrutura de aço**, verdadeiro "tabu" na área da construção metálica. Com base nessa observação relativa ao emprego do aço na construção, motivou-se um estudo mais aprofundado do problema, estudo este a partir do qual surgiu a pesquisa que possibilitou a presente **dissertação**.

Ao longo da elaboração deste trabalho, pouco a pouco os objetivos inicialmente colocados foram sendo reavaliados e, ao final, se consolidaram mais claramente em três grandes itens:

- caracterizar a ocorrência de incêndios em edifícios enquanto fenômeno, dentro das abordagens desenvolvidas no âmbito da engenharia;

- traçar um panorama geral das questões relativas à segurança contra incêndio dos edifícios, particularmente daqueles de uso não industrial, evidenciando os vários enfoques possíveis e discutindo as suas inter-relações;

- por fim, dentre os vários enfoques apresentados, detalhar aqueles preocupados com os efeitos do incêndio sobre as estruturas dos edifícios (e, mais especificamente, de estruturas de aço), abordando neste item as formas mais usuais de proteção destas estruturas.

2. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DOS EDIFÍCIOS

2.1. O Significado das Exigências de Segurança

Os riscos de incêndio fazem parte do conjunto maior de riscos inerentes às atividades humanas. Tais riscos surgem como um subproduto indesejável dessas atividades, sendo via de regra relegados a segundo plano, posto que as atenções se concentram sobre os produtos - estes os verdadeiros objetivos das citadas atividades. Assim, ao se alcançar a construção do edifício tem-se como subproduto indesejável o risco de incêndio e os eventuais danos a ele associados, que obviamente podem comprometer o objetivo inicial, na hipótese de se verificar o incêndio.

O incêndio pode ser considerado um evento, passível de acontecer durante a vida do edifício, ao qual pode ser, inclusive, associada determinada probabilidade de ocorrência (serão abordadas algumas tentativas de modelagem nesse sentido, ainda neste capítulo do trabalho). Igual raciocínio pode ser feito em relação a um conjunto de edifícios, ou a uma cidade inteira. Poucos eventos, porém, possuem capacidade potencial de prejuízos materiais e perdas de vidas humanas tão extensos. Por menor que se constate aquela probabilidade, isto justifica, particularmente pelos aspectos ligados à vida, uma expectativa constante, que significa ter no edifício níveis mínimos de prevenção e proteção contra um possível incêndio.

E, voltando à relação anteriormente abordada entre produto e subproduto da construção do edifício, trata-se de um empreendimento, cujo objetivo é de viabilizar uma determinada atividade humana, através de um certo dispêndio de recursos, e

portanto implicará em uma análise de fundo econômico para a questão. O que pode ser observado é que, não fosse o fator econômico, seria absolutamente desejável precaver-se contra toda e qualquer possibilidade advinda dos riscos de segurança inerentes a uma atividade. No entanto, maiores se tornam as conquistas humanas, maiores são os riscos associados e maiores os investimentos necessários para conseguir diminuir estes riscos.

Um exemplo fora do tema, mas perfeitamente análogo e de fácil assimilação, poderia ser o dos veículos automotores, que atingem velocidades cada vez mais altas, mas cujo acréscimo de desempenho é acompanhado de grande investimento: em sistemas de freios mais eficientes, sistemas de suspensão mais estáveis em altas velocidades, carrocerias capazes ao mesmo tempo de absorver impactos e de manter a forma do compartimento de passageiros, cintos de segurança e bolsas infláveis para preservar a vida destes passageiros em caso de choques, e vários outros.

Tal qual o automóvel, o edifício deve evoluir avançando também em segurança. Com os avanços da tecnologia de construção, os edifícios de múltiplos pavimentos vão, ano a ano, batendo recordes de altura, o emprego de fontes de energia e equipamentos torna-se cada vez maior, ao que se soma a complexidade crescente de usos e funções que os edifícios vão assumindo nas grandes cidades. Portanto, o investimento em segurança deve necessariamente crescer.

Porém, não é possível esperar, em qualquer sociedade do mundo atual, que o investimento em segurança seja tão privilegiado quanto o investimento destinado ao próprio empreendimento, e mais ainda, ao se considerar o universo de um país em desenvolvimento. A vontade social ligada a melhores e crescentes níveis de segurança

difícilmente supera a de crescer e desenvolver. Níveis mínimos devem ser estabelecidos, neste caso, de forma a manter sob controle os riscos.

No ensejo de manter ou melhorar as condições de segurança de seus edifícios, cada sociedade estabelece dispositivos de orientação e fiscalização voltados para o projeto, construção, uso e alteração de usos de seus edifícios. Geralmente estes dispositivos são as chamadas exigências de segurança, que vêm na forma de leis e normas orientativas, restringindo algumas características dos edifícios e obrigando à adoção de certas outras.

As exigências de segurança, para serem legítimas, devem possuir total respaldo dos setores sociais envolvidos, sejam eles os usuários, as empresas construtoras, os setores técnicos, de fabricação de materiais e componentes de construção, os agentes financeiros e de seguros, ou as próprias corporações de bombeiros, para citar aqueles mais importantes. E, para serem efetivas, as exigências de segurança não podem se constituir em obstáculo demasiado à viabilidade econômica do empreendimento de construir. O empreendimento passaria, eventualmente, a uma condição de "clandestinidade consentida" (i.e., construído em claro desacordo com legislações e normas mas respaldado pela notória dificuldade no seu cumprimento), para poder concretizar-se. Na hipótese de legitimidade, o atendimento às exigências e a sua fiscalização fluiriam sem esforços demasiados, de modo compatível com os níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico e social vigentes. Qualquer exigência de segurança eficaz situar-se-á no campo não das exigências absolutas (ideais), mas das exigências relativas (possíveis). Serão abordadas mais adiante, no capítulo 5, as exigências encontradas em códigos e normas de vários países.

Dentro do problema conforme colocado acima, preocupa estabelecer a relação entre os riscos existentes em cada caso, que constituem a fonte de preocupação, e os vários sistemas que concorrem para a segurança do edifício, que significam o ônus da tranquilidade, de modo a alcançar um compromisso adequado entre ambos e a realidade de um contexto social. Para tanto, seria desejável conhecer o problema em toda sua amplitude, para posteriormente apresentar alternativas viáveis e seguras de solução.

2.2. Os Diferentes Aspectos do Problema

No universo dos conceitos de segurança contra incêndio do edifício, a forma de abordagem mais clássica, e também mais aceita, tem sido direcionar para determinado objetivo a escolha e adoção dos sistemas de segurança. Dentro dos objetivos da segurança contra incêndio em edifícios, Landi [1987] enuncia dois aspectos básicos, com especial destaque:

- proteção da vida humana;
- proteção dos bens (patrimônio).

Além destes dois aspectos, Rosso [1975] acrescenta ainda o de permitir a recuperação do edifício, findo o incêndio; já a National Fire Prevention Association - NFPA [1983] inclui como terceiro item permitir a continuidade operacional; sendo estes aspectos de base predominantemente econômica, serão incluídos nas considerações acerca da proteção patrimonial.

A proteção da vida humana é considerada essencial, não sendo admitido como tese o seu negligenciamento, em quaisquer casos. A proteção do patrimônio é considerada relativa, e normalmente

determinada segundo uma conjunção de interesses de ordem econômica; podendo ainda contribuir fatores de preservação histórica ou cultural, entre outros.

Segundo a NFPA [1983], por outro lado, o problema possui pelo menos três níveis de abordagem, constituindo pontos de vista práticos diferentes:

- institucional;
- técnico-científico;
- operacional.

Os três pontos de vista possuem forte influência mútua, e cada um deles está vinculado a um ou mais setores da sociedade. A grosso modo, pode-se citar: as instituições da área de seguros e os órgãos públicos legisladores (primeiro nível); as entidades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, de normalização técnica, empresas de projeto, de construção, o meio técnico em geral (segundo nível); e, no terceiro e último nível de abordagem, os usuários dos edifícios, além de o próprio Corpo de Bombeiros - aqui incluído enquanto "usuário" dos sistemas de extinção ou meios de acesso e evacuação, durante o combate ao incêndio.

Do ponto de vista institucional, o incêndio é entendido como "ocorrência indesejável", como tal devendo ser evitado ou controlado, cabendo ainda sanções econômicas ou jurídicas e atribuição de responsabilidades. Rosso [1975] esclarece que o poder público, através dos códigos de construção e outras legislações, preocupa-se fundamentalmente com a proteção da vida humana, enquanto que a segurança patrimonial é influenciada pela postura das companhias seguradoras. Essa distinção, porém, não é absoluta, e os resultados quanto à proteção humana e proteção patrimonial

estão sempre superpostos, não sendo possível a total dissociação entre eles.

2.3. Fatores de Segurança Contra Incêndio

Conforme Malhotra [1982], as disposições de segurança contra incêndio podem ser classificadas, dentro dos objetivos que se propõem a atender e segundo sua natureza, como medidas de prevenção ou medidas de proteção.

Prevenção contra incêndio abrange as disposições que visam prevenir a eclosão ou reduzir o risco de alastramento do incêndio, evitar perigo para os ocupantes ou para a propriedade. Atende-se ao objetivo da prevenção contra incêndio através de:

- projetos e instalações adequadas das fontes de calor e energia;
- conhecimento dos riscos que envolvem as atividades exercidas;
- correta utilização de equipamentos;
- fiscalização e manutenção para garantia do nível mínimo de segurança relativo aos itens anteriores.

Proteção contra incêndio, por outro lado, diz respeito aos materiais, caminhos de fuga, sistemas e equipamentos de detecção, alarme, controle ou extinção do incêndio. Ainda segundo o mesmo autor, dentre as medidas de proteção contra incêndio, pode-se distinguir ainda:

- medidas de proteção passiva, aquelas que não dependem de qualquer acionamento em caso de emergência;
- medidas de proteção ativa, que são acionadas a partir do princípio do incêndio.

Estas medidas podem ser exemplificadas conforme segue:

	- CONTROLE DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS
PROTEÇÃO	- MEIOS DE EVACUAÇÃO
PASSIVA	- COMPARTIMENTAÇÃO DOS AMBIENTES
	- PROTEÇÃO DA ESTRUTURA
	- VENTILAÇÃO DO INCÊNDIO
PROTEÇÃO	- CONTENÇÃO DA FUMAÇA
ATIVA	- DETECÇÃO E ALARME DE INCÊNDIO
	- SISTEMAS DE EXTINÇÃO DO INCÊNDIO

Segundo Bayon [1978], para efeito de projeto, uma listagem ampla dos aspectos a serem abordados quanto à segurança contra incêndio do edifício seria:

(1) MANUTENÇÃO DA ESTABILIDADE

- Estrutural
- Dos elementos de fachada

(2) CONTENÇÃO DO AVANÇO DO FOGO

- Compartimentação
- Controle do conteúdo de materiais combustíveis

(3) AVISO DE INCÊNDIO E EVACUAÇÃO

- Sistemas de detecção/alarme
- Caminhos de evacuação
- Refúgios temporários
- Dispositivos para ventilação do incêndio
- Dispositivos para controle do movimento da fumaça
- Sistemas de sinalização, iluminação e energia de emergência
- Sistemas de monitoração e comunicação

(4) COMBATE AO INCÊNDIO

- Sistemas de extinção manual
- Sistemas de extinção automática

Ao quarto item poder-se-ia acrescentar também a acessibilidade para a atuação dos bombeiros.

Dentro da proposta de globalização é importante deixar claro que não se objetiva, aqui, atingir a enumeração de itens ou sistemas de segurança mais completa e irretocável, mas apenas elucidar satisfatoriamente o problema.

A figura 2.1 ilustra a idéia do edifício em que vários itens de segurança estão presentes. Os aspectos citados acima podem ser tratados independentemente, mas pela sua influência mútua é fundamental que componham um todo coerente. Por exemplo, existe uma forte relação entre a manutenção da estabilidade estrutural e o processo de combate ao incêndio; para que sejam preservados os objetivos, o tempo mínimo durante o qual a estrutura resiste ao fogo deve ter estreita relação com um outro, que é aquele necessário para retirar as vidas humanas ou para controlar o incêndio através dos sistemas de combate e atuação dos bombeiros

Esse tipo de consideração é feita por vários autores como Lie [1972] e Rosso [1975].

Figura 2.1 - Exemplo esquemático de edifício onde concorrem vários itens de segurança contra incêndio.
[FONTE: BAYON, 1978.]

E, segundo Malhotra [1982], a proteção da estrutura está intimamente ligada às outras medidas de proteção contra incêndio, pois todas elas interagem, e a existência ou ativação de cada sistema pode beneficiar o outro. Segundo este autor, os principais objetivos da proteção da estrutura em um edifício são:

- (a) preservar a integridade de áreas seguras no edifício;
- (b) restringir as dimensões do incêndio;
- (c) evitar que a estrutura do edifício atinja a situação de instabilidade.

Quanto à proteção da estrutura, encontrar-se-á mais à frente, nos capítulos 4 e 6 deste trabalho, um detalhamento extensivo, onde serão discutidas a necessidade e as alternativas que se dispõe, para obtenção de um adequado nível de segurança.

2.4. Uma Tentativa de Sistematização

Com o surgimento da consciência de que os modernos edifícios de múltiplos pavimentos construídos nos EUA, projetados segundo padrões aceitos de construção, apresentavam pontos falhos quanto à segurança, a "National Fire Protection Association" criou um comitê de estudo voltado a esse tema, ao qual se propunha estudar problemas relativos às estruturas de edifícios de grande altura. Da proposição inicial, evoluiu-se para um objetivo mais abrangente, dirigido para sistemas de segurança contra incêndio em construções. Do trabalho desenvolvido pela NFPA resultou um resumo consensual a respeito da Teoria de Sistemas aplicada à segurança contra incêndio em edifícios, denominado "árvore de decisões" [NFPA, 1983].

A idéia foi propor um tratamento da questão da segurança contra incêndio em nível de projeto através de uma abordagem sistêmica, para o que deviam ser identificados seus aspectos fundamentais, a participação (influência) de cada um e as inter-relações entre eles; assim foi possível definir um sistema a partir da definição das partes e das relações entre as partes, onde comparecem relações hierárquicas, e chegar-se à criação da árvore de decisões.

A árvore de decisões da NFPA proporciona uma visão abrangente do problema, ainda que meramente qualitativa, e foi elaborada tendo como universo todo tipo de edificação, com quaisquer características ou usos.

Em sua característica de ramificação lógica, a árvore de decisões apresentada traz implícita uma distribuição racional de atribuições e responsabilidades, entre proprietários, projetistas e usuários do

edifício. Seus ramos estão ilustrados nos esquemas transcritos nas figuras 2.2 e 2.3.

O ramo "Evitar a deflagração do incêndio" leva, essencialmente, a um código de prevenção de incêndios. E as providências relacionadas com prevenção, embora de responsabilidade do proprietário e dos usuários do edifício, devem ser facilitadas por características incorporadas ao próprio projeto. Por outro lado, é praticamente impossível garantir a não ocorrência de incêndios; portanto, sob o ponto de vista de projeto, o ramo "Debelar o incêndio" é o caminhar a ser adotado. Isto mostra que, à luz da Teoria de Sistemas, os objetivos da segurança contra incêndio são, qualitativamente, atingidos tanto pela prevenção quanto pela proteção.

Dentro da proposta do comitê da NFPA, a questão da proteção contra incêndio mereceria o mesmo tratamento de outros subsistemas importantes do edifício, o que significa, entre outras coisas:

- formular alternativas de solução;
- caracterizar as alternativas, sempre que possível quantificando, listando vantagens e inconvenientes, analisando custos globais, diretos e indiretos, para orientar a escolha da solução;
- adotar, conscientemente, a melhor alternativa, onde o parâmetro de qualidade é no fundo uma medida de coerência e equilíbrio.

Figura 2.2 - Ramos principais da árvore de decisões contra incêndio criada pela comissão da NFPA. O sinal (+) assinala os pontos em que cada um abaixo do mesmo constitui uma solução independente. [FONTE: NFPA, 1983.]

Figura 2.3 - Componentes dos ramos da árvore de decisões da NFPA.
[FONTE: NFPA, 1983.]

Uma forma quantitativa de analisar a segurança contra incêndio pode ser obtida com o emprego de redes tipo CPM-PERT, inter-relacionando os eventos associados a um incêndio, com suas respectivas probabilidades de ocorrência. Modelos assim formulados constituem instrumentos de projeto, auxiliando na decisão entre duas ou mais alternativas, permitindo otimizar o dimensionamento de um sistema de proteção ou extinção face às demais características de segurança do edifício, desde que para sua formulação existam dados adequados. A NFPA [1983] dá como exemplo um algoritmo com alternativas de adoção de sistemas manuais ou automáticos de extinção (ver figura 2.4). As probabilidades associadas às mudanças de estágio do incêndio (p.ex. de passar do "início" à "perpetuação") são obtidas a partir de vários registros de casos reais.

Ramachandran [1988], em um artigo que "revisa o estado da arte na abordagem probabilística dos riscos de incêndio e da efetividade das medidas (sistemas) de segurança", apresenta em defesa da utilidade da adoção desse tipo de abordagem a constatação de que o fator humano e a confiabilidade dos sistemas de extinção, detecção, confinamento possuem graus de incerteza, que estão presentes em todos os aspectos da segurança contra incêndio.

Uma formulação segundo modelos estocásticos é apresentada por este último autor, voltada para a propagação do incêndio, sendo aplicável a propagações horizontais (em um único pavimento) ou verticais (entre pavimentos). Um exemplo apoiado em dados de incêndios em indústrias têxteis do Reino Unido (tabela 2.1) serve para ilustrar a aplicação de modelos estocásticos (figura 2.5).

ALTERNATIVA 1 : Equipamentos obrigatórios + Sistema de "Sprinklers"
 $\rightarrow P(C) = 0.98$

ALTERNATIVA 2 : Equipamentos obrigatórios + Treinam. de brigada
 $\rightarrow P(C) = 0.76$

convenções apresentadas nas redes representadas acima:
 $P(E)$ é a probabilidade associada ao caminho, de ocorrência do evento explicitado no diagrama no alto da figura.

Figura 2.4 - Exemplo de aplicação de rede CPM-PERT em decisões de projeto de segurança contra incêndio.
 [FONTE: NFPA, 1983.]

ESTÁGIO DA PROPAGAÇÃO	com "sprinkler"		sem "sprinkler"	
	ÁREA MÉDIA ATINGIDA (m ²)	% DE INCÊNDIOS	ÁREA MÉDIA ATINGIDA (m ²)	% DE INCÊNDIOS
(1) restrita ao item em que se iniciou	4,43	72	4,43	49
(2) restr. ao ambiente em que se iniciou	11,82	19	15,04	23
(3) idem, atingindo tb. a estrutura	75,07	7	197,41	21
(4) propagação além do ambiente	1.000,00	2	2.000,00	7
TOTAL	30,69	100	187,08	100

Tabela 2.1 - Dados relativos a evolução de incêndios em levantamentos de ocorridos em indústrias têxteis do Reino Unido.
[FONTE: RAMACHANDRAN, 1988.]

Figura 2.5 - Exemplo de modelo estocástico aplicado à segurança contra incêndio (caso de indústrias têxteis no Reino Unido, citado na tabela 2.1).
[FONTE: RAMACHANDRAN, 1988.]

2.5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RISCO DOS EDIFÍCIOS

2.5.1. Seguro Contra Incêndio e Segurança Contra Incêndio

Acerca da securitização dos bens atingíveis pelo incêndio, ou mais particularmente, do patrimônio constituído pelo edifício e bens contidos em seu interior, vale estender um pouco mais a análise até aqui empreendida, posto que os custos de seguro podem notoriamente apresentar grande influência no tratamento das questões relativas à segurança contra incêndio, durante as fases de projeto e construção dos edifícios.

Em especial o problema dos efeitos do incêndio sobre as estruturas dos edifícios assume destaque, já que na eventualidade de um colapso da mesma, seria muito provável a perda integral de todo o patrimônio segurado. Tal problema é regulamentado no Brasil, para efeito de seguro, por meio do item "classe de construção" da Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.

Dentro do enfoque pretendido de atendimento aos vários aspectos da segurança contra incêndio, se se considerar prioritariamente a avaliação que será feita quando do seguro do edifício contra incêndio, a pressão do fator econômico dará margem a fortes distorções no processo de concepção e detalhamento dos elementos da construção, particularmente no projeto da estrutura e demais elementos associados à sua segurança.

Assim é que, ao final, a avaliação do potencial de risco da edificação, através de um resultado econômico em nível de seguro torna-se fator condicionante a priori das decisões que seriam tomadas em nível de projeto. Isto porque existe uma faixa nebulosa

no universo da segurança contra incêndio, onde normas e legislações não contribuem para a melhor definição do problema. A situação ideal seria dada por uma coerente e saudável convergência dos enfoques técnico e institucional. A figura 2.6 procura ilustrar os conflitos atualmente existentes.

Figura 2.6 - Confronto entre os níveis técnico e institucional na avaliação do potencial de risco da edificação.
[FONTE: MELHADO, 1987].

É preciso ressaltar que o confronto entre as avaliações feitas no nível institucional e no nível técnico mostrará a divisão clara entre segurança da vida humana e segurança patrimonial; algumas características do edifício contribuirão notadamente mais para a segurança patrimonial. Dentro do nível institucional, restará,

portanto, à legislação competente a tarefa de privilegiar a segurança da vida humana.

2.5.2. A Segurança Ótima contra Incêndio

Alguns autores, inicialmente Lie [1972] e, depois, da Graça [1978], procuraram abordar o assunto da forma mais coerente dentro do enfoque no qual se apresentava, de preocupação exclusivamente econômica, propondo uma minimização da soma dos custos envolvidos, levando à determinação da resistência ao fogo "ótima" para a estrutura.

Os autores acima partiram da constatação de que uma estrutura de aço perde resistência sob a ação do calor de um incêndio, devendo portanto receber algum tipo de proteção. Quanto maior a proteção, maior será a resistência ao fogo da estrutura. Por razões econômicas, porém, a resistência ao fogo de uma estrutura não pode ser fantasiosamente alta; ela deve possuir um valor apropriado. Um método para se determinar a resistência ao fogo satisfatória, seria confrontar o custo de aumentar a resistência ao fogo com o benefício econômico a ser esperado com a conseqüente redução das perdas devido a um incêndio, e fazer o balanço global de custos.

Segundo Lie, as perdas devido a um incêndio dependem de três fatores: (a) da probabilidade de ocorrência do incêndio; (b) da probabilidade de colapso do edifício ou de seus elementos; (c) do patrimônio (valor) em risco. A figura 2.7 explica a relação entre estes fatores.

Figura 2.7 - Fatores a se considerar na determinação da resistência ao fogo ótima (sob o prisma econômico do seguro).
[FONTE: LIE, 1972.]

Assim, segundo Lie [1972], uma lista das variáveis que determinam a soma de perdas econômicas esperadas em caso de incêndio seria:

- (a) dimensões do edifício;
- (b) vida útil do edifício considerada;
- (c) probabilidade, para o tipo de edifício considerado, de ocorrência de incêndio, por m² por ano (função da ocupação do edifício, sistemas de detecção, extinção, etc.);
- (d) fator de segurança adotado para o conteúdo em materiais combustíveis esperado para os ambientes do edifício;
- (e) variabilidade da resistência ao fogo adotada para os elementos estruturais;
- (f) variabilidade do valor adotado para o conteúdo em materiais combustíveis;
- (g) valor patrimonial do edifício;
- (h) valor do conteúdo;
- (i) perdas devido a paralisação de atividades;
- (j) custos de reparo após incêndio;
- (l) taxa de retorno considerada;
- (m) número de ambientes do edifício;
- (n) número de ambientes que podem ser atingidos pelo incêndio.

Para demonstrar os resultados da metodologia de avaliação proposta, Lie desenvolveu alguns exemplos, calculando em diferentes situações a soma dos custos envolvidos (de proteção da estrutura mais o custo

das perdas esperadas em caso de incêndio), variando em cada caso o fator de segurança adotado. Estes resultados, expressos na forma de curvas, estão reproduzidos na figura 2.8.

CURVAS:

50 pavimentos
(A) $A_{\text{PAVIMENTO}} = 1.000 \text{ m}^2$
total: 50.000 m^2

10 pavimentos
(B) $A_{\text{PAVIMENTO}} = 1.000 \text{ m}^2$
total: 10.000 m^2

2 pavimentos
(C) $A_{\text{PAVIMENTO}} = 1.000 \text{ m}^2$
total: 2.000 m^2

$n = \frac{W_D}{W_M}$ --> POTENCIAL CALORÍFICO DE PROJETO

W_M --> POTENCIAL CALORÍFICO MÉDIO (para o tipo de edifício)

Figura 2.8 - Relação entre o fator de segurança adotado e as perdas econômicas esperadas em caso de incêndio somadas ao investimento na proteção da estrutura.
[FONTE: LIE, 1972.]

As perdas econômicas esperadas aumentam muito com as dimensões do edifício, portanto, um ganho substancial pode ser obtido pelo incremento na proteção (contra fogo) da estrutura, especialmente nos casos de edifícios de grandes dimensões.

Lie considerou os dados existentes, particularmente os dados estatísticos, inadequados para elaborar com precisão o balanço econômico entre investimento em proteção e perdas devido a incêndio. Contudo, algumas conclusões acerca da proteção da estrutura puderam ser tiradas com aqueles dados (em 1972). Ao final de sua análise, Lie enumera alguns "princípios básicos a seguir na proteção contra fogo da estrutura":

- "(1) Para edifícios com área por pavimento da ordem de 50.000 m² (50 pavimentos de 1.000 m²), ou mais, é justificável basear sua resistência ao fogo em um alto fator de segurança, por exemplo, 4 ou mais. Neste caso as perdas econômicas esperadas seriam muito altas se fosse considerado um fator baixo de segurança; já para edifícios com cerca de dez pavimentos (área total de 10.000 m²), é relativamente pouco significativo o benefício econômico de se incrementar a proteção da estrutura, se comparado ao obtido no primeiro caso; quanto aos edifícios com 2.000 m² (em 2 pavimentos), o benefício é probabilisticamente negativo;
- (2) Em geral, quanto maior o edifício e seu valor, mais se justifica a sua proteção (que representa de 1 a 7% do custo do edifício);
- (3) Redução substancial das perdas econômicas devido ao incêndio pode ser obtida pela proteção da estrutura tão bem quanto pela redução da probabilidade de ocorrência do incêndio, pela prevenção, detecção ou extinção, dada pelos sistemas correspondentes;
- (4) Abaixo de um certo nível de probabilidade de ocorrência, a proteção da estrutura, mesmo para grandes edifícios, só é importante pelo aspecto de segurança da vida humana;
- (5) Por outro lado, em grandes edifícios com grande probabilidade de ocorrência, apenas a proteção da estrutura será insuficiente para reduzir as perdas econômicas, devendo-se adotar outros sistemas.
- (6) É fundamental um bom controle de qualidade do projeto da estrutura e conhecimento preciso do conteúdo de materiais combustíveis, para redução das perdas."

A favor desta abordagem, pode-se atribuir a objetividade do raciocínio empregado, ainda que para sua aplicação bem sucedida seja imprescindível um rol de informações específicas e confiáveis, nem sempre ao alcance do projetista.

No entanto, a determinação da "proteção ótima" com base em critérios apenas econômicos não garante em absoluto o atendimento global aos vários aspectos da segurança contra incêndio. É necessário que se considere também como parâmetro a proteção das vidas humanas envolvidas: dos ocupantes do edifício, bem como dos edifícios próximos, e dos bombeiros, em seu trabalho de combate².

A metodologia ideal - e jamais criada - para determinação do nível de proteção requerido seria aquela que congregasse de modo harmônico os vários itens de proteção contra incêndio, inclusive proteção da estrutura, e obtivesse o nível de segurança humana necessário, com máxima economia.

Acrescente-se ainda a questão das eventuais alterações de uso dos ambientes ao longo da vida útil do edifício, que tenderiam a "desatualizar" os dados considerados na análise, pelas mudanças no potencial calorífico ou pela introdução de diferentes probabilidades de ocorrência de incêndios, entre outros fatores.

2 - Da Graça [1978] observou em seu trabalho que "caso a duração do incêndio obtida venha a ser menor que o tempo de escape das pessoas, deverá ser este tempo o valor a ser considerado". Segundo o autor em pauta, poder-se-ia associar à fuga dos ocupantes um outro modelo probabilístico.

2.5.3. O Método Gretener ("Swiss Insurance Method")

A publicação da NFPA [1983] dá destaque ao método proposto por M. Gretener, utilizado pelos avaliadores de seguros na Suíça, para determinação do nível de segurança contra incêndio das edificações. O conceito empregado consiste em se associar um valor quantitativo à segurança contra incêndio da construção, obtido pela divisão do fator de risco potencial do edifício pelo fator de proteção:

$$R = \frac{P}{M} \quad (2.1)$$

R = nível provável de segurança

P = potencial de risco

M = meios de prevenção e proteção

O fator de risco (P) é dado por uma multiplicação de fatores relacionados ao potencial calorífico, combustibilidade dos materiais, produção de fumaça, características físicas do edifício, etc. A quantificação dos meios de prevenção e proteção também é obtida por multiplicação de fatores, por sua vez relacionados a uma escala de níveis de proteção do edifício.

Do método Gretener derivaram outros métodos europeus, baseados no mesmo conceito de avaliação do risco de incêndio por cálculo. Esses métodos são sempre empíricos, porém baseados em vasta experiência na área de engenharia de incêndio.

2.5.4. Avaliação do Potencial de Risco Considerando a Segurança da Vida Humana

Ainda que os métodos de avaliação de riscos tenham surgido dentro do universo da segurança patrimonial, os mesmos podem ser aplicados

à segurança humana, com resultados interessantes quando comparados aos obtidos para o patrimônio.

Um trabalho de Facio [1983] comenta um método extensão daquele primeiro introduzido por Gretener, o "Méthode D'Evaluation du Risque d'Incendie pour Calcul" - ERIC, criado na França. No ERIC comparecem duas classes de fatores de risco: uma em relação à proteção do patrimônio, outra para a salvaguarda da vida humana. O princípio de cálculo é o mesmo do Gretener:

$$R1 = \frac{P1}{M1} \quad - \quad \text{fator de risco para a vida humana} \quad (2.2)$$

$$R2 = \frac{P2}{M2} \quad - \quad \text{fator de risco para o patrimônio} \quad (2.3)$$

Os fatores relativos à segurança humana foram pesquisados por especialistas franceses, incluindo engenheiros de incêndio, profissionais de órgãos de pesquisa e do Corpo 'de Bombeiros. O risco para a segurança humana seria, segundo o método em questão, dado por:

$$P1 = t . f . i . r . c \quad (2.4)$$

onde

- t refere-se ao tempo de evacuação do edifício;
- f é o grau de redução de visibilidade pela fumaça;
- i é um índice de toxicidade;
- r é a composição de um fator de probabilidade de início de um incêndio com um fator que considera a capacidade física e reação por parte dos ocupantes;
- c mede a combustibilidade dos materiais.

O tempo de evacuação deve ser estimado a partir de fórmulas empíricas ou a partir de sessões de treinamento (caso de edifícios já construídos).

A redução de visibilidade e a toxicidade de gases e fumaças produzidos durante o incêndio são determinados a partir das características dos materiais combustíveis do edifício (mobiliário, materiais de acabamento).

A combustibilidade representa a facilidade de propagação do incêndio, que pode ser relacionada à natureza dos materiais combustíveis ou, em uma análise preliminar, ao próprio uso do edifício.

O fator "r" inclui a participação humana na deflagração de um incêndio, como também o grau de conscientização e alerta, onde influem aspectos mentais, físicos e de conhecimento da situação.

Quanto ao cálculo do fator de proteção, o mesmo é obtido de forma totalmente análoga ao fator de proteção relativo ao patrimônio:

$$M1 = S1 \cdot T1 \cdot E1 \cdot DF1 \cdot F1 \quad (2.5)$$

$$M2 = S2 \cdot T2 \cdot E2 \cdot DF2 \cdot F2 \quad (2.6)$$

onde

S é o fator de localização do edifício;
 T é o fator de detecção e alarme;
 E é o fator de extinção do fogo;
 DF é o fator de controle da fumaça;
 F é o fator de isolamento corta-fogo e de resistência ao fogo.

A medida da influência de cada um dos cinco fatores acima na segurança humana e na segurança patrimonial, porém, baseia-se em conceitos independentes, de forma que os valores de M1 e M2 podem ser bastante diferentes em um dado edifício.

Tomando-se por exemplo o fator de extinção, tem-se:

$$E1 = EX1 \cdot PE1 \quad (2.7)$$

$$E2 = EX2 \cdot PE2 + PD \quad (2.8)$$

No produto que dá o fator de extinção E1 (segurança humana), são levados em conta os meios de extinção disponíveis (EX1) e o horário de prontidão da brigada de incêndios interna. No cálculo de E2 (segurança patrimonial) comparece um outro fator, relacionado à classe de atendimento pelos bombeiros, o que não é considerado no cálculo dos meios de extinção para a salvaguarda da vida humana.

Os valores de EX1 e EX2 são tabelados (ver tabela 2.2, a seguir) para todos os agentes extintores usuais.

Observe-se que os fatores atribuídos a um meio de extinção, quanto à segurança da vida humana, possuem considerações implícitas, tais como a toxicidade ou outras características nocivas do próprio agente extintor, que não interessam sob o ponto de vista de proteção do patrimônio.

Assim, os fatores mais baixos (menor nível de segurança) referem-se justamente ao CO₂ e aos halogenados; exceção feita ao halon 1301, cuja composição é menos perigosa para a saúde humana.

De modo geral, vale sempre lembrar que o fator mais crítico para a segurança humana, dada a ocorrência de incêndio, está ligado à evacuação do edifício.

AGENTE EXTINTOR	SEGURANÇA HUMANA (EX1)	SEGURANÇA PATRIMONIAL (EX2)
1. Automáticos		
* "Sprinklers"		
- uma fonte	1,15	1,60
- duas fontes	1,15	1,90
* Halon		
- 1301	1,00	1,20
- outros	0,80	1,20
* CO ₂	0,80	1,20
* Pó químico	1,00	1,20
2. Portáteis		
* Água	1,00	1,20
* Pó químico	1,00	1,10
* Nenhum/insuficiente	0,90	0,90
3. Hidrantes		
* Distribuição normal	1,20	1,20
* Um por pavimento	1,20	1,20
* Nenhum/insuficiente	0,90	0,90

Tabela 2.2 - Fatores relativos aos meios de extinção, utilizados pelo Método ERIC.
[FONTE: FACIO, 1983.]

Como ilustração do comportamento relativo do risco para a segurança humana comparado ao risco patrimonial, vê-se na figura 2.9 um gráfico exibindo os resultados obtidos para diferentes alternativas de proteção de um Shopping Center com 20.000 m². Os pontos mostram uma tendência que é resultante do tipo de proteção adotado, de privilegiar a segurança da vida humana, pois a fumaça, além da toxicidade, dificulta grandemente uma evacuação rápida e segura.

Figura 2.9 - Avaliação de risco para várias alternativas de proteção contra incêndio em um Shopping Center - aplicação do método ERIC.
[FONTE: FACIO, 1983.]

Incluiu-se aqui a apresentação e exemplificação desses métodos de avaliação de riscos, embora possa ser aparentemente desnecessária e extensa, pela possibilidade de tratar a questão de modo globalizante. Por possuírem tal caráter, essas avaliações não recaem no enfoque puramente de proteção patrimonial, e fazem assim

vislumbrar a possibilidade de adoção de um critério universal para os vários setores da sociedade envolvidos, anteriormente citados.

2.5.5. O Problema do Seguro Contra Incêndio de Edifícios no Brasil

A "Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil" [IRB, 1978], em vigor desde 1953, estabelece um processo de avaliação de riscos em que as características físicas e de concepção, os materiais empregados na construção, além dos descontos devido a existência de sistemas de detecção e combate a incêndio, são fatores que determinarão qual a taxa a ser aplicada em cada caso, no seguro contra incêndio de edifícios.

O cálculo de prêmios obedece aos fatores básicos da chamada classificação L-O-C (localização-ocupação-construção), utilizada pelas Companhias de Seguros. Portanto, para a Tarifa brasileira um risco a ser segurado (que pode ser todo o edifício ou parte dele) é alvo de três critérios de classificação, quais sejam:

- localização, subdividido em quatro classes, segundo a cidade, vila ou localidade;
- ocupação, subdividido em treze classes, dependendo da atividade que é abrigada pelo edifício;
- construção, subdividido em quatro classes, conforme os materiais utilizados no edifício.

A classificação de localização, para efeito de aplicação da taxa de prêmio, considera superiores em termos de segurança alguns dos grandes centros, como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte,

etc. As cidades citadas são "classe 1" de localização, não sendo feita qualquer restrição quanto à situação do edifício dentro da região distrital correspondente (em outras palavras, estando o edifício localizado em cidades de uma certa classe, não interessam condições específicas como facilidade de comunicação ou acesso, proximidade do Corpo de Bombeiros, distância do prédio à via de acesso mais favorável, ou quaisquer outras peculiaridades).

A classificação de ocupação baseia-se em uma extensa lista de atividades, industriais, comerciais, agrícolas ou de moradia, levando em conta essencialmente o conteúdo. O potencial calorífico alto de um depósito de materiais combustíveis ou inflamáveis leva a uma classificação também "alta", ao passo que "moradia" é sempre classe 1 de ocupação, para efeito de seguro.

Quanto à classificação da construção, prende-se às características dos sistemas estrutural e de vedação, e define um maior ou menor valor da tarifa a se aplicar usando como parâmetro um elenco de materiais considerados de maior ou menor segurança, sem recurso a índices técnicos ou quaisquer métodos de avaliação não comparativa.

O isolamento de riscos, obtido por elementos que restrinjam a propagação do incêndio, e a adoção de sistemas de detecção e extinção automática são também considerados, e levam a descontos no prêmio.

Um conceito importante para a avaliação do nível de segurança, sob o ponto de vista das seguradoras, é o isolamento de riscos.

Conceitua-se risco isolado como sendo "o edifício, ou parte do edifício, em que é adequadamente dificultada a propagação do

incêndio a edifícios vizinhos, ou às demais partes do edifício" [IRB, 1978]. O texto esclarece que a propagação pode ser dificultada por meio de parede corta-fogo ou através de separação por uma distância mínima entre os edifícios.

A parede que separa dois riscos, segundo a Tarifa, deve satisfazer, simultaneamente, as seguintes condições:

- "a) construção total de concreto armado ou de alvenaria (...);
- b) divida os telhados;
- c) não tenha abertura de qualquer espécie, salvo as estritamente necessárias para a passagem de tubulações (...) ou tenha aberturas protegidas (...)."

As distâncias de afastamento suficientes para caracterizar um risco isolado, a partir da separação entre os edifícios, têm sua dimensão dada conforme segue (ver tabela 2.3).

Classes de Construção	Classes de Construção				
	1	2		3	4
		Ao ar livre e construção aberta	Demais		
1	-	-	-	-	-
1Ao ar livre 2e constru- ção aberta	-	8 m	3 m	5 m	8 m
Demais	-	3 m	-	3 m	3 m
3	-	5 m	3 m	5 m	5 m
4	-	8 m	3 m	5 m	8 m

Tabela 2.3 - Distância mínima entre edifícios para separação de riscos.
[FONTE: Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.]

A classe de construção indica o sistema construtivo e tipos de materiais usados, para cada um dos riscos envolvidos; por esse motivo, o seguro considera distâncias maiores para separar riscos relativos a construções "inferiores" (materiais considerados menos seguros quanto a incêndio). Assim, os edifícios classe 1 são sempre risco isolado, mesmo quando contíguos a outras construções.

A caracterização de risco isolado traz como vantagem imediata a concessão de descontos, ou seja, podem ser conseguidas taxas inferiores às normais.

O edifício pode ser caracterizado como classe 1 ("construção superior") quando apresentar, simultaneamente, as seguintes características:

" a) estrutura integral de concreto armado ou de aço protegido por concreto ou alvenaria (grifo nosso), entendendo-se por estrutura integral as colunas, vigas e cintas de amarração;

b) pisos de todos os pavimentos constituídos por laje de concreto armado ou por lajes pré-moldadas, permitindo-se que o piso do pavimento assente no solo seja de qualquer material incombustível;

c) teto ou forro, se existente, do último pavimento construído de material incombustível;

d) escadarias de comunicação geral entre os diversos pavimentos, construídas com material incombustível;

e) paredes externas de material incombustível;

f) cobertura de material incombustível assente em armação metálica ou concreto;

g) havendo elevadores, os vãos próprios, se existentes, fechados com material incombustível;

h) instalação elétrica geral embutida ou, se aparente protegida por tubos e caixas de ferro ou equivalentes.

- Não prejudicam essa classe de construção:

a) acabamentos de madeira ou de outro material combustível, aplicados sobre lajes, escadas ou paredes incombustíveis, tais como tacos, marcos, esquadrias, lambris e semelhantes;

b) ripamento de madeira aplicado exclusivamente para servir de base ao assentamento da cobertura;

c) forros falsos de material combustível para fins acústicos, térmicos, ou de iluminação, desde que aplicados imediatamente sob tetos de concreto ou laje pré-moldada;

d) o uso de materiais combustíveis para sustentação de forros de material incombustível, nos casos em que não é exigida laje de concreto armado;

e) as construções sobre a laje de cobertura de prédios de 3 ou mais pavimentos;

f) a reconstrução parcial e os acréscimos em prédios de 3 ou mais pavimentos.

São dispensáveis as seguintes exigências, desde que satisfeitas as demais do item 1:

Estrutura integral de concreto armado ou de aço protegido por concreto ou alvenaria:

a) nos prédios de 1 e 2 pavimentos em que haja laje, teto ou forro constituído por laje de concreto armado ou por lajes pré-moldadas;

b) nos dois últimos pavimentos dos prédios de 3 ou mais pavimentos.

- Assentamento de cobertura em armação metálica ou de concreto, permitindo-se, portanto, travejamento de madeira:

a) nos prédios de 3 ou mais pavimentos;

b) nos prédios de 1 ou 2 pavimentos, contanto que nestes exista teto ou forro de concreto armado."

A partir da classificação do risco, segundo localização, ocupação e construção, a taxaçoão acima pode ainda sofrer alguns acréscimos, tais como o chamado "adicional de altura", aplicável a edifícios de quatro ou mais pavimentos.

As tabelas 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7, apresentam, respectivamente, as taxas básicas aplicadas aos edifícios de localização classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4. As colunas referentes ao "prédio"

estão designadas pela letra "P"; a letra "C" designa as taxas aplicáveis ao "conteúdo".

OCUPAÇÃO	CONSTRUÇÃO					
	(1)		(2)		(3)	(4)
	P	C	P	C	P C	P C
01	0,10	0,12	0,12	0,15	0,45	0,60
02	0,10	0,20	0,20	0,25	0,50	0,65
03	0,15	0,25	0,25	0,35	0,65	0,80
04	0,20	0,40	0,35	0,50	0,80	1,00
05	0,25	0,55	0,50	0,65	1,00	1,30
06	0,35	0,70	0,65	0,80	1,20	1,60
07	0,35	0,90	0,80	1,00	1,50	1,90
08	0,35	1,10	1,00	1,20	1,80	2,20
09	0,35	1,20	1,20	1,50	2,20	2,60
10	0,50	1,50	1,50	1,80	2,60	3,00
11	0,50	1,80	1,80	2,10	3,00	3,50
12	0,50	2,10	2,10	2,50	3,50	4,00
13	0,65	2,50	2,50	3,00	4,00	4,50

Tabela 2.4 - Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 1 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).
[FONTE: Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.]

OCUPAÇÃO	CONSTRUÇÃO					
	(1)		(2)		(3)	(4)
	P	C	P	C	P C	P C
01	0,10	0,12	0,12	0,15	0,50	0,70
02	0,10	0,20	0,20	0,30	0,55	0,75
03	0,15	0,30	0,30	0,40	0,70	0,90
04	0,20	0,45	0,40	0,55	0,90	1,10
05	0,25	0,60	0,55	0,70	1,10	1,40
06	0,35	0,80	0,70	0,90	1,40	1,70
07	0,35	1,00	0,90	1,10	1,70	2,00
08	0,35	1,20	1,10	1,40	2,00	2,50
09	0,35	1,40	1,40	1,70	2,40	3,00
10	0,50	1,70	1,70	2,00	2,80	3,50
11	0,50	2,00	2,00	2,30	3,30	4,00
12	0,50	2,30	2,30	2,80	3,80	4,50
13	0,65	2,80	2,80	3,30	4,50	5,00

Tabela 2.5 - Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 2 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).
[FONTE: Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.]

OCUPAÇÃO	C O N S T R U Ç Ã O					
	(1)		(2)		(3)	(4)
	P	C	P	C	P C	P C
01	0,12	0,15	0,15	0,18	0,55	0,70
02	0,12	0,25	0,25	0,30	0,60	0,80
03	0,18	0,35	0,35	0,45	0,80	1,00
04	0,25	0,50	0,45	0,60	1,00	1,20
05	0,30	0,70	0,60	0,80	1,20	1,50
06	0,40	0,90	0,80	1,00	1,50	1,90
07	0,40	1,10	1,00	1,20	1,80	2,30
08	0,40	1,30	1,20	1,50	2,20	2,80
09	0,40	1,50	1,50	1,80	2,60	3,30
10	0,60	1,80	1,80	2,20	3,10	3,80
11	0,60	2,20	2,20	2,50	3,60	4,30
12	0,60	2,50	2,50	3,00	4,20	4,80
13	0,80	3,00	3,00	3,60	5,00	5,50

Tabela 2.6 - Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 3 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).
[FONTE: Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.]

OCUPAÇÃO	C O N S T R U Ç Ã O					
	(1)		(2)		(3)	(4)
	P	C	P	C	P C	P C
01	0,12	0,18	0,18	0,20	0,60	0,80
02	0,12	0,30	0,30	0,40	0,65	0,85
03	0,18	0,40	0,40	0,50	0,85	1,10
04	0,25	0,55	0,50	0,65	1,10	1,30
05	0,30	0,70	0,65	0,85	1,30	1,60
06	0,40	1,00	0,85	1,10	1,60	2,00
07	0,40	1,20	1,10	1,30	2,00	2,50
08	0,40	1,40	1,30	1,60	2,50	3,00
09	0,40	1,60	1,60	2,00	3,00	3,50
10	0,60	2,00	2,00	2,40	3,50	4,00
11	0,60	2,40	2,40	2,70	4,00	4,50
12	0,60	2,70	2,70	3,30	4,70	5,20
13	0,80	3,30	3,30	3,90	5,50	6,00

Tabela 2.7 - Taxa de seguro para os riscos situados em localização classe 4 (P - taxa para o prédio; C - taxa para o conteúdo).
[FONTE: Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil.]

Quanto a eventuais descontos em relação à tarifa básica, "aos riscos isolados ou estabelecimentos que, por suas características próprias, apresentarem condições especiais em relação aos normais de sua classe, poderão ser concedidas taxas inferiores às previstas (...) para os riscos normais". A existência de um sistema de chuveiros automáticos ("sprinklers"), por exemplo, pode trazer como benefício um desconto da ordem de 60% para a tarifa, desde que a taxa resultante não seja inferior a 0,10 (taxa mínima).

Pode-se inferir do exposto que este método, porém, não é suficientemente completo e abrangente para permitir uma avaliação correta do potencial de risco da edificação. No aspecto "localização", por exemplo, os parâmetros tais como tempo para chegada dos bombeiros, pressão da rede pública para hidrantes, acesso de escadas e mangueiras não são levados em consideração, já que a classificação feita abrange indistintamente todo o município. Os outros quesitos, de operação e construção não produzem a melhor imagem dos riscos associados a cada um.

O ponto básico nas limitações apresentadas pelo método adotado no Brasil está na sua tendência mais à prescrição do que à análise, que lhe conferem pouca flexibilidade no processo de avaliação.

3. O INCÊNDIO COMO FENÔMENO

3.1. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO FENÔMENO

A ocorrência de um incêndio no interior de um edifício caracteriza-se por um desprendimento violento de calor, fumaça e gases tóxicos produzidos a partir da queima dos materiais nele contidos. Para que se possa prevenir ou controlar esse fenômeno, é necessário conhecer física e quimicamente os seus mecanismos de desenvolvimento. Isto significa, em outros termos, conhecer como se processa a combustão; saber quanto calor pode ser produzido pela queima dos vários materiais; conhecer as formas pelas quais o calor e os gases produzidos se propagam e afetam o edifício e, conseqüentemente, a sua segurança; e, ao final, gerar um modelo representativo do fenômeno, de forma a possuir instrumentos que permitam prever o seu comportamento.

Dentro deste enfoque serão abordados, na ordem, os processos de transmissão de calor, a combustão dos materiais, o comportamento do incêndio real e o modelo normalizado, e a interação com os materiais constituintes do edifício.

Especialmente quanto aos conceitos de transmissão de calor e de combustão de materiais adiante apresentados, foram baseados em trabalho anterior elaborado por Melhado e Souza [1988], preparado como base de um curso de Proteção Contra Fogo de Estruturas de Aço, que vem sendo ministrado no âmbito dos Cursos de Atualização da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia desta Escola - FDTE / EPUSP.

3.2. A TRANSMISSÃO DE CALOR

3.2.1. Conceitos Preliminares

Pode-se afirmar que a transmissão de calor é dada pelo trânsito de energia entre dois corpos, que possuem determinada energia interna. A energia interna é associada a uma certa quantidade de energia existente no interior de um material, devida a movimentos dos átomos e moléculas dos quais os corpos são compostos.

Para demonstrar-se a evidência da presença desta energia interna, imagine-se um gás qualquer aprisionado em um recipiente cilíndrico por meio de um êmbolo superior (figura 3.1), apresentando-se com as seguintes características iniciais: pressão " P_1 ", volume " V_1 ", temperatura " T_1 ".

Figura 3.1 - Aumento da energia interna de um gás aprisionado por êmbolo deslocável.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

Imagine-se ainda que se aqueça o recipiente. Para os gases perfeitos a relação PV/T é considerada constante, o que levará a um

deslocamento ascensional do êmbolo; este deslocamento relaciona-se à execução de trabalho na medida em que se desloca a força $\vec{P}$ (peso do êmbolo). Este trabalho só pode ser efetuado através do aumento da energia interna do gás, associada a um aumento de sua temperatura.

A energia interna de um corpo depende de vários parâmetros: temperatura, estrutura interna, massa, estado físico. No entanto, a probabilidade de transferência desta energia de um corpo para outro é função de suas temperaturas apenas (figura 3.2). Portanto, um aumento de temperatura está associado a um aumento da energia interna e vice-versa; exceto quando ocorrem mudanças de estado - onde a passagem de um dos corpos do estado sólido ao líquido, por exemplo, demandaria uma certa quantidade de energia sem que se alterasse a temperatura deste corpo.

Corpo "A"

massa : m_A

temperatura : T_A

Corpo "B"

massa : $m_B < m_A$

temperatura : $T_B > T_A$

No equilíbrio :

$T_B < T_{\text{equilíbrio}} < T_A$

⇒ a energia passou de B para A

Figura 3.2 - Transferência de energia interna: do corpo de maior para o de menor temperatura.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

Basicamente faz-se distinção entre duas formas de calor: sensível e latente. O calor trocado por um corpo é denominado sensível quando provoca apenas variação de temperatura.

Suponha-se que a um corpo de massa " m " e temperatura inicial " T_1 " seja fornecida uma quantidade de calor " Q " levando-o a uma temperatura final " T_2 ". Verifica-se experimentalmente a proporcionalidade de " Q " em relação a " m " e à variação de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

onde a grandeza " c " é denominada calor específico, sendo característica do material que constitui o corpo em estudo. O calor específico mede numericamente a quantidade de calor necessária para variar de um grau a temperatura de uma unidade de massa. Os valores característicos de várias substâncias, num determinado intervalo de temperatura, podem ser vistos na tabela 3.1.

MATERIAL OU SUBSTÂNCIA	CALOR ESPECÍFICO c (kJ/kg°C)
óleo lubrificante	1,8
Água	4,2
Concreto	1,0
Aço	0,5
Tijolos comuns	0,8
Gesso	1,7

Tabela 3.1 - Calor específico de alguns materiais e substâncias a temperatura ambiente (valores típicos).

O calor trocado por um corpo é denominado latente quando provoca no mesmo uma mudança de estado físico, sem qualquer alteração de

temperatura. Assim, para que um corpo de massa "m" passe do estado sólido para o líquido (fusão) e do líquido para o gasoso (vaporização) há a necessidade de fornecimento de uma quantidade de calor dada por:

$$Q = m \cdot L \quad (3.2)$$

onde L é o calor latente associado à transformação, característico da substância que constitui o corpo, bem como da pressão e temperatura durante o fenômeno. Assim é que, em muitos dos materiais utilizados na construção civil, existe um conteúdo de água, correspondente a água aprisionada ou umidade de equilíbrio com a umidade do ar, cuja vaporização consome uma certa quantidade de calor que, fornecida ao corpo, no entanto não provoca elevação de sua temperatura.

Pode-se então definir calor como sendo energia térmica em trânsito de um corpo para outro devido a diferenças de temperatura entre eles; surge então a necessidade de se conhecer um pouco a respeito das maneiras pelas quais pode ocorrer essa transmissão de energia.

Analisa-se, a seguir, a troca de calor entre dois corpos que possuem temperaturas distintas, isto é, os mecanismos associados à troca de calor sensível: a condução, a convecção e a radiação.

O regime de transmissão de calor denomina-se estacionário, quando os dois corpos envolvidos mantêm suas temperaturas iniciais durante o fenômeno, ou variável, quando estas condições iniciais não se mantêm.

3.2.2. Mecanismos de Transmissão de Calor

3.2.2.1. Condução

Imagine-se um meio material, constituído por uma infinidade de partículas; suponha-se ainda que determinada região desse meio possua uma temperatura mais elevada que o restante, implicando numa maior agitação das partículas aí inseridas (figura 3.3).

Figura 3.3 - Transmissão de calor por condução - modelo.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

A agitação destas partículas ainda que sem abandono de sua posição inicial, isto é, a vibração maior das mesmas em torno de uma posição inicial fixa, será transmitida paulatinamente às partículas vizinhas, gerando com isto a transferência de calor dentro do meio.

Do exposto acima pode-se concluir da necessidade de existência de um meio material para que o mecanismo se processe, isto é, quanto mais efetivo o contato entre dois corpos a temperaturas distintas, maior a potencialidade de ocorrência de transferência de calor por condução. É neste sentido que se explica a menor condução de calor nos gases, onde as partículas estão muito mais distantes uma das outras em comparação ao que ocorre em materiais sólidos.

Suponha-se que as faces de uma placa plana, mostrada em corte na figura 3.4.a, sejam mantidas indefinidamente a temperaturas distintas T_A e T_B , com $T_A > T_B$. Será visto na sequência como determinar a quantidade de calor cedida pela superfície mais quente à mais fria durante um intervalo de tempo Δt .

Figura 3.4 - Analogia elétrica para a transmissão de calor por condução.

O calor trocado pode ser calculado através da lei de Fourier:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{T_A - T_B}{\Delta x} \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

onde k é a condutibilidade térmica do material, A é a seção atravessada pelo calor e Δx é o percurso realizado.

O fluxo de calor " q ", ou a quantidade de calor trocada na unidade de tempo, é dado portanto por:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{T_A - T_B}{\Delta x} \quad (3.4)$$

A equação (3.4) pode ser escrita como:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta x}{A}} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) guarda uma analogia com a corrente elétrica que atravessa um fio, conforme indicado na figura 3.4.b :

$$i = \frac{V_A - V_B}{R_{EL}} = \frac{\Delta V}{R_{EL}} \quad (3.6)$$

A resistência elétrica " R_{EL} " pode ser escrita como:

$$R_{EL} = \rho \cdot \frac{\Delta x}{A} \quad (3.7)$$

onde ρ é a resistividade elétrica do material, A é a seção atravessada pela corrente e Δx é o percurso por ela realizado.

Por analogia com a condução de energia elétrica, pode-se definir resistência térmica - R_t , como:

$$R_t = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta x}{A} \quad (3.8)$$

Este raciocínio analógico pode ser usado, por exemplo, para a determinação do fluxo de calor através de uma placa composta por dois materiais (figura 3.5).

Figura 3.5 - Condução de calor em placa composta por dois materiais distintos.

A comparação com um circuito elétrico com duas resistências em série leva a:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} = R_{t\sum} = \frac{1}{A} \cdot \sum_i \frac{\Delta x_i}{k_i} \quad (3.9)$$

ou, finalmente:

$$q = - \frac{\Delta T}{\frac{1}{A} \cdot \sum_i \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad (3.10)$$

Tudo o que se viu acima leva em consideração a existência de um regime estacionário de transmissão de calor. Para o caso geral a Lei de Fourier torna-se:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.11)$$

Deve-se ressaltar que a condutibilidade térmica, característica de cada material, pode variar para um mesmo material para acentuadas variações de temperatura. Alguns valores do coeficiente k a temperatura ambiente são dados na tabela 3.2 para alguns dos materiais mais utilizados nas edificações.

MATERIAL OU SUBSTÂNCIA	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA k (W/m°C)
óleo lubrificante	0,14
Água	0,59
Concreto	1,40
Cimento amianto	0,88
Aço	5,62
Tijolos comuns	0,88
Gesso	0,20
Madeira	0,12

Tabela 3.2 - Condutibilidade térmica de alguns materiais e substâncias a temperatura ambiente (valores típicos).
[FONTE: LANDI, 1977.]

Em se tratando de um regime variável (figura 3.6), existe um gradiente dT/dt em qualquer ponto, e o fluxo que atravessa uma determinada seção " x " unitária, que varia no tempo, é dado em um certo instante t_0 por:

$$q(t_0) = k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.12)$$

Figura 3.6 - Condução em regimes estacionário e variável.

Além disso, o calor que atravessa uma determinada seção não é o mesmo que sai por uma seção posterior no caso de um regime variável, podendo ocorrer armazenamento de calor no trecho em questão.

A equação 3.1, considerando-se um trecho infinitesimal de comprimento dx e área unitária a ser atravessado pelo calor, pode ser reescrita como:

$$dQ = (\rho \cdot dx) \cdot c \cdot dT \quad \rho - \text{massa específica do material} \quad (3.13)$$

Temos ainda que, para esse mesmo trecho, o calor armazenado pode ser escrito como a diferença entre o fluxo que entra e o que sai

(calculados através da equação 3.11) multiplicada pelo intervalo de tempo considerado:

$$Q = \Delta q \cdot \Delta t = \left[\left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right)_{\text{trecho de ENTRADA } (x)} - \left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right)_{\text{trecho de SAÍDA } (x + \Delta x)} \right] \cdot \Delta t \quad (3.14)$$

Na medida em que se está considerando um trecho infinitesimal, e passando-se a estimar o calor armazenado durante um intervalo de tempo também infinitesimal a equação 3.14 pode ser reescrita como:

$$dQ = k \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \cdot dx \cdot dt \quad (3.15)$$

Da comparação das equações 3.13 e 3.15 pode-se finalmente chegar à equação fundamental do fluxo linear de calor:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \quad (3.16)$$

Resolver esta equação pode ser simples, como vimos para o caso de k e dT/dt constantes (regime permanente), como pode ser extremamente complexo, no caso de estes parâmetros não serem constantes, podendo-se transformar em um exercício essencialmente matemático.

3.2.2.2. Convecção

Quando existe um escoamento de um fluido nas imediações de um corpo, estando ambos a temperaturas diferentes, ocorre troca de calor entre ambos através do mecanismo denominado convecção. Esta pode ser natural, quando o movimento do fluido é decorrente de diferenças de densidade entre regiões distintas do mesmo, ou

forçado, quando o movimento é induzido por agentes mecânicos tais como ventiladores ou bombas.

A convecção natural tem sua origem no aquecimento de um fluido em uma região localizada (figura 3.7), provocando uma diminuição de sua densidade e gerando a tendência de ascensão dessa porção com a conseqüente descida do fluido mais frio que está acima.

$$T_1 > T_2 > T_3 > T_4$$

Figura 3.7 - Movimentação de um fluido em um ambiente sob a ação de chamas localizadas.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

Seja uma superfície plana em contato com o fluido em movimento; nas imediações da interface entre ambos formar-se-á uma camada estratificada de fluido, que pode ser imaginada como uma série de estratos de partículas do próprio fluido com velocidades decrescentes na direção da superfície, sendo que o estrato de contato pode ser considerado com velocidade nula. Define-se camada limite como sendo a película de fluido que abrange os estratos desde o contato com a superfície até a distância em que a

velocidade seja 99% da velocidade do fluido. A troca de calor pode ser imaginada como ocorrendo por troca de partículas mais aquecidas por menos aquecidas estrato a estrato, fazendo uma "ponte" entre o fluido em movimento e a superfície em questão.

Por essa razão, a temperatura não é constante em todo o ambiente até a superfície, ocorrendo uma variação de T_m (temperatura do meio) a T_s (temperatura da superfície) como se ilustra na figura 3.8.

Figura 3.8 - A variação de temperaturas ao longo da camada de interface meio-superfície.

Essa variação depende fundamentalmente do escoamento do fluido, das propriedades térmicas do fluido e da superfície, e da geometria do sistema. Para simplificar a solução do problema, introduz-se o conceito de coeficiente de transmissão de calor por convecção (h) através da seguinte expressão que determina o fluxo de calor por convecção entre o meio e a superfície em estudo:

$$q = h \cdot A \cdot (T_m - T_s) \quad (3.17)$$

A determinação do valor de "h" deve ser feita experimentalmente. Qualitativamente pode-se tirar rapidamente algumas conclusões, tais como:

- a velocidade do fluido, influenciando na espessura da camada limite, afeta significativamente o valor de h;
- o sentido da troca de calor também tem grande importância: na medida em que o ar quente possui a tendência de subir, a convecção em um elemento horizontal é muito mais fácil (ou seja, h é maior) no sentido de baixo para cima que no sentido inverso.

O gráfico mostrado na figura 3.9, publicado pelo "ASHRAE Guide" e citado por Landi [1977], exemplifica o comportamento do coeficiente de convecção para superfícies de diversos materiais, em função da velocidade do ar.

Figura 3.9 - Coeficiente de convecção do ar junto a superfícies de vários materiais.
[FONTE: LANDI, 1977.]

Considerou-se até agora a convecção em regime permanente; no entanto, antes que esta situação seja alcançada, passa-se por um regime transitório. Suponha-se, por exemplo, que se queira determinar o fluxo de calor para dentro da caixa das escadas de segurança após a extinção de um incêndio, localizado em ambiente contíguo.

Por simplificação considerar-se-á que a temperatura do ambiente interno à caixa não se modifique ao longo do processo; pode-se, então, escrever:

$$-c \cdot \rho \cdot V \cdot dT = h \cdot A \cdot (T_s - \bar{T}_m) \cdot dt \quad (3.18)$$

onde V é o volume da parede ao longo da superfície de área A , T_s é a temperatura da face interna da parede e $\bar{T}_m$ a temperatura do ambiente, suposta constante. O primeiro membro da equação 3.18 representa a variação da energia térmica cedida pela parede durante o intervalo de tempo dt ; o segundo, o fluxo de calor da parede para o ambiente da caixa de escadas.

Separando-se as variáveis, tem-se:

$$\frac{dT}{T_s - \bar{T}_m} = \frac{-h \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot dt \quad (3.19)$$

Ou, integrando-se:

$$\ln \frac{T_s - \bar{T}_m}{T_{s_0} - \bar{T}_m} = \frac{-h \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot t \quad (3.20)$$

ou ainda:

$$\frac{T_s - T_m}{T_{s0} - T_m} = e^{-\frac{h A}{c \rho V} t} \quad (3.21)$$

A quantidade $\frac{c \cdot \rho \cdot V}{h \cdot A}$ possui a dimensão tempo; representa a velocidade com que o corpo responde a uma variação brusca de temperatura.

Através de uma representação gráfica da equação 3.21 obtém-se uma medida da variação da temperatura da superfície considerada, conforme pode-se observar na figura 3.10.

Figura 3.10 - Variação, ao longo do tempo, da temperatura de uma superfície cedendo calor por convecção ao meio adjacente.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

3.2.2.3. Radiação

Viu-se que a transmissão de calor pode acontecer através de um meio material estático (condução) ou em movimento (convecção). Já a

transmissão de calor por radiação é um mecanismo que prescinde da existência do meio material, na medida em que a energia é transportada através de ondas eletromagnéticas. A rigor, inclusive, a radiação é mais eficiente no vácuo, já que a existência de um meio material a ser atravessado implica em dissipação da energia trocada entre dois corpos afastados.

O mecanismo da radiação consiste, simplificada, na emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido (energia radiante) que absorvidas por um receptor transformam-se em energia térmica. De início, todo corpo que esteja a uma temperatura superior ao zero absoluto emite calor sob a forma de radiação. A velocidade de propagação de uma radiação eletromagnética no vácuo é dada por:

$$v = \lambda \cdot f = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (3.22)$$

onde " λ " é o comprimento de onda e " f " a frequência da radiação. As radiações térmicas estão localizadas dentro do espectro das ondas eletromagnéticas conforme indicado na figura 3.11.

Figura 3.11 - Espectro das ondas eletromagnéticas.

Um corpo, a uma temperatura T , emite radiações com comprimento de onda e direções bastante variáveis. Denomina-se poder emissivo total "E" à energia total que é irradiada de uma superfície por unidade de área e de tempo. Para um corpo ideal, a energia emitida para cada comprimento de onda pode ser visualizada através da curva do gráfico da figura 3.12.

Figura 3.12 - Poder emissivo de um corpo a uma temperatura T .

O poder emissivo total seria, portanto, a área total abaixo da curva indicada; pode-se também definir o poder emissivo para cada comprimento de onda (observe-se a área hachurada no gráfico). Verifica-se o que o poder emissivo de um corpo é proporcional à quarta potência da sua temperatura.

Da observação do gráfico da figura 3.12 nota-se que, para a temperatura T em questão, existe uma faixa de comprimentos de onda (região do pico do gráfico) que abrange a maior parte da energia emitida. Verifica-se que, para temperaturas mais elevadas há um deslocamento dessa faixa de comprimentos de onda preferenciais para o lado esquerdo, isto é, quanto mais quente o corpo emissor mais

predominam as emissões com pequeno comprimento de onda (ou altas frequências). Este fato pode ser utilizado para se inferir a temperatura dos corpos em função da cor que apresentam quando sucessivamente aquecidos: tons vermelhos, a seguir amarelados e por fim brancos (ordem crescente de frequência das ondas eletromagnéticas).

Entendida a natureza da origem das radiações térmicas, discute-se a seguir o que ocorre quando as mesmas atingem um corpo receptor: a radiação incidente é em parte refletida, em parte transmitida e em parte absorvida (figura 3.13).

Figura 3.13 - A reação do corpo receptor a uma radiação incidente.

O balanço de energia do fenômeno implica em que:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{radiação} & & \text{radiação} & & \text{radiação} & & \text{radiação} \\ \text{incidente} & = & \text{refletida} & + & \text{absorvida} & + & \text{transmitida} \end{array}$$

o que, em parcelas do total, pode ser escrito como:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (3.23)$$

onde: ρ = refletividade (fração da energia incidente que é refletida pela superfície do corpo receptor);

α = absorptividade (fração da energia incidente que é absorvida pelo corpo receptor);

τ = transmissividade (fração da energia incidente que é transmitida através do corpo receptor).

Quanto à radiação absorvida, parte do calor gerado será dissipado para o ambiente interno ao receptor (por condução através do corpo e convecção na interface com o meio interno) e parte voltará ao próprio ambiente externo por convecção (figura 3.14).

Figura 3.14 - Dissipação da energia absorvida.

A parte dissipada para o exterior vale:

$$q_e = h_e (T_{s,e} - T_{m,e}) \quad (3.24)$$

Sendo R a energia da radiação incidente, a energia total absorvida

torna-se αR ; assim, a parte dissipada para o interior seria a diferença entre esta e a energia dissipada para o exterior:

$$q_i = \alpha R - h_e (T_{s,e} - T_{m,e}) \quad (3.25)$$

que pode ser escrita como:

$$q_i = h_e (T_{m,e} + \frac{\alpha R}{h_e}) - T_{s,e} \quad (3.26)$$

A equação 3.26 é análoga às equações utilizadas para a determinação do fluxo de calor por convecção; desta forma, para se levar em conta a radiação como indutor de fluxo de calor para o ambiente interno a um corpo receptor faz-se uma analogia com a convecção: devido à radiação a temperatura do meio externo seria elevada com o acréscimo do termo $\Delta T_{\text{EQUIVALENTE}} = \alpha R / h_e$ (figura 3.15). Assim chega-se à denominada temperatura externa equivalente: $T_{m,e} + \alpha R / h_e$.

Figura 3.15 - Efeito da radiação sobre o fluxo de calor através de um corpo opaco.

Para que se determine o valor de $\Delta T_{\text{EQUIVALENTE}}$ há a necessidade de conhecer a intensidade da energia incidente, as condições de

circulação de ar do ambiente de estudo, a posição da superfície do corpo receptor e as propriedades deste.

A equação (3.23), válida para o caso geral do balanço energético quanto à incidência de radiações, possui casos particulares bastante importantes:

- a maioria dos sólidos são opacos, absorvendo as radiações numa camada bastante fina, o que implica em:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.27)$$

- os gases pouco refletem as radiações térmicas, valendo a relação:

$$\alpha + \tau = 1 \quad (3.28)$$

- pode-se fazer uma idealização, útil nos estudos numéricos de troca de calor, imaginando-se um corpo que absorve totalmente a radiação incidente, denominado corpo negro, para o qual ter-se-ia:

$$\alpha_N = 1 \quad (3.29)$$

O poder emissivo de um corpo negro é dado pela seguinte equação, obtida por Stefan e por Boltzmann:

$$E_N = \sigma T^4 \quad (3.30)$$

onde a constante σ vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Imagine-se, agora, dois corpos afastados da vizinhança e posicionados de forma tal que estejam unicamente trocando calor entre si por radiação. Nestas condições, alcançando o equilíbrio, a

quantidade de energia absorvida por um deles é igual à emitida pelo mesmo, isto é:

$$A_1 \cdot \alpha_1 \cdot R = A_1 \cdot E_1 \quad (3.31)$$

$$A_2 \cdot \alpha_2 \cdot R = A_2 \cdot E_2 \quad (3.32)$$

onde A_1 e A_2 são as áreas dos dois corpos respectivamente.

Fazendo-se o quociente membro a membro da equação 3.31 pela 3.32 tem-se:

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} \quad (3.33)$$

que é denominada Lei de Kirchhoff.

O valor máximo de E ocorre para o valor máximo de α . Desta forma o poder emissivo de qualquer corpo é inferior ao do negro ($\alpha_N = 1$), sendo dado por:

$$E = \epsilon \cdot E_N \quad (3.34)$$

onde ϵ é denominado emissividade.

Como para o corpo negro $\alpha_N = 1$ tem-se pela equação (3.33) que:

$$\epsilon = \frac{E}{E_N} = \frac{\alpha}{1} = \alpha \quad (3.35)$$

Portanto pode-se concluir que, no equilíbrio térmico, a absortividade e a emissividade de um corpo são iguais ou, em outras palavras, um corpo bom absorvedor de energia é também um bom emissor de radiações.

Para exemplificar são mostrados na tabela 3.3 alguns valores de emissividade para diversos materiais, em relação a dois comprimentos de onda, um relativo a radiações de baixa frequência (grandes comprimentos de onda), características de baixas temperaturas, e o outro para radiações de alta frequência, características de altas temperaturas.

MATERIAL DA SUPERFÍCIE	E M I S S I V I D A D E ϵ	
	a temperatura ambiente ($9,5 \mu\text{m}$)	a luz solar ($0,6 \mu\text{m}$)
Telhas de alumínio	0,22	0,3
Metal polido	0,06	0,45
Aço galvanizado	0,25	0,66
Ferrugem	0,96	0,89
Asfalto	0,93	0,93
Tijolo	0,93	0,7
Pintura vermelha	0,96	0,74
Pintura branca	0,95	0,18

Tabela 3.3 - Emissividade de alguns materiais a temperatura ambiente (baixa frequência) e a luz solar (alta frequência).
[FONTE: LANDI, 1977.]

Observa-se que um metal polido, inserido dentro de uma habitação em condições normais de temperatura, e onde as radiações que o atingem são as provenientes das vedações internas, dos móveis e revestimentos, radiações estas de grande comprimento de onda, comporta-se como um mal emissor e, considerando-se um equilíbrio térmico, como um mal absorvedor de energia (Lei de Kirchhoff), tanto que da tabela 3.3 extrai-se $\epsilon = 0,06$. No caso de este mesmo metal estar submetido a radiações solares, tem-se um acentuado

crescimento de absorvidade e emissividade do metal já que, conforme a tabela, chega-se a $\epsilon = 0,45$. No caso da ocorrência de um incêndio no ambiente a emissividade seria ainda maior, sendo ambas as situações caracterizadas por ondas de alta frequência, especialmente no caso do incêndio.

Resta analisar o balanço da energia trocada por radiação entre dois corpos reais C_1 e C_2 , de tamanho e forma definidos, em uma situação na qual possam interagir ("enxergar-se" um ao outro), durante um certo intervalo de tempo.

No caso ideal de dois corpos infinitos dispostos de tal forma que troquem calor por radiação unicamente entre si, durante um intervalo de tempo Δt , o balanço de energia por unidade de área, fazendo-se uso das equações (3.30) e (3.34), seria:

$$\frac{Q}{A} \langle 1 \rightarrow 2 \rangle = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \Delta t \quad (3.36)$$

Considerando-se que um dos corpos, o C_2 , seja finito em relação a C_1 (analogia com um componente metálico inserido num ambiente em chamas), apenas uma parcela da energia que sai de C_1 chega a C_2 . Para representar esta fração de energia que atinge o corpo criou-se o denominado "fator de forma" (F), que depende unicamente de parâmetros geométricos.

A quantidade de energia recebida pelo corpo C_2 , de área A_2 , usando o fator de forma, será:

$$Q \langle 1 \rightarrow 2 \rangle = \sigma \cdot \epsilon \cdot F \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \Delta t \quad (3.37)$$

que representa a energia líquida recebida de C_1 pelo corpo C_2 durante o intervalo de tempo Δt .

3.3. COMBUSTÃO DOS MATERIAIS EM UM INCÊNDIO

A combustão é uma reação extremamente complexa, a qual pode no entanto ser considerada preliminarmente como uma série de reações de oxi-redução que, dentro de condições propícias, se processam de forma bastante violenta.

Nas reações de oxi-redução ocorrem transferências de elétrons entre os elementos envolvidos. Assim é que, na reação de combustão de um hidrocarboneto como o acetileno, tem-se:

O carbono tem seu número de oxidação elevado de -1 para +4 enquanto o do oxigênio passa de zero a -2; o carbono oxida-se (cede elétrons) ao passo que o oxigênio reduz-se (recebe elétrons).

A combustão de uma substância é, como regra geral, composta de inúmeras reações intermediárias, num processo bem menos simplificado do que o ilustrado acima (equação 3.38).

O fogo pode ser considerado como uma cadeia de oxi-redução que se processa com rapidez gerando calor e luz.

O agente oxidante é, na grande maioria das vezes, o oxigênio do ar, também denominado comburente. O combustível, isto é, a substância

que gerará o calor, trata-se do agente redutor, ou ainda, da substância que é oxidada na reação.

Observe-se que a oxidação de substâncias ocorre continuamente na natureza, a velocidades muitas vezes imperceptíveis a curtos intervalos de tempo; para que se caracterize uma combustão, as velocidades envolvidas devem ser bastante significativas, o que leva à necessidade de condições que propiciem o fenômeno em cadeia: calor necessário para conduzir o material até sua temperatura de ignição, além de uma fonte de ignição.

De um modo geral as reações de combustão dão-se na fase gasosa. Se o combustível é líquido ele evapora e a reação ocorre entre o vapor do líquido e o oxigênio. Na grande parte dos combustíveis sólidos, a parcela mais importante da combustão é a que se relaciona à queima dos gases (combustão flamejante) que se originaram da destilação dos constituintes voláteis do material sólido (pirólise); a parcela em geral menos significativa é a que se relaciona à combustão do sólido restante propriamente dito, como por exemplo, o carvão, onde a reação se dá na interface sólido-gás (combustão ardente, ou sem chamas).

Para que as chamas possam se propagar efetivamente numa mistura combustível-comburente existe a exigência de que a composição apresente-se dentro de certos limites, denominados limites de inflamabilidade. Fora desses limites a chama iniciada num ponto se propaga por curta distância e se extingue.

Além da restrição quanto à composição tem-se exigências quanto à temperatura do combustível para que a chama não se extinga. Chama-se ponto de fulgor à mínima temperatura em que os vapores do

combustível entram em combustão na presença de uma chama, sendo que, no entanto, a combustão cessa ao extinguir-se esta chama inicial. Chama-se, finalmente, ponto de ignição à mínima temperatura para que, nas mesmas condições, os vapores entrem em combustão contínua.

O fenômeno da combustão pode ser vislumbrado de uma maneira genérica através da figura 3.16. O aparecimento de uma chama inicial, provocada por exemplo por um curto-circuito, principia a destilação do combustível sólido gerando gases que, ao se misturarem com o oxigênio numa proporção dentro dos limites de inflamabilidade criam uma mistura inflamável que vai se aquecendo até atingir o ponto de fulgor. Neste instante a chama inicial pode provocar a ignição da mistura, gerando reações exotérmicas que retro-alimentam o processo.

Figura 3.16 - O fenômeno da combustão.
[FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

Como visto anteriormente, a combustão deve ser entendida como uma reação altamente exotérmica. Na análise do fenômeno do incêndio mostra-se de grande interesse o conhecimento da energia liberada durante sua ocorrência. Sabe-se ainda que, na combustão de mesmas

quantidades de materiais distintos, a energia total liberada é diferente.

Dentro deste contexto surge a necessidade de quantificar o poder calorífico dos materiais existentes nos edifícios, isto é, a energia térmica total por kg de massa que pode ser liberada na combustão completa, de cada material. A tabela 3.4 exemplifica alguns valores potenciais [segundo Landi, 1987].

material	poder calorífico (MJ/kg)
madeira dura, papel	16,8
madeira mole	18,9
aglomerado de madeira	6,3
PVC	20,9
resina fenólica	25,1
gasolina, óleo diesel	44,0
borracha	33,4
roupas	18,9

Tabela 3.4 - Poder calorífico de alguns materiais.
[FONTE: LANDI, 1987.]

Um outro conceito, fundamental no tratamento das questões relativas ao incêndio em edifícios, é o de potencial calorífico ("fire load" nos países de língua inglesa). Este conceito foi desenvolvido pelo "National Bureau of Standards" - NBS (EUA) na década de vinte, e apresentado em publicação da NFPA, por Ingberg, em 1928 [segundo relata a American Society for Testing Materials - ASTM, no texto de 1983 da norma E-119]. O potencial calorífico é definido para um

determinado ambiente de um edifício como o conteúdo energético correspondente à energia térmica total potencialmente liberada no ambiente, pela eventualidade da combustão total dos materiais nele contidos. Portanto a unidade internacional para esta variável seria J/m² ou MJ/m², mas é comumente expresso em kg de madeira por m² de piso, por razões históricas.

Se se chamar C_i o poder calorífico de cada material de massa m_i , contido em um ambiente, ter-se-á para o potencial calorífico deste ambiente:

$$W = \frac{\sum_i m_i \cdot C_i}{A} \quad (3.39)$$

ou, em peso equivalente em madeira:

$$W = \frac{\sum_i m_i \cdot C_i}{C_{\text{MADEIRA}} \cdot A} \quad (3.40)$$

onde a área A é geralmente a área do piso do ambiente (na Suécia, segundo relata Rosso em seu trabalho de 1975, utiliza-se a área total das superfícies delimitadoras do ambiente, incluindo-se portanto paredes e forros além do piso).

Nos materiais que contribuem para a totalização do potencial calorífico em um ambiente incluem-se os elementos de construção combustíveis, tais como revestimentos de pisos, paredes e forros, divisórias, esquadrias, além de todos os elementos de conteúdo: peças de mobiliário, elementos de decoração, livros e papéis em geral, peças de vestuário e roupa de cama e mesa, alimentos, estoques os mais diversos, apenas para citar aqueles existentes em edifícios não industriais. O potencial calorífico de um edifício é

um parâmetro fundamental para o estudo da sua segurança em caso de incêndio; será visto mais adiante como é usado na previsão da duração de um incêndio.

3.4. A DURAÇÃO E A SEVERIDADE DOS INCÊNDIOS

3.4.1. Curva Tempo-Temperatura do Incêndio

Segundo Landi [1987], pode-se definir um incêndio como sendo a ocorrência da combustão dos materiais de uma maneira que foge ao controle corriqueiro e numa extensão incomum, de forma a atingir e por em risco vidas e bens.

Um incêndio real, ao ocorrer em um edifício, possui segundo Lie [1972] três fases características. As fases do incêndio real podem ser visualizadas na figura 3.17, onde se representou o desenvolvimento das temperaturas ao longo de sua duração. São elas denominadas:

- 1ª) fase inicial de elevação da temperatura;
- 2ª) fase de propagação generalizada;
- 3ª) fase de redução da temperatura e extinção.

Assim, a primeira fase se inicia quando, por um motivo qualquer, se provoca a ignição de um combustível. A quantidade de calor gerado, e conseqüentemente a variação da temperatura do ambiente, é pequena na medida em que se tem pouco combustível queimando. A alimentação da reação através do oxigênio é ainda baixa em função de se ter, como regra geral, as janelas fechadas e as correntes de convecção ainda relativamente brandas.

O calor gerado no foco do incêndio vai servindo principalmente para o aquecimento dos outros materiais constituintes do ambiente, que vão paulatinamente se aproximando de sua temperatura de ignição.

Este processo vai se desenvolvendo até o ponto em que, tendo havido um considerável desprendimento de gases combustíveis a partir dos materiais sólidos e estando estes já aquecidos o suficiente, esteja faltando unicamente a presença de oxigênio em quantidade apropriada para deflagrar um incêndio generalizado. É o que acontece quando, estando o ambiente já a temperatura da ordem de 100°C , os vidros estouram permitindo um farto acesso de oxigênio. Os gases combustíveis (em geral hidrocarbonetos) que se acumularam em certas regiões na forma de bolsões, iniciam uma violenta combustão que pode se dar inclusive na forma de explosões, e a temperatura então cresce rapidamente, até a temperatura de 400°C a 600°C , em que a maioria dos materiais sofre combustão espontânea (Lie [1972] cita o valor de 525°C para materiais celulósicos).

Figura 3.17 - Curva Temperatura - Tempo representativa de um incêndio.
[FONTE: LIE, 1972.]

Ocorre pois a inflamação súbita generalizada (o denominado "flash-over"), caracterizando o início da 2ª fase do incêndio. Estudos experimentais citados por Lie [1972], mostraram que o "flash-over" depende de vários fatores como a natureza dos materiais envolvidos em um incêndio, tamanho do compartimento e ventilação do mesmo, entre outros, mas que ocorre em grande parte dos casos, e após um período de tempo de 5 a 20 minutos decorridos do início do incêndio. Segundo publicação da NFPA [1983], é a partir da ocorrência do "flash-over" que pode acontecer a ruptura de elementos estruturais.

Após a queima de parte considerável do combustível, a energia que vai sendo liberada nas combustões restantes passa a não fornecer energia suficiente para contrabalançar o calor perdido para o ambiente externo; desta forma passa a ocorrer uma queda da temperatura, que caracteriza a terceira fase do fenômeno. Os gases liberados na pirólise já foram praticamente consumidos restando ainda a parte sólida dos materiais, cuja combustão é bastante lenta, podendo demandar alguns dias [segundo Landi, 1987].

Malhotra [1982], e também ASTM [1983], NFPA [1983] e AISI [1981] fazem breves históricos acerca do desenvolvimento científico e tecnológico voltado para a segurança estrutural dos edifícios incendiados. A necessidade de conhecer melhor o comportamento do incêndio, dada a notória dificuldade em evitá-lo ou, quando ocorrido, minimizar suas conseqüências, motivou várias instituições do mundo inteiro a investir em programas de pesquisa. Tais programas exibiam certa intensidade nos Estados Unidos por volta de 1920, quando já existiam normas para ensaio em laboratório segundo condições padronizadas de exposição (em fornos apropriados eram

colocadas partes estruturais de um edifício). Trata-se do chamado ensaio de incêndio normalizado. Foram também empreendidas pesquisas, naquela mesma época nos EUA e mais tarde em outros países, que visavam obter dados que complementassem os resultados dos ensaios normalizados, aproximando-se mais das condições correspondentes ao incêndio real: os ensaios com incêndios naturais, incêndios provocados no interior de compartimentos edificados especialmente para esta finalidade, sob condições que simulam razoavelmente o real. Assim é que a conceituação do fenômeno foi se tornando mais e mais completa, embora ainda hoje (1989) reste muito por investigar e conhecer, ou, pelo menos, conhecer melhor.

Comprova-se que um incêndio, em função do calor liberado na combustão dos materiais, cria uma convecção dos gases: o ar quente tende a subir, procurando as regiões mais altas do recinto, enquanto o ar frio tende a substituí-lo nas regiões mais baixas. É assim que, no caso da existência de uma abertura comunicando os meios interno e externo, o ar frio tenderia a entrar pelas regiões inferiores enquanto o ar quente deixaria o ambiente pelas camadas superiores do vão (figura 3.18).

Observe-se que as quantidades de ar necessárias à ocorrência da combustão completa dos materiais são bastante elevadas. Para uma visualização quantitativa destes montantes, seja o caso de um compartimento de 7 m x 10 m em planta e com pé-direito de 3 m (210 m³). Considere-se ainda tratar-se de um ambiente cujo potencial calorífico seja de 40 kg/m³ (equivalente em madeira).

Considerando-se ainda que, em média, para a combustão de 1 kg de madeira o oxigênio necessário só consegue ser obtido a partir de 5

m^3 de ar, chega-se à quantidade para a combustão total dos materiais de 14.000 m^3 de ar. Ora, essa quantidade é quase 70 vezes o volume de ar do recinto.

Figura 3.18 - As trocas gasosas com o meio externo na ocorrência de um incêndio.
[FONTE: LANDI, 1987.]

Esta sensível dependência quanto à ventilação reflete-se diretamente nas características do incêndio. É assim que, sendo pequena a porcentagem das aberturas do ambiente, o fator limitante do fenômeno é o oxigênio (vazão de ar que entra); quando existe uma porcentagem alta de aberturas o oxigênio não falta às reações, apresentando-se a quantidade de combustível como fator limitante do processo. A investigação deste fenômeno iniciou-se no Japão, na década de cinquenta. O trabalho desenvolvido por Fujita teve continuidade com Kawagoe e Sekine ao longo dos anos sessenta. Kawagoe demonstrou a relação entre a taxa de combustão (kg de combustível por segundo) e a área e dimensão vertical das aberturas [segundo relatado por Malhotra, 1982].

Segundo Malhotra, foi em 1967 que Thomas, Heselden e Law observaram a existência de dois possíveis regimes para a ocorrência de

incêndios. Chegou-se então a uma classificação dos incêndios, em função das situações descritas acima, em dois tipos:

- incêndios controlados pelo combustível;
- incêndios controlados pela ventilação.

No primeiro caso tem-se, como caracterização geral, uma presença acentuada de fumaça (falta oxigênio para a combustão acelerada dos gases originados na pirólise), uma quantidade não tão acentuada de chamas e a ocorrência de temperaturas menos elevadas ao longo de um período maior de tempo.

No segundo caso, o controle é exercido na verdade pela superfície exposta dos combustíveis; a abundância de oxigênio implica em rápido consumo dos materiais pelo fogo, e resultam tempos de duração mais curtos para o incêndio, em face ao caso anterior.

Grande parte dos avanços significativos para a compreensão do fenômeno foram possíveis a partir de um programa do "International Council for Building Research Studies and Documentation" - CIB, que fomentou um programa de pesquisas envolvendo simultaneamente oito laboratórios de diferentes países do mundo [Malhotra], e os resultados e descobertas foram apresentados por Heselden e Law em simpósio de 1971.

Um parâmetro importante para a análise da segurança de um edifício é a previsão da duração do incêndio em um ambiente, o que foi alvo do trabalho realizado por diversos pesquisadores, cujos resultados serão discutidos mais adiante.

3.4.2. A Curva Normalizada de Incêndio e o Conceito de Severidade

A necessidade de se estudar comparativamente o comportamento em caso de incêndio, dos materiais e elementos construtivos, levou à definição de uma curva normalizada que pudesse servir de padrão para avaliações de desempenho em ensaios realizados em laboratório (nos EUA, introduzida pela ASTM em 1918 e até hoje inalterada).

As curvas normalizadas representam condições bastante severas, podendo servir para análise do comportamento dos materiais em situações bastante graves. Observe-se que podem ocorrer incêndios que alcancem temperaturas mais altas que as indicadas por elas, como por exemplo em depósitos de combustíveis líquidos (ver figura 3.19); isto, no entanto, não diminui o valor da normalização, na medida em que se conseguiu um padrão de referência internacional, além do que para condições de combustão como as citadas existem normas específicas.

Verifica-se que as curvas temperatura-tempo de incêndios naturais são as mais variadas possíveis (figura 3.19), dependendo entre outras coisas do tipo de combustível em estudo, do potencial calorífico do ambiente e das características dos elementos de vedação.

(a)

(b)

$$W_1 < W_2 < W_3 < W_4$$

Figura 3.19 - Curvas temperatura-tempo para incêndios de vários tipos: a) combustíveis distintos; b) potenciais caloríficos distintos para um mesmo combustível. [FONTE: HART, HENN & SONTAG, 1976.]

As curvas normalizadas são obtidas por equações matemáticas, geralmente logarítmicas, e podem variar ligeiramente de país para país, pois são dadas por normas próprias. É verdade porém que, a partir de 1975, quando foi publicada a norma da ISO (International Organization for Standardization), nº R-834, algumas delas passaram a adotar a curva ISO proposta - inclusive a ABNT. As diferentes curvas adotadas por alguns desses países podem ser visualizadas no gráfico da figura 3.20. As diferenças não são muito significativas.

Figura 3.20 - Curvas normalizadas de incêndio segundo várias normas.
[FONTE: AISI, 1981.]

Há muito tempo discute-se a quantificação dos danos potenciais que um incêndio pode causar aos materiais, e aos elementos estruturais de um edifício, o que se denomina estudo da severidade do incêndio.

A duração do fenômeno foi apontada durante muito tempo como quantificador único da severidade. Acreditava-se, e muitos códigos de construção fazem ainda hoje uso deste conceito, que um incêndio seria mais severo que outro na mesma medida em que durasse mais que ele.

A primeira idéia intuitiva quanto à definição da severidade nos leva a associá-la ao potencial calorífico existente no ambiente. No caso de um incêndio, esse potencial seria convertido em energia calorífica; então, como a transmissão de calor é proporcional à diferença de temperaturas e ao período de tempo durante o qual existe a troca de calor, a manutenção de uma temperatura do ambiente T por um período D seria tão danosa quanto uma situação onde se mantivesse uma temperatura $T/2$ durante um intervalo de tempo $2D$.

É dentro deste espírito que ainda hoje se define severidade de um incêndio a partir da quantificação da área existente sob o gráfico do desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo (figura 3.21).

Área 1 = Área 2 significa mesma severidade para os dois incêndios.

Figura 3.21 - Definição de severidade em função da energia liberada no fenômeno.
[FONTE: AISI, 1981.]

Outro aspecto de interesse, desde o início, foi o questionamento acerca da relação entre as durações reais dos incêndios e a duração do ensaio, em que a severidade aparece como possível elo de ligação entre o real e a curva normalizada.

Se dois incêndios se desenvolvessem conforme a curva normalizada, aquele que durasse mais apresentaria uma maior energia produzida (área sob a curva $T = f(t)$). Nos incêndios reais, no entanto, a curva de desenvolvimento das temperaturas, como visto, varia bastante de um incêndio para outro. Mais que isto, mesmo o conceito de se estimar a severidade de um incêndio como o intervalo de tempo que definisse na curva normalizada de incêndio uma energia liberada

equivalente à do fenômeno em análise é também falha. É fácil perceber este fato: a submissão por 1 hora à temperatura de 800 °C representa para uma estrutura de aço condição muito mais severa que a exposição por 2 horas a 400 °C, já que, sendo bom condutor de calor, neste segundo caso o aço poderia se aquecer rapidamente até temperaturas bem mais altas, acima dos 550 °C, em que se considera atingir uma perda de resistência do material que pode levar ao provável colapso destas estruturas (a discussão sobre qual a temperatura em que isso ocorre será melhor detalhada no capítulo 4).

Mais precisamente, a partir da estimativa da área sob o gráfico correspondente ao incêndio real determina-se o intervalo de tempo t que defina uma área equivalente sob o gráfico da curva normalizada (figura 3.22). Diz-se que a severidade deste incêndio é de t_e minutos.

Figura 3.22 - Definição da severidade de um incêndio, por equivalência com um tempo de incêndio normalizado. [FONTE: AISI, 1981.]

Alguns pesquisadores, especialmente Harmathy [1976], têm considerado que, para se avaliar a severidade de um incêndio em certo ambiente, deve-se analisar três parâmetros:

- a estimativa da sua duração;
- a previsão da temperatura máxima alcançada;
- o fluxo de calor que se estabelece pelos elementos do contorno do ambiente.

E diversos trabalhos científicos, apoiados inclusive em ensaios em escala natural, têm demonstrado que a severidade depende de outros fatores dentre os quais: dimensões do ambiente, dimensões dos vãos de acesso de ar, temperatura máxima atingida e propriedades térmicas dos componentes de contorno. Portanto, um dos fatores que se deve levar em consideração na definição da severidade prende-se às características particulares de cada material e sua aplicação, isto é, a forma como o material é afetado pelo incêndio. Para o aço estrutural, "a aceitação de que a severidade do incêndio pode ser quantificada como sendo a área abaixo da curva tempo-temperatura não considera o efeito da temperatura nos materiais, e o efeito da temperatura máxima atingida é muito mais significativo do que a duração do incêndio", como afirma a publicação do "American Iron and Steel Institute" - AISI [1981].

Para que essa distinção seja adequadamente levada em conta na definição de severidade, estabelece-se para cada material uma "linha de base" correspondente (conforme ilustrado na figura 3.22). Landi [1987] cita o valor de 300 °C para adoção desta linha, no caso de elementos estruturais.

Segundo o AISI [1981], a linha de base mais "recentemente proposta", pelo comitê da ISO que trata dos ensaios de incêndio, para o aço estrutural corresponderia à temperatura de 538 °C (ou 1000 °F).

Resta ainda comentar que, mesmo que dois incêndios ocorram em dois ambientes de mesmas características geométricas, de suprimento de oxigênio e de quantidade, tipo e disposição de materiais combustíveis, a severidade para os componentes estruturais pode variar graças à participação dos elementos de vedação que delimitam o ambiente.

Existe uma influência sobre o isolamento do calor gerado, que pode acumular-se mais ou acumular-se menos no interior do ambiente; se dois compartimentos com iguais características (inclusive potencial calorífico) com exceção da condutibilidade térmica dos revestimentos internos, considerados incombustíveis, fossem submetidos a incêndios, aquele que apresentasse condutibilidade térmica menor do contorno teria uma ocorrência de temperaturas maiores, devido à menor perda de calor. Este fato tem inclusive sido comprovado em ensaios com incêndios naturais [Latham et alii, 1987].

Assim é que, quando o revestimento for constituído por um material de maior capacidade de isolação térmica, como as temperaturas alcançadas dentro do ambiente serão maiores, a severidade para a estrutura será maior. Como ilustração do que foi dito acima, tem-se o gráfico tempo-temperatura mostrado na figura 3.23.

Figura 3.23 - Temperaturas atingidas em ambientes incendiados com diferentes características térmicas das vedações, mostrando a influência do isolamento térmico das superfícies de contorno.
[FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

E a temperatura máxima atingida no material da estrutura, que depende diretamente do desenvolvimento de temperaturas no ambiente incendiado, é um parâmetro que pode servir como bom quantificador de severidade quando se está preocupado com os efeitos sobre a estrutura do edifício. Malhotra e Cooke [1982], neste sentido, consideraram "tempo equivalente de duração do incêndio" o tempo necessário, no ensaio normalizado, para o aço atingir um valor igual ao máximo de temperatura atingido, pelo mesmo elemento de aço, em um incêndio decorrente de condições naturais de combustão, simuladas em experimentos realizados na "Fire Research Station" - FRS (Inglaterra).

A submissão do aço a este tempo de ensaio, definido como acima, produziria no material dano idêntico ao produzido no outro caso, pois as propriedades mecânicas do material atingiriam uma mesma deterioração pelo aquecimento. Esta forma de encarar a severidade do incêndio parece ser aquela que mais se aproxima de retratar fielmente os seus efeitos sobre a estrutura de aço. O conceito é ilustrado no gráfico da figura 3.24.

Figura 3.24 - Tempo equivalente de duração do incêndio para elementos estruturais de aço.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

3.4.3. Duração do Incêndio

Será analisada com mais cuidado a estimativa da duração do fenômeno, que é o parâmetro mais utilizado ainda hoje em todo o mundo no processo convencional de verificação da resistência ao fogo dos componentes estruturais. Este consiste basicamente em, determinando-se a duração do incêndio a ser considerada, verificar através de ensaios se o componente estrutural a ser utilizado, submetido a um aquecimento segundo a curva padrão, resiste a este período de tempo sob condições normais de carregamento e vinculações.

Em publicação da NFPA, em 1928, em função dos resultados de uma série de ensaios com incêndios naturais, Ingberg propôs a seguinte correlação entre a duração do incêndio e a disponibilidade de materiais combustíveis [citado pela ASTM, 1983]:

$$D = 1,2 W \quad (3.41)$$

D = duração do incêndio (min);
 W = potencial calorífico, expresso em massa
 equivalente de madeira por unidade de área
 (kg/m²).

Foi a partir dos ensaios realizados por Ingberg que se definiu severidade do incêndio como diretamente relacionada com o potencial calorífico. Conforme a ASTM relata, Ingberg estabeleceu simplesmente a premissa de que um incêndio com 50 kg de madeira por m² duraria cerca de uma hora. Alguns autores, como Rosso [1975], no entanto, citam o coeficiente 1,3 ao invés de 1,2.

E, segundo o AISI [1981], a expressão de Ingberg aplica-se apenas a incêndios controlados pelo combustível, embora não especificado com exatidão, pois as aberturas eram "reguladas de modo a fornecer o volume de ar suficiente para obter o máximo desenvolvimento do fogo". Segundo a mesma fonte, essa proporcionalidade é válida para potenciais caloríficos do ambiente de até cerca de 150 kg de madeira por m² de piso, a partir do que a relação entre a duração do incêndio e o potencial calorífico assume coeficientes maiores. Para $W > 200$ kg de madeira por m², $t = 1,5 W$.

Landi [1987], por outro lado, faz referência aos pesquisadores Kawagoe e Sekine, que muito tempo depois (década de sessenta), apercebendo-se da influência da ventilação (suprimento de comburente), propuseram a seguinte expressão para a velocidade de combustão dos materiais presentes:

$$R = 5,5 \cdot A_v \cdot (H_v)^{1/2} \quad (3.42)$$

R = velocidade de combustão (kg/min);
 A_v = área das aberturas de ventilação (m²);
 H_v = altura, i.e., dimensão vertical destas aberturas (m).

Kawagoe definiu também o fator de ventilação do ambiente, relacionando alguns parâmetros geométricos do mesmo:

$$F_v = \frac{A_v}{A_t} \cdot (H_v)^{1/2} \quad (3.43)$$

A_t = área total das superfícies de contorno do ambiente.

Os valores típicos de F_v devem se situar entre 0,034 e 0,22.

Tendo-se a quantidade total de combustíveis expressa em kg de madeira equivalente (G), a estimativa da duração é então facilmente obtida:

$$D = \frac{G}{R} \quad (\text{min}) \quad (3.44)$$

$$G = W \cdot A_p$$

A_p = área do piso do ambiente

Rosso [1975] cita o trabalho de M. Law, da "Fire Research Station" - FRS (Inglaterra), que para os incêndios experimentais realizados no programa internacional do CIB, deduziu a seguinte expressão:

$$D = k \cdot \frac{W \cdot A_p}{(A_v \cdot (A_t - A_v))^{1/2}} \quad (\text{min}) \quad (3.45)$$

onde k é um fator associado à distribuição (espaçamento) da carga combustível, que Law mais tarde concluiu ser oportuno adotar igual à unidade ($k = 1$), como valor médio, chegando a:

$$D = \frac{W \cdot A_p}{(A_v \cdot (A_t - A_v))^{1/2}} \quad (\text{min}) \quad (3.46)$$

Com esta expressão, Law pretendeu eliminar a necessidade de distinguir entre regime de controle pela ventilação ou pelo combustível; além disto, observe-se que a altura das aberturas (H_v), ao contrário de em várias outras expressões, não está presente nesta.

Os valores calculados por Law revelam durações em geral maiores que por Kawagoe-Sekine [segundo Rosso, 1975].

Harmathy [1976] deduz expressões para duração de incêndios controlados tanto pela ventilação quanto pelo combustível; mais que isto, fornece uma expressão para delimitar a ocorrência de uma ou outra situação.

Quanto à classificação do incêndio, esta é função do fluxo de ar em relação aos combustíveis disponíveis. Para mobiliário convencional de madeira o limite entre os dois regimes é estabelecido pela expressão:

$$\frac{U_A}{G} = 18,2 \quad (3.47)$$

onde U_A = fluxo de ar em massa (kg/h), sendo estimado por:

$$U_A = 2034 A_v \cdot (H_v)^{1/2} \quad \text{com } A_v \text{ e } H_v \text{ em m}^2. \quad (3.48)$$

Valores de U_A/G superiores a 18,2 representam situações de controle pelo combustível e menores que 18,2, controle pela ventilação. Indica-se abaixo o tempo de duração previsto para o primeiro e o segundo casos respectivamente [conforme Harmathy]:

$$D = 19 \text{ min} \quad (\text{controle pelo combustível}) \quad (3.49)$$

e

$$D = 0,17 \frac{W}{\frac{A_v}{A_p} \cdot (H_v)^{1/2}} \quad (\text{controle pela ventilação}) \quad (3.50)$$

Ainda segundo Harmathy, é possível calcular, simplificadaamente, qual a área de ventilação necessária para que ocorra a transição entre os dois regimes. Esta condição seria expressa por:

$$A_v = \frac{W \cdot A_p}{150} \quad \text{ou} \quad A_v = \frac{G}{150} \quad (3.51)$$

Em outras palavras, para cada 150 kg de madeira, haveria necessidade de 1 m² de ventilação para que não faltasse suprimento de oxigênio à queima do conteúdo combustível. A expressão de Harmathy, para cada situação de ventilação, pode também fornecer o valor limite de potencial calorífico, em torno de qual é verificada a mudança de regime (ver tabela 3.5).

$\frac{A_v}{A_p}$	W (kg/m ²)
1/2	75,0
1/3	50,0
1/4	37,5
1/5	30,0
1/6	25,0
1/8	18,7
1/10	15,0

Tabela 3.5 - Valores de potencial calorífico que correspondem à transição de regime em um incêndio.

Tem-se enfim uma série de expressões, algumas com base experimental e outras teóricas, a maior parte delas baseadas na consideração de materiais combustíveis celulósicos e desenvolvidas sob certas condições particulares que impedem sua utilização

indiscriminadamente. À frente serão desenvolvidos exemplos numéricos.

3.5. POTENCIAL CALORÍFICO NOS AMBIENTES

Estabelecida a relação entre o potencial calorífico contido em um ambiente e a duração e a severidade resultantes de um incêndio que venha a ocorrer nessas condições, surge como necessidade conhecer o potencial calorífico normalmente encontrado em um edifício, para que seja possível prever o comportamento do fenômeno real.

Levantamentos feitos pelo antigo "National Bureau of Standards" - NBS (EUA) demonstraram as variações do conteúdo combustível existente nos edifícios, segundo sua utilização. Para um mesmo edifício, com uma dada utilização (escolas, escritórios, indústrias etc.), o potencial calorífico médio varia ainda dentro de certas faixas, em função da atividade desempenhada em cada ambiente.

Alguns dos resultados apresentados pelo NBS constam da tabela 3.6, transcrita de publicação da NFPA [1983]. Observe-se, para o caso dos escritórios, que a maior parte dos ambientes (59%) contém potencial calorífico entre 0 e 75 kg madeira/m², embora ocorram áreas com conteúdo combustível muito alto em menor porcentagem.

Essas variações relacionam-se com a gama de atividades desempenhadas, que implicam, além de salas de datilografia, por exemplo, em salas de arquivo, depósitos de papéis, materiais de limpeza, etc.

Evidentemente, a quantidade de material combustível existente nos edifícios é influenciada pelos próprios padrões econômicos e

culturais que caracterizam um dado país ou localidade; os dados estatísticos disponíveis quanto a potenciais caloríficos são, porém, aqueles levantados em alguns países desenvolvidos, já que persiste até hoje a necessidade de serem efetuadas investigações desse parâmetro no Brasil. Como agravante, deve-se destacar a grande variabilidade das distribuições encontradas pelas pesquisas efetuadas em vários países, como bem demonstra um gráfico elaborado por Lie [1972], transcrito na figura 3.25.

- 1 - PAÍSES BAIXOS (1963)
- 2 - E.U.A. (1967)
- 3 - E.U.A. - WASHINGTON (1942)
- 4 - JAPÃO (1963)

Figura 3.25 - Distribuições de potencial calorífico obtidas em levantamentos efetuados por vários países.
[FONTE: LIE, 1972.]

ATIVIDADE	PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL	VARIAÇÃO DO CONTEÚDO kg madeira/m ²
INDÚSTRIA DE ARTES GRÁFICAS	37 28 35	0 - 75 75 - 250 250 - 500
PEQUENO ARMAZÉM (DEPÓSITO)	18 51 31	0 - 150 150 - 375 375 - 1285
GRANDE ARMAZÉM COMERCIAL	8 78 14	0 - 25 25 - 75 75 - 200
ESCOLA PÚBLICA DE 1º GRAU	99 1	0 - 75 75 - 375
ESCOLA PÚBLICA (UNIVERSIDADE)	33 64 3	0 - 25 25 - 50 50 - 1280
ESCRITÓRIOS	59 19 22	0 - 75 75 - 150 150 - 430
HOSPITAL	82 17 1	0 - 25 25 - 75 75 - 100
APARTAMENTOS	100	50(médio)

Tabela 3.6 - Potenciais caloríficos nos edifícios - EUA.
[FONTE: NFPA, 1983.]

Um outro conjunto de informações foi obtido em edifícios do Japão, cujos resultados estão mostrados na tabela 3.7.

Especificamente quanto à distribuição em escritórios, os japoneses constataram que o valor médio situou-se em 62 kg/m² (com um desvio padrão de 10,2 kg/m²), conforme mostrado na figura 3.26.

ATIVIDADE	POTENCIAL CALORÍFICO (kg madeira/m ²)		
Lojas	50	-	200
Salas de Aula	20	-	50
Bibliotecas - salas de leitura	50	-	350
Bibliotecas	300	-	600
Escritórios	30	-	150
Hospitais	30	-	60
Apartamentos	40	-	70
Hotéis	25	-	40

Tabela 3.7 - Potenciais caloríficos nos edifícios - Japão.
[FONTE: LANDI, 1987.]

Figura 3.26 - Distribuição do potencial calorífico em edifícios de escritórios (JAPÃO).
[FONTE: LANDI, 1987.]

Estabelecer um "padrão" de potencial calorífico, ou seja, parametrizá-lo em função do tipo de ocupação do edifício, tem sido a postura adotada em muitos códigos de construção, como forma de subsídio às exigências que os mesmos colocam quanto à resistência ao fogo.

A título de ilustração, Rosso [1975] cita a classificação inglesa (de 1928), que estabelecia faixas de potencial calorífico, conforme segue:

Potencial calorífico baixo	:	até 60 kg/m ²	(1 h)
médio	:	60 a 120 kg/m ²	(2 h)
alto	:	120 a 240 kg/m ²	(4 h)

A cada uma dessas faixas era associado um tempo de duração do incêndio a ser considerado para as exigências de resistência ao fogo, em horas (números entre parênteses). A associação simples e direta entre quantidade de combustível e duração do incêndio, e desta última com a resistência ao fogo exigida, porém, pode ser criticada ao se ter em conta o conceito de severidade (conforme visto anteriormente).

A norma alemã DIN 18230, conforme relatado em Hart, Henn & Sontag [1976], por outro lado, possui um método de cálculo para determinação do potencial calorífico a ser considerado no projeto do edifício. O potencial calorífico unitário, que corresponde à

quantidade de calor produzida em um incêndio, por m^2 de ambiente, é dada por:

$$W = \frac{\sum Q_1}{A} \quad (\text{Mcal}/m^2) \quad (3.51)$$

onde:

$Q_1 = G_1 \cdot C_1$ é a quantidade de calor total produzida por cada material (Mcal)

G_1 é a massa total existente de cada material no ambiente (kg)

C_1 é o poder calorífico do material (Mcal/kg)

A é a área do ambiente incendiado (m^2)

O valor considerado para o potencial calorífico unitário é, portanto, um valor médio; entretanto, quando houver uma concentração de combustíveis muito acima da média em uma parte do edifício, a DIN 18230 estabelece a necessidade de se considerar essa região em separado.

Obtido o potencial calorífico unitário, existe uma correção a ser feita, tendo em vista os diferentes comportamentos de cada material durante sua queima. Para que se estabeleça uma correlação entre a curva temperatura-tempo de cada material e a curva normalizada (ISO R-834), o potencial calorífico unitário é multiplicado por um fator "m", obtendo-se o potencial calorífico "ideal":

$$W' = m \cdot W \quad (3.52)$$

sendo:

$$m = \frac{\sum Q_i'}{\sum Q_i} \quad \text{com} \quad Q_i' = m_i \cdot Q_i$$

m_i = fator de correção aplicado a cada material

Os fatores "m" foram obtidos a partir de ensaios de incêndio com vários materiais, e permitem considerar a relação entre volume e superfície de combustível, expressa pela espessura de material (ver tabela 3.8).

Material	Espessura (cm)	Fator m
Papel (folhas)	$d < 1$	1,3
Móveis leves	$1 < d < 4$	1,1
Móveis pesados	$4 < d < 10$	0,9
Vigas de madeira	$10 < d < 20$	0,7
Papel (em rolos)	$d > 20$	0,3
Benzina	-	1,3
óleo combustível	-	1,2

Tabela 3.8 - Fator de correção para o potencial calorífico calculado segundo norma DIN 18230.
[FONTE: HART, HENN & SONTAG, 1976.]

O fator de correção "m" é importante por permitir uma padronização de valores que possa levar ao estabelecimento de exigências de resistência ao fogo coerentes. Isto é observado, por exemplo, quando se atribui fatores que majoram o potencial calorífico de materiais de combustão rápida e intensa como folhas de papel, e minoram o potencial calorífico de materiais de combustão mais lenta (vigas de madeira).

Segundo a publicação de Hart, Henn e Sontag [1976], o cálculo preconizado pela DIN 18230 leva a resultados para o potencial calorífico ideal que se aproximam daqueles obtidos em levantamentos nos edifícios europeus. Os valores encontrados nesses levantamentos citados situaram-se em uma faixa da ordem de 80 a 100 Mcal/m² (ou 20 a 25 kg madeira/m²), para escolas, escritórios e hospitais, com mobiliário de madeira.

3.6. DURAÇÃO ESTIMADA DO INCÊNDIO: EXEMPLOS DE CÁLCULO

Passa-se, a seguir, à determinação da duração de um incêndio, em um certo pavimento, para três casos práticos, indicados na figura 3.27:

- caso 1: edifício comercial com pé-direito de 3 m e fachada-cortina de vidro em todo o perímetro, representando uma situação de controle pelo combustível;
- caso 2: edifício residencial, área de ventilação de 50 m² por pavimento, representando uma situação de controle pela ventilação;
- caso 3: a mesma planta que o caso anterior, porém adotando-se uma área de ventilação menor, totalizando 35 m².

Figura 3.27- Plantas esquemáticas do andar-tipo dos três casos a serem estudados: b) e c) edifícios residenciais; a) edifício comercial.

As equações apresentadas para a determinação da duração do incêndio "D", encontram-se retranscritas abaixo:

(1) equação 3.41

$$\text{Ingberg: } D = 1,2 W$$

(2) equação 3.42 + 3.44

$$\text{Kawagoe: } D = \frac{W}{5,5 \frac{A_v}{A_p} (H_v)^{1/2}}$$

(3) equação 3.46

$$\text{Law: } D = \frac{W \cdot A_p}{(A_v(A_r - A_v))^{1/2}}$$

(4) equação 3.49

$$\text{Harmathy: } D = 19 \text{ min.}$$

(5) equação 3.50

$$\text{Harmathy: } D = 0,17 \frac{W}{\frac{A_v}{A_p} (H_v)^{1/2}}$$

A tabela 3.9 reúne os resultados finais da aplicação destas equações aos casos anteriormente citados compatíveis com sua utilização, podendo ser observada a duração de incêndios em um pavimento para potenciais caloríficos variando de 10 a 100 kg de madeira por m² de piso. Vê-se que para o caso 1 existe grande discordância entre as expressões aplicáveis (Ingberg, Law e Harmathy). Para os casos 2 e 3, ocorre uma maior similaridade de resultados, porém.

equação n ^o W	caso 1			caso 2			caso 3		
	1	3	4,5	2	3	4,5	2	3	4,5
10	--	11	19	12	16	19	17	19	19
20	24	21	19	23	33	21	33	39	31
30	36	32	19	35	49	32	50	58	46
40	48	43	19	46	65	43	66	77	61
50	60	53	19	58	82	53	83	97	77
60	72	64	19	70	98	64	100	116	92
70	84	75	19	81	114	75	116	135	107
80	96	85	19	93	131	86	133	155	122
90	108	96	20	104	147	96	149	174	138
100	120	107	22	116	163	107	166	163	153

Tabela 3.9 - Durações do incêndio em um pavimento (em minutos), calculadas para os exemplos da figura 3.27.

As expressões foram utilizadas basicamente dentro de seus domínios de aplicação, embora seja possível que, por falta de dados quanto à sua aplicabilidade, tenham sido obtidos alguns resultados não válidos. Assim, as conclusões devem ser encaradas com alguma reserva quanto à sua exatidão.

A título de aplicação dos números indicados na tabela 3.9, pode-se tomar os valores de potenciais caloríficos citados para escritórios: enquanto os alemães indicam valores da ordem de 25 kg de madeira/m², o valor médio para escritórios japoneses alcança 62 kg/m², e em 60% dos ambientes existentes nos escritórios americanos, não se supera os 75 kg/m².

Tomando o mais alto valor dentre eles (75 kg/m^2), uma interpolação entre os valores indicados na tabela 3.9 nos levaria a durações de 19 a 140 minutos para os vários casos, o que se por um lado demonstra a variabilidade dos resultados obtidos pelos diversos pesquisadores a partir de variadas hipóteses, por outro indica que, para situações de ocupação normal de edifícios, o período de duração de um incêndio não deve ultrapassar muito as 2 horas.

Por outro lado, quanto à equivalência entre duração estimada do incêndio e tempo de ensaio normalizado, Lie [1972], baseando-se em curvas tempo-temperatura de incêndios naturais, medidas por Kawagoe e Sekine para vários fatores de ventilação, apresentou um gráfico que estabelece a relação entre duração e tempo de ensaio nas várias situações (reproduzido na figura 3.28).

Figura 3.28 - Relações entre duração estimada do incêndio e tempo equivalente de ensaio normalizado, para várias condições de ventilação. [FONTE: LIE, 1972.]

Conforme se pode observar na figura 3.28, segundo o gráfico de Lie, para fatores de ventilação em torno de 0,03 os dois períodos de tempo praticamente se equivalem. Para fatores de ventilação mais altos, o que significa grandes aberturas, no entanto, os tempos de ensaio normalizado equivalentes tornam-se proporcionalmente bem maiores (no caso 1 da figura 3.27, $F_v = 0,312$ leva a t da ordem de 3,5 D), o que pode traduzir a realidade em termos da severidade transmitida aos elementos construtivos contidos no ambiente, pois as temperaturas alcançadas pelos materiais seriam possivelmente maiores naquelas condições de maior ventilação, embora por menor período.

Para melhor entendimento das dúvidas levantadas quanto à validade de se calcular a citada equivalência, apresenta-se na figura 3.29 resultados experimentais obtidos mais tarde (1976) por Lie e Stanzak para as curvas relativas a diferentes condições de ventilação e mesmo potencial calorífico [reproduzidos pelo AISI, 1981]. Nestas curvas pode-se observar que o calor transmitido aos elementos tende a diminuir com a ventilação, já que as áreas sob as curvas de maior ventilação seriam proporcionalmente menores; por outro lado, o incêndio chega a temperaturas mais altas que, porém, rápido diminuem.

Figura 3.29 - Curvas de incêndios com diferentes condições de ventilação e mesmo potencial calorífico (20 kg de madeira por m²).
 [FONTE: AISI, 1981.]

3.7. O INCÊNDIO E OS MATERIAIS DO EDIFÍCIO

3.7.1. Classificação dos Materiais Segundo seu Comportamento ao Fogo: Comportamento do Aço

Os efeitos do incêndio manifestam-se muitas vezes sem haver um contato direto com as chamas, mas pela elevação intensa de temperaturas, além do que os gases gerados no fenômeno podem ser altamente danosos. Cumpre analisar um pouco a interação dos materiais existentes no edifício com o incêndio, seja quanto à sua propagação, seja quanto à resistência à sua ocorrência ou ainda quanto à geração de fumaça ou gases.

Segundo Landi [1987], a primeira tentativa de classificação dos materiais parte sempre da idéia de dividi-los em: combustíveis ou incombustíveis. A dificuldade inicial quanto a este procedimento seria a definição de uma temperatura de referência para a análise, já se adotou o valor de 1250 °C, por ser uma temperatura dificilmente alcançada em um incêndio, e para a qual os materiais tradicionais de construção (pedra, aço, tijolo, areia, concreto) não entram em combustão. O mesmo autor cita uma segunda classificação, que versaria acerca da inflamabilidade dos materiais, isto é, a maior ou menor facilidade que ele possui de entrar em combustão sob o efeito da elevação de temperatura. No entanto, discute-se até que ponto esta definição é importante na medida em que, apesar de ininflamável e incombustível, um material pode sofrer muito com a elevação da temperatura, como é o caso do aço, que a temperaturas bastante inferiores aos 1250 °C perde muito de sua resistência mecânica.

Para elementos estruturais, por causa de sua função de suporte de cargas (além de seu próprio peso, esforços de utilização ou acidentais), as alterações produzidas pelo fogo no material podem levar à perda de função. Os materiais estruturais perdem resistência mecânica a altas temperaturas. Porém, em função de coeficientes de segurança e outros fatores decorrentes dos processos de cálculo estrutural, as peças normalmente resistem até uma certa temperatura, apesar do acentuado decréscimo de resistência do material que as constitui. Conforme Lie [1972], "temperatura crítica de um elemento estrutural carregado, ou de seus componentes, é aquela temperatura que, alcançada pelo mesmo, significaria uma perda tão grande de sua capacidade de suporte que levaria à sua ruína."

Segundo Berto [1988] e Malhotra [1982], em geral considera-se como temperatura crítica para os aços estruturais comumente empregados o valor de 550 °C - segundo a ASTM, 538 °C ou 1000 °F - já que a este estágio de aquecimento corresponde uma perda de aproximadamente 50% da resistência mecânica, no que tange à tensão de escoamento e ao módulo de elasticidade (em relação a seus valores a temperaturas ambientes)^m. A variação da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade com a temperatura podem ser visualizados na figura 3.30. O decréscimo verificado na tensão de escoamento significa uma redução do limite de carga possível para as peças, pela perda de capacidade resistente do material, a que se somam as maiores deformações resultantes do menor módulo de elasticidade. No capítulo 4 serão abordadas as conseqüências disto para a estrutura.

Figura 3.30 - Variação das propriedades mecânicas do aço ASTM A-36 com a temperatura proporcionalmente em relação aos valores a temperatura ambiente (equação simplificada, ajustada a partir de ensaios de tração). [FONTE: BERTO, 1988.]

3 - Observe-se que, no conceito de severidade definido pela figura 3.22, a temperatura crítica coincidiria com a linha de base, para o aço.

Esta sensibilidade em relação à temperatura leva à obrigatoriedade, em muitas das vezes, de se proteger a estrutura de aço contra a ocorrência de incêndio (o problema da necessidade de proteção voltará a ser abordado mais à frente).

Deve-se observar que a perda de resistência mecânica ocorre com todos os materiais de construção e, no caso de materiais metálicos é função de sua composição química e estrutura cristalina. A composição de um aço carbono como os empregados na construção civil apresenta de 0,15 a 0,50 % de carbono, 0,045 a 0,080 % de fósforo, 0,045 a 0,050 % de enxôfre, e 0,007 a 0,009 % de nitrogênio [segundo Scheer, 1987].

Recentemente, no periódico "Nippon Steel News" [março-abril de 1989], a Nippon Steel Corporation divulgou a entrada em mercado de um aço estrutural fogo-resistente para emprego na construção civil, cujo comportamento a altas temperaturas é sensivelmente superior aos aços normalmente utilizados, especialmente até os 600 °C, quando ainda retém cerca de 75 % da resistência a temperatura ambiente (ver figura 3.31). Nas mesmas condições, este novo aço atingiria a temperatura crítica então em torno dos 650 °C (contra os 550 °C normais). A Nippon Steel afirma que isto foi possível pela adição de algo como 1 % de cromo, níquel e molibdênio, e ainda que o novo aço possui boa soldabilidade.

O que foi apresentado pela Nippon Steel Corporation não é absolutamente novidade na indústria siderúrgica, dentro do universo dos vários aços-liga e não-ligados. Segundo informações fornecidas pela Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, o aço em questão deve possuir teores adequados de molibdênio, nióbio, titânio e outros

metais que formam carbonetos em solução, que se interpõem entre as moléculas de ferro de forma a dificultar o escorregamento dos planos cristalinos e alteram favoravelmente a resistência mecânica a altas temperaturas. Porém, também segundo a COSIPA, os custos de fabricação destes tipos de aços são consideravelmente superiores, principalmente pelas dificuldades em se proceder a laminação do material.

Figura 3.31 - Comportamento do limite de escoamento com a temperatura, para o aço fogo-resistente, comparado aos aços estruturais normais.
[FONTE: NIPPON STEEL NEWS, 1989.]

De acordo com Scheer [1987], para a utilização em caldeiras e outros equipamentos industriais que trabalham a altas temperaturas, emprega-se aços não-ligados com teores maiores de molibdênio, vanádio, tungstênio, lítânio e nióbio, denominados aços resistentes e extra-resistentes a quente, que possuem melhores resistências mecânicas para temperaturas de emprego entre 500 e 800 °C. São aços semelhantes ao divulgado pelo Nippon Steel News.

Ainda quanto ao comportamento dos materiais de construção, estruturais ou não, a altas temperaturas, há que se discutir o que se deve procurar medir em cada caso. Para fechar a questão é preciso distinguir reação ao fogo de resistência ao fogo.

Conforme Kato [1988], o parâmetro de reação ao fogo de um material exprime "a contribuição dos materiais pertencentes aos componentes ou elementos (...) ao alimentar e propagar o fogo, bem como desenvolver fumaça e gases nocivos", ou seja, é o comportamento quanto a incombustibilidade e inflamabilidade, propagação de chama e desprendimento de gases e fumaça, que um material apresenta quando submetido ao fogo. Este aspecto é bastante importante quanto à previsão da velocidade de propagação do incêndio, bem como em relação à forma de seu combate, e se aplica a vários materiais de construção. O aço, porém, não possui reação ao fogo, nos termos desta definição que é empregada.

Por exemplo, na parte da norma inglesa dedicada ao ensaio de incombustibilidade ("BS-476: Part 4"), as superfícies dos materiais são classificadas segundo sua reação ao fogo, o que se aplica principalmente aos revestimentos do edifício, sejam estes de parede, piso, forro, ou fachada. Esta classificação, bastante conhecida, conduz a três classes de materiais quanto à reação ao fogo:

- classe A, referente aos materiais incombustíveis por natureza;
- classe B, materiais de baixa inflamabilidade, que não queimam facilmente, propagando superficialmente a chama com dificuldade, e cujo desprendimento de gases e fumaça não vai além de uma quantidade limitada;

- classe C: materiais combustíveis e inflamáveis, porém com moderada propagação de chama.

A reação ao fogo, portanto, não deve ser confundida com a capacidade de um elemento feito de determinado material manter-se estável estruturalmente.

A NBR-5628 [1980] caracteriza resistência ao fogo como "o tempo, após o início de um incêndio, durante o qual o componente em questão mantém as suas características sem entrar em colapso, que é definido pela ocorrência de um primeiro dos seguintes eventos:

- ruptura do elemento;
- a temperatura média da superfície oposta à exposta ao incêndio vindo a alcançar um valor igual ou superior a 140 °C, ou igual ou superior a 180 °C em qualquer ponto;
- surgimento de fissuras ou trincas, através das quais permita a passagem de chamas ou gases quentes de um ambiente para outro."

Assim, alguns materiais como a madeira, por sua múltipla aplicação, podem ser avaliados quanto a reação e também resistência ao fogo, e serão alvo de dois ensaios distintos.

3.7.2. Geração de Fumaça

Quanto à fumaça ou aos gases originados em um incêndio, segundo Rosso [1975] as estatísticas os têm apontado como principais responsáveis pela perda de vidas humanas em um incêndio, tendo efeito mais danoso que o calor ou as chamas em si.

Em função dos tipos de materiais, pode-se ter geração de fumaça em grandes quantidades que, se de início podem ser úteis no sentido de dar o alerta quanto ao incêndio, em curto intervalo de tempo podem abranger uma grande extensão do edifício, gerando pânico na fuga dos ocupantes por dificultar a visão, visto esta que também os bombeiros precisam para o combate ao fogo.

E, quanto à toxicidade, pode-se analisar dois aspectos: a periculosidade do gás formado por si só e o efeito da diminuição da concentração de oxigênio no ar.

Em resumo, a NFPA [1983] afirma quanto aos gases tóxicos que o mais freqüente trata-se do monóxido de carbono (CO) originado na combustão incompleta dos materiais orgânicos. Segundo a fonte citada, baixas concentrações deste gás levam à inconsciência e mesmo à morte em poucos minutos, e entre outros gases tóxicos comuns de serem encontrados em incêndios tem-se: sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de enxofre (SO_2), amônia (NH_3), ácido cianídrico (HCN), dióxido de nitrogênio (NO_2).

E, em relação à insuficiência de oxigênio no ar, quando sua concentração cai de 21% para 15% induz-se uma redução dos reflexos musculares; entre 10% e 14% provoca-se distúrbios de julgamento, enquanto taxas de 6% a 10% produzem desmaios.

A presença de CO_2 , produto final da combustão completa dos hidrocarbonetos, apesar da pequena toxicidade, pode ser nociva pela redução da concentração de O_2 ou pela indução de superestimulação do sistema respiratório. Quando sua concentração passa de 0,03% a 2% tem-se um aumento de 50% na taxa de respiração; a 3% dobra-se o ritmo, enquanto uma concentração de 10% é fatal em poucos minutos.

O simples aumento do ritmo respiratório já é prejudicial no sentido de estimular a absorção dos outros gases tóxicos presentes.

Os gases, além do efeito sobre a vida humana, podem ser agressivos aos componentes do edifício propriamente dito. A queima de certos plásticos pode liberar ácido clorídrico em quantidade suficiente para gerar um ataque corrosivo às estruturas.

Segundo Landi [1987], quanto à geração de fumaça a tendência atual é a de se utilizar o conceito de potencial de fumaça do ambiente, definido como a geração de fumaça a partir da combustão completa dos materiais nele contidos. Tem-se a medida em laboratório da densidade ótica da fumaça produzida por um dado material, i.e., a dificuldade de se transmitir luz através dela. Sabendo-se a área superficial total de cada material presente em um ambiente pode-se inferir a quantidade potencial de fumaça a ser gerada. A tabela 3.10 fornece valores de densidade ótica de fumaça para duas condições: material exposto a chama ou a radiação, isto é, a maneira pela qual se induziu a combustão no ensaio.

MATERIAL	espessura (mm)	densidade (kg/m ³)	DENS. ÓTICA DE FUMAÇA	
			radiação	chama
Cimento amianto	4,75	2000	0	0
Gesso	9,53	816	35	10
Compens. de madeira	4,32	512	305	45
Carpete de nylon	9,91	2,9 kg/m ²	310	270
Lã de vidro	25,4	56	25	25
Isopor (poliestireno)	25,4	28,8	25	390

Tabela 3.10- Densidade ótica de fumaça produzida por alguns materiais quando submetidos a radiação ou a chama.
[FONTE: LANDI, 1987.]

4. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO NO PROJETO DOS EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA DE AÇO

4.1. RESISTÊNCIA AO FOGO DAS ESTRUTURAS DE AÇO

4.1.1. O que é Resistência ao Fogo da Estrutura

Sob o ponto de vista da proteção passiva do edifício, torna-se necessário conhecer o comportamento dos elementos da estrutura de aço face à elevação de temperatura. Foi visto anteriormente como o fogo afeta as propriedades do material aço; interessa ao projeto da estrutura, porém, uma abordagem mais direta e específica para responder à pergunta: a estrutura resiste ao incêndio o tempo necessário?

* 30 minutos

A manutenção da estabilidade estrutural por um tempo mínimo, seja para garantir um tempo necessário à fuga ou retirada dos ocupantes do edifício, ou pelo enfoque de preservação do patrimônio, é condição essencial para a segurança dos edifícios de estrutura de aço, em caso de incêndio. Para que se verifique essa estabilidade é preciso conhecer:

- a resistência ao fogo dos elementos estruturais em si, nas condições de solicitação de serviço;
- o comportamento das ligações entre elementos diante dos esforços gerados pelas deformações com o aumento da temperatura;

- e analisar a estrutura como um todo, objetivando prever o comportamento quando em caso de incêndio, de modo a encontrar possíveis pontos falhos, e evitar os problemas conseqüentes para a manutenção da estabilidade, ou aproveitar reservas de resistência do sistema estrutural, visando a economia da obra.

Sob o ponto de vista da estabilidade na situação de incêndio, pode-se diferenciar os elementos estruturais quanto à sua importância, resultando em diferentes necessidades de resistência ao fogo. De fato, vários códigos e normas de segurança contra incêndio distinguem os elementos estruturais quanto a este aspecto. O "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment" - CSTB [1983] define por conta do enfoque de estabilidade dois tipos de elementos:

- elementos estruturais principais: aqueles cuja ruína total ou parcial significa um comprometimento da estabilidade exigida da construção, sob a ação de cargas aplicadas;
- elementos estruturais secundários: sua ruína não afeta o restante da estrutura.

Os primeiros, segundo a definição do CSTB, são os pilares, as vigas, os pórticos, os elementos de contraventamento, bem como lajes, paredes e demais elementos considerados na verificação de estabilidade a esforços de vento. Os demais elementos serão considerados secundários.

As normas e códigos de construção relativos ao problema de segurança contra incêndio estabelecem para os elementos construtivos, em função do tipo de ocupação, altura do edifício e características do seu conteúdo, os tempos exigidos de resistência ao fogo. Em tese, este tempo corresponderá durante o incêndio a um período no qual a estrutura deverá manter a estabilidade e continuar resistindo às cargas aplicadas.

Originalmente, segundo Malhotra e Cooke [1982], estes tempos de resistência ao fogo surgiram em referência aos resultados de ensaios em forno. E, de fato, muitos projetos de edifícios foram, e muitos ainda são, baseados na realização de ensaios com amostras⁴ dos elementos estruturais projetados.

No entanto, trata-se de procedimento bastante custoso, e os autores acima consideram ser satisfatório, em boa parte dos casos, aplicar resultados tabelados de ensaios, disponíveis na forma de "esquemas-padrão". Estes esquemas-padrão permitem escolher, qual se fosse um catálogo, dentre uma variedade de perfis para vigas ou colunas de aço, com diferentes seções, cada um deles com o respectivo dado de resistência ao fogo obtido no ensaio normalizado. O American Iron and Steel Institute - AISI desenvolveu até mesmo equações que permitem alguma extrapolação a partir de dados de ensaio, para amostras com características diversas das ensaiadas (mais informação a este respeito será encontrada no capítulo 6 deste trabalho).

4 - Mais à frente, ao se discutir as normas de ensaio de resistência ao fogo, deve ficar claro o que se entende por "amostra" de um elemento estrutural.

Finalmente, o último destes três processos enumerados por Malhotra e Cooke é a verificação por cálculo analítico da resistência ao fogo, pelo qual é possível avaliar o comportamento da estrutura em caso de incêndio, ainda na fase de projeto, a partir das solicitações e dos parâmetros físicos da peça (acerca destes processos analíticos, mais à frente encontram-se exemplos dos procedimentos adotados).

Considerando-se que os esquemas-padrão resultam de ensaios anteriormente realizados, pode-se dizer que existem, de modo geral e no mundo todo, duas vertentes principais para a obtenção de dados acerca dos tempos de resistência ao fogo. Pode-se recorrer a ensaios de incêndio com elementos ou partes da estrutura, ou fazer uso de métodos de cálculo analítico que modelem adequadamente a situação de incêndio e o comportamento das peças.

Dentro deste quadro é evidente a carência em termos nacionais. Embora exista o procedimento especificado em norma ABNT [NBR-5628/80], dada a complexidade envolvida, são restritas as possibilidades de verificação em ensaios de laboratório⁵; por outro lado o Brasil também não possui ainda textos de norma que orientem a verificação por cálculo analítico do comportamento ao fogo de estruturas de aço (houve a dissolução do grupo de trabalho da ABNT que iniciou o estudo). No entanto, pode-se abordar o assunto à luz das experiências internacionalmente conhecidas, e aprender com seus resultados. De qualquer forma, é também objetivo deste trabalho modestamente contribuir para a conscientização do

5 - Um dos fornos que permite a realização dos ensaios de resistência ao fogo preconizados encontra-se no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, equipamento este que possui algumas limitações, podendo-se realizar apenas ensaios de elementos verticais.

meio técnico, de forma a estimular uma reversão da tendência de defasagem da normalização brasileira face ao contexto internacional.

4.1.2. Ensaaios de Resistência ao Fogo

O método tradicional pelo qual a segurança contra incêndio é considerada no projeto da estrutura de um edifício consiste em provar, através de ensaios normalizados, que seus elementos apresentam resistência ao fogo maior ou igual à requerida.

Em termos históricos, tem-se registros de que os primeiros ensaios de resistência ao fogo de elementos estruturais surgiram no século XVIII, tendo proliferado efetivamente na segunda metade do século passado. Malhotra [1982] cita como primeiro evento dessa natureza, um ensaio de incêndio realizado em 1790 pela "Associated Architects" inglesa.

Segundo a NFPA [1983], entre 1884 e 1886, deve-se citar ensaios envolvendo colunas metálicas e colunas de alvenaria, na Alemanha. Nos EUA, os primeiros ensaios em larga escala teriam sido feitos em Denver, Colorado (1890), com arcos de alvenaria.

A ASTM [1983] afirma que as primeiras tabelas de resistência ao fogo a serem publicadas, em 1894, o foram por obra do "British Fire Protection Committee" - BFPC, listando resultados de vários tipos de pisos, paredes e outros elementos.

A NFPA relata que foram os engenheiros do "New York Building Office", daquela cidade, os primeiros a estabelecer um procedimento padronizado de ensaio, em 1896, visando classificar diferentes tipos de fachadas de edifícios. Após o grande incêndio ocorrido na cidade de Baltimore, a "American Society for Testing Materials" - ASTM constituiu um comitê de normalização dirigido por estes engenheiros nova-iorquinos. Em 1914, um outro comitê, composto por onze entidades técnicas, revisou as normas elaboradas pela ASTM (este segundo comitê teria dado origem posteriormente ao "American National Standards Institute" - ANSI).

E, segundo a ASTM, dos fornos destinados a ensaios padronizados construídos em 1900 nos Estados Unidos, primeiro pelo "Underwriters Laboratories", depois pelo "National Bureau of Standards", estes últimos viriam a permitir as pesquisas que dariam origem ao atual método de ensaio ASTM E-119 - publicado inicialmente em 1918, como ASTM C-19. A demanda por normas de ensaios de desempenho justificava-se, à época, pela crescente utilização de novos materiais e técnicas e projetos inovadores. Um exemplo do tipo de forno utilizado para ensaios de resistência ao fogo, no início do século, é mostrado na figura 4.1.

Os demais países também criaram, mais tarde, normas para ensaio em fornos normalizados. O ensaio da norma inglesa (BS-476: Part 8) tem sua primeira edição datada de 1932, sofrendo uma série de alterações ao longo do tempo, mas preservando sua essência (ver na tabela 4.1 a cronologia evolutiva do texto desta norma).

O comitê da "International Organization for Standardization" - ISO que tratou do mesmo tipo de ensaio (hoje, nº ISO R-834), teve sua formação somente em 1961, segundo Malhotra [1982].

Em 1981, a "European Commission on Steel Construction" - ECCS, lança recomendações para o projeto de estruturas de aço, quanto a incêndio [Malhotra].

Figura 4.1 - Ilustração do equipamento utilizado para ensaio de resistência ao fogo de elementos estruturais, em laboratório, segundo uma exposição normalizada. [FONTE: MALHOTRA, 1982.]

Os ensaios de resistência ao fogo são internacionalmente aceitos como recurso de obtenção de dados de projeto. Apesar das limitações que apresentam - por exemplo, a falha reprodução dos vínculos das peças - os seus resultados podem ser associados a métodos analíticos de cálculo, permitindo extrapolar estes resultados e obter uma análise final completa da estrutura, com um número reduzido de ensaios.

ITEM	situação em 1932	1953	1972
Curva Normalizada	não-linear, como a da ASTM	idem	adoção da curva ISO
Tamanho das amostras	paredes: 3 X 3 m pisos: 3 X 3 m colunas: 3 m vigas: 3 m	idem	2.5 X 2.5 m 2.5 X 4.0 m 3.0 m 3.0 m
Carregamento	1.5 vezes a carga de projeto	carga de projeto	idem
Ensaio de recarga	após 48 h	idem	após 24 h
Ensaio de jato d'água	para ensaios de mais de 2 h	retirado	-
Ensaio de impacto	para paredes não estruturais	retirado	-
Critério de isolamento	T < 139 °C em qualquer ponto	T média de 139 °C	T média de 140 °C
Critério de integridade	fissuras e trincas pequenas	limite de fissuração	emprego de algodão
Critério de estabilidade	não atingir o colapso	idem	limite de flechas

Tabela 4.1 - Principais alterações do ensaio BS-476: Part 8 desde sua criação.
[FONTE: MALHOTRA, 1982.]

A figura 4.2 mostra, de forma esquemática, o procedimento pelo qual podem ser utilizados os resultados de ensaios no projeto de estruturas para uma dada resistência ao fogo. Os ensaios de laboratório, como instrumento de análise, devem estar inseridos em um procedimento maior de verificação do comportamento face ao incêndio, já que são relativamente onerosos e, isoladamente, não constituem subsídio suficiente para as necessárias considerações de segurança.

Figura 4.2 - Procedimento de projeto de estruturas de aço utilizando dados de ensaios de resistência ao fogo. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

A norma brasileira que trata do tema é a NBR 5628 - "Componentes Construtivos Estruturais - Determinação da Resistência ao Fogo", (antiga M-1192/77), cujo texto é genérico, não sendo especificado o material constituinte das peças. De qualquer modo, vários conceitos são aplicáveis a elementos de aço. Determina-se a resistência ao fogo pelo tempo decorrido desde o início do ensaio até a ocorrência da ruína da peça, onde a mesma estará carregada, submetida a esforços que correspondem às condições de serviço, durante todo o período de ensaio. A evolução das temperaturas é controlada para que siga a curva padrão tempo-temperatura (dada pela normalização internacional ISO R-834).

Landi [1987] cita a definição de resistência ao fogo dada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, de Portugal:

"Tempo durante o qual os elementos de construção, sujeitos a uma evolução normalizada de temperatura, mantêm a sua estabilidade assegurando no caso de elementos separadores, a estanqueidade às chamas e o isolamento térmico entre as duas faces".

A partir da definição do LNEC tem-se uma idéia mais abrangente do que seria o conjunto de elementos estruturais de um edifício, em termos de segurança contra incêndio; além do "esqueleto" estrutural propriamente dito, paredes e elementos divisórios devem suportar as condições do incêndio durante um tempo determinado, em cada caso atendendo às seguintes exigências de desempenho (citadas no capítulo 3):

- estabilidade, que se traduz pela capacidade de manter suas funções estruturais;

- estanqueidade, ou capacidade da peça de não permitir a passagem de chamas e gases quentes para a face não exposta ao incêndio, comprometendo a segurança de vidas humanas ou propagando o incêndio a outros ambientes, o que implica em restrições de fissuração do material;

- isolamento térmica, que deve ser tal que não sejam atingidas temperaturas na face oposta ao incêndio, que poderiam originar novas combustões ou comprometer a segurança de vidas humanas.

É usual que a avaliação de estabilidade, estanqueidade e isolamento sejam independentes, e de fato várias normas estrangeiras assim o determinam. No caso da legislação francesa [Arrêté du 5 Janvier 1959; ver Sécurité contre l'incendie, edição de 1979-1980], a consideração de cada resultado separadamente conduz à seguinte classificação:

a) elementos "estáveis ao fogo" (SF- Stables au Feu), que satisfazem ao critério de estabilidade apenas.

b) elementos "pára-chamas" (PFL- Pare-Flammes), que atendem requisitos de estabilidade e estanqueidade, a chamas e gases.

c) elementos "corta-fogo" (CF- Coppe-Feu), que são aqueles cujo aquecimento da face não exposta é baixo o suficiente para qualificá-los como isolantes, além de satisfazer os critérios anteriores.

Tanto dos elementos estruturais, como daqueles que, sejam ou não estruturais, desempenham função de compartimentação - elementos estes que devem possuir resistência ao fogo, portanto - interessa conhecer qual o comportamento quando submetido à exposição normalizada.

Para os elementos com função puramente estrutural, é o critério de estabilidade que definirá a sua classificação de resistência ao fogo, dentro de uma das categorias [segundo a NBR-5628]:

- F30 - resistência ao fogo por 30 minutos
- F60 - resistência ao fogo por 60 minutos
- F90 - resistência ao fogo por 90 minutos
- F120 - resistência ao fogo por 120 minutos
- F180 - resistência ao fogo por 180 minutos
- F240 - resistência ao fogo por 240 minutos

Alguns países possuem categorias dadas em múltiplos e frações de hora, tais como 1/2 h, 1 h, 1 1/2 h, e assim por diante.

Como o resultado do ensaio é um tempo em minutos, dado pela leitura do instante em que a peça atinge o critério de ruína, o que ocorre na prática é que o elemento estrutural que se considera atender uma determinada categoria de resistência ao fogo, pode superar esse tempo no ensaio, mas não o supera o suficiente para ser enquadrado na categoria acima daquela.

Qualquer que seja a norma considerada, na realização dos ensaios de incêndio, devem ser reproduzidas, tanto quanto possível, as condições reais de exposição a que o elemento estará submetido. O elemento ensaiado deverá incluir, ainda, de acordo com o caso, "todos os tipos de junta previstos, os sistemas de fixação e apoio, os vínculos e os acabamentos que reproduzam as condições de uso". [NBR-5628].

O tamanho da amostra ensaiada, porém, sofrerá limitações próprias do método, ou seja, a amostra terá as dimensões totais da peça desde que não ultrapassem os limites úteis das medidas do forno (ver, por exemplo, as especificações da ASTM E-119, nas tabelas 4.2 e 4.3). O mesmo vale para as condições de umidade da amostra, que deverão no início do ensaio estar próximas às condições normais, para que não seja alterado o comportamento térmico (como o aço não possui higroscopicidade, isto vale para peças revestidas com materiais que a apresentem, ou sistemas de piso utilizando elementos de concreto, apenas para exemplificar).

ELEMENTO A SER ENSAIADO	POSICÃO E DIMENSÕES MÍNIMAS DA AMOSTRA	observações
Paredes estruturais	vertical, 9 m ² , menor dimensão de 2.7 m	<ul style="list-style-type: none"> - a amostra não deve ter restringidas suas beiradas verticais - temperatura da face não exposta não maior que 139 °C - no ensaio de jato d'água dirigido à face exposta ao fogo, não deve haver passagem para a outra face
Colunas	um tramo vertical, nunca menos de 2.7 m	<ul style="list-style-type: none"> - devem ser reproduzidos os detalhes de conexão e proteção da peça - exposição em todas as faces - ensaio opcional com 1.75 vezes a carga de projeto
Pisos e Coberturas	natural, 16 m ² , menor dimensão de 3.7 m	<ul style="list-style-type: none"> - montagens completas - temperatura da face não exposta não maior que 139 °C - se contiver vigas de aço estas deverão atender o critério de temperatura crítica
Vigas	horizontal, mínimo de 3.7 m	<ul style="list-style-type: none"> - deve incluir uma faixa de piso ou cobertura, de largura mínima 2.1 m - restrição dos apoios tal que impeça a dilatação térmica - ensaio sem carga: medida de temperatura crítica, média 593 e máxima 704°C

Tabela 4.2 - Dimensões das amostras a serem empregadas e condições particulares no ensaio de resistência ao fogo de elementos estruturais, segundo a ASTM E-119.
[FONTE: ASTM, 1983.]

ELEMENTO A SER ENSAIADO	POSIÇÃO E DIMENSÕES MÍNIMAS DA AMOSTRA	observações
Colunas (alternativa)	vertical, mínimo de 2.4 m	<ul style="list-style-type: none"> - quando não exequível a aplicação de carga - aplicável somente a colunas protegidas por revestimento não estrutural - temperatura crítica: média 538 e máxima 649°C
Vigas e Trelças (alternativa)	horizontal, mínimo de 3.7 m	<ul style="list-style-type: none"> - quando não exequível a aplicação de carga - aplicável somente a peças protegidas por um revestimento não estrutural - deve incluir uma faixa de piso ou cobertura, de largura mínima 1.5 m - temperatura crítica: média 538 e máxima 649°C

Tabela 4.3 - Ensaios de elementos estruturais com uso do conceito de temperatura crítica (alternativa permitida pela ASTM E-119).
[FONTE: ASTM, 1983.]

Para avaliar a estabilidade, durante o ensaio são medidas as deformações da peça até um limite pré-definido (que, no caso de vigas, segundo a NBR-5628, pode ser caracterizado por uma flecha superior a 1/30 do vão livre). O limite de deformação é, inclusive, uma medida de segurança na realização do ensaio, procurando-se antecipar uma ruptura.

Quanto à estanqueidade, a sua verificação é feita com um teste de inflamação de chumaços de algodão, passados ao longo de fissuras que permitem às chamas e gases atravessar a peça, caracterizando a perda de estanqueidade do elemento. Já o critério de isolamento térmico implica na medição de temperaturas em pontos da face não exposta.

4.1.3. Cálculo Analítico da Resistência ao Fogo

Da mesma forma que ocorre com os efeitos das cargas permanentes ou variáveis, ou o carregamento devido à ação do vento, também o incêndio pode ser entendido como uma condição de solicitações a que o edifício estará submetido, cujos efeitos podem ser tratados de modo analítico, à semelhança dos demais fenômenos. Basta tomar por exemplo a verificação usualmente feita quando do projeto da estrutura, em que o edifício é submetido às solicitações devido à ação do vento, sem no entanto se recorrer a ensaios aerodinâmicos.

Pode-se avaliar que por radiação ou pela convecção gerada com os gases quentes produzidos na combustão, durante o incêndio o calor produzido é transmitido aos elementos da estrutura, aquecendo-os e levando-os a apresentar deformações térmicas, que se somam aos efeitos da perda de resistência mecânica devido ao aumento de temperatura.

As deformações térmicas surgem nos elementos da estrutura quando o acréscimo da temperatura gera dilatação do material e também pela exposição diferenciada nas diversas faces (condição real e que pode ser mais crítica que a suposição de aquecimento uniforme), o que leva a encurvamentos das peças, mesmo sem aplicação de carga. Estas deformações acabam gerando, por fim, esforços nas ligações e nos demais elementos, diferentes dos associados ao uso normal.

Além disso, a perda de resistência do aço, como foi visto anteriormente, manifesta-se através da minoração do módulo de elasticidade e do valor da tensão de escoamento. A associação de todos os fatores de alteração de cargas originados no incêndio pode levar a situações de solicitação da estrutura bastante diversas das situações de uso normal (ver figura 4.3).

A perda de resistência normalmente é levada em conta pela determinação de uma temperatura crítica, na qual ocorre o limite de resistência da peça sob a ação do carregamento de utilização previsto, temperatura crítica esta que a peça não deverá atingir antes de um tempo pré-estabelecido, que é a resistência ao fogo requerida da mesma.

Figura 4.3 - Deformação de partes da estrutura do edifício devido à dilatação diferencial, por aquecimento gerado a partir de focos de incêndio.
[FONTE: BRASIL, MIC/STI, 1986.]

Como explica Berto [1988], a temperatura atingida por um elemento estrutural de aço durante o incêndio é fortemente influenciada pela relação que existe entre a área superficial exposta ao calor e a massa do perfil.

Para atingir uma certa temperatura, um elemento de grande massa precisará absorver mais calor que um outro, de menor massa, se os dois possuírem a mesma superfície exposta (pela qual se dá a troca de calor com o ambiente).

Essa relação pode ser mais simplesmente expressa por um fator de forma, também denominado fator de massividade, relacionando perímetro e seção transversal:

$$f = \frac{P_s}{A_s} \quad (4.1)$$

P_s - perímetro da seção transversal do elemento

A_s - área da seção transversal do elemento

Um valor que, como já dito, pode representar a temperatura crítica do aço, em termos gerais e sem levar em conta o estado de sollicitação, é de 550 °C. A figura 4.4 mostra a relação entre o fator de forma e o tempo até atingir 550 °C, no ensaio normalizado de resistência ao fogo, para peças de aço não-revestido.

Figura 4.4 - Relação entre fator de forma e tempo de aquecimento normalizado para atingir a temperatura de 550 °C.
[FONTE: BERTO, 1988.]

A rigor, além da dependência com o comportamento do próprio material quando aquecido, não é possível estabelecer o valor de temperatura crítica para a estrutura de aço, ou para um elemento qualquer da mesma sem também levar em consideração o estado de sollicitação a que o mesmo estará submetido. Isto porque cada peça possui um esquema estático e um coeficiente de aproveitamento da capacidade resistente da seção capazes de favorecer ou desfavorecer seu comportamento durante o incêndio, além do que, em uma situação tão crítica de carga como ocorre em um incêndio, pode ser plenamente justificável adotar como critério de verificação o limite último de resistência da peça, em que ocorre o colapso, e não o instante em que a tensão atinge o valor de escoamento.

Assim é que, para a adoção de uma temperatura crítica, o CSTB faz as seguintes considerações:

- tendo em conta o enfoque de segurança sob a ótica das normas de dimensionamento atuais (para construções de aço), e os coeficientes de segurança adotados, quanto à majoração de esforços e minoração da resistência do material;
- na hipótese de, para um dado elemento construtivo, otimizar-se a solicitação da capacidade resistente da área de seção transversal do perfil, para obtenção da máxima taxa de aproveitamento, dentro do estado limite considerado;
- assumindo os gradientes térmicos resultantes da exposição do aço à curva normalizada de tempo-temperatura (ISO R-834);
- a título de simplificação, nas condições acima, pode-se adotar para a verificação da resistência ao fogo do elemento construtivo estrutural as seguintes temperaturas críticas do aço (para aços franceses tipos E-24 e E-26, similares aos americanos ASTM A-7 e A-36):

elementos isostáticos e colunas: 470 °C

elementos hiperestáticos: 550 °C

Segundo Malhotra & Cooke [1982], o processo analítico de verificação da resistência ao fogo, estabelecidos o tempo a que deve resistir a peça (resistência ao fogo requerida) e o valor da temperatura crítica, passa então a uma etapa de cálculo de temperaturas atingidas ao longo do incêndio, usando as equações de transmissão de calor (ver figura 4.5).

Figura 4.5 - Verificação analítica da resistência ao fogo de elementos estruturais.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Supondo um aço ASTM A-36, usado em perfis para construção civil, tem-se as seguintes características físicas:

a. massa específica (d_A) - pode ser considerada constante com a temperatura, sendo

$$d_A = 7.850 \text{ Kg/m}^3 ;$$

b. calor específico (c_A) - seu valor altera-se com a temperatura, podendo ser representado pela curva apresentada na figura 4.6. Na prática, segundo Malhotra e Cooke o valor médio de $0,52 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ pode ser adotado para as finalidades pretendidas.

Figura 4.6 - Variação do calor específico do aço ASTM A-36 com a temperatura.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Para ilustrar as possibilidades de abordagem do problema dentro de um enfoque analítico, será desenvolvido a seguir um equacionamento de transmissão de calor, usando como critério de limite de resistência a temperatura crítica de 550 °C, conforme apresentado por Landi [1986]. Um elemento de aço da estrutura, quando submetido ao incêndio, receberá calor sob duas formas: radiação e convecção. A elevação de temperatura será devida a estas duas formas de calor, resultando que:

$$Q_x = Q_R + Q_C \quad (4.2)$$

onde: Q_x = calor total absorvido pelo elemento de aço, por unidade de comprimento

Q_R = calor recebido por radiação, idem

Q_C = calor recebido por convecção, ibidem

e

$$Q_R = \sigma \epsilon F P_s (T_r^4 - T_a^4) \Delta t \quad (4.3)$$

sendo σ - constante de Boltzmann

ϵ - a emissividade do incêndio

F - fator de forma da seção da peça

P_s - perímetro da seção da peça

T_r - temperatura do incêndio

T_a - temperatura do aço

Δt - intervalo de tempo

e

$$Q_c = h P_s (T_r - T_A) \Delta t \quad (4.4)$$

h - coeficiente de convecção

com o calor absorvido pelo aço dado por:

$$Q_x = m_A c_A \Delta T \quad (4.5)$$

onde:

m_A - massa do elemento, por unidade de comprimento ($m_A = A_s d_A$)

A_s - área da seção transversal

c_A - calor específico do aço

ΔT - acréscimo de temperatura no aço.

Fazendo ainda uma série de simplificações, é possível escrever:

$$Q.E.F. P_s (T_r^4 - T_A^4) \Delta t + h P_s (T_r - T_A) \Delta t = A_s d_A c_A (T_A - T_0) \quad (4.6)$$

onde T_0 é a temperatura do ambiente no início do incêndio, cujo aumento de temperatura é dado pela curva normalizada (ISO):

$$T_r - T_0 = 345 \log (8t + 1) \quad (4.7)$$

O equacionamento descrito admite como hipóteses a propagação instantânea do calor no interior do aço, que é razoável dada sua alta condutibilidade térmica (da ordem de 4 a 6 w / m °C), além de considerar o elemento total e homogeneamente envolvido pelo fogo. Esta última hipótese, é preciso dizer, constitui uma simplificação de cálculo que não guarda semelhança com a situação real, mas é útil para que se obtenha um processo rápido de verificação da estrutura.

Um outro recurso de simplificação que pode ser adotado é escrever a expressão do calor recebido por radiação com uma forma semelhante à da parcela trocada por convecção, criando um coeficiente h_R hipotético:

$$Q_R = \sigma \cdot \epsilon \cdot F \cdot P_B (T_F^4 - T_A^4) \Delta t = h_R \cdot P_B (T_F - T_A) \Delta t \quad (4.8)$$

A partir deste recurso, a equação do balanço térmico de calor passa a ser:

$$h_R \cdot P_B (T_F - T_A) \Delta t + h \cdot P_B (T_F - T_A) \Delta t = A_B \cdot d_A \cdot c_A (T_A - T_0) \quad (4.9)$$

com

$$h_R = \sigma \cdot \epsilon \cdot F \left(\frac{T_F^4 - T_A^4}{T_F - T_A} \right) \quad (4.10)$$

Ou, fazendo surgir no primeiro membro o fator $f = P_s/A_s$, e reagrupando os termos da equação:

$$\frac{P_s}{A_s} (h + h_R) (T_f - T_A) \Delta t = c_A a_A (T_A - T_\infty) \quad (4.11)$$

que seria a forma final a ser adotada no cálculo de temperaturas. Para as constantes que comparecem nas equações 4.10 e 4.11, ter-se-ia como valores usuais os seguintes:

- Constante de Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

- Emissividade das chamas e gases do incêndio

$$\epsilon = 0,7$$

- Fator de forma para troca de calor entre o incêndio e o perfil

$$F = 0,07$$

- Coeficiente de troca de calor por convecção

$$h = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Para melhor avaliar o comportamento dos elementos estruturais de aço submetidos à ação do incêndio, segue um exemplo de aplicação do processo analítico descrito, aplicado ao perfil de aço mostrado na figura 4.7.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Perímetro da seção transversal: 0,39 m
 Área da seção transversal: $1,42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Figura 4.7 - Características do perfil de aço submetido ao incêndio (exemplo de aplicação).

Como a troca de calor por radiação depende tanto da temperatura do incêndio quanto da temperatura do aço, e esta última é justamente aquela que será determinada pelo cálculo, torna-se necessário usar um artifício: efetua-se o cálculo em pequenos intervalos de tempo, durante os quais a temperatura do aço pode ser considerada constante, com boa aproximação. O roteiro de cálculo segue os seguintes passos:

1- Determina-se o intervalo de tempo Δt a adotar no cálculo, que deve obedecer a um critério de convergência:

$$\Delta t \leq \frac{25.000}{60 f} \quad (\text{em minutos}) \quad (4.12)$$

onde $f = P_s/A_s$ é o fator de forma da seção transversal do elemento;

2- Calcula-se o coeficiente h_R (eq. 4.10), no instante correspondente ao instante final do intervalo anterior:

$$h_R = \sigma \cdot \epsilon \cdot F \left(\frac{T_F^4 - T_A'^4}{T_F - T_A'} \right)$$

sendo $T_F = 345 \log (8t + 1) + T_\infty$

$T_\infty = 20^\circ \text{C}$ (valor assumido)

T_A' = temperatura do aço obtida no intervalo anterior

3- A temperatura do aço será então

$$T_A = T_A' + \frac{P_s}{A_s} \frac{60 \Delta t}{d_A C_A} (h_R + h) (T_F - T_A') \quad (4.13)$$

4- O processo repete as etapas número 2 e 3, sucessivamente, até que seja ultrapassado o valor da temperatura crítica no aço;

5- A resistência ao fogo obtida será considerada igual ao tempo que corresponder ao instante, calculado através de interpolação, em que a temperatura no aço atinge o valor crítico.

Os valores de temperatura correspondentes a cada instante calculado podem ser vistos na tabela 4.4.

Δt (min)	$T_a' - 273$ (K)	$T_f - 273$ (K)	$T_f - T_a'$ (K)	$T_f^4 - T_a'^4$ (K ⁴)	$h + h_r$ (W/m ² K)	$T_a - T_a'$ (K)	$T_a - 273$ (K)
0	20	20	0	0	25,00	0	20
1,5	20	404	384	2,03E+11	26,47	62	82
3,0	82	502	420	3,45E+11	27,28	69	151
4,5	151	561	410	4,51E+11	28,06	69	220
6,0	220	603	383	5,30E+11	28,85	67	287
7,5	287	636	349	5,84E+11	29,65	63	350
9,0	350	663	313	6,17E+11	30,47	57	407
10,5	407	686	279	6,32E+11	31,29	53	460
12,0	460	705	245	6,26E+11	32,11	47	507
13,5	507	723	216	6,14E+11	32,90	44	551

Tabela 4.4 - Evolução da temperatura em um perfil de aço ASTM 3" x 11,2 kg submetido a incêndio normalizado.
[FONTE: MELHADO, 1987.]

O valor final do tempo obtido para a resistência ao fogo do perfil correspondente à temperatura crítica pode ser admitido aproximadamente igual a:

$$t = 13,5 \text{ min.}$$

A partir do exemplo dado, é fácil perceber que um perfil de aço estrutural dimensionado para resistir aos esforços usuais em um edifício, quando submetido a um incêndio, dificilmente atingiria um valor de resistência ao fogo exigido por qualquer código ou norma (mínimo de 30 minutos). Neste caso em especial, o perfil é muito leve e, portanto, desfavorável.

Voltando ao fluxograma mostrado anteriormente (figura 4.5), dado que a resistência ao fogo requerida não foi atingida no cálculo, cabe ao projetista avaliar as dimensões do problema e alterar as entradas do processo visando nova iteração.

4.1.4. A Utilização de Estruturas de Aço sem Proteção

A "British Steel Corporation" - BSC em associação com a "Fire Research Station" - FRS, empreendeu um programa de ensaios com incêndios naturais, desenvolvido com vistas a quantificar a elevação de temperaturas em perfis estruturais de aço, para incêndios com várias severidades e sob condições diversas de isolamento térmico de contornos e ventilação do ambiente.

Tal programa conjunto foi iniciado em 1983, com a construção de um compartimento de 8.6 X 5.9 m por 3.9 m de altura, em um hangar da FRS, para que independesse das condições climáticas. Latham, Kirby e Thomson [1987] publicaram um artigo no "Fire Safety Journal", relatando os ensaios feitos e seus principais resultados.

Segundo Latham et alii [1987], "os engenheiros têm se baseado, tradicionalmente, nas propriedades do aço a temperatura ambiente para projetar e dimensionar as estruturas. Materiais isolantes são então aplicados para garantir que a temperatura do aço não se eleve além de um valor de temperatura crítica, em que a redução da capacidade de carga atinge o limite. No entanto, as observações experimentais sugerem que é sem dúvida muitas vezes possível obter maior economia projetando a estrutura de aço considerando seu comportamento a altas temperaturas, e assim minimizar a necessidade de proteção isolante."

Quanto aos ensaios em forno normalizado, Latham et alii afirmam que "a curva normalizada não representa bem o regime de aquecimento real em um incêndio", e que, portanto "é necessário obter informações adicionais a partir de dados de incêndios naturais bem documentados, para estudar o comportamento real de estruturas de aço (...) uma melhor determinação da condição de estabilidade pode ser obtida, a partir destes dados, pelo cálculo de um tempo equivalente de exposição, associado à máxima temperatura atingida pelo aço no incêndio natural, que será o tempo para atingir a mesma temperatura no ensaio em forno" (ver no capítulo 3, o tempo equivalente proposto por Malhotra e Cooke).

Foram realizados ensaios com baixos potenciais caloríficos e altas taxas de ventilação, de modo a representar edifícios com ocupações tais como escolas e edifícios de escritórios de múltiplos pavimentos.

Os combustíveis empregados nos vários ensaios variaram entre "madeira" e "madeira + plástico" (polipropileno), sendo que para a madeira foram experimentados dois tipos de ignição: simultânea e gradual, esta última a mais similar ao fenômeno real. A figura 4.8 apresenta curvas obtidas com potencial calorífico de 15 kg/m^2 .

Figura 4.8 - Temperaturas do ambiente em ensaios com incêndios naturais, para diferentes tipos de combustíveis e condições de ignição.
[FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

Foram então determinadas curvas de temperaturas médias máximas de vigas e colunas em função do fator de forma dos perfis, para diversas condições de ventilação e potenciais caloríficos, com os combustíveis e formas de combustão anteriormente citados. Tomando-se como referência os incêndios com madeira e ignição gradual, os resultados estão reproduzidos no gráfico da figura 4.9.

Figura 4.9 - Temperaturas máximas médias de vigas e colunas de aço, em função do fator de forma dos perfis, medidas em várias condições de potencial calorífico e ventilação. [FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

Nas figuras 4.10 e 4.11, apresenta-se o mesmo tipo de curvas para vigas de aço, porém, na figura 4.10 o compartimento era isolado por tijolos refratários de grande isolamento térmico e, na figura 4.11, por placas de gesso fogo-resistentes, de menor isolamento. Observe-se que existem diferenças bastantes sensíveis nas temperaturas alcançadas no aço, mais altas no compartimento mais isolado.

Figura 4.10 - Temperaturas máximas médias de vigas de aço em função do fator de forma do perfil, para várias condições de potencial calorífico e ventilação - compartimento revestido com tijolos refratários.
[FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

Figura 4.11 - Temperaturas máximas médias de vigas de aço em função do fator de forma do perfil, para várias condições de potencial calorífico e ventilação - compartimento revestido com placas de gesso.
[FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

A partir dos resultados obtidos com as curvas traçadas em cima de três perfis diferentes de vigas e três perfis diferentes de colunas, Latham, Kirby e Thomson extrapolaram os resultados obtidos para vários valores de fatores de forma e outros potenciais caloríficos. Assim, chegaram finalmente a tabelas de fatores limites de forma para vigas e colunas de aço não-revestido, para adequada resistência ao fogo em incêndios envolvendo madeira (tabela 4.5) e incêndios envolvendo madeira e plástico como combustíveis (tabela 4.6), e para potenciais caloríficos variando entre 7.5 e 60 kg/m², com diversos fatores de ventilação.

As tabelas criadas por Latham, Kirby e Thomson, em comparação com os resultados de análises feitas segundo a curva normalizada, tornam mais claras as possibilidades de emprego de aço não-revestido - basta ver que o perfil exemplificado anteriormente no item 4.1.3, possuindo um fator de forma de 275 m⁻¹ (bastante desfavorável), atingiu uma resistência ao fogo de apenas 13.5 minutos, e que a princípio parece insuficiente em quaisquer casos, enquanto que, na tabela 4.5 vê-se que o mesmo poderia resistir a incêndios com até 15 kg de madeira por m², para fatores de ventilação altos. Tais situações existem, na prática, em vários edifícios (como por exemplo, em salas de aula de edifícios escolares da rede pública de ensino básico).

Portanto, o conhecimento tem avançado no sentido de melhor aproveitar a resistência ao fogo dos elementos estruturais de aço, o que além do aspecto econômico, contribui para desfazer o tabu criado em torno do assunto "incêndio".

potencial calorífico, kg/m²		7.5	10.0	10.0	10.0	10.0	15.0	15.0	15.0	15.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	30.0	30.0	30.0	30.0	60.0	60.0	
ventilação (uma parede)		1/4	1/8	1/4	1/2	1/4	1/8	1/4	1/2	1/4	1/8	1/4	1/2	1/4	1/8	1/2	1/4	1/8	1/2	1/4	1/4	
fator de ventilação - F _v		0.06	0.03	0.12	0.06	0.03	0.12	0.06	0.03	0.12	0.06	0.03	0.12	0.06	0.03	0.12	0.06	0.03	0.12	0.06	0.06	
duração equivalente (min)		9.9	12.1	10.5	14.7	20.8	11.5	19.8	24.2	17.6	29.5	33.0	23.0	39.6	48.4	46.2	79.2					79.2
FATOR DE FORMA P _e /A _s LIMITE																						
TEMPERATURAS CRÍTICAS (°C)																						
(1) três faces expostas	500	> 244	> 285	> 285	175	100	244	109	79	130	< 60	< 60	85	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
	550	> 285	> 285	> 285	212	119	> 285	129	93	155	66	< 60	101	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
	600	> 285	> 285	> 285	268	142	> 285	154	111	190	80	66	120	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
	650	> 285	> 285	> 285	> 285	175	> 285	192	134	248	96	81	146	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
	700	> 285	> 285	> 285	> 285	248	> 285	274	175	> 285	121	102	195	72	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
(2) quatro faces expostas	750	> 285	> 285	> 285	> 285	> 285	> 285	> 285	> 285	> 285	181	148	> 285	101	< 66	75	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	
	500	270	205	250	146	86	220	94	71	108	54	46	76	34	< 30	< 30	—	—	—	—	—	
	550	> 300	240	300	180	104	257	114	83	132	60	52	90	41	< 30	31	—	—	—	—	—	
	600	> 300	275	> 300	204	128	> 300	140	94	156	72	60	107	47	35	38	—	—	—	—	—	
	650	> 300	> 300	> 300	249	158	> 300	178	118	198	84	72	132	55	40	43	—	—	—	—	—	
700	> 300	> 300	> 300	> 300	> 300	193	> 300	208	144	245	106	88	170	66	49	52	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	
	750	> 300	> 300	> 300	> 300	270	> 300	300	210	> 300	144	114	228	85	60	67	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	

OBSERVAÇÕES: (a) ventilação expressa como fração da área total de uma parede do compartimento;
(b) compartimento revestido por placas de gesso fogo-resistente.

Tabela 4.6 - Valores limites do fator de forma para perfis de aço, obtidos a partir de dados de ensaios com incêndios naturais - combustíveis utilizados: madeira e plástico.
[FONTE: LATHAM et alii, 1987.]

4.1.5. Comportamento de Vigas e Colunas Quanto à Ruptura

Como afirma Almeida [1983], em dissertação de mestrado referente ao comportamento ao fogo das estruturas de concreto armado, "as estruturas hiperestáticas reagem mais favoravelmente, em face da deformação que mobiliza esforços, os quais compensam, parcialmente, as ações decorrentes do efeito do fogo". O que o autor citado apregoa vale para outros materiais estruturais como o aço, e pode ser deduzido a partir da observação dos esquemas estáticos de vigas, e seu comportamento face ao aquecimento.

Tanto é que, segundo Malhotra [1982], "no caso de sistemas estaticamente determinados, a formação de uma única rótula no ponto de maior solicitação pode levar à ruína, já que a seção é incapaz de oferecer resistência à rotação", o que não ocorre com os sistemas estaticamente indeterminados onde "mais de uma rótula é necessária para propiciar um mecanismo de ruptura", conforme mostrado na figura 4.12.

Figura 4.12 - Formação de rótulas plásticas em componentes submetidos à flexão: a) simplesmente apoiado, b) contínuo; c) bi-engastado.

Assim é que a adoção de continuidade para as vigas leva a um melhor desempenho das mesmas.

Considerando-se uma uniformidade na elevação da temperatura ao longo de todo o vão da viga, sua capacidade resistente reduz-se também uniformemente, enquanto a solicitação pode ser considerada constante, desprezando-se o consumo dos materiais pelo fogo (exemplo: luminárias penduradas, revestimento do forro). A maior temperatura da face inferior em relação à superior levará a uma maior dilatação daquela, com a conseqüente curvatura da viga convexamente, em direção ao fogo.

No caso de uma viga contínua a situação pode ser bastante mais favorável. O maior aquecimento da face inferior, levará à tendência de um maior alongamento desta com relação à face superior; no entanto, em função das restrições agora existentes nos apoios intermediários quanto à dilatação da viga, surge uma tendência ao levantamento destes. Todo este contexto vai gerar um acréscimo nos momentos negativos na região dos apoios intermediários e uma redução dos momentos solicitantes positivos na região central dos vãos.

Há que se considerar finalmente que a temperatura próxima à face superior é menor que próximo à face inferior, o que implica em menores reduções da resistência da porção superior da seção, solicitada à tração junto aos apoios. O aumento da solicitação acontece, portanto, numa região em que a redução da capacidade resistente é atenuada.

A figura 4.13 indica qualitativamente o efeito do aquecimento nos momentos solicitantes em uma viga hiperestática.

Figura 4.13 - Diagramas de momentos solicitantes em uma viga hiperestática, antes e durante a ocorrência de um incêndio.
[FONTE: MALHOTRA, 1982.]

Para o incêndio ocorrendo no compartimento sob um tramo intermediário de uma viga contínua, as extremidades da mesma propiciariam um certo engastamento, levando a um comportamento semelhante ao descrito.

Em relação ao comportamento de colunas sob a ação das temperaturas de um incêndio, Malhotra e Cooke [1982] discorrem acerca da deformação sofrida pelos elementos ao receberem um aquecimento não-uniforme da seção. O aço enfraquece progressivamente com a temperatura e, eventualmente, o colapso de uma coluna pode ocorrer como resultado de sua incapacidade de sustentar a carga aplicada, levando-a a flambar, e atingir deformações exageradas.

Na figura 4.14 pode-se observar que a alteração das características mecânicas do aço de modo não-uniforme desloca o eixo resistente da seção da peça, o que em estágios mais adiantados de temperaturas leva a uma deformação oposta àquela verificada no início do incêndio.

Figura 4.14 - Deformação de colunas de aço sujeitas a aquecimento não-uniforme ao longo da seção transversal. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Malhotra e Cooke [1982] mostram que são afetados sensivelmente os parâmetros característicos da resistência à flambagem das colunas diante da elevação da temperatura, isto é, a carga crítica de flambagem e o índice de esbeltez alteram-se com a temperatura.

Os autores acima descrevem um procedimento que leva em conta as condições específicas de carga e vinculação de colunas, para determinação da temperatura crítica. Ao invés de assumir, simplifadamente, o valor de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, pode-se considerar as reais condições de ruptura à flambagem.

Sabe-se que haverá alteração dos parâmetros envolvidos na Fórmula de Euler, já que se alteram a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade. Para levar em conta tal alteração, a "European Convention for Constructional Steelwork" - ECCS propôs curvas (ver figura 4.16, mais à frente) relacionando a carga crítica de flambagem e o índice de esbeltez com a temperatura, através de dois fatores adimensionais:

$$\bar{C}_{CR,T} = n \cdot \bar{C}_{CR,20} \quad \text{OU} \quad n = \frac{\bar{C}_{CR,T}}{\bar{C}_{CR,20}} \quad (1^\circ \text{ fator}) \quad (4.14)$$

onde

$$\bar{C}_{CR,20} = \frac{\sigma_{CR,20}}{\sigma_{E,20}} \quad (4.15)$$

e

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \left(\frac{E_{20}}{\sigma_{E,20}} \right)^{1/2}} \quad (2^\circ \text{ fator}) \quad (4.16)$$

sendo:

n - fator de redução da resistência à flambagem

$\bar{\lambda}$ - fator de esbeltez

$\bar{C}_{CR,20}$ - resistência à flambagem à temperatura ambiente

$\sigma_{CR,20}$ - tensão crítica de flambagem à temperatura ambiente

$\sigma_{E,20}$ - tensão de escoamento à temperatura ambiente

λ - índice de esbeltez da coluna

E_{20} - módulo de elasticidade do aço

A carga crítica de flambagem da coluna é dada por:

$$k \cdot P = C_{CR,T} \cdot A_s \cdot \sigma_{E,E0} \quad (4.17)$$

onde:

- P - é a carga externamente aplicada à coluna
- K - é um fator de correção utilizado para adaptar os valores calculados aos resultados dos ensaios em forno
- A_s - é a área da seção transversal da coluna

Para a maior parte dos casos, a ECCS aconselha adotar $K = 0,85$, o que permite boa aproximação entre os valores calculados e os de ensaio.

Quanto às condições de vínculo de extremidade, que vão influenciar no comportamento da coluna quanto à resistência ao fogo, Malhotra e Cooke afirmam existir uma condição que melhor representa a vinculação das colunas de aço, nos casos usuais em edifícios:

- para colunas de pisos intermediários, em que apenas um pavimento está sujeito ao fogo, do térreo ao penúltimo pavimento, o bi-engastamento (figura 4.15-a);
- para colunas do último pavimento, ou de edifícios térreos, engastamento na base e articulação na outra extremidade (figura 4.15.b).

Figura 4.15 - Comprimentos de flambagem l_{FL} para diversas condições de vínculo das extremidades da coluna.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Malhotra e Cooke estabeleceram o seguinte roteiro para determinação da temperatura crítica de colunas, baseado no método da ECCS:

(a) Calcular o índice de esbeltez da coluna, e o fator de esbeltez $\bar{\lambda}$ na equação (4.16), usando para tanto o comprimento de flambagem correspondente (tais como os mostrados na figura 4.15).

(b) Determinar $C_{CR, 20}$ na figura 4.16, utilizando a curva para 20 °C (temperatura ambiente) e o valor de $\bar{\lambda}$ calculado em (a).

(c) Calcular a carga P , valor de projeto, segundo procedimentos usuais de dimensionamento.

(d) Calcular a resistência à flambagem $\bar{C}_{CR,T}$ na equação (4.17).

(e) Calcular o fator n de redução da resistência à flambagem, na equação (4.14).

(f) Usando a relação simplificada entre tensão de escoamento e temperatura, como a dada pelo gráfico da figura 3.28 (ver capítulo 3), determinar a temperatura crítica da coluna:

$$n = \frac{\sigma_{E,T}}{\sigma_{E,20}} \quad \text{---> } T_{CRÍTICA}$$

(g) Ou, alternativamente, obter o valor de $\bar{\lambda}$ na equação (4.16) e $\bar{C}_{CR,T}$ em (4.17), e determinar na figura 4.16 a temperatura correspondente por interpolação, a qual será a temperatura crítica da coluna.

Determinada a temperatura crítica da peça, o procedimento a seguir é o mesmo anteriormente mostrado, onde se verifica o tempo necessário para o perfil atingir esta temperatura, que é a resistência ao fogo da coluna considerada.

Observação: fórmula de cálculo da carga crítica:

$$P = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad (4.18)$$

onde:

$$\lambda = \left(\frac{l_{FL}}{I} \right)^{1/2} \quad (4.19)$$

I = momento de inércia da seção da peça

Figura 4.16 - Efeito da temperatura na carga crítica de flambagem e no índice de esbeltez de colunas de aço. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

4.1.6. Comportamento de Estruturas Planas Quanto à Ruptura

Dentro do procedimento de avaliação do comportamento ao fogo da estrutura de aço, assume papel fundamental o aspecto de conjunto. Pontos fracos, como conexões que possam gerar um comportamento frágil de partes do sistema ou, por outro lado, efeitos de contribuição para a estabilidade dada por outros elementos, devem ser analisados.

De acordo com Hart, Henn e Sontag [1976], "dependendo do sistema estático concebido, os aspectos de conjunto poderão contribuir favoravelmente; os sistemas hiperestáticos calculados pela Teoria da Elasticidade possuem reservas de resistência, e o fato de ser atingida a temperatura crítica em uma dada seção pode não significar a ruína da peça. Nestas condições uma viga de aço contínua de vários tramos passa a trabalhar muito mais a tração que a flexão, a partir do aparecimento de rótulas plásticas naquelas seções mais solicitadas; disto resulta um aumento na resistência ao fogo da estrutura, do qual é possível tirar-se partido, visando obter estruturas mais econômicas".

Ainda segundo Hart, Henn e Sontag, um aspecto estrutural importante é que os aços estruturais alcançam o limite de escoamento bem antes da ruptura, deformando-se plasticamente; o colapso é precedido por grandes deformações (em vigas, por grandes flechas). Este é um princípio geral de comportamento, que também é verificado em caso de incêndio, durante o qual têm lugar grandes deformações da estrutura.

No caso de pórticos, por exemplo, vigas e colunas compõem um sistema estrutural cujo comportamento é bastante característico; segundo Malhotra [1982] e Landi [1986], quando submetidas à ação do incêndio, as vigas sofrem inicialmente uma dilatação, fletindo as colunas "para fora" (ver figuras 4.17 e 4.18). Com o aumento da temperatura são criadas articulações nas vigas, e a deformação conseqüente gera nas colunas um esforço contrário ao observado inicialmente, culminando com a ruptura.

Figura 4.17 - Diagrama de momentos fletores em um pórtico, ao longo da evolução de um incêndio.
[FONTE: MALHOTRA, 1982.]

Figura 4.18 - Deformação de um pórtico ao longo da evolução de um incêndio.
[FONTE: LANDI, 1986.]

Quanto às conexões, soldadas ou parafusadas, segundo o CSTB [1983], se as conexões e as soldas são dimensionadas segundo normas em vigor (dimensionamento convencional), e quando os perfis são protegidos, elas também o são igualmente, não existe necessidade de verificações adicionais. A única observação feita quanto à condição em caso de incêndio, feita pelo CSTB, é quanto à posição da seção de plastificação eventualmente formada em vigas, que, devido à massa da conexão (maior capacidade de absorção de calor que o perfil), irá se formar menos próxima do nó e mais próxima do meio do vão. Quanto aos sistemas e detalhes de proteção eventuais, serão tratados no capítulo 6.

4.1.7. Alternativas para Aumentar a Resistência ao Fogo

Através de ensaios ou por verificação analítica, ao final da análise, freqüentemente o projetista encontrará como resultado um valor de resistência ao fogo insuficiente, pois o dimensionamento das peças possui coeficientes de segurança que não incluem em suas considerações uma situação de incêndio.

Dadas as suas consequências, porém, a perda de resistência dos elementos deve ser minimizada. Para tanto lança-se mão de certos procedimentos que objetivam atingir um nível mínimo de segurança.

Para enfrentar o problema de resistência ao fogo insuficiente, podem ser citadas algumas soluções, sugeridas por Malhotra e Cooke [1982], e agrupadas em dois casos:

(a) Quando a diferença ($t_R - t$) for pequena:

- minorar, se possível, as cargas de serviço a que o elemento estudado ficará submetido;
- alterar o perfil da peça estudada, de modo a obter um menor fator de forma P_s / A_s ;
- embutir, total ou parcialmente o elemento estrutural em paredes ou lajes; ver exemplos nas figuras 4.19 e 4.20;
- ainda se tratando de vigas, melhorar as condições de vínculo, através de conexões que reduzam a rotação dos nós.

Figura 4.19 - Embutimento parcial da viga em laje moldada no local, isolando o calor na aba superior e aumentando o tempo de resistência ao fogo.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Figura 4.20 - Embutimento parcial do elemento de aço em sistema usando lajes pré-moldadas.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

(b) quando a diferença ($t_R - t$) for grande:

- rever a concepção do edifício, eventualmente adotando soluções estruturais com colunas externas ao edifício e protegidas da radiação do incêndio (ver figura 4.21);
- proteger os elementos, através de mantas, argamassas, concretos, placas, tijolos refratários ou quaisquer materiais que envolvam o perfil e proporcionem ao mesmo adequada isolação.

Os sistemas de proteção da estrutura de aço serão objeto do sexto capítulo deste trabalho.

Figura 4.21 - Proteção da estrutura de aço externamente disposta em relação ao edifício incendiado.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

4.1.8. A Possibilidade de Recuperação de Estruturas de Aço Atingidas pelo Incêndio

Malhotra e Cooke [1982] enfocaram a problemática relativa à reconstrução de uma estrutura de aço atingida pelo incêndio.

Os autores supracitados argumentam: "todos os materiais estruturais do edifício são afetados pelo incêndio: a madeira é queimada; alvenaria e concreto enfraquecem e podem sofrer lascamentos; todos os metais perdem resistência com o aumento de temperatura. O aço estrutural tem seu ponto de fusão aproximadamente a 1550 °C,

temperatura bem acima das máximas constatadas em incêndios de edifícios ou em ensaios de resistência ao fogo, em que normalmente não se excede os 1200 °C." Com isto, a possibilidade de recuperação é maior do que se possa pensar, para a estrutura de aço.

Segundo Malhotra e Cooke, o aço estrutural recupera muito de sua resistência após a exposição ao incêndio, e a reutilização é geralmente possível ou não a partir de considerações relativas à deformação residual, mais que por perda da resistência mecânica em termos da tensão de escoamento. Por exemplo, em geral no mínimo 95% da tensão de escoamento original é recuperada depois de o aço haver sido submetido à temperatura de 600 °C (ver figura 4.23, mais adiante). Em muitas situações, portanto, é possível e desejável a reutilização de estruturas de aço de um edifício que foi submetido a um incêndio de severidade razoável.

Também segundo Hart, Henn e Sontag [1976], "as peças atingidas pelo incêndio, após o seu resfriamento, apresentam uma recuperação de resistência que pode ser avaliada pelo seu aspecto. Na recuperação do edifício, não serão reaproveitados apenas aqueles perfis que, passado o incêndio, ainda se mostrem deformados, enquanto que todos aqueles cuja forma corresponder à anterior ao incêndio, poderão ser reutilizados" - o dito acima é resumido pelos autores na frase: "if it is bent, cut it; if it is straight, paint it".

Quanto a verificações no local, pode-se utilizar a dureza Brinell para avaliar a tensão de escoamento residual do aço, pois existe uma forte correlação entre ambos, conforme pode ser visto no gráfico da figura 4.22.

Figura 4.22 - Relação entre tensão de escoamento residual do aço submetido a um incêndio, após o resfriamento, e a dureza Brinell (faixa para vários aços estruturais). [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

A extensão dos danos à estrutura cristalina e a possibilidade de reversão dos mesmos dependerá da temperatura em que os perfis são fabricados (se são laminados a quente, ou formados a frio, encruados). Não são encontrados dados a respeito de perfis obtidos a partir de soldagem de chapas grossas. Para perfis de aço laminados a quente, vale o gráfico de resistência residual mostrado na figura 4.23 - a faixa mostrada inclui os aços de alta resistência, além dos normais. Para as temperaturas máximas de até 600 °C atingidas no aço, não há perdas significativas, e a estrutura pode ser reconstruída segundo os critérios normais de projeto (vigentes à época da reconstrução).

Figura 4.23 - Relação entre tensão de escoamento residual do aço submetido a um incêndio, após o resfriamento, e a temperatura máxima do aço atingida no incêndio (faixa para vários aços estruturais).
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

No caso de aços trabalhados a frio, estes perdem seu encruamento e as tensões de limite de ruptura ou de escoamento são alteradas para valores próximos daqueles anteriores a serem encruados.

Como visto anteriormente (item 4.1.5), um elemento de aço pode ser levado a distorções durante incêndios, como resultado de expansão térmica, e à instabilidade plástica quando a peça não suportar a carga aplicada. Para todos os aços, grandes danos devido à expansão térmica podem ocorrer, teoricamente, com temperaturas relativamente baixas atingidas no material. Isto dar-se-ia em função de o aço possuir um grande coeficiente de expansão térmica; porém, ocorre um decréscimo do módulo de elasticidade. Pode-se demonstrar que tensões em torno de 230 MPa seriam produzidas no aquecimento tão somente à temperatura de 100 °C, se não fosse a perda de rigidez da estrutura, que faz com que haja uma dissipação através da energia de deformação. Na prática, observa-se que os principais elementos estruturais conseguem suportar altas temperaturas sem apresentar distorções significativas.

Especial cuidado deve ser tomado no exame das conexões das peças atingidas pelo incêndio e, devido ao fenômeno de expansão térmica, mesmo conexões distantes do local afetado podem sofrer os efeitos dos esforços induzidos pelo fogo, e devem ser examinadas. Pode ser necessário substituir parafusos cisalhados, torcidos ou desapertados.

4.2. ASPECTOS ARQUITETÔNICOS DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

4.2.1. Interferência na Concepção do Edifício

A proteção de pessoas e bens presentes no edifício, que não estejam inicialmente expostos ao fogo, pode ser obtida a partir de um confinamento do calor e da fumaça no foco de origem, até que o incêndio seja controlado e extinto, ou, retardando a propagação do fogo e difusão da fumaça um tempo suficiente para que os ocupantes sejam transportados a um local seguro. Semelhante proteção pode ser aplicada quanto à segurança dos edifícios vizinhos.

O controle do incêndio, bem como de seus subprodutos, especialmente o calor, os gases tóxicos e a perda de visibilidade, além da contribuição dada pelos meios de extinção, pode ser facilitado ou dificultado a partir da eficiência dos próprios elementos construtivos do edifício em restringir a propagação do fogo, ou de sua influência sobre o movimento da fumaça. Isto é conseguido por meio de detalhes de confinamento e de ventilação do incêndio.

Será denominado confinamento do incêndio o conjunto de detalhes de projeto destinados a impedir que um incêndio iniciado em um foco no interior de um edifício avance até alcançar proporções incontroláveis, através de:

- paredes e esquadrias resistentes ao fogo, ou protegidas do seu calor;
- elementos de fachada que dificultem o acesso de chamas, pelo lado externo do edifício, a outros andares ou ambientes contíguos;

- afastamento adequado ou barreiras contra a radiação, ou outros sistemas capazes de preservar os edifícios vizinhos;
- em todas as situações, escolha de materiais de revestimento de baixa inflamabilidade, visando prevenir a formação de novos focos pela radiação ou pela elevação de temperaturas.

O confinamento do incêndio é importante inclusive como parte do projeto de saídas do edifício para a evacuação dos ocupantes. Em caso de incêndio, se houver o avanço rápido das chamas, a disseminação da fumaça, o pânico associado a eles concorrerá para dificultar a segurança, cabendo ao projeto das vias de evacuação conhecer e controlar estes fenômenos.

Restam os detalhes de ventilação do incêndio, entendida como um sistema de extração de calor e fumaça, cuja influência se dá sobre o desenvolvimento do fogo e sobre a geração e acumulação de fumaça, e mesmo quanto ao volume de água necessário à extinção. Estes sistemas foram pesquisados pela National Fire Protection Association - NFPA (EUA) em incêndios industriais, representando "um ponto polêmico no estágio atual de conhecimento na área de incêndio" [segundo a NFPA, 1983].

Os aspectos citados da segurança contra incêndio são em sua maioria itens de proteção passiva do edifício e devem ser entendidos como de responsabilidade do projetista⁶, pela sua importância ou pela

6 - O termo "projetista", bastante impreciso, foi aqui empregado com o significado mais amplo possível, em que se supõe uma série de possibilidades, variando segundo o tipo de uso e importância do edifício projetado, local (país, estado, cidade, etc.) e recursos com que foi realizado o projeto do edifício; o "projetista" seria no caso geral uma equipe multidisciplinar, embora no Brasil, na maior parte dos casos, os aspectos enfocados neste item sejam de responsabilidade direta do arquiteto autor do projeto, na qualidade de idealizador do edifício e coordenador do desenvolvimento e detalhamento do projeto do mesmo.

própria interferência que a sua consideração implica quanto à concepção do edifício.

4.2.2. Confinamento e Compartimentação do Incêndio

A NFPA [1983] alerta para o fato de que os edifícios podem conter um sem número de perigosos espaços confinados, atrás de divisórias ou forros, em canaletas ou dutos, embaixo de pisos elevados para computadores, e muitos outros, com dimensões variando de alguns centímetros a alguns metros. No caso de focos de incêndio dentro desses espaços, a detecção visual é difícil, ocorrendo em geral só após o agravamento da situação.

Como exemplo, pode-se imaginar um pequeno foco de incêndio originado no interior de um forro falso combustível, por aquecimento excessivo de um fio elétrico do circuito de iluminação, estando em contato com um material de isolamento acústico - uma combinação de falhas possível em muitos edifícios. Sendo um ambiente confinado, o avanço do incêndio a partir do pequeno foco será lento, pela própria falta da aeração, com grande acumulação de calor. Em uma etapa posterior, a temperatura será suficiente para provocar a combustão de todo o material do forro e, no contato do incêndio com o ar do ambiente, deve ocorrer o fenômeno de inflamação súbita generalizada, propagando o fogo quase instantaneamente por todo o ambiente ("flash-over"). Este problema pode se repetir identicamente em pisos elevados.

O conhecimento dos processos que ocorrem em um incêndio e a experiência acumulada a partir principalmente de fracassos anteriores, são fundamentais para a concepção de um edifício seguro; no exemplo anterior, se o ambiente em questão for

constituído por "fronteiras" resistentes ao fogo, ou seja, for compartimentado, o incêndio poderá ter sua propagação retardada tempo suficiente para que se tome outras providências, ou, caso contrário, alastrar-se-á rapidamente por todo o edifício.

Malhotra e Read [1983] definem como um dos termos de seu glossário: "espaços confinados: espaços vazios internos à construção ou existentes entre partes da construção; como exemplos, tem-se os espaços internos a paredes duplas, os deixados entre forro e piso, ou forro e cobertura." Os autores estabelecem, para minimização de riscos, que todo espaço confinado deve ser subdividido:

- por barreiras resistentes ao fogo colocadas no mesmo plano de qualquer elemento que deva possuir determinada resistência ao fogo (o que, no caso de um forro suspenso, significa prolongar todas as paredes divisórias até acima do forro, e nunca adotar divisórias que se interrompam junto ao mesmo), de tal forma que os espaços confinados mantenham a mesma compartimentação existente nos ambientes;
- deixando um espaçamento entre as barreiras de, no máximo, 10 m (dez metros), em qualquer direção.

A figura 4.24 ilustra o problema, no caso de forros.

Quanto à compartimentação, Malhotra e Read [1983] observam que a definição de fronteiras deve obedecer critérios de risco de ocupação, e que "os compartimentos devem ser delimitados em um pavimento por meio de divisões verticais, ou incluir até no máximo dois pavimentos, exceção feita às escadas de segurança".

Figura 4.24 - Possibilidades de propagação do incêndio devido a pontos falhos de um forro falso.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Os autores citados acima relacionam estrutura e compartimentação dentro do conceito de resistência ao fogo: "se o edifício é projetado de modo a que os elementos estruturais não atinjam o colapso quando submetidos ao incêndio e os elementos de separação, responsáveis por isolar compartimentos, não permitam a propagação do fogo, diz-se que o edifício possui adequada resistência ao fogo (...). O sucesso da compartimentação depende de se conseguir vedações com adequada resistência ao fogo; na prática, além do projeto adequado, isto significa ter cuidados extras com o detalhamento de juntas e ligações entre elementos, e passagens e perfurações dos elementos."

Pelo exposto, vê-se que a inclusão de vedações dimensionadas para resistir à ação do fogo, entre ambientes ou áreas delimitadas do edifício, é um dos itens de proteção passiva a ser incorporado ao

projeto dos edifícios. Mas, qual deve ser essa resistência ao fogo? A resistência ao fogo requerida para vedações ou elementos divisórios é comumente determinada por exigências dos códigos de construção, a partir do tipo de atividade para o qual a edificação (ou parte dela) foi construída, e deve obedecer aos mesmos valores exigidos para os elementos estruturais.

Na verdade, a classificação de atividade possui uma associação feita com o conteúdo - em termos de mobiliário, materiais armazenados, equipamento, etc. - conteúdo este provavelmente existente no espaço associado àquela atividade, e que por sua vez está relacionado a um provável potencial calorífico.

Como visto anteriormente, vários levantamentos feitos permitiram associar, ao tipo de utilização de um edifício ou de seus espaços, um valor médio de potencial calorífico por m^2 , e esse material combustível vai determinar uma duração provável do incêndio, que é influenciado, ainda, pelas condições de ventilação a que o incêndio estaria sujeito no edifício em questão.

Portanto, conhecendo-se as atividades a que são destinados os ambientes, da mesma forma que no caso de elementos estruturais, poder-se-ia estabelecer parâmetros de resistência ao fogo para a compartimentação, independentemente de haver ou não exigências específicas para o caso considerado.

Segundo a NFPA [1983], a compartimentação dos espaços, através de paredes e esquadrias adequadamente resistentes, deve ser feita no sentido de confinar o fogo à sua origem provável, isolando áreas onde está concentrado o potencial calorífico (o caso crítico seria quando houvesse concentrações de risco como as de depósitos de

inflamáveis) ou simplesmente separando unidades (tais como áreas de escritórios de uma mesma empresa ou setor da empresa, ou apartamentos, dependendo do tipo de edifício), mantendo cada risco sob um controle independente.

Segundo Malhotra e Read [1983] as dimensões dos compartimentos devem em geral obedecer:

- para edifícios térreos: área máxima de 2.000 m²; no caso de armazéns (qualquer tipo de estocagem), o volume limite que deve ser observado é de 10.000 m³;

- para edifícios de múltiplos pavimentos: área máxima de 600 m².

Quanto à propagação vertical, os edifícios com oito pavimentos ou mais, de qualquer tipo de uso, devem ter todos os pisos resistentes ao fogo.

Para edifícios de apartamentos, hotéis, creches, hospitais e assemelhados, segundo Malhotra e Read, pode-se ter até dois andares em um mesmo "setor", i.e., ter pisos resistentes ao fogo de dois em dois pavimentos, mas apenas para edifícios com entre 4 e 8 pavimentos.

Conclui-se que para estes autores pode ser dispensada a compartimentação vertical em todos os edifícios com até quatro pavimentos.

Malhotra e Read [1983] afirmam que "teoricamente, a divisão em células ou compartimentos faz com que um incêndio não deva avançar além das fronteiras dentro das quais se iniciou; porém, na prática,

alguns fatores podem por vezes permitir a passagem do incêndio por estas fronteiras, tais como a presença de portas, passagem de tubos, dutos e a própria propagação externa, pelas fachadas. Isto não invalida os requisitos de compartimentação, mas obriga as portas a atenderem à mesma resistência ao fogo das paredes correspondentes, e as passagens de tubos e outras perfurações a serem seladas e protegidas."

Segundo a NFPA [1983], "afora a noção de que o fogo se propaga horizontal e verticalmente em um edifício através de pontos fracos dos sistemas de vedação, é importante entender que o incêndio, como fenômeno complexo que é, quase sempre encontra caminhos bastante propícios, graças à falibilidade dos conceitos adotados em projeto e independente de quanto possam resistir ao fogo, individualmente, os elementos. O fogo pode propagar-se em sentido horizontal ou vertical até pontos distantes do foco inicial de incêndio, através de compartimentos ou espaços que não contenham materiais combustíveis. Dentre os gases quentes originados por pirólise no incêndio, alguns produtos não queimados podem sofrer ignição ao ter contato com ar mais 'limpo', rico em oxigênio, permitindo assim o avanço de chamas ao exterior, ao qual se segue uma propagação vertical do incêndio".

E a propagação vertical externa, que frequentemente se dá, é facilitada pela inexistência de barreiras horizontais e verticais entre as aberturas, pela fragilidade do vidro, amplamente utilizado nas fachadas dos edifícios, e pela existência bastante comum de forros, cortinas divisórias e outros elementos facilmente inflamáveis, próximos às janelas.

Ainda conforme a NFPA, embora dependa do tipo empregado, uma placa de vidro normalmente romperá em uma faixa de temperaturas do ambiente entre 100 °C até no máximo 300 °C, faixa esta de temperatura rapidamente atingida (na curva normalizada ISO, para o tempo de 5 minutos, tem-se $T = 556^{\circ}\text{C}$, mais a temperatura ambiente).

Para dificultar a passagem de chamas de um andar a outro, há uma série de possibilidades, construtivas e de escolha de materiais. Podem ser empregadas placas salientes (marquises) ou balcões, parapeitos de material resistente ao fogo; no caso de fachadas-cortina inteiramente constituídas de vidro, pode-se ter sua segurança contra incêndio aumentada pela criação de parapeitos internos, de concreto ou vidro aramado (ver figura 4.25).

Figura 4.25 - Detalhes construtivos associados a fachadas de vidro, para minimizar a propagação vertical do incêndio. [FONTE: MELHADO & SOUZA, 1988.]

Quanto a estes obstáculos à passagem de chamas, o AISI [1981] relata que houve a partir de estudos experimentais realizados na Grã-Bretanha, uma evolução das exigências, que anteriormente admitiam estar os edifícios bem protegidos em condições que hoje sabe-se que não era exigido suficiente proteção contra o acesso de chamas a andares acima do incêndio (ver figura 4.26). Segundo a fonte citada, não se determinou as dimensões que estes elementos de fachada deveriam possuir para proporcionar proteção adequada, mas é recomendada a dimensão mínima para os painéis de 0.90 m.

Figura 4.26 - Evolução das exigências de barreiras contra a propagação de chamas entre andares.
[FONTE: AISI, 1981.]

O vidro aramado, constituído por uma lâmina de vidro em cujo interior existe uma malha de fios de aço que distribui o calor, reduzindo os esforços térmicos e aumentando a resistência do conjunto, suporta temperaturas bastante mais altas que os vidros comuns. Só a temperaturas da ordem de 800 °C é que uma placa de vidro aramado começa a apresentar deformações excessivas [segundo a NFPA, 1983]; nominalmente, a sua resistência ao fogo é considerada de 45 minutos, mas a sua integridade pode permanecer por mais tempo em condições moderadas de exposição.

Ainda segundo a NFPA, a propagação do fogo pode acontecer também vertical e internamente ao edifício, por suas aberturas verticais, através do chamado "efeito chaminé": os gases quentes resultantes da pirólise dos materiais movimentam-se em sentido ascendente através dos poços de elevador, poços de escada, lixeiras, dutos de ventilação, cujas aberturas ao nível de cada pavimento não tenham bloqueios adequados, seguindo-se então a propagação horizontal em cada um dos andares alcançados pelo fogo.

Os dutos construídos para instalação elétrica, de telefonia, hidráulica ou quaisquer outras tubulações podem proporcionar fácil e imprevista condução do fogo a outros andares. A NFPA [1983] cita como exemplo um incêndio ocorrido no famoso edifício "World Trade Center" na cidade de Nova Iorque, onde, "a partir de sua deflagração em um depósito no décimo-primeiro andar, o fogo passou a um quadro telefônico através de uma porta com persianas, inflamando os cabos e levando o incêndio a atingir do décimo ao décimo-sexto andares, antes que o eficiente grupo de bombeiros local pudesse controlá-lo."

Para dificultar uma propagação interna a dutos de ar condicionado, são utilizados "fire dampers", dispositivos de obturação dos dutos acionados por comando voluntário, o que está sujeito a falha humana, ou por detetores automáticos, caso em que deve haver um suprimento de energia independente.

Malhotra e Read [1983] definem: "fire damper - dispositivo mecânico instalado no interior de um duto, que ao fechar constitui-se em barreira à passagem de chamas e gases quentes ao longo do duto, quando devido à penetração do incêndio no sistema é elevada a temperatura de um elo fusível (ou outro mecanismo de operação) acima de um nível pré-determinado, usualmente na faixa entre 60 e 80 °C". Um destes dispositivos está ilustrado na figura 4.27.

Para os dutos verticais de passagem de tubos, são necessárias barreiras a cada andar, que podem ser "membranas" constituídas de material resistente ao fogo, envolvendo as tubulações de modo a seccionar o duto. Os tubos devem também resistir a temperaturas altas (tubos de plástico tornariam ineficaz a obturação do duto).

Figura 4.27 - Dispositivo de obturação de dutos ("fire damper").
[FONTE: Catálogo PROMAT, s.dt.]

Dentro de uma visão de segurança global contra incêndio, o edifício poderá possuir outros sistemas que poderão contribuir para tornar baixa a probabilidade de propagação do foco de incêndio. Além da interação entre a resistência ao fogo dos materiais constituintes da fachada, inflamabilidade destes materiais da fachada e especialmente daqueles contiguamente dispostos do lado interno, e da presença de obstáculos que dificultem o acesso das chamas às áreas não atingidas, pode-se acrescentar ainda os sistemas de extinção automática. Sua ação poderá conter o avanço do fogo e minimizar, com isso, os riscos de alastramento devido a deficiências de compartimentação, por exemplo.

A legislação francesa no tocante a segurança contra incêndio dos edifícios, reconhece em parte essa interação, permitindo a utilização de uma mesma área com o dobro de potencial calorífico se esta área for dotada de sistema de "sprinklers".

Segundo a NFPA [1983], um outro aspecto ligado ao confinamento do incêndio é o isolamento entre edifícios ou entre zonas independentes de um mesmo edifício.

O AISI [1981] explica que os principais fatores que provocam a transmissão do incêndio de um edifício a um outro, separado do primeiro alguns metros, são:

- o valor máximo da temperatura do fogo atingida no incêndio, já que a quantidade de radiação emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura (segundo o AISI, esta temperatura máxima deve variar entre cerca de 1000 e 1200 °C);

- por outro lado, esta radiação emitida terá sua intensidade diminuída com a distância, na proporção inversa do quadrado da mesma;

- ainda mais, influi nesta intensidade a forma e dimensão do corpo, pois a intensidade calculada por Stefan-Boltzmann refere-se à emissão puntual, e qualquer superfície emissora atuará como se fosse a superposição de várias emissões puntuais (ver figura 4.28), de forma que será a combinação entre a altura do edifício e a dimensão horizontal da fachada (figura 4.29) a determinar um afastamento mínimo para que a radiação que atinge o edifício à frente não seja suficiente para propagar o incêndio.

Figura 4.28 - Radiação emitida por um ponto e radiação emitida por uma superfície (associação de pontos): a forma influi na intensidade de radiação recebida.
[FONTE: AISI, 1981.]

Figura 4.29 - Ilustração esquemática relacionando dimensões das fachadas dos edifícios incendiados e intensidade de radiação emitida.
[FONTE: AISI, 1981.]

As distâncias mínimas de afastamento entre edifícios para impedir a propagação constam de alguns códigos de construção. E, segundo Malhotra e Read [1983], dependendo da inflamabilidade do revestimento usado na fachada e também da porcentagem de aberturas não-protegidas, a distância mínima exigida de separação entre edifícios varia de 5 m a 30 m (ver tabela 4.7).

O AISI [1981] reproduz as tabelas de exigências do "Building Officials and Code Administration - BOCA International Inc.", onde é relacionada a área de aberturas não-protegidas da fachada que se permite em função da distância de afastamento entre edifícios. A tabela 4.8 contém tais exigências, válidas para a grande maioria dos edifícios, exceto os que contêm grande poder calorífico (tais como armazéns de estocagem e alguns tipos de indústrias).

Observe-se que, pela tabela 4.8, para casos onde se tem 100 % de área da fachada com aberturas não protegidas⁷, o que ocorre com vários edifícios na cidade de São Paulo, a distância de afastamento recomendada não pode ser nunca inferior a 4.6 m, atingindo até 46 m quando se tem grandes áreas não compartimentadas.

materiais da fachada*	aberturas não protegidas (% da fachada)	distância mín. de separação
classe A	0	sem restrições
classe B ou C	0	5 m
classe A	≤ 50	5 m
classe A	> 50	15 m
classe B ou C	≤ 50	15 m
sem restrições	> 50	30 m

(*) CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O ENSAIO DE INCOMBUSTIBILIDADE BS-476: Part 4.

Tabela 4.7 - Distância mínima de separação entre edifícios.
[FONTE: MALHOTRA & READ, 1983.]

7 - Para as exigências da BOCA, deve-se considerar área de aberturas desprotegidas todas as áreas de esquadrias com vidro ou aberturas vazadas ou vedadas com materiais não resistentes ao fogo, à qual é adicionada ainda uma área correspondente a elementos de vedação com resistência ao fogo, através de um fator que é função da temperatura atingida pelo elemento no ensaio em forno normalizado - já que à temperatura do elemento de vedação também pode ser associado um determinado poder de emissão de calor.

distância horizontal de separação em metros (2)(3)																						
área máxima de fachada em m² (1)	0	1.2	1.8	2.5	3	4.6	6.1	7.6	9.1	11	12	14	15	17	18	21	24	27	30	34	37	46
ÁREA MÁXIMA DE ABERTURAS NÃO-PROTEGIDAS, EM PORCENTAGEM DA ÁREA DE FACHADA																						
10	0	9	18	43	55	100																
15	0	8	15	32	40	96	100															
20	0	8	13	27	33	75	100															
25	0	8	12	23	28	62	100															
30	0	8	11	21	25	54	97	100														
40	0	7	10	18	21	43	75	100														
50	0	7	10	16	19	36	62	97	100													
60	0	7	9	15	17	32	54	83	100													
70	0	7	9	14	16	29	48	73	100													
80	0	7	9	13	15	27	43	65	92	100												
90	0	7	9	12	14	25	39	59	83	100												
100	0	7	8	12	13	23	37	54	76	100												
150	0	7	8	11	12	18	28	40	54	72	92	100										
200	0	7	8	10	11	16	23	32	43	57	72	89	100									
250	0	7	8	9	10	14	20	28	37	47	60	74	90	100								
350	0	7	7	9	9	13	17	23	29	37	46	56	67	80	93	100						
500	0	7	7	8	9	11	14	19	23	29	35	42	50	59	69	91	100					
1000	0	7	7	8	8	9	11	13	16	19	22	26	30	35	40	51	64	78	95	100		
2000	0	7	7	7	7	8	9	11	12	14	16	18	20	22	25	31	37	45	53	62	72	100

(1) A área de fachada deve ser medida como a área da fachada correspondente a um setor compartimentado do edifício.

(2) O afastamento deve ser medido até os limites do terreno ou até o eixo central da via pública, quando a fachada estiver voltada para esta.

(3) Para áreas sem proteção por "sprinklers"; caso contrário, permite-se o dobro.

Tabela 4.8 - Áreas máximas de fachada com aberturas não-protegidas⁷ em função de áreas de fachada e de distâncias de afastamento entre o edifício e os limites do terreno.
[FONTE: AISI, 1981.]

Quanto à definição de zonas independentes em um mesmo edifício, a presença de um "plano resistente ao fogo" seccionando verticalmente a construção constitui um dos modos de se limitar as perdas prováveis em caso de incêndio, que ficam restritas a uma menor superfície; isto vale também para a separação entre edifícios próximos, pois impede que as chamas e também o calor transmitido por radiação possam levar o incêndio de um edifício a outro.

Este "plano resistente ao fogo", construtivamente, pode ser obtido:

- através do fechamento, com painéis de alvenaria, dos vários vãos deixados por uma linha de colunas de aço revestido, desde que considerada a duração total do incêndio em seu dimensionamento (figura 4.30);
- através de uma parede corta-fogo estrutural, definindo duas estruturas no edifício, independentes entre si, e cada uma delas em relação à parede, caracterizando uma junta no edifício;
- através de uma parede corta-fogo (figura 4.31), que não receba cargas verticais da estrutura ou a ela transfira, mas apenas cargas horizontais (permitindo a continuidade estrutural do edifício);
- através de duas paredes próximas, com resistência individual tal que aquela contígua à área não incendiada continue a exercer a função de proteção, quando a outra, próxima ao incêndio, eventualmente vier a ruir;
- outros elementos cuja resistência ao fogo e estabilidade, quando submetidos à condição última provável de um incêndio contíguo a uma das faces, sejam suficientes para confinar o incêndio.

Figura 4.30 - Exemplo de esquema construtivo para isolamento corta-fogo entre partes de uma construção.
[FONTE: NFPA, 1983.]

Figura 4.31 - Exemplo de esquema construtivo para parede corta-fogo auto-portante usada entre edifícios ou como junta entre partes de uma construção.
[FONTE: NFPA, 1983.]

No projeto desses elementos corta-fogo, a preocupação com a manutenção de sua integridade e estabilidade deve ser predominante, já que o isolamento que eles proporcionam depende não apenas da resistência ao fogo dos materiais constituintes: trata-se de um elemento que estará provavelmente sujeito a forças devido a deformação da estrutura face ao fogo, desabamento de paredes, lajes ou outros elementos. Pelo mesmo motivo, a passagem de tubulações ou elementos da estrutura não pode acontecer por essas separações entre edifícios, pois prejudicaria a integridade das mesmas em caso de incêndio.

4.2.3. Ventilação do Incêndio

4.2.3.1. Influência no Desenvolvimento do Incêndio

Como discutido anteriormente, em um incêndio o processo de combustão dos materiais consome grandes volumes de oxigênio do ar, ou seja, depende da existência de ar fresco para alimentar a queima dos combustíveis, e assim há necessidade de um grande volume de ar externo durante o desenvolvimento do incêndio.

A captação de ar externo irá condicionar a reação de combustão. Recordando os conceitos anteriormente abordados, pode-se destacar o fato de que um incêndio pouco ventilado tem um crescimento mais lento da curva temperatura-tempo, apresentando em contrapartida uma maior duração.

Ao contrário, se a quantidade de ar fresco disponível for suficientemente grande, as temperaturas atingidas tendem a valores mais altos e reduz-se a duração do incêndio. A figura 4.32 mostra o efeito que a ventilação exerce sobre um incêndio plenamente desenvolvido em um ambiente.

Figura 4.32 - Relação típica entre a área de ventilação e as temperaturas máximas do incêndio.
[FONTE: NFPA, 1983.]

Um outro efeito importante da ventilação ocorre quanto à produção de gases e fumaça. Tomando-se dois incêndios em edifícios semelhantes, um deles com forte captação de ar externo, o outro quase sem possibilidade de ventilação do fogo, resultaria no primeiro uma maior produção de calor e, no segundo, a saturação total de fumaça em seu interior, transcorrido o mesmo tempo após o início do fogo.

Segundo a NFPA [1983], ainda que não existam conclusões definitivas a respeito da questão, estudos realizados com modelos reduzidos, para pesquisar o emprego de dispositivos de ventilação, mostraram que:

- em um incêndio ventilado obtém-se como benefício um retardo na perda de visibilidade;
- a ventilação aumenta a taxa de consumo, pelo fogo, de combustíveis;
- existe uma influência sobre a quantidade de água necessária para debelar o incêndio: se o fogo ocorre abaixo de um dispositivo de ventilação, diminui a quantidade de água necessária e, se o fogo está situado em local equidistante dos pontos de ventilação colocados, aumenta a quantidade de água necessária.

A figura 4.33 mostra a aplicação de sistemas de ventilação do incêndio também em edifícios de múltiplos pavimentos [Bayon, 1978].

Figura 4.33 - Utilização de sistemas de ventilação do incêndio em edifícios de múltiplos pavimentos. [FONTE: BAYON, 1978.]

A ventilação do incêndio feita por dispositivos projetados, traz como principal vantagem a facilitação do trabalho do Corpo de Bombeiros, pela melhor visibilidade e acesso no combate ao fogo ou retirada de vítimas. A "National Fire Protection Association" - NFPA possui uma publicação intitulada "Guide to Smoke and Heat Venting", que trata o assunto específica e isoladamente.

4.2.3.2. Projeto de Dispositivos para a Ventilação do Incêndio

Em edifícios de um só pavimento, a ventilação do incêndio pode ser efetuada facilmente através da cobertura. Os dispositivos de ventilação devem ser dotados de um "mecanismo" de acionamento, isto é, possuir um princípio qualquer de construção pelo qual entrarão em ação em caso de incêndio.

Segundo Bayon [1978] e NFPA [1983], o acionamento dos dispositivos de ventilação pode se dar por quebra de chapas de vidro muito fino (dimensionado para romper a uma certa temperatura) ou através de mecanismos de mola contidos por um elemento fusível adequado (ver figura 4.34). Os sistemas acionados eletricamente são desaconselháveis, pela grande probabilidade de falha por falta de energia provocada pelo próprio incêndio, e o acionamento manual (não automático) pode ser uma solução aceitável em alguns casos (quando existir uma brigada de combate interna).

A temperatura adotada como referência para o início de funcionamento dos sistemas de ventilação é um ponto importante. Para os elementos fusíveis adota-se o valor de 100 °C ou mais, dependendo da temperatura ambiente. Porém, alguns incêndios podem produzir muita fumaça sem que haja uma elevação expressiva da temperatura. Por esse motivo, o emprego de detetores de fumaça, combinados aos mecanismos de acionamento por calor, é muito indicado, especialmente se utilizados também para informar um sistema de alarme e aviso ao Corpo de Bombeiros.

Para edifícios de grande área, sem compartimentação, segundo a NFPA, torna-se necessário restringir a propagação horizontal de calor e fumaça através de painéis-cortina, construídos com chapas metálicas (por exemplo), suspensos desde o teto até uma altura de 2,4 a 3,0 m acima do chão (ver figura 4.35).

Figura 4.34 - Dispositivo de ventilação de incêndio acionado por mecanismo contido por um elemento fusível térmico. [FONTES: BAYON, 1978; LIE, 1972.]

Figura 4.35 - Corte esquemático de edifício industrial mostrando a importância da ventilação no trabalho de combate ao incêndio.
[FONTE: NFPA, 1983.]

A distância de espaçamento entre painéis-cortina dependerá da atividade desenvolvida em cada ponto do edifício. De acordo com a quantidade de calor produzido, o espaçamento entre painéis (máximo) pode variar de 75 a 30 m, e a área protegida correspondente, de 4500 a 900 m².

Os sistemas de ventilação são mais eficientes em edifícios de um só pavimento e grande área sem paredes divisórias, ou edifícios enterrados; segundo a NFPA [1983], para proteger a vida humana "é importante observar que o emprego de dispositivos de ventilação, ao contrário do que se possa pensar, não supre a necessidade de outros sistemas, tais como a proteção por chuveiros automáticos".

Para o bom funcionamento dos sistemas de ventilação, o edifício deve possuir também uma série de aberturas mais baixas, próximas ao solo, por onde entrará o ar necessário à formação das correntes de convecção.

Afora os edifícios industriais e de estocagem de materiais, tais sistemas de ventilação podem apresentar bom resultado também em locais de reunião pública (teatros, salas de conferências) ou na região superior de caixas de escadas. Sua aplicação pode ainda ser estendida a edifícios de múltiplos pavimentos. A figura 4.36 mostra a utilização de sistemas de ventilação do incêndio nos vários casos.

O cálculo da área necessária do dispositivo de ventilação pode ser realizado através da fórmula empírica da National Fire Protection Association:

$$A = 0,139 p \cdot h^{3/2} \cdot d^{-1/2} \quad (4.14)$$

onde

A é a área de ventilação (m²)

p é o perímetro da área onde surge o foco de incêndio (m)

h é a altura medida do piso até a base da região saturada de fumaça (m)

d é a profundidade da região saturada de fumaça (m)

O dimensionamento, na maior parte dos casos, dada a relação de proporcionalidade entre o perímetro do fogo e a área necessária de ventilação, pode ser efetuado por fatores tabelados, definidos como:

$$\text{FATOR DE VENTILAÇÃO} = \frac{\text{Área de ventilação (m}^2\text{)}}{\text{Perímetro do fogo (m)}} \quad (4.15)$$

abertura acionada automaticamente

errado

certo

um excesso de ventilação alimenta o fogo

ventilação apenas para saída de fumaça

esquemas para mais de um pavimento

Figura 4.36 - Utilização de sistemas de ventilação do incêndio nos edifícios.

[FONTE: The AQUA GROUP, 1984.]

O fator é escolhido em função da "altura limite de visibilidade" desejada (região não saturada de fumaça). Os fatores de ventilação, válidos para galpões com cobertura em "shed" ou outros tipos onde existe boa subdivisão das áreas a serem ventiladas, estão apresentados na tabela 4.9.

Distância do piso ao centro geométrico do dispositivo de ventilação	Fatores de ventilação para cada altura limite de visibilidade							
	3.1 m	4.6 m	6.1 m	7.6 m	9.2 m	10.7 m	12.2 m	13.7 m
4.6 m	0.61	----	----	----	----	----	----	----
6.1 m	0.43	1.10	----	----	----	----	----	----
7.6 m	0.37	0.79	1.71	----	----	----	----	----
9.2 m	0.31	0.64	1.22	2.41	----	----	----	----
10.7 m	0.27	0.55	0.98	1.71	3.05	----	----	----
12.2 m	0.25	0.49	0.85	1.37	2.23	3.97	----	----
13.7 m	0.23	0.46	0.76	1.19	1.83	2.81	4.88	----
15.3 m	0.21	0.43	0.70	1.07	1.56	2.29	3.36	5.80

Tabela 4.9 - Fatores para dimensionamento de dispositivos de ventilação.
[FONTE: NFPA, 1983.]

É interessante adotar várias ventilações pequenas em lugar de um único dispositivo com toda a área necessária, pois as temperaturas dos gases diminuem rapidamente em seu movimento abaixo da cobertura, retardando o acionamento dos dispositivos de ventilação. Além disso, o risco representado pelas fagulhas e pela radiação das chamas, que saem através das ventilações na cobertura e atingem outras construções é menor quando existem várias ventilações pequenas, que são inclusive menos sensíveis ao efeito de refluxo que pode ser provocado pelo vento.

5. EXIGÊNCIAS DE RESISTÊNCIA AO FOGO PARA AS ESTRUTURAS DOS EDIFÍCIOS

5.1. OS CRITÉRIOS INTERNACIONALMENTE ADOTADOS

O processo pelo qual são estabelecidos e verificados os requisitos de resistência do fogo para as estruturas dos edifícios apresenta as mesmas linhas gerais, na maior parte dos países do mundo. A figura 5.1 mostra, esquematicamente, tal processo.

Figura 5.1 - Relações esquemáticas entre características dos edifícios e tempos de resistência ao fogo das estruturas exigidos por códigos e normas. [FONTE: MELHADO & SOUZA, 1989.]

Sem considerar as naturais diferenças quanto aos critérios estabelecidos por distintos órgãos ou instituições nos vários países, esse processo consiste, em termos simples:

- na classificação do edifício segundo padrões de altura, área construída, materiais de construção empregados, localização (características físicas) e tipo de uso ou atividade;

- no estabelecimento de exigências (tempos mínimos) de resistência ao fogo para as estruturas e outros elementos da construção;
- na verificação do atendimento às exigências estabelecidas, quer seja através da realização de ensaios segundo métodos normalizados, ou pela adoção de elementos construtivos já ensaiados e certificados (esquemas-padrão).

A classificação dos edifícios, determinada por critérios existentes em normas, códigos de construção ou métodos de avaliação de seguros, mede o "potencial de danos" associado à ocorrência do incêndio. O potencial calorífico provável existente, bem como a severidade resultante, estão normalmente considerados de forma implícita na classificação de tipo de uso ou atividade. Como visto, porém, existem exceções. É o caso da normalização alemã (DIN 18.230), que explicita um cálculo para o potencial calorífico, mostrado em 3.5.

Os critérios de classificação dos edifícios e o estabelecimento de exigências para a estrutura diferem nos vários países, o que não ocorre com os métodos de ensaios de resistência ao fogo, muito semelhantes. Como decorrência disso, aos tempos de resistência ao fogo, que são distintos, podem ser associadas reservas de resistência também distintas diante de uma mesma severidade de incêndio. Isto significa, em termos reais, a adoção de coeficientes de segurança não explicitados e diferentes, nos diversos códigos e normas.

Lie [1972] e Rosso [1975] argumentam que nas exigências de resistência ao fogo, existe obrigatoriamente um coeficiente de

segurança, que é tanto maior quanto menor o controle sobre os fatores de risco:

$$t_R = c \cdot t_e \quad (5.1)$$

onde:

t_R - tempo exigido de resistência ao fogo;

t_e - duração equivalente do incêndio, em termos de tempo de ensaio em forno normalizado;

c - coeficiente de segurança.

Assim, se houver maior controle sobre o potencial calorífico real contido no interior do edifício, ao longo de sua vida útil, bem como for conhecido o desempenho dos elementos construtivos quanto à resistência ao fogo, além da inclusão de outras medidas de segurança destinadas a minorar o risco de deflagração e propagação de incêndio, o tempo exigido de resistência ao fogo deverá se aproximar do tempo calculado de duração do fenômeno - já que as hipóteses deste cálculo tornar-se-ão mais verdadeiras.

Harmathy [1988], por sua vez, faz uma crítica às exigências constantes dos códigos de construção:

"As exigências de resistência ao fogo especificadas nos códigos de construção são baseadas principalmente na tradição ou em estimativas grosseiras da severidade provável do incêndio (...) A escolha de elementos construtivos que atendam os requisitos de segurança ao fogo estabelecidos nos códigos e normas de construção não é, entretanto, garantia de que estes elementos cumprirão satisfatoriamente sua função nos incêndios reais em edifícios".

O autor acima defende a posição de que cabe aos projetistas a responsabilidade, mas também o discernimento, sobre os valores requeridos de resistência ao fogo a serem considerados na

verificação da estrutura. A posição defendida por Harmathy contesta a utilidade universal e hegemônica dos ensaios em forno como procedimento de verificação da resistência ao fogo.

Serão discutidas a seguir as diferentes exigências de resistência ao fogo para as estruturas, segundo normas e códigos adotados na Alemanha Ocidental, França, Estados Unidos e Brasil.

5.2. EXIGÊNCIAS DE NORMA NA ALEMANHA OCIDENTAL

Foi visto no item 3.5 deste trabalho como é feita a determinação do potencial calorífico nos ambientes segundo a DIN 18230. A mesma norma propõe categorias de proteção dos elementos dos edifícios a partir do conteúdo de combustível envolvido e das características físicas (área e número de pavimentos) do edifício considerado.

O conceito utilizado é o de potencial calorífico de cálculo, dado por:

$$W_c = f \cdot W' \quad (\text{Mcal/m}^2) \quad (5.2)$$

W_c - potencial calorífico de cálculo

f - fator do edifício

W' - potencial calorífico ideal (Mcal/m²)

O fator "f" é tabelado para diferentes tipos de edifícios. A tabela 5.1 contém fatores aplicáveis a edifícios com ventilação moderada dos ambientes; a área a ser considerada no acessamento das linhas é a área do ambiente, ou a área do pavimento, quando o mesmo não for dividido por elementos resistentes ao fogo.

ÁREA (m ²)	NÚMERO DE PAVIMENTOS					
	1	2	3	4	5	6
< 1600	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
1600-3000	1,2	1,44	1,56	1,68	1,80	1,92
3000-5000	1,4	1,68	1,82	1,96	2,10	2,24
5000-7000	1,6	1,92	2,08	2,24	2,40	2,56
7000-10000	1,8	2,16	2,34	2,52	2,70	2,88
> 10000	2,0	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20

Tabela 5.1 - Fator do edifício para determinação do potencial calorífico calculado (DIN 18230).
[FONTE: HART, HENN & SONTAG, 1976.]

A partir da determinação de W_c , os edifícios são classificados em cinco categorias de exigências de resistência ao fogo, como pode ser visto na tabela 5.2.

Potencial calorífico calculado (W_c)	Categoria do edifício
< 75	I
75-150	II
150-300	III
300-450	IV
450-600	V
> 600	V(*)

(*) COM PRECAUÇÕES ESPECIAIS.

Tabela 5.2 - Categorias de proteção contra incêndio (DIN 18230).
[FONTE: HART, HENN & SONTAG, 1976.]

A cada categoria corresponderão exigências de tempos de resistência ao fogo dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes, treliças de cobertura), exigências estas transcritas na tabela 5.3.

FUNÇÃO ESTRUTURAL	CATEGORIA DO EDIFÍCIO				
	I	II	III	IV	V
Pilares, vigas	-	F30	F60	F90	F120
Lajes	-	F30	F30	F60	F90
Treliças de cobertura	-	-	F30	F30	F30

Tabela 5.3 - Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais (DIN 18230).
[FONTE: HART, HENN & SONTAG, 1976.]

E, segundo a DIN, para verificar a resistência ao fogo requerida, no ensaio o elemento deve estar submetido às cargas de utilização; quando não for possível, para colunas, p.ex., a temperatura do aço não deve superar em média 400 °C, ou 500 °C em qualquer ponto.

5.3. EXIGÊNCIAS DE LEGISLAÇÃO NA FRANÇA

As exigências francesas quanto à construção e utilização dos edifícios são estabelecidas por decretos ("arrêtés"). Os ensaios de resistência ao fogo seguem a curva normalizada pela ISO, e os elementos são classificados, segundo sua estabilidade, em:

- SF $\frac{1}{4}$ h. - estáveis ao fogo por 15 minutos
- SF $\frac{1}{2}$ h. - estáveis ao fogo por 30 minutos
- SF 1 h. - estáveis ao fogo por 60 minutos
- SF 1 $\frac{1}{2}$ h. - estáveis ao fogo por 90 minutos
- SF 2 h. - estáveis ao fogo por 120 minutos

Essa classificação possui ainda graus de 3, 4 e 6 horas, que porém não são exigidos pela legislação, ainda que possam ser atingidos nos ensaios dos elementos estruturais.

A legislação francesa distingue três categorias básicas, segundo características físicas e de uso dos edifícios: as "construções habitacionais", os "estabelecimentos que recebem público" e os "imóveis de grande altura".

À categoria denominada "construções habitacionais", pertencem os edifícios de uso habitacional individual ou coletivo, cuja altura máxima, definida pela distância do piso do pavimento mais elevado ao solo, for inferior a 50 metros. Na hipótese de um edifício habitacional atingir uma cota mais elevada, este será classificado como "imóvel de grande altura". A categoria "construções habitacionais" é ainda subdividida em quatro outras, sempre segundo o número de pisos ou a altura do piso mais elevado.

São considerados "estabelecimentos que recebem público" hotéis, pensões, restaurantes, bares, casas de espetáculos, locais de culto religioso, discotecas, salões de jogos, salas de conferências, estabelecimentos de ensino, bibliotecas, salas de exposições, centros comerciais, lojas, bancos, escritórios administrativos públicos ou privados, centros esportivos cobertos e colônias de férias, entre outros.

Quanto à denominação "imóveis de grande altura", tal classificação se aplica: aos edifícios de uso habitacional, quando possuírem o piso do andar mais alto acima de 50 metros em relação ao solo; aos demais tipos de utilização, quando a altura referida ultrapassar os 28 metros.

Embora cada categoria obedeça a regulamentação específica (decretos distintos), os dados relativos às exigências de resistência ao fogo para elementos estruturais foram agrupados na tabela 5.4, de forma a ter um panorama geral conjunto. É importante destacar que, às exigências de projeto relativas à resistência ao fogo, somam-se outras, inclusive no que concerne ao controle do conteúdo combustível permitido no interior dos edifícios; para a resistência ao fogo de 2 horas exigida para imóveis de grande altura, o limite permitido é de 40 kg de madeira por m².

A regulamentação francesa, portanto, possui implícita essa relação entre potencial calorífico e tempos de resistência ao fogo.

CONSTRUÇÕES HABITACIONAIS ⁽¹⁾		ESTABELECIMENTOS QUE RECEBEM PÚBLICO ⁽²⁾	IMÓVEIS DE GRANDE ALTURA
COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 50 m DO SOLO		COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 28 m DO SOLO	COM QUAISQUER USOS
CATEGORIA res. fogo		ALTURA DO PISO MAIS ELEVADO resist. ao fogo	SF 2 h
1	SF 1/2 h		
2	SF 1/2 h	Térreo SF 1/2 h	
3	SF 1 h	< 8 m SF 1/2 a 1 h ⁽⁴⁾	
4	SF 1 1/2 h ⁽²⁾	> 8 m SF 1 a 1 1/2 h ⁽⁴⁾	

observações:

(1) CONSTRUÇÕES HABITACIONAIS:

- Categoria 1: habitações individuais com até dois níveis (acima do solo);
- Categoria 2: habitações individuais com mais de dois níveis, ou coletivas com o piso mais elevado a não mais de 8 m do solo;
- Categoria 3: as que, não se enquadrando em 1 ou 2, tenham o piso mais alto a menos de 28 m do solo;
- Categoria 4: idem anterior, mas com piso mais elevado entre 28 e 50 m.

(2) OS PISOS PODERÃO RESISTIR APENAS 1 h NOS EDIFÍCIOS COM PISO MAIS ELEVADO A MENOS DE 35 m.

(3) QUANDO O ESTABELECIMENTO OCUPAR INTEGRALMENTE O EDIFÍCIO CONSIDERADO.

(4) DEPENDENDO DA LOTAÇÃO (CAPACIDADE) DO ESTABELECIMENTO.

Tabela 5.4 - Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais (França).
[FONTE: JOURNAL OFFICIEL, 1979-80.]

5.4. CÓDIGOS DE CONSTRUÇÃO NOS ESTADOS UNIDOS

Os norte-americanos possuem, além dos códigos locais, cinco códigos de construção nacionalmente reconhecidos. Tais códigos estabelecem exigências de resistência ao fogo, sempre a partir de uma classificação dos edifícios. Dentre esses cinco códigos, será abordado o "Uniform Building Code" - UBC, cujas disposições são apresentadas neste trabalho.

A classificação feita pelo UBC reúne as ocupações possíveis para os edifícios em grupos e sub-grupos, a partir dos quais são colocadas exigências de resistência ao fogo de acordo com altura e número de pavimentos. Assim como as ocupações, os possíveis tipos de construção também são classificados em categorias, cujas características o código define com base na resistência ao fogo. Os tipos de construção, segundo requisitos de resistência ao fogo, definidos pelo Uniform Building Code, estão dados na tabela 5.5.

Dentro do conceito do UBC, qualquer que seja o tipo de ocupação do edifício, ele poderá ter área, altura e número de pavimentos ilimitados, desde que seus elementos construtivos atendam as exigências "tipo I", quanto à resistência ao fogo. Porém, para os outros tipos de construção, as limitações de altura e número de pavimentos é bastante severa, e tanto maior quanto menor a resistência ao fogo correspondente. São igualmente colocadas restrições quanto às áreas máximas permitidas, no caso de edifícios com pavimento único.

COMPONENTE	TIPO I		TIPO II	
	INCOMBUSTÍVEL			
	F.R.	F.R.	1 HORA	N.R.
Paredes portantes externas	4 h.	4 h.	1 h.	-
Paredes portantes internas	3 h.	2 h.	1 h.	-
Paredes não portantes ext.	4 h.	4 h.	1 h.	-
Estrutura principal	3 h.	2 h.	1 h.	-
Divisórias fixas	1 h.	1 h.	1 h.	-
Paredes de dutos	2 h.	2 h.	1 h.	1 h.
Pisos	2 h.	2 h.	1 h.	-
Coberturas	2 h.	1 h.	1 h.	-

OBSERVAÇÕES:

- F.R.: construções classificadas como "fogo-resistentes";
- N.R.: construções "não-resistentes".
- As exigências transcritas referem-se aos edifícios construídos com elementos incombustíveis, apenas, embora materiais como a madeira também sejam tratados pelo mesmo código.

Tabela 5.5 - Tipos de construção e exigências de resistência ao fogo (Uniform Building Code - EUA).
[FONTE: UNIFORM BUILDING CODE, 1979.]

Para edifícios de escritórios, tem-se:

* construção tipo I: altura e área ilimitadas;

* construção tipo II-F.R.:

- altura máxima de 160 pés (48,8 m);
- número máximo de pavimentos: 12;
- área máxima (pavimento único): 39.900 pé² ou 3.707 m²;

* construção tipo II - 1 hora:

- altura máxima de 65 pés (19,8m);
- número máximo de pavimentos: 4;
- área máxima (pavimento único): 18.000 pé² ou 1.672m²;

* construção tipo II - N.R.:

- altura máxima de 55 pés (16,8m);
- número máximo de pavimentos: 2;
- área máxima (pavimento único): 12.000 pé² ou 1.115 m².

No caso de locais de reunião (auditórios, por exemplo), as restrições são muito maiores, a ponto dos edifícios desse tipo apenas poderem ser construídos dentro dos padrões tipo I e tipo II - F.R., este último com no máximo quatro pavimentos. As restrições são também maiores que as colocadas para os edifícios de escritórios, no caso de escolas, hospitais, e várias outras ocupações.

5.5. PANDRAMA DAS EXIGÊNCIAS NO BRASIL

5.5.1. O Contexto Atual

Hoje, dentro do universo de normas editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT não existe texto genérico que contemple o assunto "resistência ao fogo dos edifícios", ou, especificamente, que trate desse aspecto das estruturas de aço. No caso exclusivo de estruturas de concreto, vale a NBR-5627/80 - "Exigências Particulares das Obras de Concreto Armado e Protendido em Relação à Resistência ao Fogo".

A NBR-5627, antes de estabelecer os cobrimentos para as armaduras e as dimensões mínimas exigidas para as peças de concreto armado ou protendido, necessários para atender a determinada classificação, propõe uma relação direta entre o potencial calorífico existente e o grau de resistência ao fogo exigido, dada por:

$$t_R = 2 W \quad (5.3)$$

E são estabelecidas, a partir disto, quatro classes para os elementos estruturais: F60 (1 hora), F120 (2 horas), F180 (3 horas), F240 (4 horas). Assim, a um potencial calorífico de 60 kg de madeira por m², por exemplo, corresponderia a seguinte exigência: $2 \times 60 = 120$, ou seja, duas horas de resistência ao fogo.

Restam, porém, as exigências da legislação que regula as condições mínimas para aprovação de projetos e construções, particulares de cada município. Em São Paulo, o Código de Edificações apresenta o texto a seguir, relativo a "particularidades construtivas e dimensionamento dos elementos":

"Estruturas - Todas as partes da construção com função de suporte como colunas, pilares e lajes, além de atender às solicitações das cargas incidentes devem apresentar resistência ao fogo, no mínimo, de 4 horas".

Observe-se que a exigência de resistência ao fogo de quatro horas só aparece em códigos de construção americanos, para alguns elementos particulares e no caso de edifícios de altura ilimitada, e na Alemanha e França não se atinge além de duas horas nas exigências de resistência ao fogo.

Além das normas técnicas oficiais e códigos de construção municipais, devem ser mencionadas as exigências das companhias de seguro, que, como já visto em 2.5.1 e 2.5.5, vão condicionar as decisões no nível dos sistemas de segurança do edifício, inclusive quanto à proteção das estruturas.

Através da Circular Normativa nº 13 da Fundação Escola Nacional de Seguros - FUNENSEG [1973], estabelece-se a exigência de uma resistência ao fogo mínima de 3 horas para colunas de aço. Desta forma, na hipótese de não ser atendido o índice de resistência ao fogo estipulado, o edifício será "classe 2 de construção" e pagará taxas mais altas de seguro contra incêndio.

Discorre-se a seguir, acerca destas duas fontes de exigências aplicáveis a estruturas de aço citadas acima, com maior detalhe.

5.5.2. Disposições de Segurança do Código de Edificações do Município de São Paulo

5.5.2.1. Classificação dos Riscos de Incêndio

Através do Decreto nº 10.878 de 7 de fevereiro de 1974, a Prefeitura do Município de São Paulo definiu parâmetros que permitem classificar:

- os materiais, segundo suas "características de ignição e queima";
- as edificações, segundo seu "risco de uso".

Essas classificações estão inter-relacionadas e, a partir delas, as construções são categorizadas em 4 níveis (de risco crescente em termos da segurança contra incêndio), levando em conta:

- o tipo de utilização do edifício;
- altura do edifício e número de pavimentos;
- área construída total ou dos pavimentos mais altos;
- capacidade, lotação ou número de unidades atendidas, segundo o caso;
- características dos materiais nelas depositados ou manipulados, que se classificam em quatro classes, segundo sua inflamabilidade, produção de substâncias tóxicas e risco de explosão.

A classificação dos edifícios faz referência a uma série de características particulares de difícil generalização. Para exemplificar, no caso específico de prédios de apartamentos, seu enquadramento nas categorias de risco dá-se nos seguintes termos:

- CATEGORIA I: edifícios com "superfície total igual ou inferior a 750 m²";
- CATEGORIA II: edifícios com "número de pavimentos de 4 a 8 ou pisos mais elevados entre 8 e 23 m acima da soleira e área construída superior a 750 m²";
- CATEGORIA III: edifícios com "mais de 8 pavimentos, possuindo andar acima do oitavo com área superior a 1000 m²";
- CATEGORIA IV: não inclui edifícios habitacionais.

A cada categoria de risco de uso está associado um conjunto de exigências, relativas a escadas, resistência ao fogo da estrutura, tipos de acabamento interno, sistemas de combate a incêndio. Porém, o artigo 25 da Lei 8.266/75, acrescido pela Lei 8.881/75, isenta uma série de pequenas edificações de "exigências especiais de proteção contra incêndio". Dentre estas, os "edifícios de apartamentos de três andares no máximo", mesmo aqueles em que ocorre um uso misto (andar térreo comercial, por exemplo).

5.5.2.2. Exigências de Compartimentação e Resistência ao Fogo

Quanto à propagação vertical do incêndio no edifício, o Código de Edificações obriga que sejam colocadas barreiras ao longo das fachadas, sempre que os andares não possuírem um certo nível de compartimentação.

Para os edifícios de apartamentos com quatro ou mais pavimentos, por exemplo, caso não haja a subdivisão dos andares em compartimentos com área inferior a 400 m², subdivisão esta efetuada por meio de paredes resistentes a pelo menos 2 horas de fogo, devem ser construídos elementos tais como parapeitos ou abas de características especificadas. A figura 5.2 ilustra as exigências citadas.

As mesmas disposições ilustradas na figura 5.2 aplicam-se a construções de uso não habitacional, cuja área total construída ultrapasse 750 m² ou que possuam mais que dois pavimentos ou 12,00 m de altura.

Os edifícios de apartamentos deverão ainda ter seus pavimentos obrigatoriamente subdivididos em compartimentos com área máxima de 800 m², protegidos por paredes com resistência ao fogo de 2 h e portas corta-fogo (aplica-se aos andares situados acima de 10,00 m do piso do andar mais baixo da edificação).

Figura 5.2 - Exigências do Código de Edificações de São Paulo quanto à colocação de elementos de fachada acima e abaixo de pavimentos não compartimentados - os parapeitos e abas devem resistir, no mínimo, a 2 horas de fogo.
[FONTE: HIRSCHFELD, 1987.]

O Código de Edificações estabelece ainda uma definição para o termo resistência ao fogo:

"Resistência ao fogo - avaliado pelo tempo que o elemento construtivo, quando exposto ao fogo, pode resistir sem se inflamar ou expelir gases combustíveis, sem perder a coesão ou forma, nem

deixar passar para a face oposta elevação de temperatura superior à prefixada".

Pode-se constatar que a definição transcrita acima é uma mescla dos conceitos consagrados de reação ao fogo e resistência ao fogo e, sem dúvida alguma, tecnicamente sem valor enquanto requisito de desempenho de elementos estruturais.

Ainda quanto às características técnicas dos materiais, a legislação municipal toma por parâmetro os chamados materiais "tradicionais", afirmando que "o emprego de materiais (...) ainda não consagrados pelo uso (...) dependerá de prévio exame e aceitação, pela Prefeitura (...), comprovada mediante exames, ensaios, análises ou provas realizadas por entidades oficiais ou reconhecidas pela Prefeitura".

Já o Decreto nº 10.878/74 estabelece exemplos de materiais "resistentes ao fogo", sempre tomando por referência aqueles "já consagrados pelo uso", conforme trecho transcrito a seguir:

"Admitem-se como resistentes ao fogo durante:

6 horas - Parede de alvenaria de tijolos comuns de barro, com espessura não inferior a 38 cm, e colunas de concreto armado com espessura de 35 cm com recobrimento de proteção não inferior a 5 cm; vigas e lajes de concreto armado com espessura não inferior a 15 cm e recobrimento mínimo de 3 cm.

4 horas - Parede de tijolos de barro revestida com argamassa de cal e areia, e espessura total não inferior a 25 centímetros; laje de concreto armado com espessura não inferior a 10 cm e vigas com espessura não inferior a 12 cm, com recobrimento não inferior a 2,5 cm para as vigas e 2 cm para as lajes;

2 horas - Paredes de tijolo comum com espessura total não inferior a 14 cm (1/2 tijolo, com revestimento); laje de concreto, espessura 8 cm, recobrimento mínimo 1,5 cm;

1 hora - Parede de tijolos em espelho (1/4), assentes com argamassa de cimento, revestida com cal e areia."

Uma observação importante quanto às definições acima transcritas é que as mesmas entram em conflito com as definições equivalentes para as categorias de resistência ao fogo de peças de concreto, constantes de normas da ABNT [NBR-5627/80].

E, na lei 8.266/75, artigo 97, o Código adverte que "os pavimentos que separam verticalmente os andares de uma edificação (...) deverão obrigatoriamente observar os índices técnicos de resistência ao fogo, isolamento térmico, isolamento e condicionamento acústico, resistência e impermeabilidade correspondentes aos de um pavimento de laje de concreto armado, com espessura final de 0,10 m, acabada na face superior com piso de tacos de madeira e revestimento, na face inferior, com argamassa de cal e areia."

Deve ser levado em consideração a forma e circunstâncias de elaboração das leis que compõem os requisitos voltados à segurança contra incêndio, dentro do atual Código de Edificações, as quais vieram como resposta à inquietação gerada pelos incêndios dos edifícios Andraus e Joelma - ocorridos em 24/02/72 e 01/02/74, respectivamente, ambos na cidade de São Paulo.

É forçoso observar, porém, que o Código de Edificações do Município de São Paulo, a cidade mais desenvolvida do Brasil, trata com muita reserva o emprego de materiais e sistemas construtivos não convencionais, dentre os quais podem ser incluídos os processos que empregam estruturas de aço em edifícios, mas também vários outros largamente empregados na cidade e no país.

São colocadas restrições ainda quanto ao emprego de materiais de acabamento, cuja combustibilidade deve ser limitada de acordo com o tipo de utilização do edifício.

5.5.3. Exigências das Seguradoras Quanto a Proteção de Estruturas de Aço

Embora na Tarifa de Seguro Contra Incêndio do Brasil a avaliação feita pelo critério "construção" não inclua maiores considerações quando aos edifícios de aço, a Fundação Escola Nacional de Seguros - FUNENSEG [1973], em sua Circular Normativa nº 13 (20/07/73), recomenda o revestimento das estruturas de aço para resistências ao fogo de 3 a 6 horas e toma como parâmetros sistemas testados pelo Underwriters Laboratories (EUA). Não é feita, porém, qualquer referência a uma relação entre as exigências de resistência ao fogo colocadas e a tipologia do edifício.

Nessa circular normativa, a FUNENSEG observa que "o nosso trabalho visa somente traçar uma diretriz básica, apresentando valores relativos que servirão de ponto de partida para futuramente podermos apresentar trabalhos com reais características técnico-científicas.(...) Os tipos de técnica de revestimento dados a seguir são os já usados entre nós e estão de acordo com os padrões internacionais e da 'Fire Test of Building Construction and Materials', ASTM E-119 (...)."

Os revestimentos de proteção contra incêndio para a estrutura de aço recomendados pela FUNENSEG, segundo o ensaio ASTM E-119, apresentam resistência ao fogo variando entre 1 e 6 horas.

Os vários sistemas disponíveis para proteção contra fogo de elementos estruturais de aço serão alvo do capítulo seguinte deste trabalho.

5.6. O CÓDIGO PROPOSTO POR MALHOTRA E READ

Sob os auspícios de um programa das Nações Unidas que envolveu um projeto de cooperação entre o Brasil e o Reino Unido⁸, H. L. Malhotra e R. E. H. Read [1983] elaboraram uma proposta de "Código de Segurança Contra Incêndio dos Edifícios", contemplando a totalidade das exigências voltadas aos sistemas de proteção passiva dos edifícios - exigências, como nos demais códigos, genéricas, aplicadas aos edifícios seja a estrutura destes de aço ou não. Algumas das disposições constantes deste código já foram, inclusive, citadas em capítulos anteriores.

Dentre outras exigências apresentadas por Malhotra e Read, destacam-se as relativas à resistência ao fogo dos elementos estruturais dos edifícios. Tais exigências partem de uma classificação dos edifícios segundo sua utilização, classificação esta ilustrada pela tabela 5.6.

8 - Um grupo de especialistas do Reino Unido, técnicos e engenheiros pesquisadores da Fire Research Station, engajou-se no "Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, Normalização e Controle de Qualidade e Certificação de Qualidade de Ferro e Aço" (BRA/75/003), para elaborar um guia de projeto de "Proteção de Estruturas de Aço Contra Incêndio". Como fora constatada uma lacuna quanto à formulação de exigências de segurança contra incêndio nos edifícios, o trabalho iniciou-se pela redação de um "Código de Segurança Contra Incêndio dos Edifícios", que faria "retaguarda" ao guia de projeto de estruturas de aço.

TIPO	USO DO EDIFÍCIO
1	Residências unifamiliares (1 ou 2 pavimentos)
2	Edifícios de apartamentos
3	Edifícios institucionais (*)
4	Edifícios de hospedagem (**)
5	Escolas
6	Edifícios de escritórios
7	Lojas (***)
8	Locais de reunião (****)
9	Edifícios industriais térreos
10	Edifícios industriais de múltiplos pavimentos
11	Estacionamentos
12	Estocagem - baixo potencial calorífico
13	Estocagem - alto potencial calorífico

observações:

(*) inclui creches, asilos, hospitais, prisões, etc.

(**) além de hotéis, também motéis e internatos.

(***) inclui cabeleireiros e restaurantes.

(****) clubes, museus, saunas, teatros, cinemas, etc.

Tabela 5.6 - Classificação dos edifícios segundo sua utilização.
[FONTE: MALHOTRA & READ, 1983.]

Dentro de cada categoria de utilização, Malhotra e Read separam os edifícios, para efeito das exigências de resistência ao fogo de elementos estruturais ou de compartimentação, em quatro faixas, dependendo do número de pavimentos. As exigências propostas são reproduzidas na tabela 5.7. Para efeito do código de Malhotra e Read, considera-se "elementos estruturais ou de compartimentação" as colunas, vigas, sistemas de piso, paredes com função estrutural, paredes externas e paredes entre compartimentos do edifício.

TIPO de EDIFÍCIO	RESISTÊNCIA AO FOGO EXIGIDA (horas)			
	número de pavimentos do edifício			
	TÉRREO	ATÉ 4 pav.	4-8 pav.	mais de 8
1	$1/2$	$1/2$	-	-
2	$1/2$	1	$1\ 1/2$	2
3	$1/2$	1	2	3
4	$1/2$	1	$1\ 1/2$	2
5	$1/2$	1	2	2
6	$1/2$	1	2	2
7	$1/2$	1	2	3
8	1	1	$1\ 1/2$	2
9	1	-	-	-
10	1	$1\ 1/2$	2	3
11	1	1	2	3
12	1	$1\ 1/2$	2	3
13	1	$1\ 1/2$	3	4

OBS.: não se aplica a pavimentos enterrados sem comunicação direta com o exterior.

Tabela 5.7 - Exigências de resistência ao fogo para os elementos estruturais ou de compartimentação, segundo a classificação mostrada na tabela 5.6.
[FONTE: MALHOTRA & READ, 1983.]

6. SISTEMAS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA DE AÇO

6.1. A UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA PROTEÇÃO DO AÇO

6.1.1. Aspectos Gerais

O aço estrutural é suscetível a altas temperaturas e, como discutido anteriormente, isto se traduz por uma gradual perda de resistência mecânica. Se a verificação da resistência ao fogo indicar o atingimento de uma situação de colapso em caso de incêndio, em muitos casos, a solução mais viável será adotar sistemas de proteção da estrutura do edifício, minimizando os efeitos do calor produzido nesse possível incêndio.

Em publicação da CONSTRADO de autoria de Elliott [1974], e também em publicações do AISI [1981] e da NFPA [1983], são feitas revisões acerca da utilização dos vários sistemas de proteção adotados para incrementar a resistência ao fogo de perfis de aço. A NFPA e o AISI apresentam uma visão evolutiva destes sistemas, ao longo do tempo, até sua situação em época recente.

Um dos métodos mais comuns de se obter a proteção do aço é utilizar revestimentos com materiais isolantes e resistentes ao fogo, sob a forma de concretos, argamassas, placas, mantas, etc.

Outro aspecto já abordado é que essa proteção pode ser obtida não apenas pelo uso de revestimentos dos componentes de aço. Pode-se ainda lançar mão de soluções arquitetônicas e construtivas; por exemplo, dispondo a estrutura externamente ao edifício, com as colunas convenientemente isoladas do acesso das chamas, usando

forros para o isolamento das vigas e pisos, usando divisórias corta-fogo, enfim, uma série de alternativas diferentes de evitar a exposição do aço ao calor.

Dentro da tradição construtiva de outros países, em que o emprego de aço é mais intenso que entre nós, um método largamente empregado por muito tempo foi o "encapsulamento" dos perfis em uma massa de concreto. No caso de painéis de piso, isto era obtido por uma concretagem simultânea da laje e da proteção da viga, formando um todo monolítico (figura 6.1).

Figura 6.1 - Encapsulamento de viga de aço por concreto, formando conjunto monolítico com a laje de piso.

Tal tipo de proteção apresentava muitos inconvenientes quanto aos custos de mão-de-obra e mesmo quanto à execução, por introduzir a necessidade de fôrmas e escoramentos, além de aumentar consideravelmente o peso da estrutura. Estas desvantagens levaram ao desenvolvimento de soluções mais leves e de mais fácil execução.

Uma outra observação quanto ao concreto em relação à resistência ao fogo é de que suas propriedades como material de proteção são variáveis de acordo com os agregados usados na mistura; condiciona ainda o seu comportamento a altas temperaturas a quantidade de água existente nos poros e capilares, cuja expansão aumenta o problema de lascamento e perda de resistência do concreto pela exposição ao calor do incêndio.

Da mesma forma que o encapsulamento de vigas e colunas de aço em concreto, também uma série de tipos de blocos, cerâmicos, de gesso ou concreto, foram bastante empregados para revestimento isolante dos elementos estruturais. Os inconvenientes de mão-de-obra e carga na estrutura estão também geralmente presentes nestes sistemas.

Assim é que se popularizaram os revestimentos projetados, aplicados com bombas apropriadas, como é o caso de argamassas a base de fibras minerais, e outros revestimentos de grande poder isolante, por exemplo na forma de placas ou mantas pré-fabricadas, e cuja aplicação é também rápida e independente da execução da estrutura.

Os sistemas de forro fixados sob o vigamento dos pisos (proteção por membrana), têm tido largo emprego; cuidados especiais quanto a este tipo de proteção, porém, devem ser dispensados para garantir sua integridade em caso de incêndio, dada a possibilidade de falhas construtivas, geradas na própria execução ou por reparos inadequados feitos quando da manutenção de instalações, por exemplo. No entanto, um detalhamento adequado e a comprovação mediante ensaios permitiram desenvolver maior confiabilidade.

Mais à frente, os vários sistemas citados serão vistos em maiores detalhes.

6.1.2. Propriedades Desejáveis

O comportamento de um material empregado na proteção dos componentes estruturais de aço está relacionado com algumas propriedades físicas e químicas, que o qualificam como bom isolante térmico a altas temperaturas, bem como permitem que o sistema de proteção apresente a integridade necessária durante a evolução do incêndio, mantendo-se coeso e impedindo que o aço fique diretamente exposto ao calor.

Em termos ideais, um material para proteção da estrutura de aço deveria apresentar como propriedades [segundo Berto, 1984]:

- baixa densidade ou massa específica aparente (d);
- baixo coeficiente de condutibilidade térmica (k);
- alta capacidade de absorção de calor (capacidade térmica, função do calor específico e da densidade);
- alto conteúdo de umidade;
- resistência a choques térmicos;
- baixo coeficiente de dilatação térmica;
- adequada resistência mecânica (quando exposto a impactos) e coesão.

Normalmente os materiais com baixa densidade possuem baixa condutibilidade térmica; porém, sua capacidade térmica, função da massa e do calor específico do material, é também baixa. Além disso, embora o conteúdo de umidade presente no material aumente sua capacidade de absorção de calor, em alguns materiais a expansão da água contida nos vazios da sua estrutura gera tensões que ajudam a desagregar o material. Isto, como foi citado, ocorre no chamado fenômeno de lascamento do concreto ("spalling").

Algumas dessas propriedades também sofrem alguma variação com a temperatura.

Quanto ao problema da resistência aos choques térmicos, deve-se tal preocupação ao uso de jatos d'água durante a extinção do incêndio, que pode provocar a perda de integridade do elemento. Algumas normas de ensaio em forno normalizado, como a DIN alemã, e a ASTM americana, incluem tal verificação, antes de homologar o sistema para uso como elemento de compartimentação com um dado grau de resistência ao fogo.

Apresenta-se na tabela 6.1, uma série de sistemas de proteção contra fogo, com algumas das propriedades térmicas correspondentes.

O princípio básico pelo qual atuam vários sistemas de proteção para proporcionar adequada resistência ao fogo ao componente de aço resume-se em manter o mesmo a temperaturas abaixo da temperatura crítica convencionada. Como não é possível reproduzir todas as condições reais em ensaios, o critério de temperatura crítica é aceito para determinação da resistência ao fogo na maior parte das normas de ensaio em forno (ver item 4.1.2).

MATERIAL	DENSI- DADE kg/m ³	CALOR ESPECÍ- FICO J/kg°C	CONDU- TIVILI- DADE W/m°C	UMIDADE % massa
Fibras minerais projetadas	200-350	1050	0,08-0,10	1,0
Placas de vermiculita	150-300	1200	0,12-0,17	7,0
Placas de vermiculita/gesso	800	1200	0,15	15,0
Argamassa de gesso	500-800	1700	0,20-0,23	20,0
Fibras minerais em mantas	100-500	1500	0,23-0,25	2,0
Concreto celular	300-1000	1200	0,12-0,40	2,5
Concreto leve	1200-1600	1200	0,64-0,81	2,5
Concreto	2200-2400	1200	1,28-1,74	1,5

Tabela 6.1 - Propriedades térmicas típicas de alguns materiais e componentes utilizados em proteção contra fogo.
[FONTES: LIE, 1972; MALHOTRA, 1982.]

De qualquer modo, os resultados de ensaios, uma vez conhecidos quanto a um determinado sistema de proteção aplicado a uma certa seção estrutural de aço, tornam-se dados disponíveis para o projeto de estruturas de aço. De fato, alguns fabricantes de materiais de proteção contra fogo "encomendam" ensaios a laboratórios de renome, e incluem tais dados em seus catálogos.

Os próprios laboratórios de ensaios estabeleceram uma listagem de esquemas de proteção já ensaiados, "esquemas-padrão" de proteção para determinados graus de resistência ao fogo, que podem ser considerados pelos projetistas de estruturas de aço (caso dos esquemas "UL design" do Underwriters Laboratories norte-americano). Adiante se voltará a falar destes esquemas-padrão.

O mesmo procedimento que adota a curva normalizada e o critério de temperatura crítica, pode ser utilizado dentro de um método de cálculo analítico para determinação da resistência ao fogo proporcionada por uma certa espessura de proteção; conhecidas as propriedades físicas que caracterizam o material usado, é possível calcular o tempo necessário para que se atinja uma dada temperatura no aço, internamente a esta proteção. Será abordado a seguir um processo de cálculo que permite determinar este tempo de resistência ao fogo de perfis protegidos.

6.1.3. Dimensionamento Analítico da Proteção Contra Fogo

Segundo Malhotra [1982], o cálculo analítico da resistência ao fogo de um perfil protegido utiliza as equações de transmissão de calor considerando dois casos distintos: materiais de proteção com capacidade térmica desprezível, e materiais cuja capacidade térmica é significativa.

À semelhança do visto no item 4.1.3 - "Cálculo Analítico do Comportamento ao Fogo", a variação da temperatura em um perfil de aço protegido, exposto ao incêndio normalizado (ver figura 6.2), é dada por:

$$\Delta T_A = \frac{P_s}{A_s} \frac{60 \Delta t}{c_A d_A} (h + h_R) \frac{k}{e} (T_F - T_A) \quad (6.1)$$

sendo:

T_A - temperatura atingida no aço, em um dado instante;

P_s/A_s - fator de forma da seção da peça, onde P_s é o perímetro de contato aço - material de proteção (ver figura 6.3);

c_A - calor específico do aço;

- d_a - densidade do aço;
 h - coeficiente de transmissão de calor por convecção;
 h_r - coeficiente de transmissão de calor por radiação;
 Δt - intervalo de tempo para cálculo de temperaturas;
 K - condutibilidade térmica do material de proteção;
 e - espessura da proteção;
 T_f - temperatura do incêndio (tomada no meio do intervalo).

Ou, chamando $\alpha = (h + h_r)$ e rearranjando a equação anterior:

$$\Delta T_a = \frac{P_s}{A_s} \frac{60 \Delta t}{\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{e}{K} \right) c_a d_a} (T_f - T_a) \quad (6.2)$$

Figura 6.2 - Transferência de calor do incêndio (curva normalizada ISO R 834) a um perfil de aço protegido.

Para as temperaturas muito elevadas atingidas durante o incêndio, $1/\alpha$ é desprezível diante da relação e/K , característica da

transmissão de calor através do material de proteção, o que permite chegar à seguinte equação simplificada:

$$\Delta T_A = \frac{K}{e} \frac{P_0}{A_0} \frac{1}{c_A d_A} (T_r - T_A) 60 \Delta t \quad (6.3)$$

Figura 6.3 - Fatores de forma P_0/A_0 para várias seções de aço protegidas.

A equação (6.3) vale para a hipótese de que a proteção não possui capacidade térmica, isto é, não absorve nenhuma quantidade de calor, e está completamente seca. Porém, em diversos materiais ocorre o oposto, o que leva a uma atenuação da quantidade de calor transmitida e vai retardar o aquecimento do aço. Uma regra prática

determina que a proteção pode ser considerada de baixa capacidade térmica quando [segundo Malhotra, 1982]:

$$2 (c d e) P_s < (c_A d_A) A_s \quad (6.4)$$

onde:

c - calor específico do material de proteção;

d - densidade do material de proteção;

e - espessura do material de proteção.

Caso não se verifique a condição acima, ou seja, o material possa ser considerado de alta capacidade térmica, a quantidade de calor absorvida pela proteção deve ser considerada. Assumindo que após um intervalo de tempo Δt , em que a variação de temperatura do fogo é de ΔT_f e da seção de aço, ΔT_A , a temperatura do material de proteção varie $(\Delta T_f + \Delta T_A)/2$, a quantidade de calor correspondente será dada por aquele necessário para elevar a temperatura do aço de ΔT_A , mais o calor para aquecer a proteção, conforme a hipótese acima, com um acréscimo $\Delta T = (\Delta T_f + \Delta T_A)/2$.

Assumindo ainda que o efeito da capacidade térmica da proteção pode ser simulado aumentando-se a capacidade térmica do aço, de um valor $1/2 (c d e) P_s$, chega-se a:

$$\Delta T_A = \left[\frac{K}{e} P_s \frac{1}{(A_s c_A d_A + \frac{c d e P_s}{2})} (T_f - T_A) \right] 60 \Delta t \quad (6.5)$$

Ou ainda:

$$\Delta T_A = \frac{K}{e} \frac{P_s}{A_s c_A d_A} \frac{1}{\frac{c_A d_A}{c_A d_A + \frac{c d e P_s}{2A_s}}} (T_f - T_A) 60 \Delta t \quad (6.6)$$

Observe-se que o fator $\frac{c_A d_A}{c_A d_A + c d e P_0}$ da equação (6.6) é menor que 1, o que comprova o menor aquecimento do aço obtido, ao se considerar também o efeito de capacidade térmica da proteção.

Desenvolve-se a seguir um exemplo de aplicação para o cálculo analítico de resistência ao fogo de um perfil de aço protegido, cujas características podem ser vistas na figura 6.4.

seção 460 x 152 x 60 Kg

$c_A = 520 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$d_A = 7850 \text{ kg/m}^3$

Figura 6.4 - Características do perfil de aço (exemplo de aplicação).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO:

Características da proteção:

$$e = 0,025 \text{ m}$$

$$K = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$c = 1050 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$$

$$d = 300 \text{ Kg/m}^3$$

Temperatura ambiente: $T_0 = 20^\circ\text{C}$

Temperatura do fogo: $T_f = T_0 + 345 \log(8t + 1)$ - curva ISO R 834

Intervalo de tempo para cálculo:

$$\Delta t \leq \frac{25.000}{60 f}$$

$$f = \frac{P_s}{A_s} = \frac{1,2538}{75,8 \times 10^{-4}} = 165 \text{ m}^{-1}$$

$$\therefore \Delta t < \frac{25.000}{60 \times 165} \Rightarrow \Delta t = 2,5 \text{ min.}$$

Avaliação da capacidade térmica da proteção:

$$(c_A d_A) A_s = 30.942$$

$$2 (c d e) P_s = 13.590$$

Como $2 (c d e) P_s < (c_A d_A) A_s$, considera-se a proteção como de baixa capacidade térmica, e a equação para cálculo da temperatura atingida no aço será:

$$\Delta T_A = \frac{K}{e} \left[\frac{P_s}{A_s} \frac{1}{c_A d_A} 60 \Delta t \right] (T_F - T_A)$$

sendo

$$\frac{K}{e} = \frac{0,1}{0,025} = 4$$

e

$$\frac{P_s}{A_s} \frac{1}{c_A d_A} 60 \Delta t = 165 \times \frac{1}{520 \times 7850} \times 60 \times 2,5$$

$$\Rightarrow \frac{P_s}{A_s} \frac{1}{c_A d_A} 60 \Delta t = 0,0061$$

donde

$$\Delta T_A = 0,0243 (T_F - T_A)$$

Procede-se os cálculos a intervalos de 2,5 minutos (sendo a temperatura do fogo calculada nos pontos médios dos intervalos) até obter-se temperatura no aço superior à crítica, o que pode-se convencionar como:

$$T_A \geq 550^\circ\text{C}$$

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 6.2, a seguir.

Tempo (min.)	T_F (°C)	$T_F - T_A$ (°C)	ΔT_A (°C)	T_A (°C)
0	20	0	0	20
2,5	379	359	9	29
5,0	535	506	12	41
7,5	609	568	14	55
10,0	659	604	15	70
30,0	...			199
60,0	...			377
90,0				530
92,5	1008	478	12	542
95,0	1012	470	12	554
97,5	1016	462	12	565

Tabela 6.2 - Cálculo de temperaturas em perfil de aço protegido.

Da tabela 6.2 pode-se obter o tempo necessário para a seção dada atingir o valor de temperatura crítica no aço, por interpolação linear:

$$t = 92,5 + 2,5 \times \frac{(550 - 542)}{(554 - 542)}$$

$$\underline{t = 94 \text{ min.}}$$

que, dentro do critério adotado, representa a resistência ao fogo da peça estudada. Como classificação, ter-se-ia F90 ou SF 1 1/2 h.

Anteriormente, no capítulo 4 - item 4.1.3 - foi calculada a resistência ao fogo de um perfil desprotegido, com fator de forma desfavorável (alto), obtendo-se para o mesmo 13,5 minutos de resistência ao fogo na exposição à curva normalizada.

Para efeito de comparação entre o comportamento deste perfil na situação de exposição direta ao fogo normalizado e o mesmo perfil revestido, calculou-se a resistência ao fogo que este atingiria se fosse protegido por um revestimento bastante isolante, com as mesmas características do utilizado acima; os resultados, apresentados em forma de gráfico comparativo, podem ser vistos na figura 6.5.

Observe-se que a alteração é sensível na curva de aquecimento do perfil quando se introduz a proteção, permitindo a ele obter um tempo de resistência ao fogo de cerca de 76 minutos, o que na prática significaria receber o grau de 1 hora (F60 ou SF 1 h).

Figura 6.5 - Gráfico comparativo de temperaturas atingidas por um perfil leve de aço na exposição à curva ISO R 834, para os casos de perfil sem proteção e perfil revestido - perfil 3" X 11,2 kg, características da proteção dadas na figura.

6.1.4. Os Esquemas-Padrão

Para atender às exigências de resistência ao fogo dos códigos de construção norte-americanos, existem disponíveis conjuntos de especificações de proteção para determinados perfis de aço com resultados comprovados por ensaios em forno, e que são possíveis de serem adotados pelo projetista na fase de dimensionamento da estrutura de aço, sem que seja necessário proceder a ensaios específicos ou verificação analítica para averiguar sua resistência ao fogo.

O Underwriters Laboratories possui um grande número destes esquemas-padrão, em que são relacionadas as dimensões das peças e as espessuras mínimas de revestimento para atingir determinado grau de resistência ao fogo, utilizando-se os produtos de fabricantes que procederam sua homologação pelo UL. Para maior clareza, um esquema-padrão preconizado pelo Underwriters Laboratories para viga WB X 2B é mostrado na figura 6.6.

O American Iron and Steel Institute - AISI [1984] apresenta ainda equações empíricas que podem ser utilizadas, dentro de seus limites, para a consideração de perfis de vigas ou colunas com seções similares às de esquemas já ensaiados, ampliando assim o alcance dos dados disponíveis. É importante ressaltar que apenas os materiais homologados podem ter seu uso com base nas espessuras tabeladas, não bastando conhecer dados quanto às propriedades térmicas dos mesmos, se não forem aplicados a amostras de perfis e estes submetidos a ensaios.

Tais equações calculam uma espessura de proteção necessária para um dado perfil de maior massividade, a partir de resultados de um primeiro ensaiado, em função desta relação entre fatores de forma dos perfis, ou espessuras de proteção necessárias de um certo material exaustivamente ensaiado. Isto permite ao projetista grande facilidade e rapidez na elaboração de especificações de proteção de elementos estruturais.

UL Design nº N708

- (1) PERFIL DA VIGA: W8 X 28.
 (2) CONCRETO: densidade normal ou leve, resistência à compressão e agregados especificados.
 (3) CONECTOR (opcional).
 (4) TELA SOLDADA (opcional).
 (5) FÔRMA DE AÇO INCORPORADA.
 (6) PROTEÇÃO DA VIGA: por aplicação de argamassas projetadas (**), espessuras abaixo:

VIGAS SEM RESTRIÇÃO DE APOIO

grau de resistência ao fogo	espessura mínima (pol.)
1	1/2
1 1/2	7/8
2	1 1/8
3	1 5/8
4	2

VIGAS COM RESTRIÇÃO DE APOIO

grau de resistência ao fogo	espessura mínima (pol.)
1	1/2
1 1/2	3/4
2	1
3	1 1/2
4	2

(**) SÃO FORNECIDOS OS FABRICANTES E RESPECTIVOS MATERIAIS HOMOLOGADOS.

Figura 6.6 - Esquema-padrão para vigas W8 X 28 com especificações de proteção segundo o Underwriters Laboratories.
 [FONTE: AISI, 1984.]

6.2. OS SISTEMAS DE PROTEÇÃO: CLASSIFICAÇÃO E TIPOS

6.2.1. Classificação

Na proteção de estruturas de aço contra fogo podem ser empregados diversos materiais e cada um desses materiais em variadas formas de aplicação. Existem ainda maneiras de se classificar e agrupar os muitos sistemas existentes, facilitando sua análise e escolha do mais adequado pelo projetista.

Uma primeira classificação surge do enfoque voltado para a evolução da tecnologia na área, separando os materiais em "tradicionais" e "inovadores", estes últimos considerados mais compatíveis com o alto grau de industrialização que normalmente é desejável na construção metálica. Os materiais considerados tradicionais seriam o concreto "in loco" e a alvenaria; os inovadores seriam a maior parte dos demais, cujo desenvolvimento ocorreu com vistas a uma aplicação específica, sendo normalmente materiais de muito baixa densidade, e fácil aplicação.

Pode-se também adotar uma divisão morfológica bastante simples, em termos da seção resultante da peça revestida; tem-se então as aplicações tipo "contorno" e a tipo "caixa", à primeira correspondendo em geral os materiais moldados "in loco" ou projetados, enquanto que na segunda se incluiriam as placas e outros sistemas pré-moldados, embora essa não seja uma relação obrigatória (é comum utilizar-se materiais projetados para seções tipo "caixa"). Os dois tipos estão ilustrados na figura 6.7, com suas variações.

Uma terceira forma de classificação dos materiais de proteção contra fogo divide-os em grupos, aproximando-os por características de execução ou propriedades (princípio de proteção). Assim, tem-se os seguintes grupos básicos:

- os concretos;
- as argamassas;
- as alvenarias;
- os revestimentos à base de fibras minerais;
- as mantas isolantes;
- os revestimentos e tintas intumescentes;
- os materiais em placas rígidas;
- os materiais pré-moldados com as dimensões do perfil a ser protegido.

Adotando esta forma de classificação, será visto a seguir as características particulares, vantagens, desvantagens e limitações de cada tipo de proteção.

Figura 6.7 - Proteção de colunas e vigas de aço, tipo "contorno" e tipo "caixa".

6.2.2. Concretos

As propriedades do concreto endurecido são significativamente afetadas pela temperatura. Existe um decréscimo da resistência mecânica a temperaturas elevadas, variando esse decréscimo de resistência com o tipo de concreto: os concretos mais pobres sofrem uma menor redução relativa de resistência que aqueles mais ricos. A condutibilidade térmica mais baixa faz com que os concretos leves apresentem maior resistência ao fogo do que os concretos normais.

Para o concreto entendido como "material de proteção do aço estrutural", interessa conhecer as suas características físicas como isolante térmico a altas temperaturas, mas igualmente o quanto a camada de proteção mantém-se íntegra quando exposta ao fogo. Devido à condição transitória de aquecimento tem-se acentuados gradientes de temperatura ao longo da seção, que podem causar danos nos primeiros estágios do fogo: é o chamado lascamento do concreto ("spalling"), em que, por causa das diferentes temperaturas em que se encontram as camadas superficiais e as mais profundas, ocorre uma tendência de separação das mesmas.

Segundo Almeida [1983] pode-se distinguir três tipos de lascamento:

- por rachadura ou estilhaçamento dos agregados;
- por explosão no início do incêndio;
- por enfraquecimento das camadas superficiais.

O primeiro caso é típico de concretos feitos com agregados silicosos. A razão fundamental seria o aumento de volume que o quartzo apresenta ao mudar a sua estrutura cristalina, o que ocorre acima dos 500 °C, para agregados de granito e gnaiss. O segundo

caso, em que pedaços de concreto são arremessados violenta e ruidosamente, relaciona-se à natureza do agregado, porosidade do concreto, conteúdo de umidade e nível de solicitação do componente.

Já o terceiro caso deve-se à exposição mais acentuada das camadas superficiais do material às altas temperaturas, o que provoca o enfraquecimento desse concreto mais externo à peça.

Para minimizar o problema de lascamento, é recomendada a adoção de agregados mais favoráveis, como o calcáreo, ou agregados leves (argila expandida, vermiculita expandida, etc.). Outras providências podem ser tomadas para melhorar a integridade da camada de concreto, por exemplo, incorporação de ar, uso de armadura de pele, uso de um sobre-revestimento mais isolante.

Segundo Rosso [1975], quanto à variação das propriedades térmicas do concreto com a temperatura, os valores da condutibilidade térmica em geral caem da ordem de 1,7 a 2,1 W/m°C (a zero graus) para valores de 0,9 W/m°C (a 1000 °C). Pode-se depreender que, sob a ação do incêndio, o conteúdo de umidade é logo perdido, o que implica diretamente em uma variação da condutibilidade do concreto.

Resultados de ensaios de resistência ao fogo de concretos com diferentes tipos de agregados mostraram que é possível, através de interpolação dos dados obtidos, prever a resistência ao fogo de perfis protegidos por meio de fórmulas empíricas, algumas delas colocadas na forma de ábacos.

Estudos publicados pela National Fire Protection Association - NFPA [1983] permitem estimar a resistência ao fogo de perfis de aço

encapsulados em concreto, conhecido o tipo de agregado e as dimensões da seção da peça (ver figura 6.8).

Figura 6.8 - Relação entre resistência ao fogo de colunas de aço e espessura de concreto de proteção, para vários agregados.
[FONTE: NFPA, 1983.]

O concreto como material de proteção contra fogo, apesar das críticas quanto à incompatibilidade com uma construção altamente industrializada (como sugere a utilização do aço), ainda apresenta qualidades que o colocam em destaque. A sua alta resistência mecânica, especialmente quando comparado a materiais de muito menor densidade, além de ser um material amplamente pesquisado e conhecido, portanto de maior domínio quanto à sua tecnologia de emprego, o recomendam em muitos casos.

6.2.3. Argamassas

Segundo Malhotra e Cooke [1982], o emprego de argamassas de gesso e areia, ou de cimento e areia, eventualmente adicionando fibras minerais, constitui uma alternativa confiável para a proteção da estrutura de aço. Normalmente se utiliza uma tela metálica de reforço, para melhorar a retenção da argamassa fresca, quer em aplicações tipo contorno, quer em aplicações tipo caixa.

A composição do gesso endurecido é basicamente sulfato de cálcio com duas moléculas de água ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mais uma pequena parcela de outros compostos (impurezas). A porcentagem de água presente no material, mesmo após aplicado e seco, é bastante elevada - 20% em massa, segundo Landi [1987]. Além da parcela de calor que é consumida pela vaporização da água, calor este que deixa de atingir a peça, após este processo a condutibilidade térmica propriamente dita do material diminui. A adição de fibras de papel desagregado pode aumentar em 100% a resistência à flexão [Agopyan, 1989]. Tudo isto confere ao gesso grande poder de isolamento térmica em altas temperaturas. Possui ainda a vantagem de não liberar gases tóxicos ou inflamáveis.

Uma fase mais recente no desenvolvimento dos materiais de proteção contra fogo trouxe a utilização de minerais como a vermiculita e a perlita, no lugar da areia. A vermiculita e a perlita, após tratamento de expansão térmica, fornecem agregados muito leves (densidade da ordem de 160 kg/m^3), permitindo obter argamassas com baixíssima condutibilidade térmica (ver tabela 6.3, para argamassas de cimento e vermiculita), e boa resistência mecânica.

Traço	DENSIDADE kg/m ³	COND. TÉRMICA W/m°C
1:4	530	0,070
1:5	450	0,079
1:8	440	0,064
1:9	420	0,056

Tabela 6.3 - Propriedades de argamassas de cimento e vermiculita.
[FONTE: ROSSO - O Uso da Vermiculite na Proteção
contra o Fogo. s.d.].

Pode-se admitir para as argamassas de gesso e agregado leve (densidade da ordem de 300 kg/m³) uma condutibilidade entre 0,10 e 0,15 W/m°C na faixa de temperaturas de 100 °C a 900 °C.

As argamassas à base de vermiculita e cimento podem ser projetadas com equipamento de ar comprimido "obtendo-se uma massa específica aparente que varia de 190 a 880 kg/m³" [segundo Rosso - "O Uso da Vermiculite na Proteção Contra o Fogo"]. São também utilizadas para fabricar placas ou pré-moldados com a forma da seção, assim como as argamassas de gesso e vermiculita, cujo emprego em placas tem a vantagem de permitir fazer o acabamento final com pasta ou argamassa, após a montagem. As proteções com placas ou pré-moldados serão tratadas adiante.

6.2.4. Alvenarias

Conforme Lie [1972] e Malhotra [1982] existem poucos estudos acerca das propriedades térmicas das alvenarias, a altas temperaturas. Analisando-se a condutibilidade térmica de tijolos cerâmicos a altas temperaturas, para tijolos com densidades variando de 700 a 2100 kg/m³ (figura 6.9) conclui-se que, mesmo para tijolos de maior densidade (os tijolos convencionais de barro cozido possuem

normalmente 1800 kg/m^3), a condutibilidade de uma alvenaria cerâmica é baixa quando confrontada com a do concreto convencional.

Também foi pesquisada a variação do calor específico dos tijolos cerâmicos, os quais apresentaram oscilações pouco significativas dessa propriedade com a temperatura, conforme se vê na figura 6.10. Essa variação pequena nos valores de calor específico é previsível, dado o fato dos materiais cerâmicos serem quimicamente estáveis com a temperatura.

Figura 6.9 - Condutibilidade térmica de tijolos cerâmicos em função da temperatura para diversas densidades. [FONTE: LIE, 1972.]

Figura 6.10 - Variação do calor específico de tijolos cerâmicos com a temperatura para diferentes tipos de tijolos. [FONTE: LIE, 1972.]

6.2.5. Revestimentos com Fibras Minerais

Os revestimentos à base de fibras minerais, aplicados por equipamento de projeção ("spray"), são bastante versáteis e especialmente competitivos quando não é primordial o fator acabamento. Seu custo é também relativamente baixo quando comparado a outros sistemas.

Um caso típico de utilização em edifícios é como proteção de painéis de piso e de vigas, sob os quais será colocado um forro. A aplicação deve ser feita anteriormente à montagem de dutos e tubulações, sendo feitos eventuais reparos posteriores, na hipótese de danos à proteção do aço quando da montagem das instalações.

Estes revestimentos possuem baixa densidade e são bons isolantes térmicos a altas temperaturas, contribuindo ainda para o aspecto acústico; proporcionam boa proteção contra corrosão em condições normais mas possuem baixa resistência mecânica, o que não os recomenda para áreas externas ou sujeitas a choques e outras agressões, exceto quando protegidos por outro revestimento.

O material possui em sua constituição, além das fibras, aglomerantes (cimentos hidráulicos), adesivos e outras adições. O equipamento para projeção pode utilizar ou não ar comprimido; dependendo do caso, o material é impulsionado na forma seca, sendo a mistura com a água necessária feita apenas um pouco antes da saída do bico. Alguns desses equipamentos são bastante leves, melhorando a operacionalidade na execução da proteção da estrutura.

Quanto à preparação da superfície, no caso de existir algum revestimento anterior deve-se verificar a compatibilidade entre os

dois revestimentos. Em aplicação direta sobre o aço, verifica-se apenas o grau de limpeza, isenção de graxas ou materiais aderidos, não havendo necessidade de imprimação ou uso de adesivos.

A densidade desses materiais varia usualmente entre 240 e 400 kg/m³, e a condutibilidade térmica é de 0,05 a 0,15 W/m°C entre 100 e 800 °C.

6.2.6. Revestimentos com Fibras Cerâmicas

A partir da fusão de um material cerâmico (silicato aluminoso) e posterior aplicação de jato de ar que o resfria e confere uma forma alongada, obtém-se fibras de aspecto vítreo e com estrutura molecular amorfa (não cristalina), conhecidas como fibras cerâmicas. Essas fibras podem ser prensadas através da passagem por cilindros metálicos, resultando ao final mantas cuja densidade pode ser dosada em função da prensagem efetuada. Este processo está esquematizado na figura 6.11.

Figura 6.11 - Processo de fabricação de componentes à base de fibras cerâmicas.

As mantas de fibras cerâmicas possuem qualidades de muito bom isolante térmico a altas temperaturas, para o que contribui principalmente a sua alta refletividade do calor recebido por radiação térmica. Por esse motivo, possui amplas possibilidades de utilização, como é o caso do isolamento de fornos industriais ou também na proteção contra fogo de estruturas, em navios, plataformas marítimas e edifícios. Dados da Babcock & Wilcox revelam que a condutibilidade térmica desse tipo de proteção varia de 0,1 a 0,25 W/m°C entre 100 e 900 °C, para uma densidade de 64 a 192 kg/m³.

O material apresenta-se na forma de rolos, sendo de fácil aplicação. Para perfis pequenos (até cerca de 8") podem ser colocadas na forma de "caixa", usando-se como suporte do material uma tela metálica envolvendo a seção da peça. Em aplicações tipo "contorno", geralmente adotadas nos perfis maiores, a fixação da manta é feita por soldagem de pinos à peça e emprego de arruelas rápidas. Para obter bom resultado, devem ser colocadas várias camadas (no mínimo duas) com as juntas defasadas, ou seja, não coincidentes.

A exemplo das fibras minerais projetadas, as mantas são facilmente danificadas, devendo ser aplicadas em áreas protegidas.

6.2.7. Revestimentos Intumescentes

Segundo Weismantel [1981], para melhor entender o comportamento dos materiais intumescentes, convém discutir algumas definições quanto

ao comportamento ao fogo dos materiais incombustíveis. Pode-se distinguir:

- "fogo-inerte", que diz respeito a um material não combustível, isto é, que não alimenta a reação de combustão;
- "fogo-retardante", que se refere àquele que, aplicado sobre substrato combustível, retarda a propagação das chamas ao longo deste, ou a queima do mesmo;
- "fogo-resistente", que qualifica os materiais que, aplicados sobre um componente, retardam o acesso do calor ao mesmo, aumentando a sua resistência ao fogo.

Os revestimentos resistentes ao fogo são aqueles que, aplicados a um componente, aumentam o período de tempo de estabilidade deste quando submetido ao ensaio em forno (nos EUA, ASTM E-119). Este intervalo de manutenção da estabilidade vai servir para classificar o revestimento como de certo grau (equivalente a este período de tempo) de resistência ao fogo para a aplicação em estudo.

Já os revestimentos fogo-retardantes são ensaiados dentro de programas diferentes dos de resistência ao fogo, e específicos, como o ensaio ASTM E-84.

As tintas intumescentes (revestimentos de menor espessura) são geralmente entendidas como materiais simplesmente fogo-retardantes.

Os revestimentos quimicamente reativos, considerados resistentes ao fogo, caracterizam-se por desenvolverem alguns dos seguintes

mecanismos físicos e químicos, que são ativados pelo aquecimento gerado num incêndio:

- calcinação, onde a quebra dos componentes iniciais consome uma parcela pequena de energia;
- abrasão, quando a fricção aquece uma camada externa do revestimento, que se desprende, levando consigo esta energia adicional, e deixando a camada contígua resistente para continuar a proteção;
- intumescência, fenômeno pelo qual o calor provoca uma reação em cadeia que converte um revestimento fino em uma espessa barreira isolante;
- geração térmica de umidade, quando algumas reações de calcinação provocam a formação de vapor d'água;
- sublimação, onde a transformação dos constituintes do estado sólido diretamente para o gasoso demanda grandes quantidades de energia, além de os gases produzidos bloquearem a penetração do calor e inibirem a própria combustão;
- transpiração, modo de proteção presente em todos os materiais porosos, que consiste em facilitar o desprendimento e dispersão do calor e gases resfriadores devido a reações químicas no revestimento;
- reflexão, onde as boas características de refletividade dos produtos gerados pelas reações do revestimento implicam em menor acesso das ondas energéticas ao substrato.

Neste item trata-se especificamente dos revestimentos intumescentes, que podem ser constituídos, por exemplo, por

mástiques baseados em resinas epoxídicas, que possuem a propriedade de amolecer e libertar CO_2 quando a temperatura excede os 150°C , provocando uma expansão que forma uma estrutura alveolar de boas características de isolamento térmica. Acima de 800°C principia-se uma decomposição do material, ocorrendo uma redução de sua espessura.

Os revestimentos intumescentes são jateados sobre as superfícies metálicas, endurecendo e aderindo de uma maneira similar às pinturas, e podem ser aplicados sob as formas texturada, de argamassa simples ou do tipo reforçada com fibras minerais.

Quanto à resistência ao fogo, alguns produtos chegam a propiciar três horas de resistência ao fogo para as seções de aço. Alguns resultados obtidos com diferentes produtos estão mostrados na tabela 6.4.

	espessura do revestimento (mm)	resistência ao fogo (min)
produto A	4,8	60
	11,7	98
	13,0	107
produto B	12,7	120
	27,0	180
produto C	6,4	60
	27,0	180

Tabela 6.4 - Resultados de ensaios de diferentes revestimentos intumescentes aplicados sobre perfil de aço tipo W 10 X 49 (segundo a ASTM E-119).
[FONTE: SCHULTZ, 1985.]

As tintas intumescentes podem ser usadas, apesar das relativas limitações quanto à resistência ao fogo obtida, quando se pretende

proteger as estruturas metálicas mantendo-as, no entanto, aparentes.

Schultz [1985] afirma que existem, porém, evidências de que somente alguns destes produtos são capazes de suportar exposição prolongada a condições de umidade sem sofrer danos, o que pode implicar em um acabamento adicional posterior.

Segundo Weismantel [1981], a atuação dessas tintas pode se dar através de diferentes mecanismos, tais como a combinação com radicais livres do substrato evitando a formação de produtos inflamáveis. O sucesso das pinturas fogo-retardantes é função de um dos seguintes aspectos:

- capacidade de produção de gases inflamáveis;
- formação de estrutura esponjosa pelo desenvolvimento de poros no material vítreo fundido gerado no aquecimento de seus constituintes;
- absorção de calor através do fenômeno da sublimação.

Convém destacar que, para as tintas intumescentes, as espessuras da película aplicada são da ordem de 1,5 a 2,0 mm, bastante inferiores aos valores citados para os revestimentos. Ressalte-se ainda que, apesar de poder cumprir o papel de aumentar a resistência ao fogo de um componente metálico, pode ser necessária a adoção de proteção adicional quanto a corrosão.

6.2.8. Placas Rígidas

Segundo Schultz [1985], até recentemente, eram muito empregadas placas isolantes de amianto para proteção de vigas e colunas. O

amianto, por ser um material nocivo à saúde humana, tem sido substituído pelo uso de outras fibras, aglomeradas por cimento ou cal. Placas de vermiculita expandida e aglomerantes à base de silicatos e placas de gesso também têm sido usadas.

A execução desse tipo de proteção é simples e rápida, pois as placas podem ser acopladas diretamente ao perfil de aço através de pinos soldados e arruelas rápidas, ou através de parafusos. Existe uma preocupação quanto a prevenir o aparecimento de frestas entre as placas, justapondo-as ou rejuntando as emendas, em alguns casos.

Esse tipo de proteção, aplicado a vigas de aço, está ilustrado na figura 6.12.

Figura 6.12 - Aplicação de sistemas de placas rígidas de gesso à proteção de vigas.
[FONTE: MELHADO E SOUZA, 1989.]

Segundo Malhotra e Cooke [1983], no caso de placas de fibras minerais a densidade mínima utilizada é de 140 kg/m^3 e a condutibilidade térmica não ultrapassa $0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ na faixa de 100 a 900°C .

Os mesmos autores atribuem às placas de vermiculita expandida densidades entre 350 a 500 kg/m³ (espessuras de 25 a 50 mm) e uma faixa de condutibilidade térmica de 0,09 a 0,17 W/m°C entre 100 e 800 °C.

Um exemplo de aplicação de proteção por placas rígidas a elementos estruturais treliçados externamente encobertos por placas formando um elemento de vedação vertical, inclusive destinado a compartimentar ambientes, é mostrado na figura 6.13.

Figura 6.13 - Proteção por placas rígidas - aplicação à proteção de elementos estruturais treliçados.
[FONTE: AISI - Designing Fire Protection for Steel Trusses, 1981.]

As placas rígidas, especialmente as de gesso, são também comumente empregadas na execução de forros suspensos. Estes sistemas de proteção são objeto do próximo sub-item.

6.2.9. Forros Resistentes ao Fogo

Um forro suspenso pode ser entendido como uma membrana que é posicionada distante da face inferior do piso ou cobertura acima daquele. Para efeito de proteção da estrutura de aço, tanto podem ser aplicados materiais de proteção diretamente nos perfis desta estrutura quanto pode ser empregada uma membrana fogo-protetora (figura 6.14).

Figura 6.14 - Proteção de vigas por forros resistentes ao fogo: o forro pode, além de funções de acabamento e acústica, substituir a proteção que seria aplicada à viga. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

O aproveitamento de sistemas de forro suspensos para a proteção de vigas de aço traz, segundo Malhotra e Cooke [1982], as seguintes

vantagens, em substituição à proteção aplicada diretamente ao perfil:

- fácil execução e bom acabamento;
- permite ocultar as instalações atrás do forro;
- confere melhor isolamento térmico e acústico;
- é uma alternativa para aumentar a resistência ao fogo de pisos e coberturas, por exemplo, quando de uma alteração de uso do ambiente que faz necessário aumentá-la.

Sem outra proteção adicional, pode-se segundo Malhotra e Cooke atingir duas horas de resistência ao fogo. Seu projeto deve ser cuidadoso e bem detalhado para que se possa garantir a efetividade da proteção contra fogo por ele conferida à estrutura.

E, segundo os autores citados acima, existem dois tipos de forros suspensos empregados em proteção contra fogo:

- forros moldados no local ("wet");
- placas pré-fabricadas fixadas em uma grelha ("dry").

São descritos a seguir estes dois tipos de forro abordados pelo trabalho de Malhotra e Cooke.

6.2.9.1. Forros Moldados no Local

São forros suspensos que possuem como vantagem a possibilidade de serem usados para confecção de formas curvas, e formarem membranas que, a menos de acessos de manutenção, não possuem juntas. São geralmente mais seguros quando submetidos a um incêndio porque são

sistemas simples e é mais improvável que sejam danificados por uma manutenção malfeita.

Este tipo de forro é obtido por emprego de argamassas leves ou material aglomerado, com uso de equipamentos de projeção ou aplicação manual, sobre telas de metal expandido. A tela de metal expandido é suportada por perfis leves de aço que são fixados à mesa inferior das vigas de piso ou cobertura (figura 6.15).

Figura 6.15 - Sistemas de forros moldados no local, para proteção de vigas de aço.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

O peso aproximado dessas membranas de forro é de 20 kg/m² para placas de gesso com espessura de 12,5 mm de 25 mm (argamassa de gesso com agregados leves), para respectivamente 1 hora e 2 horas de resistência ao fogo.

Como alternativa, pode-se ainda utilizar placas de gesso revestidas por uma camada de argamassa ou chapas de fibras de madeira aglomeradas revestidas com argamassa. A fixação é feita também por perfis leves de aço.

6.2.9.2. Forros de Placas Fixadas em uma Grelha

Normalmente são sistemas constituídos por uma estrutura leve de aço suspensa, que suporta uma série de placas (figura 6.16).

A classificação destes sistemas, feita segundo o grau de exposição da grelha de suporte ao ambiente abaixo dela, possui três possibilidades: perfis aparentes, perfis parcialmente embutidos e perfis embutidos (figura 6.17).

Existem alguns cuidados, no projeto e execução, que devem ser tomados para garantir a efetiva proteção do elemento estrutural:

- caso o forro seja interrompido por elementos verticais, estes devem ter, no mínimo, a mesma resistência ao fogo do primeiro;
- as placas devem se manter na posição na situação de incêndio, o que significa que a sua deformação quando aquecidas bem como da estrutura de fixação devem ser cuidadosamente estudadas, o que de todo modo é necessidade comum a todos os sistemas que se utilizam de placas.

Figura 6.16 - Sistemas de forros de placas fixadas em uma grelha, para proteção de vigas de aço.
[FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Figura 6.17 - Tipos de forros sustentados por placas, quanto ao grau de embutimento da estrutura de sustentação das placas: (A) perfis expostos; (B) parcialmente embutidos; (C) embutidos. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

Os tipos de grelhas metálicas tais que mantenham as placas em suas posições durante o incêndio, e consigam absorver a dilatação térmica resultante do violento acréscimo de temperaturas através de juntas de dilatação podem ser observados na figura 6.18.

Figura 6.18 - Detalhes dos perfis de sustentação de forros fogo-resistentes, destinados a permitir a dilatação livre quando submetidos ao calor do incêndio. [FONTE: MALHOTRA & COOKE, 1982.]

6.2.10. Pré-Moldados com a Forma do Perfil

Coerente com o conceito de padronização que a construção industrializada oferece como horizonte, uma solução extremamente interessante é pré-fabricar componentes de proteção específicos para determinados perfis usados em vigas ou colunas. Para tanto, a variedade de perfis deve ser reduzida, o que é possível para cada tipologia de edifício.

Alguns fabricantes de componentes utilizando vermiculita expandida desenvolveram sistemas desse tipo, com placas de vermiculita e gesso, ou outros aglomerantes, em alguns casos revestidas com chapas de aço. Os sistemas podem ser tipo caixa (com vazios) ou encapsular totalmente o perfil. A figura 6.19 mostra um desses componentes pré-moldados, em que a peça para vigas é única, em forma de "U", sendo que para colunas são utilizadas duas peças (duplo "U").

Figura 6.19 - Sistema de proteção pré-moldado para vigas e colunas.
[FONTE: VERMICULITE INSTITUTE, s.d.]

Nos pré-moldados compostos com chapas de aço, o material isolante é colado à chapa por meio de adesivo incombustível. O acabamento de chapa confere ótima resistência, aconselhando seu uso em colunas sujeitas a choques mecânicos, como ocorre em edifícios do tipo industrial e outros. A chapa de aço pode ter diversos acabamentos, desde pintura até galvanização, ou pode ser usado até mesmo aço inoxidável.

6.2.11. Outros Sistemas de Proteção

Quando se utiliza seções vazadas no esqueleto estrutural do edifício, podem ser empregados os sistemas de proteção descritos anteriormente, mas adicionalmente utilizar um preenchimento da seção com concreto ou água.

No caso de seções vazadas cheias com água, o sistema pode ser sempre aplicado às colunas e, em certas condições, também aos outros componentes. A água ao aquecer circula por diferença de densidade (termo-sifonamento) e utiliza-se até mesmo reservatórios para aumentar a quantidade de água fria e a conseqüente troca de calor. A água deve receber aditivos que previnam a corrosão. Existe uma publicação inglesa da Constructional Steel Research and Development Organisation - CONSTRADO, de autoria de Bond [s.d.], que trata exclusivamente desse tipo de sistema e de seu dimensionamento.

Edifícios ingleses e norte-americanos foram construídos utilizando este processo. Em um edifício próximo à Cannon Street Station (Londres), foi dada uma solução que permite à água circular por todos os membros estruturais.

A figura 6.20 mostra um esquema de preenchimento das colunas de aço vazadas de um edifício com água.

Figura 6.20 - Proteção de colunas vazadas através do preenchimento com água.
[FONTE: AISI, 1981.]

E, na figura 6.21 está ilustrada a troca de calor que é originada na exposição a um incêndio de uma coluna cheia d'água. O calor trocado com a água gera um resfriamento do aço.

Figura 6.21 - Troca de calor que proporciona proteção à coluna de seção vazada preenchida com água.
[FONTE: BOND, s.d.]

No caso de utilizar-se o concreto para preenchimento da seção, pesquisas feitas mostraram que pode-se obter incrementos na resistência ao fogo de colunas, e a adição de armadura de reforço a esse concreto proporciona um aumento ainda maior dessa resistência.

Doutros sistemas que devem ser considerados como alternativa, permitindo apresentar um aspecto de "aço aparente", são aqueles que utilizam chapas de aço como acabamento final de perfis protegidos, o que no caso de vigas de fachada pode levar a permitir que uma parcela do perímetro da seção fique realmente aparente (ver figura 6.22). Pode-se denominá-las vigas falsamente desprotegidas ou expostas.

O conceito também é aplicável a colunas, mas o resultado arquitetônico é discutível (figura 6.23).

Figura 6.22 - Vigas de aço falsamente desprotegidas.
[FONTE: AISI, 1981.]

Figura 6.23 - Colunas de aço falsamente desprotegidas.
[FONTE: AISI, 1981.]

6.3. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS EXISTENTES NO MERCADO NACIONAL

6.3.1. Situação Atual do Mercado

No Brasil dispõe-se de um número muito reduzido de produtos voltados especificamente ao mercado de proteção de estruturas de aço. Aparentemente, esse estado de coisas insere-se no contexto da própria estrutura de aço dentro da construção civil de edifícios, cujo uso é ainda incipiente, embora não justifique o grande número de edifícios industriais construídos com estrutura de aço sem que houvesse preocupação com a resistência ao fogo dos perfis.

Serão descritos a seguir os principais sistemas que podem ser empregados para a proteção de estruturas metálicas, disponíveis no mercado nacional.

6.3.2. Produtos à Base de Vermiculita

O Brasil possui extensas jazidas de vermiculita e alguns fabricantes de agregados leves obtidos pela expansão desse mineral, dentre os quais a Eucatex e a Minebra (Paranapanema).

A vermiculita expandida pode ser comprada não conformada, na forma de agregado, em sacos de $0,1 \text{ m}^3$. Existem várias granulometrias disponíveis, mas aquela mais apropriada ao uso em construção civil corresponde às malhas ABNT 4-40, possuindo densidade da ordem de 120 a 130 kg/m^3 . A Minebra indica a sua aplicação em argamassas de cimento e vermiculita, segundo os traços mostrados na tabela 6.5.

TRAÇO UTILIZADO	QUANTIDADE DE VERMICULITA (m ³)	QUANT. DE CIMENTO (kg)	DENSIDADE OBTIDA (kg/m ³)	RESIST. À COMPRESSÃO (MPa)
1:4	1,3	450	600	0,6 a 0,7
1:5	1,3	350	540	0,5 a 0,6
1:6	1,3	300	490	0,4 a 0,5
1:7	1,3	250	440	0,3 a 0,4
1:10	1,3	180	310	-

Tabela 6.5 - Resistência à compressão de argamassas de cimento e vermiculita.
[FONTE: MINEBRA - MINÉRIOS BRASILEIROS LTDA.]

A vermiculita expandida também é encontrada na forma de argamassas pré-misturadas, com os nomes comerciais de "Vermimassa" (Minebra) e "Isopiro" (Eucatex). Esses produtos já possuem uma história de aplicação na proteção contra fogo, parte em edifícios e parte em plataformas marítimas. Alguns dados fornecidos pelos fabricantes dessas argamassas, quanto às suas propriedades e técnicas de aplicação são apresentados a seguir.

Material: ISOPIRO

Fabricante: EUCATEX.

Descrição do material: pré-misturado seco de vermiculita expandida, aditivos e cimento Portland, vendido em sacos de 25 kg e 49 kg.

Propriedades:

- massa específica aparente: 1100 kg/m³ (umidade de 11%) e 898 kg/m³ (seco em estufa)
- condutibilidade térmica: 0,22 W/m°C

- calor específico: 0,92 kJ/kg°C
- consumo de água: 32 l/49 kg (jateamento)
- consumo de aditivo: 1 l/5 kg
- resistência à compressão: 2,25 MPa após 28 dias.

Técnica de execução:

Normalmente aplicado por jateamento em camadas sucessivas, em proteções tipo contorno ou tipo caixa. Na primeira camada é adicionado um aditivo para garantir melhor adesão. São utilizadas ainda telas de arame galvanizado (quadrada de 1/2" e fio BWG 22 ou hexagonal) ou tela em chapa de aço carbono 1010/1020 expandida e galvanizada, malha 10 x 15, para estabelecer a ancoragem da argamassa.

As proteções tipo caixa utilizam a tela de chapa expandida, sendo recomendadas pelo fabricante para vigas e colunas de até 10", no máximo. O acabamento obtido com o equipamento de projeção é rugoso, podendo ser melhorado com o uso de régua e desempenadeira.

A cura inclui a necessidade de manter o material umedecido durante 72 horas, e protegido das intempéries por mais 27 dias. Após esse período de cura (30 dias), o material pode ser pintado.

Ensaio de resistência ao fogo:

- Coluna IP 360 (360 mm x 57,1 kg), usando tela de arame malha hexagonal 1" e espessura de 30 mm - resistência ao fogo: 90 minutos.
- Coluna HPL 200 (190 mm x 42,3 kg), mesma proteção acima, 105 minutos.

- Coluna HPL 200, porém com proteção tipo caixa, usando tela de aço expandido galvanizado 0,6 mm e malha 4 x 8 mm, espessura de Isopiro também 30 mm: 95 minutos de resistência ao fogo.

obs.: dados certificados pelo IPT, pelo método ASTM E-119/83.

Material: VERMIMASSA

Fabricante: MINEBRA.

Descrição do material: pré-misturado seco constituído essencialmente de vermiculita expandida e cimentos de aluminato de cálcio, vendido em sacos contendo 40 kg.

Propriedades:

- massa específica aparente: 480 kg/m³ (MB-259)
- condutibilidade térmica: 0,14 W/m°C
- calor específico: 0,92 kJ/kg°C
- consumo de água: 0,7 l/kg
- resistência à compressão: 0,5 a 0,6 MPa

Técnica de execução:

Aplicação do material, manual ou por jateamento, sobre tela metálica (tipo "deployé") envolvendo o perfil. Para espessuras acima de 50 mm é conveniente que seja utilizada uma fôrma. Os cuidados com a cura devem evitar a perda excessiva de umidade por um período de 48 horas.

Ensaio de resistência ao fogo: conforme tabela 6.6.

Tipo de Proteção	Espessura (mm)	Resistência ao Fogo (h)
contorno	63	4
caixa	44	4
caixa	34	3
contorno*	39	2
contorno*	20	1

(*) MATERIAL APLICADO POR GUNITAGEM.

Tabela 6.6 - Resistência ao fogo de colunas protegidas com Vermimassa.
[FONTE: MINEBRA.]

Além das argamassas, são fabricados outros sistemas de proteção à base de vermiculita, em placas, blocos, ou na forma de revestimento intumescente.

A Minebra indica para as placas "Vermiplac" as seguintes características:

- massa específica aparente: 0,45 a 0,52;
- condutibilidade térmica aproximada: 0,12 W/m²°C;
- resistência à compressão: 0,6 a 0,7 MPa.

Os blocos "Vermibloc" da Minebra, nas medidas 229 x 114 x 63 mm e 229 x 114 x 76 mm, possuem massa específica aparente de 600 a 900 kg/m³ e condutibilidade térmica variando de 0,057 W/m°C a 0,379 W/m°C, entre 200 e 1200°C.

6.3.3. Revestimentos Intumescentes

Como exemplos de revestimentos intumescentes, tem-se as tintas "Vermicol" (Minebra) e "Acriflex H" (Tecno-Química). A Minebra atribui à Vermicol, um adesivo mineral, elevado poder de isolamento

na aplicação como tinta intumescente, aplicada com pistola na espessura de até 2 mm. Sua densidade é de 1700 kg/m^3 . A Tecno - Química descreve como características da Acriflex-H: "revestimento intermediário de alta espessura à base de resina acrílica solúvel em água recomendado como intermediário em um sistema projetado para resistir a chama direta". Sua densidade é de 1300 kg/m^3 , e a espessura de aplicação, 0,6 mm (duas demãos).

6.3.4. Produtos à Base de Fibras Cerâmicas

O emprego de materiais à base de fibras cerâmicas na proteção contra fogo de estruturas foi iniciado no Brasil por volta de 1980, em plataformas marítimas; anteriormente a essa data, seu emprego era restrito a isolamento de fornos industriais. Hoje, as mantas cerâmicas já podem ser consideradas mais uma opção para a proteção de estruturas de aço de edifícios.

Alguns dados fornecidos por um fabricante, quanto às suas características, propriedades e técnicas de aplicação são apresentados a seguir.

Material: KAOWOOL

Fabricante: Fibras Cerâmicas Ltda. - antiga BABCOCK & WILCOX.

Descrição do material: manta isolante resistente a altas temperaturas (até 1260°C), constituída por fibras entrelaçadas obtidas de matérias primas sílico-aluminosas, disponíveis em rolos com larguras e densidades variadas (conforme tabela 6.7).

DENSIDADE (kg/m ³)	ESPESSURA (cm)	MEDIDAS (m)	
		largura	compr.
96	2,5	0,61 X 7,62	
128	3,8		

Tabela 6.7 - Características das mantas "Kaowool" disponíveis no Brasil.
[FONTE: BABCOCK & WILCOX.]

Propriedades:

- massa específica aparente: 96 ou 128 kg/m³.
- condutibilidade térmica: conforme figura 6.24.
- calor específico: 1,067 kJ/kg°C.

Figura 6.24 - Variação da condutibilidade térmica das mantas "Kaowool" com a temperatura.
[FONTE: BABCOCK & WILCOX.]

Técnica de execução:

O material pode ser utilizado em aplicação tipo caixa (perfis pequenos) ou tipo contorno (perfis maiores). Para as aplicações tipo caixa a manta é colocada sobre tela metálica envolvendo o perfil. Na aplicação tipo contorno, as mantas são fixadas aos perfis através de pinos soldados à peça e arruelas, e normalmente a espessura final é atingida por meio de várias camadas sucessivas (ver figura 6.25) colocadas de forma a não coincidir juntas.

As mantas cerâmicas não devem ficar expostas às intempéries ou, caso fiquem, recomenda-se revesti-las com argamassa sobre tela, ou chapas de aço pintadas.

Figura 6.25 - Fixação de proteção por mantas cerâmicas, em vigas de aço.
[FONTE: BABCOCK & WILCOX.]

Ensaio de resistência ao fogo: ver tabela 6.8.

Tipo de Peça	Espessura (mm)	Resistência ao Fogo (h)
W 10 X 49	38	1 1/2
W 10 X 49	51	2
W 14 X 223	38	3

Tabela 6.8 - Resistência ao fogo de perfis de aço protegidos com mantas cerâmicas "KADWOOL" segundo ensaio ASTM E-119. [FONTE: BABCOCK & WILCOX.]

Além das mantas descritas as fibras cerâmicas também são apresentadas sob outras formas, dentre as quais deve-se destacar as placas. Essas placas são obtidas por deposição das fibras a vácuo, com adição de "ligantes", resultando em materiais de maior resistência mecânica; suas aplicações, no entanto, ficam restritas pelo custo muito superior ao das mantas.

6.3.5. Outros Materiais

Além dos materiais à base de vermiculita expandida e das tintas intumescentes, existem outras argamassas isolantes específicas para proteção contra fogo de estruturas metálicas; o "Pyrocret" (fabricado pela SUMARÉ), em duas versões de argamassa pré-misturada, tem sido empregado principalmente em plataformas marítimas.

O Pyrocret 102 é um material bicomponente, à base de oxiclreto de magnésio, com utilização restrita a metais não suscetíveis ao ataque por cloretos; o Pyrocret 241, pré-misturado cimentoso e monocomponente.

Os cimentos de oxicleto de magnésio iniciaram seu uso como material fogo - resistente a partir da década de 60, e sua característica básica é o alto conteúdo de água na forma hidratada, duas e meia vezes maior que aquela existente no gesso, conferindo-lhe alto poder de isolamento [Schultz, 1985].

Devido ao custo muito elevado e à necessidade de proteção anti-corrosiva anterior à aplicação do produto, o Pyrocret 102 vem sendo substituído pelo Pyrocret 241, embora este último proporcione proteção menos eficiente.

Apresenta-se a seguir as propriedades do Pyrocret (dados fornecidos pelo fabricante), que podem ser vistas na tabela 6.9.

Propriedades	Pyrocret 102	Pyrocret 241
Densidade seca (kg/m^3)	960 a 1100	960 a 1040
Densidade aparente (kg/m^3)	-	750
Conteúdo de umidade (%)	-	14,6
Resistência à compressão (MPa)	14	3,87
Coef. dilatação térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	7×10^{-4}	$2,2 \times 10^{-5}$
Condutibilidade térmica ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	1,38	0,88
Calor específico ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)	15,1	-

Tabela 6.9 - Propriedades do PYROCRET.
[FONTE: SUMARÉ IND.QUÍMICA S.A.]

A técnica de execução é preferencialmente por gunitagem, embora o produto possa ser utilizado manualmente, como qualquer argamassa. A ancoragem do produto é feita com o auxílio de uma tela de chapa de aço expandida e galvanizada, com espessura da ordem de 1 mm e malha 9 x 12 mm, fixada por pinos soldados e arruelas rápidas. A cura final do Pyrocret 241 é atingida ao final de 10 dias.

As resistências ao fogo indicadas pelo fabricante do Pyrocret 102 e 241 estão mostradas na figura 6.26 (transcrição de dados de ensaios realizados nos EUA).

PYROCRETE 102 Montagem de Colunas UNDERWRITERS LABORATORIES Procedimento X-716	PYROCRETE 241 Montagem de Colunas UNDERWRITERS LABORATORIES
<p> ① Coluna de aço ② Tela metálica galvanizada ③ Pyrocrete 102 ④ Fixação da tela </p> <table border="1" data-bbox="558 772 774 965"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 cm</td><td>1 1/2 hora</td></tr> <tr><td>1,4 cm</td><td>2 horas</td></tr> <tr><td>2,2 cm</td><td>3 horas</td></tr> <tr><td>3 cm</td><td>4 horas</td></tr> </tbody> </table>	Espessura	Índice de tempo	1 cm	1 1/2 hora	1,4 cm	2 horas	2,2 cm	3 horas	3 cm	4 horas	<p>Procedimento X-732</p> <p> ① coluna de aço ② pyrocrete 241 </p> <table border="1" data-bbox="1037 817 1348 952"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de Tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,6 cm</td><td>1 hora</td></tr> <tr><td>2,7 cm</td><td>2 horas</td></tr> <tr><td>3,6 cm</td><td>3 horas</td></tr> <tr><td>4,4 cm</td><td>4 horas</td></tr> </tbody> </table>	Espessura	Índice de Tempo	1,6 cm	1 hora	2,7 cm	2 horas	3,6 cm	3 horas	4,4 cm	4 horas
Espessura	Índice de tempo																				
1 cm	1 1/2 hora																				
1,4 cm	2 horas																				
2,2 cm	3 horas																				
3 cm	4 horas																				
Espessura	Índice de Tempo																				
1,6 cm	1 hora																				
2,7 cm	2 horas																				
3,6 cm	3 horas																				
4,4 cm	4 horas																				
<p>MONTAGEM DE PISOS, FORROS, VIGAS Aprovado pelo código baseado no procedimento D-717.</p> <p> ① Viga de aço ② Pyrocrete 102 ③ Montagem da cobertura ④ Tela metálica galvanizada (1,85 kg/m²) </p> <table border="1" data-bbox="295 1198 678 1263"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,4 cm na viga</td><td>1 1/2 hora (não-restrito)</td></tr> </tbody> </table>	Espessura	Índice de tempo	1,4 cm na viga	1 1/2 hora (não-restrito)	<p>Procedimento X-733</p> <p> ① coluna de aço ② pyrocrete 241 ③ tela metálica galvanizada </p> <table border="1" data-bbox="1037 1131 1348 1263"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de Tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,6 cm</td><td>1 hora</td></tr> <tr><td>2,7 cm</td><td>2 horas</td></tr> <tr><td>3,6 cm</td><td>3 horas</td></tr> <tr><td>4,4 cm</td><td>4 horas</td></tr> </tbody> </table>	Espessura	Índice de Tempo	1,6 cm	1 hora	2,7 cm	2 horas	3,6 cm	3 horas	4,4 cm	4 horas						
Espessura	Índice de tempo																				
1,4 cm na viga	1 1/2 hora (não-restrito)																				
Espessura	Índice de Tempo																				
1,6 cm	1 hora																				
2,7 cm	2 horas																				
3,6 cm	3 horas																				
4,4 cm	4 horas																				
<p>MONTAGEM DA VIGA SOB TENSÃO Procedimento FC-206 da Factory Mutual Research Corp. Série N° 23188</p> <p> ① Viga de aço ② Tela metálica ③ Pyrocrete 102 ④ Cobertura de piso de aço ⑤ Concreto </p> <table border="1" data-bbox="327 1467 646 1512"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 cm</td><td>4 horas</td></tr> </tbody> </table> <p>Esta montagem foi considerada pelos grupos de códigos de modelos como não combinada, tornando a aplicação na cobertura opcional.</p>	Espessura	Índice de tempo	1 cm	4 horas	<p>Procedimento X-734</p> <p> ① coluna de aço ② pyrocrete 241 ③ tela metálica galvanizada </p> <table border="1" data-bbox="1037 1422 1348 1579"> <thead> <tr> <th>Espessura</th><th>Índice de Tempo</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,4 cm</td><td>1 hora</td></tr> <tr><td>1,9 cm</td><td>1 1/2 hora</td></tr> <tr><td>2,4 cm</td><td>2 horas</td></tr> <tr><td>3,2 cm</td><td>3 horas</td></tr> <tr><td>3,8 cm</td><td>4 horas</td></tr> </tbody> </table>	Espessura	Índice de Tempo	1,4 cm	1 hora	1,9 cm	1 1/2 hora	2,4 cm	2 horas	3,2 cm	3 horas	3,8 cm	4 horas				
Espessura	Índice de tempo																				
1 cm	4 horas																				
Espessura	Índice de Tempo																				
1,4 cm	1 hora																				
1,9 cm	1 1/2 hora																				
2,4 cm	2 horas																				
3,2 cm	3 horas																				
3,8 cm	4 horas																				

Figura 6.26 - Resistências ao fogo obtidas em ensaios para diferentes espessuras de "Pyrocret", em colunas e vigas de aço.
[FONTE: SUMARÉ IND. QUÍMICAS S.A.]

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. ACERCA DA VIABILIZAÇÃO E CONFIABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE AÇO

Trabalhos recentes, voltados ao desenvolvimento do uso de estruturas de aço em edifícios, têm apontado para uma crescente competitividade destas estruturas e potencial ampliação de seu emprego. Quanto ao desempenho em termos de segurança contra incêndio, avanços significativos têm sido divulgados por pesquisadores estrangeiros⁹, resultando inclusive em ganhos econômicos, quanto ao investimento em proteção destas estruturas.

Aqui, como em outros países, a opção pelo aço encontra amplas justificativas técnicas. As estruturas de aço têm apresentado, no entanto, um emprego restrito em edifícios de uso não industrial e, como foi visto anteriormente no capítulo introdutório deste trabalho, sua aplicação em edifícios de múltiplos andares representa apenas uma reduzida fração da produção total de estruturas de aço (ver tabela 1.3).

O temor, algumas vezes levantado, porém discutido de forma extremamente superficial, quanto à segurança que essas estruturas apresentam diante da eventual exposição aos efeitos térmicos de um incêndio, demonstra claramente a frágil conjuntura técnica e de mercado em que se insere o anseio por ampliar o emprego das estruturas de aço em nossos edifícios.

9 - A este respeito, veja-se Latham, Kirby & Thomson [1987], Robinson & Walker [1987], e Harmathy [1988].

Não é objetivo deste trabalho direcionar a discussão para os aspectos mais gerais da tecnologia de produção de edifícios de estrutura de aço, no entanto cabem alguns comentários no sentido de melhor contextualizar estas considerações finais.

Hoje, a produção de edifícios de múltiplos andares no Brasil, dá-se essencialmente a partir do emprego generalizado de estruturas de concreto moldado no local, e é notório o desenvolvimento da indústria cimenteira, bem como extremamente arraigada a tecnologia básica de produção deste tipo de estruturas - aqui incluídas as várias etapas e inclusive a concepção e projeto das mesmas. Não é preciso apresentar estatísticas para que se possa aceitar as afirmações feitas quanto a essa hegemonia do concreto entre nós, e que vem desde os anos sessenta, ou até anterior àquela década.

Outros processos construtivos mais racionalizados têm sido empregados em muito menor escala, sejam eles a alvenaria estrutural, ou o concreto pré-fabricado, apenas para citar dois dos mais importantes.

Todo processo "inovador" sofre as agruras de uma postura de desconfiança quanto a aspectos como economia, desempenho, durabilidade ou segurança, por parte de empresários, construtores, órgãos fiscalizadores e mesmo usuários, desconfiança esta mantida até que as qualidades do processo permitam que se demonstre o contrário. Isto é justo e compreensível, pois são vários e importantes os interesses de cada um destes segmentos.

Além disso, o mercado preferencial de cada processo construtivo tende a se definir, a se delimitar, dentro do mercado maior da construção de edifícios.

As estruturas de aço, pela grande resistência mecânica do material, possuem emprego promissor em edifícios altos, estruturas de grande vão livre ou que empreguem peças atirantadas ou em balanço, permitindo realizar estruturas leves, delgadas e resistentes.

E, uma das características intrínsecas que a estrutura de aço apresenta como diferencial face ao concreto armado, quanto à tecnologia executiva, é um maior grau de industrialização, pois utiliza a montagem de elementos pré-fabricados; o que implica em benefícios, porém, via de regra não explorados em todo seu potencial. Sob este aspecto, o aço seria bom concorrente onde a repetitividade, decorrente de uma produção em larga escala, ou a minimização dos prazos de obra fossem aspectos predominantes.

No entanto, ao se focar o edifício como um todo, embora haja condições de obter na estrutura uma boa industrialização da execução, o mesmo não se pode dizer dos demais sub-sistemas - vedações, instalações e revestimentos, que têm sido em geral executados de modo tradicional, similar aos demais edifícios, representando um comprometimento das vantagens iniciais.

O raciocínio desenvolvido até aqui é importante apenas para que se possa concluir com a afirmação de que, ao contrário do que ocorre com os processos convencionais, processos como os que utilizam estruturas de aço necessitam investir em desenvolvimento tecnológico para se firmarem nas atuais condições do nosso mercado de construção civil. É o que se pode denominar de investimento na formação da cultura do emprego do aço em edifícios. Este investimento, que dará no futuro condição às estruturas de aço de

alcançarem um emprego intensivo, pode ser dividido em algumas frentes inter-relacionadas:

- investir no desenvolvimento de sistemas construtivos que empregam estrutura de aço, voltados para edifícios de tipologias determinadas de uso: edifícios comerciais, edifícios habitacionais, edifícios escolares, institucionais e outros - o que efetivará as vantagens potenciais que o aço apresenta para tais finalidades;
- investir em normalização, controle e certificação de qualidade, voltadas ao projeto, fabricação e execução de edifícios de estrutura de aço, importante para que se confira alto grau de segurança e confiabilidade ao emprego do material;
- investir na formação e capacitação técnica de profissionais, sejam estes a mão-de-obra diretamente envolvida na fabricação e montagem da estrutura ou na execução dos demais elementos do edifício com ela relacionados; ou sejam estes os profissionais de nível superior, arquitetos e engenheiros, que possuem papel fundamental, como aqueles que conceberão, dimensionarão e especificarão seu uso e executarão o emprego do material, e para tanto devem conhecer o máximo sobre ele.

A questão da segurança contra incêndio deve ser entendida como um dos aspectos deste contexto de necessidade de maior desenvolvimento tecnológico do emprego do aço em edifícios, em nada conflitando com os demais, uma vez que se trata igualmente de propiciar um emprego adequado do material aço, com a consideração de suas particularidades características.

Hoje, alguns segmentos do setor siderúrgico e do setor de fabricação de estruturas concordam com estas teses, que são, de

certa forma, intrínsecas à Universidade. São assim ensejadas boas perspectivas futuras, resultantes de um trabalho conjunto.

Passa-se a seguir a itens dedicados a algumas das principais carências diagnosticadas dentro da área de segurança contra incêndio das estruturas de aço, com a proposição de trabalhos a serem realizados para a superação de tais carências, subdivididos segundo três enfoques distintos: formulação de exigências de resistência ao fogo, verificação da resistência ao fogo e sistemas de proteção contra fogo de estruturas de aço. E, como complementação fundamental destes trabalhos, por último, os aspectos relativos ao ensino, formação e treinamento de profissionais de nível superior são abordados.

7.2. ACERCA DA FORMULAÇÃO DE EXIGÊNCIAS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Foram abordadas no capítulo 5 deste trabalho as exigências de resistência ao fogo formuladas por códigos e normas. De modo geral, no caso dos vários países estudados, tais exigências são conservativas, mas os códigos e normas são bastante completos e abrangem vários aspectos do problema, apresentando uma certa coerência. Em nosso caso, além de incompletos, claramente existe uma inadequação dos códigos e normas brasileiros quanto às exigências de resistência ao fogo, já que se incorre em erros conceituais, que comprometem a sua legitimidade e o seu cumprimento integral.

A situação descrita acima pode ser explicada a partir da seguinte visão: em países mais desenvolvidos, houve uma formação histórica de tais exigências, a partir de necessidades de segurança detectadas em trágicos insucessos do passado. Neste processo

histórico, a conscientização quanto ao problema e a mobilização social e política em torno do tema, associada ao investimento em pesquisas, permitiu consolidar um conjunto de conceitos que vem sendo continuamente renovado e aperfeiçoado. No caso brasileiro, houve também trágicos incidentes, porém não foram acompanhados do mesmo nível de mobilização e consciência, ou de levantamentos e pesquisas para a formulação das exigências. Este diagnóstico seria válido para as exigências voltadas à maioria dos itens de segurança contra incêndio dos edifícios.

Isto então justificaria a proposta de uma retomada do processo histórico. Diante da constatação de que, quanto ao tratamento das questões de segurança contra incêndio, a realidade nacional é frágil, restaria apenas reformulá-la a partir de uma melhor fundamentação em termos de dados e conceitos. Seria trilhar o próprio caminho, para saber como se chegou até determinado ponto, e principalmente, como continuar a partir desse ponto.

Dentro da visão descortinada acima, pode-se formular alguns destaques:

- deve ser adotado um caminho único e comum para a reformulação das exigências de segurança contra incêndio dos edifícios, ou seja, as exigências de resistência ao fogo não devem ser as únicas a sofrer revisão, sob pena de torná-las exageradamente superexigentes, e o todo, confuso e incompreensível;
- a base de qualquer formulação de exigências de segurança é o bom conhecimento dos riscos envolvidos, o que torna urgente e imprescindível a implantação de programas permanentes de levantamento, análise e divulgação de dados, relativos a ocorrência de incêndios, potenciais caloríficos existentes nos edifícios,

riscos envolvidos nas atividades, falhas detectadas em sistemas de segurança, etc.

Em especial, a pesquisa dos potenciais caloríficos existentes nos edifícios, que como visto em 3.5, assumem valores bastante díspares nos vários levantamentos efetuados em diversos países, é um dado básico para a correta reformulação das exigências, em particular as de resistência ao fogo de elementos estruturais.

Em relação ao conflito entre os enfoques patrimonial e de proteção da vida humana, abordados no capítulo 2, a reformulação das exigências deve obrigatoriamente abranger os dois enfoques e buscar sua compatibilidade mútua. Tal compatibilização não parece de forma alguma impossível, visto que é consensual a necessidade de um nível mínimo de segurança visando a preservação da vida humana, além do que o risco cresce tanto para um quanto para o outro com os mesmos fatores de área e altura do edifício, e várias medidas de segurança possuem repercussão favorável simultaneamente para o aspecto patrimonial e para o aspecto de segurança da vida humana.

Portanto, uma proposta válida seria a elaboração de uma metodologia unificada de avaliação do risco de segurança contra incêndio dos edifícios, que pudesse ser utilizada identicamente como instrumento por parte de órgãos como o departamento municipal de fiscalização e controle da segurança dos edifícios, e por parte das companhias de seguro.

Quanto à forma, um expediente que permitiria obter maior respeitabilidade para tais exigências, seria a sua edição em termos de um "Código Nacional de Segurança Contra Incêndio dos Edifícios", elaborada com a participação de representantes e o respaldo dos

vários setores interessados, desde órgãos municipais e corpos de bombeiros, até construtores e fabricantes de materiais e equipamentos. Isto significaria a exclusão destas exigências dos códigos de construção, que passariam a tomar o "Código Nacional" como referência, e a elaboração de um conjunto de normas técnicas adequado e suficiente para dar respaldo às exigências de segurança por ele determinadas.

E, ainda que o caminho aparente ser longo, há que se elaborar um bom traçado, pois sem este, o caminho não se torna mais curto e certamente decaem os resultados.

7.3. ACERCA DA VERIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Admitindo que existam dados suficientes acerca dos parâmetros envolvidos, e que haja um satisfatório controle de qualidade em todas as etapas da produção de um edifício, seu nível de segurança terá sido fixado, e assim tornado realidade, quando de seu projeto.

De fato, cabe ao projeto a importante tarefa de compatibilizar o atendimento a um sem número de requisitos, conferindo ao edifício características de difícil modificação em etapas posteriores à sua concepção, ou, alteráveis a partir de implicações de custo e com sacrifício de outras características também desejáveis. Os itens de segurança, por vezes, conflitam com outros parâmetros de projeto, e para que sejam atendidos sem se tornarem em "traumas" ou "mutilações", necessitam de uma adequada base de dados e adequada metodologia de processamento das informações. Daí a importância de um conjunto integrado e coerente de normas, que orientem o projeto.

Particularmente em relação ao projeto de estruturas de aço de edifícios, tem-se hoje no Brasil uma norma de projeto recentemente publicada, a NBR-8800/86 - "Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios" [1986], e não se tem texto normativo contemplando a verificação de resistência ao fogo, seja na forma de um item desta NBR-8800, seja como norma ABNT específica para o tema (pois, como comentado em 4.1.1, o grupo de trabalho por ele responsável na ABNT sofreu solução de continuidade), ou ainda "norma recomendada" - no anexo Q da NBR-8800 (Normas e Documentos Complementares) não se faz referência nem mesmo a normas estrangeiras que tratem da verificação da resistência ao fogo. Pode-se inferir que o projetista é induzido a desconsiderar este aspecto.

Uma posição a se defender nestas considerações finais diz respeito, portanto, à complementação do corpo de normas da ABNT voltadas ao projeto de estruturas de aço hoje existente.

Uma hipótese, divulgada em informativo do COBRACON - Comitê Brasileiro de Construção Civil (CB-2) da ABNT, indica a elaboração de uma norma separada com o título "Exigências Particulares de Resistência ao Fogo para as Estruturas de Aço". A julgar pela sua equivalente para o caso de estruturas de concreto, NBR-5627/80, em vigor há pelo menos doze anos, porém desconhecida pela maior parte dos usuários da norma de projeto de estruturas de concreto (NBR-6118), este não parece o procedimento de melhor resultado prático.

No contexto brasileiro atual, parece mais saudável a inclusão de um capítulo destinado à verificação analítica da resistência ao fogo da estrutura de aço na própria NBR-8800, ainda que com o risco de tornar mais difícil a leitura desta. Teria ainda como vantagem a obrigatoriedade de manter este procedimento de verificação de

resistência ao fogo compatibilizado com o processo de dimensionamento da estrutura adotado por norma.

Sendo procedimento usual e obrigatório a verificação da estrutura na etapa de cálculo, seria possível maximizar o emprego de estruturas desprotegidas, o que significa aproveitamento máximo da capacidade resistente do aço dentro dos critérios de segurança da estrutura, bem como a especificação ainda na fase de projeto de sistemas de proteção eventualmente necessários ao edifício considerado - resultando sem dúvida alguma em estruturas mais funcionais, seguras e econômicas. A execução de ensaios de elementos estruturais, ou ensaios de caracterização do comportamento de materiais de proteção do aço, seriam, portanto, entendidos como fonte de dados complementares. Pouco a pouco, se apreenderiam algumas soluções-padrão que poderiam constar inclusive como sugestão de norma para casos típicos.

7.4. ACERCA DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA CONTRA FOGO

No Brasil, pode-se dizer que o mercado efetivo de execução de proteção de estruturas de aço resume-se ao emprego de três tipos de materiais de revestimento dos perfis estruturais - sendo dois deles argamassas projetadas, à base de vermiculita ou tipo "Pyrocret", e o terceiro tipo, a manta de fibras cerâmicas. Os principais "compradores" são as plataformas "off-shore". A aplicação destes materiais em proteção de edifícios de modo geral é bastante reduzida e, como pode ser deduzido, menor que o emprego do aço estrutural, já que em grande parte dos projetos de estrutura de aço este item ou não é considerado ou é resolvido através de qualquer outro expediente.

E, por outro lado, uma das dificuldades que se apresenta ao projeto de estruturas de aço resistentes ao fogo é esta restrita possibilidade de especificação de sistemas de proteção; dada a pequena variedade de sistemas disponíveis e por não possuir tradição de emprego, a proteção da estrutura torna-se por vezes um capítulo de insegurança dentro do projeto.

Trata-se de um círculo vicioso, inserido dentro do contexto do uso do aço em edifícios.

Esta situação reflete, inclusive, o baixo nível efetivo de industrialização que a construção dos edifícios de estrutura de aço apresenta hoje no Brasil. Uma reversão do quadro não virá antes de a estrutura de aço atingir um maior "quantum" da sua potencialidade de emprego, e este potencial, por sua vez, não será atingido sem que os sistemas de proteção se apresentem mais diversificados e melhor detalhados e desenvolvidos.

7.5. ACERCA DO ENSINO, FORMAÇÃO E TREINAMENTO DE PROFISSIONAIS

Admita-se, por hipótese, que se possa distinguir, de modo universal, três níveis de informação de um profissional projetista - seja este um arquiteto ou um engenheiro - quanto a um determinado tópico que faça parte do conjunto de conhecimentos especializados envolvido no projeto de edifícios: este profissional pode possuir boas noções a respeito do assunto, pode ser um especialista dentro do assunto em pauta, ou pode desconhecê-lo quase que por completo. No caso deste último nível de informação, se for este tópico um item importante dentro da elaboração do projeto do edifício, pode-se dizer que se trata de uma deficiência de formação do projetista, que deve resultar em um projeto falho e com conseqüências pouco

previsíveis quanto à qualidade do edifício, dado o estado de desconhecimento em que se elaborou o projeto.

Se este tópico do conhecimento for segurança contra incêndio, a situação resultante pode ter trágicas repercussões, como de todo modo teria se fosse um desconhecimento de conceitos básicos de estabilidade estrutural, por exemplo, ou qualquer outro item de importância crucial.

O que se pretende é justificar a importância de se proporcionar, a todos aqueles profissionais, sem exceção, um conhecimento básico sólido dos conceitos voltados à consideração dos aspectos de segurança contra incêndio no projeto dos edifícios, incluído aí o aspecto de resistência ao fogo das estruturas (de qualquer material), de tal forma que estes profissionais possam projetar edifícios seguros. Isto pode ser eventualmente realizado de forma autônoma, ou eventualmente através de um consultor, mas cujo trabalho de consultoria possa ser compreendido e avaliado por quem faz o projeto e recorre a tal consultoria, para aspectos particulares importantes do mesmo.

Uma avaliação mais criteriosa do grau de formação dos profissionais nas questões relativas à segurança contra incêndio, formação esta resultante do atual currículo das escolas de engenharia e de arquitetura, poderia medir qual a distância efetivamente verificada entre o desejável e o recebido quanto a esta formação, de modo a propor eventuais alterações desse currículo atual.

Resta comentar a importância de se incrementar em qualidade e quantidade a possibilidade de acesso a uma especialização, isto é,

uma formação adicional em nível de pós-graduação - estrito ou lato senso - para aqueles cujo interesse vier a se dirigir ao assunto.

Apresentou-se ao longo deste trabalho e nestas considerações finais a importância e a necessidade do tratamento adequado dos aspectos de segurança contra incêndio, e a estrutura de aço como importante e válida alternativa de emprego, dentro do universo da construção de edifícios.

Mostra-se portanto a causa da segurança contra incêndio nos edifícios como uma causa a ser abraçada por vários segmentos sociais, e dentre eles os próprios setores produtivos, visando a sua confiabilidade e transparência diante do investidor e do usuário. Esta condição consolidar-se-á a médio e longo prazo, quando for logrado ampliar a cultura tecnológica em torno do tema, através de pesquisa, estabelecimento de exigências e normas técnicas modernas e melhor formação dos profissionais de projeto. O aço, como material "inovador", tirará desta maior cultura tecnológica os melhores benefícios.

E tais investimentos seriam sem sombra de dúvida de grande retorno para a sociedade como um todo, pela inestimável contribuição à construção de edifícios cada vez mais seguros, dentro do melhor das possibilidades e dos recursos que efetivamente se dispuser.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT. NBR-5627 / 80: Exigências particulares para as obras de concreto armado e protendido.
- . NBR-5628 / 80: Componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo.
- . NBR-8800 / 86: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios - método dos estados limites. 2.ed. Rio de Janeiro, ABNT, 1986.
- AGOPYAN, V. O gesso na construção civil. in: UFSC. Desempenho de materiais e componentes de construção civil - anais do simpósio. Florianópolis, 12-15 set. 1989. p. 65-75.
- AISI. Designing fire protection for steel beams. Washington DC, American Iron and Steel Institute, 1984.
- . Designing fire protection for steel columns. 3. ed. Washington DC, American Iron and Steel Institute, March 1980.
- . Designing fire protection for steel trusses. 2. ed. Washington DC, American Iron and Steel Institute, October 1981.
- . Fire protection through modern buildings codes. 5. ed. Washington DC, American Iron and Steel Institute, 1981.

ALBERO, C. E. S. Sistemas fixos de combate a incêndio por inundação total utilizando o agente extintor halon 1301. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1986.

ALMEIDA, D.F.A. As estruturas de concreto armado e o fogo. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1983.

ASTM. E 119 - 83 - Standard methods of fire tests of building construction and materials.

-----, E 603 - 77 - Standard guide for room fire experiments.

The AQUA GROUP. Fire and building - a guide for the design team. London, Granada, 1984.

BABCOCK & WILCOX. Catálogos técnicos. s.n.t.

BAYON, R. La protección contra incendios en la construcción. Barcelona, Editores Asociados, 1978.

BERTO, A.F. Proteção contra incêndio de estruturas de aço. in: Tecnologia de edificações. São Paulo, Pini/IPT, 1988. p. 407-12

-----, Tratamento superficial de estruturas de aço - proteção contra incêndio. in: Universidade Mackenzie. Utilização do aço na construção civil - anais do simpósio. São Paulo, maio 1984.

BOND. Fire and steel construction - water cooled hollow columns. Croydon, Constrado, s.d.

BRASIL. Ministério da Indústria e Comércio. Manual para cálculo de estruturas metálicas. Brasília, MIC/STI, 1986. v. 1.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 476: Part 8: 1972 - Test methods and criteria for the fire resistance of building construction.

CARDOSO, F. F.; MESSARDS, R. M. & PIGNATTA e SILVA, V. Uso do aço na construção. 1. ed. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, fevereiro/1988. p.4-29. (Projeto e Construção de Edifícios de Aço - publicação técnica PT-04)

CONSTRADO. The building regulations 1972 - the application to steelwork of Part E - structural fire precautions. Croydon, Constrado, October 1973. (publication 2/73)

CSTB. Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures de acier. Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, sept. 1983. (cahier 1840)

ELLIOTT, D. A. An introduction to the fire protection of steel. Croydon, Constrado, s.d.

----- . Fire and steel construction - protection of structural steelwork. Croydon, Constrado, August 1974. (publication 4/74)

EUCATEX. Isopiro - catálogo técnico. 2p.

FACIO, M. P. Avaliação do potencial de risco das edificações. São Paulo, SETRE, 1983.

FIBRAS CERÂMICAS. Kaowool e Firemaster - Manual construção civil.

FUNENSEG. Circular normativa nº 13. Rio de Janeiro, 1973.

da GRAÇA, M. E. A. Determinação da resistência ao fogo ótima para o projeto de proteção de estruturas de edifícios. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1978.

HARMATHY, T.Z. Design of buildings for fire safety - part I. in: Fire technology. NFPA, Boston Mass., 1976. v. 12 - n. 2. p.95-108.

----- How much fire resistance is really needed? in: Concrete International: Design and Construction. v. 10 - n. 12. Detroit, American Concrete Institute, December/1988.

HART, F.; HENN, W. & SONTAG, H. El atlas de la construcción metálica. Barcelona, Gustavo Gilli, 1976. p. 178-9; 281-94; 314-9; 337-46.

HIRSCHFELD, H. Código de edificações. 7.ed. São Paulo, Atlas, 1987.

IRB. Tarifa de seguro contra incêndio do Brasil. Rio de Janeiro, 1978.

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE FRANÇAISE. Sécurité contre l'incendie. Paris, Journaux Officiels, 1979-80.

JUNGBLUTH, Otto. Verbund-und sandwichtragwerke: tragverhalten, feuerwiderstand, bauphysik. Springer-Verlag, Berlin, 1986. p.57-65; 81-94.

KATO, M. F. Reação ao fogo dos materiais de construção. in: Tecnologia de Edificações. São Paulo, Pini/IPT, 1988. p. 365-8.

KIRBY, B. R. Recent developments and applications in structural fire engineering design - a review. in: Fire Safety Journal. n. 11(1986), p. 141-179.

LANDI, F. R. A ação do fogo sobre as estruturas metálicas. in: EPUSP. Os edifícios de estrutura metálica; anais do seminário. São Paulo, jun. 86. p. 123-64.

----- . Desempenho de materiais e projeto de edifícios com relação a incêndio. São Paulo, EPUSP, 1987.

----- . O conforto térmico na habitação. São Paulo, EPUSP, 1977.

LATHAM, D. J., KIRBY, B. R. & THOMSON, G. The temperatures attained by unprotected structural steelwork in experimental natural fires. in: Fire Safety Journal. n. 12 (1987), p. 139-152.

LIE, T. T. Fire and buildings. London, Applied Science, 1972.

MALHOTRA, H. L. Design of fire-resisting structures. 1. ed. London, Surrey University, 1982.

MALHOTRA, H. L. & COOKE, G. M. E. Protection of steel structures against fire. August 1982. (Project DP/BRA/75/003 - report n. 5/1982.)

- MALHOTRA, H. L. & READ, R. E. H. Fire safety code for buildings. September 1983. (Project DP/BRA/75/003 - report n. 6/1983.)
- MASTERTON, W. L. & SLOWINSKI, E. J. Química geral superior. 4.ed. Rio de Janeiro, Interamericana, 1978.
- MELHADO, S. B. Sistematização do problema de segurança contra incêndio para os edifícios de estrutura de aço. in: EPUSP. Sistemas de proteção e combate a incêndios - anais do IV simpósio nacional de instalações prediais. São Paulo, out. 1987.
- MELHADO, S. B. & SOUZA, U. E. L. O incêndio e os edifícios de aço. in: Aço na Construção. São Paulo, Pini/ABCEM-ABIPE, janeiro/89. n. 3 - p.41-56.
- Segurança contra incêndio nos edifícios de estrutura de aço. 1. ed. São Paulo, EPUSP/FDTE/COSIPA, janeiro/1988. 208 p. (Projeto e Construção de Edifícios de Aço - publicação técnica PT-06)
- MILITZER, J. et alii. Transferência de calor e massa. São Paulo, EPUSP, 1980.
- MINEBRA. Vermiculita - catálogo técnico.
- NATIONAL COMMISSION ON FIRE PREVENTION AND CONTROL. America burning. Washington DC, U.S. Government, 1973.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 1. ed., São Paulo, Pini, 1982. 738 p.

NFPA. High-rise building fires and fire safety. Boston Mass., NFPA, 1973. (NFPA n. SPP-18)

----. Manual de protección contra incendios. 2. ed. Madrid, Mapfre, 1983.

----. Fire protection handbook. 14. ed. Boston Mass., NFPA, 1976.

PATTON, W. J. Materiais de construção para engenharia civil. São Paulo, E.P.U., 1978.

PEREZ, A. R. Ensaios de caracterização do comportamento ao fogo de materiais e componentes do edifício. Seminário de pós-graduação (disciplina PCC-702). São Paulo, EPUSP, 1978.

PROMAT. Passive fire protection - British standard 476. s.n.t.

RAMACHANDRAN, G. Probabilistic approach to fire risk evaluation. in: Fire Technology. Quincy Mass., NFPA, august 1988. v.24 - n. 3

ROBINSON, J. T. & WALKER, H. B. Fire-safe structural design. in: Construction and Building Materials n. 1. March-April 1987.

ROSSO, T. Incêndios e arquitetura. São Paulo, FAU-USP, 1975.

ROSSO, T. O uso da vermiculite na proteção contra o fogo. s.n.t.

SANTOS, U. P. Proteção de estruturas metálicas contra fogo. s.n.t.

SCHEER, L. O que é aço? 2. ed. São Paulo, E.P.U./Limasa, 1987. p.88-94.

SCHULTZ, N. Fire and flammability handbook. New York, Van Nostrand Reinhold, 1985.

SCHULZ, G. W. et alii. The ECCS column curves. in: Manual on stability of steel structures. 2. ed. Milano, ECCS, June 1976. p.55-75.

SEIGEL, L. G. A performance approach to the design of fire-resistive buildings. in: National Bureau of Standards Special Publication 361. NBS, 1972. v.1.

SINTRAC. Detector de fumaça supervisionado - catálogo técnico. São Paulo.

SOUZA, U.E.L. A utilização da laje composta em edifícios. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1989.

SOUZA, U.E.L.; MELHADO, S. B. & LANDI, F. R. Previsão do comportamento do incêndio e exigências de resistência ao fogo dos edifícios de aço. in: Congresso ABCEM-ABIPE 1987 - anais. Rio de Janeiro, 1987. 32 p.

SUMARÉ. Pyrocret - catálogo técnico.

UNIFORM BUILDING CODE. Requirements based on occupancy. 1979th edition.

VERMICULITE INSTITUTE. Catálogos técnicos. USA.

ANEXO
FOTOS DE ENSAIOS
E SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Foto A.1 - Ensaio em um compartimento com incêndios naturais, realizado nos EUA.
[Cópia a partir de original cedido por Mr. Richard Gewain - consultor.]

Foto A.2 - Visão mais próxima do compartimento ensaiado.
[Cópia a partir de original cedido por Mr. Richard Gewain - consultor.]

Foto A.3 - Vista interna ao compartimento mostrando o detalhe dos elementos de madeira usados para simulação de potenciais caloríficos no ensaio de incêndio natural. [Cópia a partir de original cedido por Mr. Richard Gewain - consultor.]

Foto A.4 - Montagem para ensaio de resistência ao fogo de colunas de aço, no Laboratório de Ensaaios de Fogo do IPT (São Paulo) - à esquerda, coluna revestida com manta de fibras cerâmicas, à direita, revestida com manta de fibras cerâmicas com acabamento final em chapa de aço galvanizado.
[Cópia a partir de original cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.5 - Aspecto após a realização do ensaio normalizado em forno; observe-se a colocação de diversos medidores de temperatura para acompanhamento das temperaturas do aço. [Cópia a partir de original cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.6 - Idem anterior, sob outro ângulo; destaque para o aspecto inalterado da manta de fibras cerâmicas.
[Cópia a partir de original cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.7 - Proteção de sistema de piso sobre vigas de aço, através de revestimento com fibras minerais projetadas. [Cópia a partir de original cedido por Mr. Richard Gewain - consultor.]

Foto A.8 - Aplicação de manta de fibras cerâmicas sobre vigas de aço; a fixação das camadas de manta é feita por pinos soldados ao perfil de aço. [Cópia a partir de original cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.9 - Outra vista da aplicação de manta de fibras cerâmicas sobre vigas de aço, mostrando a fixação de chapa galvanizada de acabamento e proteção sobre a manta já aplicada.
[Cópia a partir de original] cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.10 - Detalhe da aplicação de manta de fibras cerâmicas sobre vigas de aço, destacando os mesmos pinos mostrados na foto A.8, os quais também fixam a chapa de acabamento. [Cópia a partir de original cedido pela Babcock & Wilcox.]

Foto A.11 - Utilização de argamassa de vermiculita na proteção de estrutura de aço; adição de água e mistura da argamassa. [Cópia a partir de original cedido pela Eucatex S.A.]

Foto A.12 - Utilização de argamassa de vermiculita na proteção de estrutura de aço; aplicação por jateamento sobre tela tipo "deployee".
[Cópia a partir de original cedido pela Eucatex S.A.]

Foto A.13 - Detalhe mostrando o aspecto da tela e da argamassa já aplicada.
[Cópia a partir de original cedido pela Eucatex S.A.]

Foto A.14 - Acabamento final do revestimento de argamassa de vermiculita, feito de modo similar ao de um reboco.
[Cópia a partir de original cedido pela Eucatex S.A.]

Foto A.15 - Edifício construído em Belo Horizonte, com elementos estruturais de aço externos à fachada; as vigas e colunas internas são revestidas.
[Foto tirada em maio de 1988.]