Ricardo de Scarabello Cuoghi

**Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em
situação de incêndio**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana**

**Orientador:
Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo**

**São Paulo
2006**

Aos meus pais, Osvaldo e Zulmira, por todo amor que me ofereceram e ao apoio que recebi em todos os momentos de minha vida.
À Fernanda, minha esposa, pelo amor dedicado, incentivo e companheirismo.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Antonio Figueiredo pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada.

À Yasuda Seguros e em especial ao Macoto pela compreensão e apoio.

À AGF Seguros e aos meus colegas de trabalho pelo apoio decisivo.

À Renata Monte e ao Reginaldo que sempre me apoiaram no Laboratório da POLI-USP.

Por fim, aos meus colegas de Mestrado da POLI-USP pelo apoio e ajuda incondicionais.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Importância do tema	1
1.2	Instituições relacionadas à segurança contra incêndio em alguns países	10
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivos	18
1.5	Conteúdo da dissertação	18
2.	O INCÊNDIO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.1	O fenômeno da combustão	21
2.2	Tipos de combustão	25
2.3	Propagação do fogo	29
2.4	Incêndio compartimentado	30
2.5	Duração do incêndio compartimentado	42
2.6	Balanco térmico de um incêndio em um ambiente compartimentado	45
2.7	Incêndio em grandes compartimentos	46
2.8	Severidade de um incêndio	47
2.9	O conceito de carga de incêndio	52
2.10	Incêndio associado a um carregamento	58
2.11	Breve histórico da evolução de testes de incêndio e normas no mundo	62
2.12	Curvas normalizadas de incêndio	68
2.13	Aspectos arquitetônicos de segurança contra incêndio	72
2.14	Aspectos de segurança estrutural	80
3.	O RISCO DE INCÊNDIO	83
3.1	Aspectos de análise de risco de incêndio	83
3.2	Aspectos de gerenciamento de risco de incêndio	89
4.	ASPECTOS DE SEGURO INCÊNDIO E LEGISLAÇÃO CONTRA INCÊNDIO DOS EDIFÍCIOS	109
4.1	Considerações sobre seguro incêndio	109
4.2	Matriz de sinistralidade (Severidade x Frequência)	110
4.3	O conceito de PMP (Perda Máxima Possível)	113

4.4	Classificação de riscos para fins de seguro a partir da TSIB	115
4.5	Cálculo do prêmio do seguro incêndio de acordo com a TSIB ...	126
4.6	Desconto aplicado sobre o prêmio de seguro incêndio em função da instalação de equipamentos de proteção contra incêndio	128
4.7	Legislação de segurança contra incêndio (O Decreto nº 46.076)	133
4.8	Considerações sobre as perdas econômicas decorrentes de um incêndio em um edifício	140
5.	COMPORTAMENTO DO CONCRETO ENDURECIDO EM ALTAS TEMPERATURAS	147
5.1	Propriedades térmicas dos materiais não combustíveis	150
5.2	Decomposição química do concreto endurecido	156
5.3	Degradação da macroestrutura do concreto endurecido	158
5.4	Evolução da zona de baixa porosidade no elemento estrutural ..	160
5.5	Evolução da perda de resistência mecânica do concreto em função da elevação da temperatura a partir dos parâmetros de dosagem (Parte Experimental)	162
5.5.1	Objetivos do experimento	163
5.5.2	Descrição do experimento	163
5.5.3	Seleção de materiais	164
5.5.4	Estudo de dosagem	164
5.5.5	Influência do tipo de agregado	165
5.5.6	Influência da relação a/c	165
5.5.7	Influência do volume de argamassa	165
5.5.8	Influência da porosidade	166
5.5.9	Influência da curva temperatura x tempo (mufla)	166
5.5.10	Apresentação dos dados e análise de resultados da primeira etapa	167
5.5.11	Apresentação dos dados e análise de resultados da segunda etapa	182
6.	ESTUDO DE CASO DE SINISTRO DE INCÊNDIO	189
6.1	Incêndio no Aeroporto Santos Dumont	189
6.1.1	Descrição do edifício sinistrado	189

6.1.2	Danos provocados pelo incêndio às estruturas de concreto armado	189
6.1.3	Conclusões sobre o sinistro incêndio	196
6.2	Considerações sobre avaliação e recuperação de estruturas submetidas a incêndio a partir de um estudo de caso	196
7.	ASPECTOS TECNOLÓGICOS A SEREM OBSERVADOS PARA A REDUÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELO INCÊNDIO ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO	208
7.1	Espessura equivalente de concreto para argamassa protetora	208
7.2	Influência da porosidade na composição de materiais refratários	211
7.3	Considerações sobre a porosidade das argamassas	212
7.4	Exemplos de materiais de proteção térmica para estruturas de aço e de concreto	217
8.	CONCLUSÕES	226
9.	ESTUDOS FUTUROS	229
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	232
	ANEXO I – DEFINIÇÕES DOS TERMOS UTILIZADOS	237

RESUMO

O risco de incêndio e seus prejuízos às vidas humanas e ao patrimônio tornaram-se cada vez maiores com o desenvolvimento urbano e a evolução da construção civil. Assim, os meios de proteção contra o incêndio tornam-se cada vez mais necessários, tanto os meios ativos (*sprinklers*, brigada de incêndio, etc), quanto os meios passivos (proteção térmica de estruturas, etc).

Em situação de incêndio, a proteção à vida e ao patrimônio deve ser garantida pelos meios de proteção das edificações evitando-se o colapso de parte ou toda estrutura. A eventualidade do sinistro não deve ser desprezada sendo que, melhorar o desempenho das estruturas visando a iminência de um incêndio é sinônimo de economia em um aspecto abrangente: proteção à vida, ao patrimônio e à atividade econômica desenvolvida no estabelecimento.

Neste trabalho, realiza-se uma apresentação do tema comportamento das estruturas de concreto em situação de incêndio, abordando aspectos de análise de risco incêndio, seguro contra incêndio, o fenômeno incêndio e suas variáveis, meios de proteção térmica das estruturas e aspectos arquitetônicos e estruturais que influenciam na probabilidade de ocorrência de um incêndio. No plano experimental, analisa-se a susceptibilidade ao fogo do concreto, através da aferição da perda de resistência mecânica de alguns traços submetidos a curvas de temperatura. Realiza-se também a análise de um caso real de incêndio sob o ponto de vista da descrição do incêndio, seus danos às estruturas de concreto e metodologia de recuperação das estruturas afetadas.

CUOGHI, Ricardo de Scarabello
Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
**Av. Prof. Almeida Prado, Trav. 2, n° 271, Ed. Paula Souza [Eng. Civil] – CEP 05508-900 – Cidade
Universitária – São Paulo – S.P. – Tel.: +55 +11 3091-5459/5165. Fax: +55 +11 3091– 5715.**

ABSTRACT

The fire risk and its damage to the human being lives and to the assets had become each time greater with the urban development and the evolution of civil construction. Thus, the ways of fire protection become each time more necessary, as much the direct assets (fire sprinklers, brigade, etc), as the indirect assets (structural thermal insullation, etc).

In fire situation, the protection to the life and the assets must be guaranteed by the ways of protection inside buildings, preventing high costs of structural recovery and, mainly, the immediate collapse of all or part of the structure. The occurrence of a fire accident does not have to be rejected and improving the performance of the structures aiming at the imminence of a fire is synonymous of economy in an including aspect: protection to the life, protection to the assets and to the activities in the building.

In this work, a general overview of the behavior of concrete structures in fire situation is presented, approaching aspects of fire risk analysis, fire insurance, the fire phenomenon and its interferences, methods for thermal insullation and structural and architectural aspects that have influence in the probability of a fire occurrence. In the experimental plan, the susceptibility of hardened concrete to the fire is analysed, through the measurement of its mechanical resistance loss submitted to the high temperatures. The analysis of a real fire case in a building is also presented, highlighting the description of the fire, its damages to the hardened concrete structures and the development of a methodology of recovering the affected structures.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

As normas ou legislações de proteção de edifícios contra incêndio vêm se aperfeiçoando lentamente ao longo dos séculos. Grandes incêndios, alguns dos quais serão descritos nesta dissertação posteriormente, arrasaram cidades desde a Idade Antiga, por exemplo, em Roma, de onde se tem registro do primeiro grande incêndio (64 d.C.) durante o império de Nero. Até o fim do século XIX os incêndios destruíam cidades devido a falta de medidas de planejamento urbano (ONO, 1997). O maior progresso na área de segurança contra incêndio se deu a partir da segunda metade do século XIX, sendo que, deste período em diante, os incêndios começaram a se limitar aos edifícios. Porém, depois da Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento da industrialização gerou uma série de produtos que foram incorporados aos edifícios, muitos deles contribuindo para o aumento da carga de incêndio. A larga utilização de materiais sintéticos na construção civil, principalmente no acabamento e isolamento, traz outro agravante que é a grande quantidade de fumaça tóxica e asfixiante que a combustão destes materiais produz. Desta forma, depois da Segunda Grande Guerra houve um aumento gradual da carga de incêndio nos edifícios.

Devido às catástrofes já ocorridas e conseqüentes perdas, em vidas humanas e patrimoniais, os países desenvolvidos, como os Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Japão, Inglaterra e França, dentre outros, vem ampliando o investimento em pesquisas e investigações na área de segurança contra incêndio em geral. Este investimento em pesquisa pode ser comprovado através do grande número de trabalhos técnicos e científicos publicados. A China, ultimamente, também vem apresentando uma quantidade razoável de trabalhos publicados no meio científico internacional.

Pelo fato do Brasil ser um país ainda em desenvolvimento, e, portanto, possuir inúmeras áreas de carência, e a despeito da importância do tema “Segurança contra Incêndio em Edificações”, poucos investimentos são dispensados em pesquisas nesta área. Pode-se exemplificar o citado na medida em que não há, até a presente data, uma legislação nacional que dite as diretrizes de segurança contra incêndio para todo o país. Outro aspecto importante a se ressaltar é o fato de não existir no país uma cultura de disseminação de metodologias de proteção contra incêndio. Assim, o país aceita níveis

de risco de incêndio impraticáveis em outros países. Como exemplo, pode-se citar que, no Brasil, as residências unifamiliares estão isentas de qualquer forma de proteção contra incêndio e isto talvez explique o fato de elas apresentarem maior quantidade de casos de incêndio. Além disto, apresenta-se neste país uma deficiência de normas e legislação contra incêndio, principalmente, no plano federal, que se soma a falta de consciência dos usuários dos edifícios e deficiência dos profissionais da construção civil, sejam estes ligados ao projeto, à produção ou à manutenção dos edifícios.

De acordo com SEITO (1995), as cidades brasileiras observam o aumento do risco de incêndio em seus edifícios devido aos seguintes fatores:

- Concentração urbana com adensamento de casas e construção de edifícios altos;
- Uso indiscriminado de materiais combustíveis, principalmente os materiais plásticos;
- Maior consumo de energia, tanto para a produção como para o conforto;
- Adoção de tecnologias importadas sem uma análise do seu risco de incêndio;
- Edifícios altos sem projetos adequados de segurança contra incêndio;
- Instalação de equipamentos de combate a incêndio sem comprovação de sua eficácia;
- Falta de regulamentação de segurança contra incêndio que contemple as medidas de prevenção e as medidas de proteção, e;
- Inexistência de um sistema global de segurança contra incêndio no plano federal gerenciada pelas autoridades competentes:
 - Para a elaboração de regulamentos para todo o país;
 - Atualização dos regulamentos existentes;
 - Desenvolvimento de novas tecnologias;
 - Autonomia dos Corpos de Bombeiros;
 - Criação dos bombeiros voluntários;
 - Assegurar a correta execução dos regulamentos.

Somente depois das tragédias dos incêndios dos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974) houve mobilização dos órgãos competentes no sentido de promover a atualização da norma de segurança contra incêndio na cidade de São Paulo. Cinco dias depois da tragédia do Joelma foi aprovado o Decreto 10.878 pela Câmara de Vereadores de São Paulo na data de 07 de fevereiro de 1974 que trata da atualização das normas de

segurança contra incêndio. Depois, surgiu a Lei Municipal 8.226, de 20 de junho de 1975 e o Decreto 20.811, de 11 de março de 1983. Ressalta-se que a Lei Municipal 11.228 de 25 de junho de 1992 substituiu a Lei Municipal 8.226, de 20 de junho de 1975. O Decreto Estadual 38.069, de 14 de dezembro de 1993 substituiu o Decreto 20.811 de 11 de março de 1983. Atualmente, vigora no Estado de São Paulo o Decreto 4.076 de 31 de agosto de 2001 de acordo com a Lei 684 de 30 de setembro de 1975. Por fim, é importante esclarecer que dentro do Edifício Joelma estavam instaladas nove Companhias de Seguro, o que demonstra a falta de atenção ao tema de segurança contra incêndio até mesmo em empresas especializadas no tratamento de riscos desta natureza.

No Brasil as estatísticas de incêndio não são feitas no âmbito nacional e, portanto, não se sabe o quanto se perde precisamente com os sinistros de incêndio e qual é o seu perfil. SEITO (1995) estima que as perdas indiretas superam as perdas diretas dos sinistros de incêndio e mais de 30% das empresas que sofreram incêndio total, apesar de receberem indenização securitária e retomarem suas atividades, saem do mercado dentro de 2 a 3 anos após seu retorno.

As conseqüências de um incêndio não podem ser quantificadas diretamente, sendo determinadas por intermédio de estudos estatísticos que visam levantar (SEITO, 1995):

- Perdas materiais e humanas;
- Causas do incêndio;
- Causa das mortes;
- Tipos de construções envolvidos;
- Ocupações e atividades;
- Local de início do fogo no ambiente;
- Época do ano de ocorrência do incêndio;
- Distância do edifício em relação ao posto de bombeiros;
- Problemas do trânsito na hora da ocorrência do incêndio;
- Tempo decorrido entre a detecção do fogo e o início do seu combate;
- Eficiência das técnicas de combate do fogo;
- Meios para carros de bombeiros aproximarem-se do risco.

Desta forma, para minimizar as conseqüências do incêndio são necessárias várias ações que estão resumidas a seguir (SEITO, 1995):

- Existência de regulamento compulsório de segurança contra incêndio;
- Normas técnicas de terminologia, especificação, procedimento, simbologia, padronização, método de ensaios, instalações, vistoria e manutenção adequadas às necessidades do Brasil;
- Serviços públicos eficientes para profissionalização de seus funcionários e uma política de implementação em:
 - Prevenção e proteção de incêndio (Prefeituras e Bombeiros);
 - Abastecimento de água (hidrantes públicos e serviços de água);
 - Planejamento das vias públicas (planejamento urbano);
- Projetistas de edificações com conhecimento de segurança contra incêndio;
- Materiais, componentes e sistemas construtivos específicos para segurança contra incêndio utilizados na construção civil, com certificação de qualidade;
- Produtos, equipamentos e sistemas de combate e detecção de incêndio com selo de conformidade que atestem e garantam seus desempenhos;
- Empresas de serviço de instalação e manutenção, devidamente credenciadas e fiscalizadas pelas autoridades competentes em segurança contra incêndio;
- Laboratórios de certificação credenciados devidamente equipados para os diversos ensaios e com laboratoristas treinados;
- Laboratórios de pesquisas e desenvolvimentos de materiais, produtos e sistemas construtivos para darem suporte às autoridades, entidades normalizadoras, projetistas e indústrias;
- Criação de Corpos de Bombeiros voluntários e seu treinamento;

Seria importante ainda, para a minimização das conseqüências dos incêndios, a criação de um foro nacional de discussão de segurança contra incêndio (SEITO, 1995), onde estivessem presentes diferentes segmentos da sociedade como, por exemplo: órgãos legisladores, corpos de bombeiros, seguradoras, construtoras, empresas de instalação e inspeção de sistemas de proteção contra incêndio, universidades e institutos de pesquisa e avaliação de sistemas e materiais de proteção contra incêndio (SEITO, 1995). Torna-se difícil que este foro se realize na prática devido a grande quantidade de problemas econômicos e sociais que o Brasil enfrenta. Porém, se o incêndio for analisado não somente sob o ponto de vista do dano direto, mas também do dano indireto

(aproximadamente 30% das empresas que sofrem incêndio total encerram suas atividades 2 ou 3 anos após o incêndio, embora tenham recebido indenização de seguro), percebe-se que ele contribui para o aumento do desemprego e reproduz um impacto negativo no PIB brasileiro. Sob este ponto de vista, o incêndio deixa de ser apenas um evento de prejuízo isolado em um edifício para ganhar relevância macro-econômica. Desta forma, combater o incêndio não é importante apenas para evitar a perda de vidas humanas ou evitar o prejuízo patrimonial, mas também para assegurar o emprego e o PIB do país. Sob este enfoque o incêndio ganha relevância social.

A criação de um foro nacional possui, primordialmente, uma meta que é a determinação mais clara dos objetivos de segurança contra incêndio uma vez que a legislação de vários Estados e Municípios preconiza a segurança à vida, enquanto que as Seguradoras preconizam a segurança patrimonial. ROSSO (1975) acrescenta ainda mais um objetivo que é o de permitir a recuperação estrutural do edifício após o incêndio. Por fim, a NFPA (1983) apud MELHADO (1990) inclui um último objetivo que é o de permitir a continuidade operacional do edifício. É necessário que haja consenso entre as diversas visões da legislação de segurança contra incêndio, para que os usuários e administradores dos edifícios não sofram dificuldades por necessitarem atender diversas regras impostas pela legislação ou normas securitárias.

O risco de incêndio é um subproduto indesejável da atividade humana. Um edifício quando é construído, representa o produto principal, sobre o qual são voltadas as atenções, porém, ele terá consigo o risco de incêndio ao longo de sua vida útil. Desta forma, o risco de incêndio pode ser considerado um evento que pode ocorrer durante a vida útil do edifício e, inclusive sobre ele pode ser determinada uma probabilidade de ocorrência. Existem modelos matemáticos que sugerem percentuais de risco de incêndio ao longo da vida útil do edifício. Apesar da probabilidade de risco de incêndio ser relativamente baixa ao longo da vida útil dos edifícios, seus prejuízos são enormes, não somente com relação às vidas humanas como também às perdas patrimoniais. Porém, não se pode esperar que em qualquer país o investimento em sistemas de segurança seja maior que o próprio investimento no desenvolvimento do produto. É o que acontece na segurança contra incêndio das edificações. Assim, pensar no desenvolvimento dos edifícios e na mitigação dos riscos de incêndio é tão importante quanto os efeitos da globalização e dos impactos sócio-ambientais, uma vez que o edifício do futuro deverá

ser construído absorvendo conceitos de sustentabilidade, tais como: menor geração de entulho e resíduos, menor consumo de energia e de água, menor grau de toxicidade dos materiais de construção empregados, etc.

Abordando apenas o tópico sustentabilidade ambiental, pode-se acrescentar que o incêndio impacta não só o meio social, como também o meio ambiente já que a frequência e severidade de incêndios em todos os setores da atividade humana geram uma grande quantidade de produtos tóxicos que são lançados na atmosfera, agravando os fenômenos do aquecimento do planeta e poluição ambiental. Pode-se reunir a este grupo os incêndios em reservas florestais que além de contribuir para a poluição do ambiente consomem a biodiversidade do planeta. Esta abordagem é superficial e serve apenas para ampliar a dimensão da visão dos efeitos do incêndio sobre um edifício para além das perdas de vidas humanas e patrimoniais.

O impacto ambiental global do chamado construbusiness (termo criado por associações de construção brasileiras que buscam descrever a totalidade dos negócios referentes à atividade de construção, abarcando projetistas, materiais, sistemas de produção, agentes financeiros, pesquisadores, instituições governamentais, organizações de meio ambiente, consumidores etc), proveniente da extração de matéria prima, produção de materiais, transporte, construção, uso, manutenção e demolição, é bastante importante no plano global (JOHN; AGOPYAN; SJÖSTRÖM, 2001). Segundo SILVA & SILVA & AGOPYAN (2001) a indústria da construção é a atividade humana com maior impacto sobre o meio ambiente, devido ao seu tamanho e importância dentro da economia. Para ilustrar a dimensão das atividades de construção, a ABCP (1999) afirma que o consumo “*per capita*” de concreto por ano é maior do que o de alimentos ou de qualquer outro produto necessário à sobrevivência e desenvolvimento do homem, perdendo apenas para o consumo de água. Na União Européia, o chamado construbusiness responde por cerca de 11% do seu PIB.

Assim como seu impacto econômico, o impacto ambiental do construbusiness é bastante expressivo e infelizmente não pode ser reduzido na mesma proporção dos avanços tecnológicos experimentados pelo setor (JOHN et al., 2001). A indústria da construção e seus produtos consomem aproximadamente 40% da energia e dos recursos naturais e gera 40% dos resíduos produzidos por todo o conjunto de atividades humanas

(SJÖSTRÖM, 2000, apud JOHN, 2001), podendo atingir até 75% como no caso dos Estados Unidos (JOHN, 2000 apud JOHN, 2001). A massa de resíduos gerados na construção e demolição é igual a massa de lixo urbano, com valores variáveis entre países, mas com valores típicos em torno de 400 kg/hab.ano (JOHN, 2000 apud JOHN, 2001), provavelmente, mesmo em países como o Brasil (PINTO, 2000 apud JOHN, 2001). Se somarmos os resíduos gerados na produção de materiais este valor sobe significativamente.

Sendo assim, faz-se necessário relacionar o impacto ambiental dos incêndios no construbusiness para se reconhecer qual o percentual de participação destes impactos no conjunto de agressões ambientais. Quando se fala de impacto devido ao incêndio é importante salientar que não entra no computo somente a poluição liberada pela queima de combustíveis presentes na construção, mas também o destino dos escombros do incêndio e todo o impacto gerado na produção de um novo edifício. Portanto, a incidência de um incêndio no edifício ao longo de sua vida útil sobrecarrega o impacto ambiental que este edifício causa na natureza e certamente contribui para a não sustentabilidade da construção.

Desta forma, a segurança contra incêndio possui diversas visões (LAWSON, 2001). Para o engenheiro estrutural esta visão seria importante o comportamento dos elementos estruturais em altas temperaturas. Para as autoridades de regulação de normas seria o estudo do crescimento da temperatura nos chamados incêndios naturais, como função da compartimentação e das condições de ventilação. Segundo a arquitetura, o incêndio é visto sob a perspectiva da incorporação de elementos de proteção ou detecção de incêndio para redução do potencial de incêndio ou redução da propagação do mesmo. Sob o ponto de vista da administração, significa segurança patrimonial para os administradores da empresa ou do edifício. Por fim, sob o ponto de vista social, segurança contra incêndio pode representar estabilidade do emprego e na esfera econômica, ela contribui positivamente para a construção do PIB de um país. Numa visão mais ampla, a engenharia de incêndio se relaciona com a quantificação do desempenho das estruturas frente ao incêndio, no sentido de adequação dos aspectos de segurança e economia. Destas diversas visões, depreende-se que engenharia de segurança contra incêndio possui um campo de aplicação muito amplo e interdisciplinar, sendo que, para se atingir bons resultados no desenvolvimento de

projetos ou mesmo na manutenção de edifícios, torna-se necessária a aplicação de conceitos de diversas áreas do conhecimento humano.

De acordo com a NFPA apud (MELHADO, 1990), a questão do incêndio possui no mínimo 3 níveis de abordagem, a saber:

- Institucional (primeiro nível);
- Técnico-científico (segundo nível);
- Operacional (terceiro nível).

Os três níveis estão ligados a um ou mais setores da sociedade: 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 nível, os usuários dos edifícios, além do próprio Corpo de Bombeiros como usuário dos sistemas de proteção contra incêndio. Um quarto nível poderia estar ligado à sustentabilidade e envolveria todas estas instituições citadas anteriormente.

Segundo ROSSO (1975), 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 pelas companhias seguradoras. Esta distinção não é absoluta, sendo que a proteção a vida humana e ao patrimônio não são objetivos dissociados na prática.

Para MALHOTRA (1982), os sistemas de segurança contra incêndio podem ser divididos conforme a seguir:

- Prevenção contra incêndio: dispositivos que visam prevenir a ocorrência de um incêndio ou reduzir a propagação do mesmo 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: está relacionado aos materiais, rotas de fuga, sistemas e equipamentos de detecção, alarme, controle ou extinção do incêndio, podendo-se destacar:
 - **Medidas de proteção passiva:** aquelas que não dependem de nenhum acionamento de emergência, como por exemplo: controle dos materiais combustíveis, rotas de fuga, compartimentação dos ambientes e proteção térmica das estruturas;
 - **Medidas de proteção ativa:** aquelas que dependem de algum acionamento de emergência, como por exemplo: detecção e alarme de incêndio e sistemas de extinção do incêndio;

MALHOTRA (1982) apregoa ainda que a segurança estrutural dos edifícios tem por objetivo:

- Preservar a integridade de áreas seguras no edifício;
- Restringir as dimensões do incêndio;
- Evitar que a estrutura do edifício atinja a situação de instabilidade.

Por fim, é importante salientar que um dispositivo de proteção contra incêndio atua no desempenho do conjunto dos meios de proteção contra incêndio. Por exemplo, a estabilidade estrutural é importante para garantir que os bombeiros realizem o combate ao fogo. A proteção contra incêndio das estruturas está ligada às outras medidas de proteção contra incêndio, uma vez que a ativação de um sistema de proteção pode beneficiar outros melhorando o desempenho global do conjunto de sistemas de segurança contra incêndio.

1.2 Instituições relacionadas à segurança contra incêndio em alguns países

Muitas instituições vêm pesquisando o comportamento do incêndio nos edifícios e o comportamento das estruturas em situação de incêndio a fim de garantir a evolução das normas de proteção contra incêndio e melhorar o nível de segurança à vida humana e patrimonial dos edifícios. Nos Estados Unidos estão os maiores contingentes de instituições, organizações e profissionais atuantes na área de segurança contra incêndio no mundo atualmente. Pode-se citar as seguintes entidades:

- **International Association of Fire (IAFC):** primeira associação americana na área, foi fundada em 1873 na cidade de Baltimore por representantes das 500 maiores cidades dos Estados Unidos na época, com o objetivo de promover a prevenção de incêndio e as técnicas de proteção. Uma de suas primeiras resoluções foi a instalação de uma campanha para a padronização dos diâmetros e tipos de conexão das mangueiras de bombeiros, de modo que qualquer corpo de bombeiros pudesse dar assistência a outro no combate a incêndios.
- **National Board of Fire Underwriters:** deu origem ao *Underwriters' Eletrical Bureau* em 1894, que posteriormente (1901) passou a ser conhecido como *Underwriters' Laboratories* (UL). O objetivo inicial da UL era a salvaguarda da vida humana através do desenvolvimento de normas de segurança contra incêndio para materiais e aparelhos eletrodomésticos. A UL hoje estabelece, mantém e opera laboratórios de verificação e testes em equipamentos, sistemas e materiais a fim de determinar o grau de perigo que estes podem causar à vida e à propriedade, e para assegurar, definir e publicar normas, classificações e especificações para materiais, equipamentos, produtos, dispositivos, construções, métodos e sistemas que podem afetar o homem. O selo de qualidade da UL tem hoje credibilidade mundial (UNDERWRITERS LABORATORIES INC., 1990). O *National Board of Fire Underwriters* publicou, em 1894, o primeiro “*model building law*”, ou seja, o código de obras modelo, em que municipalidades passariam a se basear para o desenvolvimento de seu código municipal de obras, adequando-o às suas necessidades. O *Underwriters Laboratories* (UL) desenvolve normas de segurança baseados em procedimentos que possibilitam a participação das partes interessadas, seja o consumidor, seja a indústria. Assim, os seus procedimentos consideram um levantamento de normas existentes e a necessidade de se obter a opinião dos

vários interessados no assunto em questão, por exemplo: fabricantes, consumidores e pessoas, associações e organizações de proteção do consumidor, entidades acadêmicas, representantes governamentais, usuários industriais e comerciais, inspetores e companhias seguradoras. Todas estas entidades fornecem subsídios para o UL formular suas normas e mantê-las atualizadas com os avanços sociais e tecnológicos.

- **National Fire Protection Association (NFPA):** foi criada em 1896 pelos membros do *National Board* com a missão de salvaguardar o homem, sua propriedade e o meio ambiente do evento do incêndio, utilizando como meio as técnicas científicas e de engenharia, além da educação. A NFPA, uma organização independente, de associação (adesão) voluntária e sem fins lucrativos é financiada, principalmente, pela venda de publicações e materiais audiovisuais que produz, além de taxas anuais dos associados, rendas de seminários, prêmios e doações. A associação conta com mais de 57.000 membros individuais e 115 organizações nacionais, comerciais e profissionais. A grande maioria dos membros é residente nos Estados Unidos, mas devido ao seu alcance internacional, hoje possuem membros espalhados pelo Canadá e mais 85 países, entre os quais no Brasil. Dos associados, 24% pertencem ao Corpo de Bombeiros, 11% a autoridades de saúde, 22% a indústria e comércio, 6% a seguradoras, 7% a autoridades governamentais federais, estaduais e municipais, 8% a arquitetos, 6% a produtores e distribuidores de equipamentos de proteção, 2% a associações de comércio e de profissionais e 14% a outros campos de atuação (ONO, 1997). As atividades da NFPA se dividem, basicamente, em atividades técnicas e educacionais, envolvendo o desenvolvimento, a publicidade e a disseminação de normas e a promoção da educação de profissionais e da comunidade em geral, com o intuito de minimizar a possibilidade e os efeitos dos incêndios em todos os campos de atividade do homem. As normas da NFPA são amplamente reconhecidas, servindo de referência para várias agências federais e também utilizadas pelas companhias seguradoras para a avaliação de risco e definição de prêmios de seguro.
- **National Institute of Standards and Technology (NIST):** denominado *National Bureau of Standards* (NBS) até 1988, foi fundado em 1901, quando sua criação foi aprovada pelo Congresso dos Estados Unidos para dar suporte ao desenvolvimento das indústrias americanas. Subordinado ao Departamento de

Comércio dos Estados Unidos (*US Department of Commerce*), o NIST tinha como objetivo desenvolver e fortalecer a ciência e tecnologia do país e facilitar sua aplicação para benefício público, fornecendo novos serviços para a indústria e comércio, tais como:

- Base para os sistemas de medidas físicas e químicas do país (materiais de padrão de referência de medidas);
- Serviços científicos e tecnológicos para a indústria e o governo;
- Base técnica para igualdades comerciais;
- Base técnica para promover a segurança pública.

O NIST vem desenvolvendo pesquisas e tecnologia ao longo de sua existência, através de seus institutos e laboratórios com larga atuação na área de engenharia, química e física, além das ciências computacionais. Dentro de seu Centro para Tecnologia das Edificações (*Center for Building Technology*) e Centro para Pesquisas do Fogo (*Center for Fire Research*), aglutinados desde 1991 no hoje denominado Laboratório de Pesquisas em Edificações e Fogo (*Building and Fire Research Laboratory – BFRL*), têm sido desenvolvidos projetos não só de interesse nacional, mas também, pesquisas que promovem o desenvolvimento científico e tecnológico das áreas em questão no mundo (JASON apud ONO, 1997). Hoje, os pesquisadores dos laboratórios do NIST trabalham com a indústria no desenvolvimento de novas tecnologias, de novos métodos de medição e oferecem materiais, dados e calibrações para a garantia da qualidade. Na área específica da segurança contra incêndio, o *Building and Fire Research Laboratory* do NIST ocupa uma posição de destaque juntamente com outros renomados laboratórios e institutos do Canadá, Japão e da Europa.

Na Inglaterra, um incêndio ocorrido em Cripplegate, um distrito de Londres, em 1897, estimulou a pesquisa sistemática dos métodos de proteção contra incêndio. O arquiteto Edwin Sachs então formou um grupo de profissionais interessados na criação de um comitê denominado *British Fire Prevention* com o objetivo de estudar métodos de proteção à vida e à propriedade. Durante os primeiros 7 anos de atuação, o comitê conduziu 79 ensaios de fogo em materiais e equipamentos de combate ao fogo, ampliando, mais tarde, o número e tipos de ensaio com a construção de fornos para ensaio de portas e vedadores.

Em 1935, o *Riverdale Comittee*, formado com a finalidade de dar suporte ao governo nos assuntos concernentes aos serviços de bombeiros, recomendou que mais pesquisas fossem desenvolvidas na área de proteção contra incêndio. Esta necessidade se tornou mais evidente com a aproximação e durante a Segunda Guerra Mundial, quando o fogo se tornou uma forte arma para o inimigo, na forma de bombas aéreas incendiárias.

A pesquisa no pós-guerra nesta área se iniciou quando o *Department of Scientific and Industrial Research* se juntou ao *Fire Officers Comittee*, estabelecendo a *Joint Fire Research Organization*. Os trabalhos realizados por esta organização incluíram estudos de ignição, crescimento e supressão de incêndios e utilização de modelos sistemáticos para estudos ao desenvolvimento do fogo.

O *Building Research Establishment* (BRE), hoje uma agência do *Department of Environment* do governo britânico, foi criado pelo *Department of Scientific and Industrial Research* no pós-guerra, herdando as instalações do *Fire Officer's Comittee*, localizados em Borehamwood.

Hoje, o BRE possui um laboratório de pesquisa de incêndio denominado *Fire Research Station* (FRS), localizado em Garston, Watford, para onde foi transferido de Borehamwood em 1991. O FRS, que tem suas atividades principais voltadas para suporte ao governo, também efetua trabalhos para órgãos não-governamentais. Seu principal enfoque é a ciência e a engenharia da segurança contra incêndio, e abrange ensaios experimentais, conhecimentos avançados de modelagem matemática e intercâmbio científico internacional.

Na França a pesquisa na área de construção é liderada pelo *Centre Scientifique et Technique du Batiment*, o CSTB, uma entidade pública subordinada ao Ministério da Política Habitacional e da Construção, que foi criada em 1947 e tem como missão principal contribuir para o desenvolvimento da qualidade e a redução de custos na construção.

O CSTB tem suas atividades técnicas distribuídas pelos grupos de Qualidade e Tecnologia da Construção, de Conforto, Saúde e Prevenção de Riscos, de Divulgação Técnica e de Ciências Econômicas.

No Grupo de Conforto, Saúde e Prevenção de Riscos estão alocadas as áreas de acústica, aerodinâmica e clima, iluminação, energia e automação e segurança contra incêndio. A área de segurança contra incêndio possui seus laboratórios localizados em *Marne-La-Vallée*, onde existe infra-estrutura para ensaios em escala real, estudos de movimento de fumaça e ensaios de resistência ao fogo.

O CSTB é um dos três fundadores do *Conseil International du Batiment pour la Recherche, l'Etude et la Documentation* (CIB) e membro atuante deste Conselho na área de segurança contra incêndio, participando da harmonização das regulamentações européias e dos esforços para o desenvolvimento científico internacional da área.

O CIB é uma organização voltada ao incentivo e desenvolvimento de cooperação internacional em pesquisa e documentação nos campos de edificações, habitação e planejamento. Fundado em 1953, conta no momento com 60 membros plenos, congregando institutos de pesquisa de 50 países. Conta ainda com cerca de 100 membros associados, provenientes de um igual número de países, totalizando uma representação global de cerca de 70 países. Os trabalhos são desenvolvidos fundamentalmente pelas 40 comissões de estudo. Cerca de 50 encontros e simpósios de comissões de trabalhos são realizados anualmente, com a discussão de aspectos dos trabalhos do CIB. Possui sede na Holanda e efetua seu Congresso Geral a cada três anos.

Dentre as entidades internacionais na área da segurança contra incêndio, o CIB W14 é o pioneiro no intercâmbio de informações e cooperação tecnológica no plano internacional e propiciou o nascimento de novas associações / organizações como o IAFSS e o ISO/TC92/SC4. Entre as atividades do CIB W14 estão a promoção de simpósios e workshops e a publicação e circulação de informações de desenvolvimento de pesquisa dos países membros.

No Canadá a pesquisa de incêndio teve início em 1950, na *Division of Building Research* do *National Research Council of Canada* (NRC). Os estudos realizados por esta organização incluem o desenvolvimento de modelos sistemáticos do fogo e a queima experimental de edificações. Grandes ensaios em escala real simulando incêndios foram realizados nos primórdios da formação do seu laboratório de fogo, para estudar o desenvolvimento do fogo do ponto de vista da radiação, ventilação e sobrevivência dos ocupantes.

Atualmente, as pesquisas em edificações dentro do *National Research Council of Canada* (NRC) são realizadas no *Institute for Research in Construction* (IRC). Outras organizações canadenses estão engajadas em pesquisas de segurança contra incêndio como o *Underwriters' Laboratories of Canada* e a *Canadian Standards Association*.

A pesquisa sobre incêndio no Japão, no início, dava ênfase ao estudo do desenvolvimento e propagação do fogo no meio urbano, em consequência do grande número de incêndios ocorridos em escala urbana, os quais Tóquio e outras cidades japonesas sofreram por séculos. Segundo o *Committee on New Outline of Architectural Studies* (1983), o primeiro estudo sistemático foi realizado pelo Departamento de Física da Universidade Imperial de Tóquio após o grande terremoto de Kantoh (1923) em que o tremor e o incêndio destruíram grande parte da cidade de Tóquio e região.

O *Building Research Institute* (BRI) do Ministério da Construção foi fundado em 1946 e inicialmente conduziu estudos experimentais sobre a propagação do fogo no interior e entre edificações. É o único instituto de sua abrangência no país na área relacionada ao planejamento urbano, habitação e tecnologia da construção. O Departamento de Meio Ambiente, Projeto e Fogo (*Environment, Design and Fire Department*) do BRI, composto de três divisões (*Fire Safety Division*, *Smoke Control Division* e *Fire Preventive Materials Division*), desenvolve pesquisas relacionadas à segurança contra incêndio, contemplando fatores que envolvem o tema desde a escala urbana até o detalhe do desenvolvimento de materiais construtivos. Adicionalmente, existe ainda o Departamento de Ensaios e Avaliação (*Testing and Evaluation Department*) composto por laboratórios que dão suporte ao Departamento de Meio Ambiente, Projeto e Fogo na área de projeto de segurança contra incêndio, controle de fumaça, resistência ao fogo, propagação do fogo e comportamento ao fogo de materiais.

Em 1948, foi fundado o *Fire Research Institute*, responsável pela pesquisa de incêndio do *National Fire Defense Board* (atualmente *Fire Defense Agency*). Suas funções não se limitam às pesquisas básicas mas também ao ensaio e à aprovação de todos os tipos de equipamentos e sistemas de proteção contra incêndio produzidos e comercializados no Japão. Este instituto tem desenvolvido suas atividades no sentido de promover a pesquisa para o gerenciamento dos serviços dos bombeiros no âmbito nacional e representar internacionalmente a pesquisa nesta área.

A *Fire Prevention Society of Japan* foi fundada em 1950 com associados que abrangiam todas as classes interessadas nas várias áreas da pesquisa de segurança contra incêndio no Japão e atualmente é denominada *Japan Association of Fire Science and Engineering*, atuando na divulgação de pesquisas por meio de simpósios e seminários.

Muitos outros países apresentam evoluções na pesquisa e normalização de segurança contra incêndio como, por exemplo: Austrália, Espanha, Finlândia, Suécia, Alemanha, Índia e China.

Na Austrália, por exemplo, o *National Building Technology Centre* expandiu seus estudos para ensaios na área de segurança contra incêndio em 1950, devido, principalmente, às mudanças radicais ocorridas nos métodos construtivos após a Segunda Guerra Mundial.

Na Espanha, o organismo de normalização nacional é denominado *Subdirección General de Normalización y Regulamentación* e é subordinado ao Ministério da Indústria e Energia, tendo como função básica a elaboração e difusão das normas, a representação espanhola na *International Organization for Standardization* (ISO) e no Comitê Europeu de Normalização (CEN).

O instituto oficial para ensaios e testes neste país é o *Laboratorio de Investigación y Control Del Fuego* (LICOF) do Ministério da Indústria e Energia. Existem, porém, outros laboratórios de cunho local ou privado, que realizam ensaios de homologação de materiais, produtos e sistemas construtivos além daqueles que homologam equipamentos e veículos de combate. Dentre estes laboratórios é possível citar o *Centro*

Tecnológico Del Fuego (CETEF) do Instituto Tecnológico de Seguridad Mapfre, Laboratório de Experiências e Investigaciones Del Fuego do Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), Laboratório de la Dirección General de Arquitectura y Edificación (MOPU) e Laboratório General de Ensayos e Investigaciones de la Generalidad de Cataluña.

O *Fire Research Laboratory* da Índia foi criado dentro do *Central Building Research Institute* em 1968 num esforço para reduzir as perdas por incêndio naquele país. Este laboratório não só realiza pesquisa e desenvolvimento, mas também avalia materiais, componentes construtivos, sistemas de detecção, alarme e extinção de incêndio e equipamentos de bombeiros, exercendo papel importante no auxílio técnico à indústria de proteção contra incêndio.

A Suécia possui uma agência mista denominada *Swedish Research Board* (BRANDFORSK) composta pelo governo, pelas companhias de seguro suecas e pelo setor comercial que apóia, financia e supervisiona os diferentes programas de pesquisa. Foi criada em 1979 com um programa nacional de pesquisa em segurança contra incêndio.

Outros países europeus vêm se apresentando de forma ativa na pesquisa de segurança contra incêndio: Áustria, Dinamarca, Finlândia, Itália, Holanda, Noruega e Grécia.

No Brasil a pesquisa da segurança contra incêndio ainda se encontra em um estágio embrionário, a despeito de alguns casos de incêndio que ocorreram há algumas décadas.

A entidade de pesquisa que possui o laboratório melhor equipado na área de segurança contra incêndio no país é o *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo* (IPT), que foi fundado em 1979 e onde funciona o *Laboratório de Segurança ao Fogo* junto à *CETAC – Centro Tecnológico do Ambiente Construído*.

1.3 Justificativa

Apesar dos registros de incêndios que vêm ocorrendo nos últimos anos, poucos avanços aconteceram na legislação brasileira (a exceção do Estado de São Paulo). Ao mesmo tempo, existe carência de profissionais ligados ao setor de construção com formação de segurança contra incêndio, desde o projetista, passando pelo construtor e pelas pessoas responsáveis pela manutenção dos edifícios. Desta forma, o tema torna-se relevante pela somatória dos fatores: necessidade dos engenheiros se preocuparem em minimizar o número de vidas que podem ser perdidas nos incêndios, bem como os prejuízos materiais decorrentes dos mesmos e a compatibilização desta responsabilidade com a legislação de incêndio desatualizada ou até mesmo falta de legislação e falta de profissionais especializados no assunto.

1.4 Objetivos

O presente trabalho possui como objetivo principal apresentar os principais aspectos associados ao risco que representa o incêndio em edifícios com estruturas de concreto, de modo a se obter um melhor entendimento das alternativas possíveis para sua minimização. Para isto faz-se um compêndio consubstanciado de diversos parâmetros que envolvem o fenômeno do fogo em compartimentos como: a legislação de segurança contra incêndio, os aspectos de análise de risco de incêndio em edifícios, os aspectos de seguro incêndio, o comportamento do concreto endurecido em altas temperaturas, as medidas de proteção das estruturas contra fogo e considerações sobre avaliação e recuperação de estruturas de concreto submetidas ao incêndio, uma vez que o fenômeno incêndio em edifícios é uma matéria multidisciplinar e deve ser tratada, portanto, de forma abrangente.

1.5 Conteúdo da dissertação

No *Capítulo 1* é descrita a importância do tema abordado, são relacionadas as mais importantes instituições voltadas à segurança contra incêndio em alguns países e, por fim, são descritos a justificativa e objetivos da pesquisa realizada.

No *Capítulo 2* os conceitos básicos ligados ao incêndio são abordados, fornecendo uma visão geral desde a composição química do incêndio até conceitos relacionados aos aspectos arquitetônicos e estruturais de segurança contra incêndio em edifícios.

O *Capítulo 3* se concentra na abordagem dos conceitos pertinentes ao risco de incêndio em edifícios e gerenciamento de risco de incêndio.

O *Capítulo 4* fornece uma visão da legislação e do seguro contra incêndio aplicado no Brasil, destacando suas incoerências com relação ao tratamento uniforme das estruturas dos edifícios. Este capítulo aborda também aspectos da legislação de segurança contra incêndio no Estado de São Paulo.

O *Capítulo 5* aborda o comportamento do concreto frente a altas temperaturas, sendo realizados comentários sobre as propriedades térmicas do concreto, formas de degradação do concreto frente ao fogo, descrição e conclusões do experimento realizado, sendo os ensaios divididos em duas etapas: a primeira etapa aborda, através de um estudo de dosagem, quais são os parâmetros que mais influenciam na perda de resistência mecânica do concreto quando submetido a temperaturas elevadas. Numa segunda etapa, repetiram-se os ensaios elaborados na primeira etapa, porém, variando-se apenas a relação a/c: fator que apresentou maior influência nos resultados dos ensaios da primeira etapa.

O *Capítulo 6* apresenta um caso real de incêndio no Terminal de Passageiros do Aeroporto Santos Dumont, na cidade do Rio de Janeiro, onde há a descrição dos danos do fogo às estruturas de concreto do edifício e das suas ações de recuperação. Com esta descrição, é possível aferir, sob o ponto de vista prático, o comportamento das estruturas de concreto frente ao fogo.

O *Capítulo 7* apresenta alguns conceitos relacionados aos materiais de proteção térmica de estruturas de concreto. Ao final, são apresentadas algumas soluções de proteção térmica, já bastante utilizadas para a proteção contra o fogo de estruturas de aço.

O *Capítulo 8* apresenta as conclusões a respeito desta pesquisa, salientando que a elevação da relação a/c, de acordo com os dados do experimento realizado, aumenta a

susceptibilidade dos concretos ao incêndio e que sob ponto de vista do seguro, estruturas de concreto e metálicas recebem o mesmo tratamento, ou seja, representam o mesmo risco de colapso e portanto, remetem ao mesmo prêmio de seguro incêndio; o que representa uma incoerência, na medida em que nem mesmo o comportamento de duas estruturas metálicas ou de concreto são iguais.

O *Capítulo 9* apresenta as possíveis diretrizes para estudos futuros, necessárias ao desenvolvimento da segurança estrutural das edificações.

2. O INCÊNDIO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Para se entender melhor a condição de risco gerado por um incêndio em um edifício com estrutura de concreto, deve-se procurar uma melhor compreensão deste fenômeno. Apesar de sua elevada complexidade, procurar-se-á aqui apresentar seus principais aspectos para a se obter uma melhor compreensão dos capítulos seguintes.

2.1 O fenômeno da combustão

O fogo é o resultado de diversas reações químicas entre diversos tipos de combustíveis e o oxigênio. A reação de combustão pode ser entendida como uma reação oxidante exotérmica: oxidante por ser uma reação química que consome oxigênio (O_2) e, exotérmica porque libera calor durante a reação (DRYSDALE, 1998). Este processo é rápido e considerado praticamente adiabático. Desta forma, a temperatura atingida na reação é alta porque os mecanismos de transferência de energia, isto é, condução, convecção e radiação não são capazes de dispersar rapidamente a energia liberada na combustão.

Para que a reação de combustão ocorra faz-se necessário a presença de oxigênio (comburente) e combustível em proporções devidas além da existência de uma fonte de ignição. Usualmente é necessário um pré-aquecimento ou uma temperatura mínima do combustível para que a reação de combustão se inicie. Uma vez iniciada a reação, deve haver combustível e energia térmica suficientes para tornar a reação auto-sustentável. Esta energia pode ser obtida por retroalimentação, ou seja, convecção e radiação, como pode ser observado na Figura 2.1.

- (1) Representa a região em que a energia proveniente da radiação e convecção retorna para a base combustível original a fim de liberar mais produtos voláteis da combustão.
- (2) Representa a componente de radiação para as regiões do entorno, facilitando a propagação do fogo.
- (3) Representa a laje de um compartimento que serve de anteparo para o retorno ao foco de incêndio da energia proveniente da radiação e convecção.

Figura 2.1 – Mecanismos de retro-alimentação da reação de combustão em um ambiente compartimentado (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

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 de 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 se apresente dentro de certos limites, denominados limites superior e inferior de inflamabilidade. Fora destes limites a chama iniciada num ponto se extingue rapidamente. Além da restrição quanto à composição, tem-se exigências quanto à temperatura do combustível para que a chama não se extinga. Desta forma, ponto de ignição é o nome dado à mínima temperatura para a qual, nas condições ideais, os vapores entrem em combustão contínua, iniciando o incêndio.

O fenômeno da combustão pode ser vislumbrado de uma maneira genérica através da Figura 2.2. 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 oxigênio numa proporção dentro dos limites de inflamabilidade criam uma mistura inflamável que vai aquecendo até atingir o ponto de ignição. Neste instante a chama inicial pode provocar a ignição da mistura, gerando reações exotérmicas que retro-alimentam o processo.

Figura 2.2 – O fenômeno da combustão (Fonte: MELHADO, 1990)

O triângulo do fogo (Figura 2.3) representa, de forma simplificada, os elementos necessários a uma reação de combustão. Também é encontrada a denominação “*Tetraedro do Fogo*”, onde o quarto elemento é a reação em cadeia.

..

Figura 2.3: Triângulo do fogo.

Cabe ressaltar a importância da quantificação do poder calorífico dos materiais existentes nos edifícios, isto é, a energia térmica total por unidade de massa que pode ser liberada na combustão completa de cada material, para a adequação dos sistemas de proteção contra incêndio em um edifício. A Tabela 2.1 exemplifica valores do poder calorífico de alguns materiais.

Tabela 2.1 – Poder calorífico de alguns materiais (Fonte: LANDI, 1986).

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

2.2 Tipos de combustão

Existem basicamente dois tipos de combustão, a saber:

- Combustão com chamas;
- Combustão lenta ou sem chamas ou “*smoldering*”.

A combustão com chamas é caracterizada pela existência e difusão das chamas e luz. Cabe ressaltar que as chamas são responsáveis pela propagação do fogo pela superfície do material combustível. A combustão sem chamas é um processo de combustão onde a propagação ocorre sem a existência de chamas. Somente sólidos compostos de carbono podem sofrer combustão sem chamas, como por exemplo: papel, produtos de celulose, etc.

O mecanismo da ignição, como dito anteriormente, pode ser caracterizado como sendo parte do processo de combustão, sendo possível a existência de duas formas de ignição do material combustível:

- Fonte de ignição (chama piloto);
- Ignição espontânea.

Através da ignição por “*fonte de ignição*”, a chama é criada devido a um ponto de ignição, ou seja, um ponto de origem do fogo, que se propaga pelo material combustível. A Figura 2.4 apresenta um esquema deste tipo de ignição em sólidos.

Figura 2.4 – Esquema da ignição por “fonte de ignição” em combustíveis sólidos (Fonte: DRYSDALE, 1998).

Ao contrário, quando ocorre ignição espontânea, não há necessidade de uma fonte de ignição, sendo que o fogo se inicia tão somente pela elevação da temperatura do ambiente, através da incidência, principalmente, de radiação no material combustível. Neste caso, numa situação de incêndio, se superfícies combustíveis de edifícios adjacentes são submetidas a altos níveis de radiação durante um longo período de tempo, a propagação do incêndio entre edifícios é encorajada. A Figura 2.5 apresenta um modelo para o desenvolvimento deste tipo de ignição em sólidos.

Figura 2.5 – Esquema de “ignição espontânea” em combustíveis sólidos (Fonte: DRYSDALE, 1998).

Uma série de testes foi realizada com madeira a fim de se determinar a variação do tempo de ignição com a incidência de radiação para a “*fonte de ignição*” e a “*ignição espontânea*” (LAWSON apud SHIELDS & SILCOCK, 1987). A Figura 2.6 apresenta o resultado destes testes. Pode-se deduzir também que para intensidades de radiação maiores estes valores críticos de tempo de ignição poderiam ser relacionados à intensidade de radiação (Expressões 2.1 e 2.2, Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987):

$$(I - I_{cp}) t^{2/3} = A \text{ (Para fonte de ignição)} \quad [2.1]$$

e

$$(I - I_{cp}) t^{4/5} = B \text{ (Para ignição espontânea)} \quad [2.2]$$

Onde:

I = incidência de radiação, em KW/m^2 ;

I_{cp} = incidência crítica de radiação, em KW/m^2 ;

t = tempo, em segundos;

A e B = são diretamente proporcionais à inércia térmica, $(\lambda \rho c)^{1/2}$;

A incidência crítica de radiação representa o nível de incidência mínimo para que haja ignição do fogo no material combustível. Como se pode observar na Figura 2.6, existe uma variação do tempo de ignição em função da intensidade de radiação sobre o material combustível.

Figura 2.6 – Variação do tempo de ignição em função da intensidade (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Assim, nos incêndios compartimentados, o fogo pode se iniciar através de uma “*fonte de ignição*” e pode se propagar através do compartimento ou outros ambientes/edifícios por “*ignição espontânea*”, ou seja, pela incidência de radiação sobre os materiais combustíveis. Cabe ressaltar que cada material combustível possui uma temperatura específica para que ocorra ignição espontânea. Por exemplo, o algodão possui uma temperatura de “*ignição espontânea*” menor que a madeira. A umidade do ar também colabora para a ocorrência deste fenômeno. Quando a umidade do ar aumenta diminui a possibilidade de ignição espontânea, assim como a ignição por fonte de ignição.

2.3 Propagação do fogo

Em geral, a diferença entre pequenos e grandes incêndios pode ser atribuída à propagação do fogo (VENEZIA, 2004). Esta afirmação é baseada na experiência e análise de casos reais. Um exemplo claro foi o ocorrido no Edifício Andraus em São Paulo, onde em 24 de fevereiro de 1972, o foco de incêndio teve origem no 4º pavimento e se alastrou pelos 31 pavimentos (escritórios e lojas), atingindo todos os andares, com 16 vítimas fatais e 329 feridos. A propagação das chamas se deu principalmente pelas fachadas e a radiação térmica foi tão intensa que atingiu edifícios vizinhos.

Esta compreensão deve ser considerada a partir da observação dos três tipos de propagação na combustão de materiais:

- **Propagação transversal:** é o desenvolvimento da combustão no sentido da profundidade que se realiza por condução e que paulatinamente vai atingindo as camadas sucessivas do material;
- **Propagação superficial:** é o alastramento da combustão na superfície do material;
- **Pós-combustão:** é o conjunto de fenômenos complexos que se observam notadamente em materiais de estruturas alveolares, após ter cessado a combustão viva. Em materiais que contém em sua massa grandes quantidades de ar, a combustão se realiza lentamente por combinação direta do oxigênio com o combustível sólido, sem chamas e com produção de monóxido de carbono (“*smoldering*”).

Quando o calor atinge de alguma forma a superfície de um material combustível, uma parte é absorvida e transmitida por condução para dentro do corpo do material, uma outra parte permanece na superfície aumentando sua temperatura. É evidente que se o material for mau condutor, a transmissão de calor será muito menor e a temperatura superficial aumentará mais rapidamente, como é o caso da madeira.

A radiação térmica aumenta muito mais rapidamente com o aumento da temperatura do que a condução e a convecção. Esta forma de transmissão é realmente o processo mais importante de propagação do incêndio num mesmo edifício ou entre edifícios vizinhos,

sendo o principal responsável pela inflamação generalizada, junto com o alastramento superficial.

2.4 Incêndio compartimentado

FRIEDMAN apud SHIELDS & SILCOCK (1987) observou diferenças entre o incêndio em campo aberto e o compartimentado, como pode apresentado na Figura 2.7. No incêndio em campo aberto, grande parte do calor liberado da reação de combustão é perdido para a atmosfera, ao passo que, no incêndio compartimentado, boa parte deste calor é retido no ambiente, catalisando a reação de combustão, elevando consideravelmente a taxa de combustão e a temperatura máxima do incêndio.

1 – Incêndio compartimentado / 2 – Incêndio em campo aberto

Figura 2.7 – Efeito da compartimentação na taxa de combustão de um incêndio (Fonte: FRIEDMAN apud SHIELDS & SILCOCK, 1987).

O desenvolvimento de um incêndio dentro de um compartimento depende de muitos fatores:

- Se a fonte de ignição é suficientemente inflamável para permitir a propagação das chamas por sua superfície;
- Se o fluxo de calor no princípio de incêndio é forte o suficiente para irradiar energia e ignizar o material combustível ao seu redor;
- Se existe quantidade suficiente de material combustível no compartimento, do

contrário, o foco de incêndio termina em si mesmo;

- Se o fogo, no início, pode queimar vagorosamente por causa da restrição de oxigênio;
- Em estando à disposição suficientes quantidades de material combustível e oxigênio, o incêndio provavelmente tomará todo o compartimento.

Quando existem pequenas aberturas no compartimento, a taxa de combustão depende da disponibilidade de ar, ou seja, este é um incêndio controlado pela ventilação, sendo que, quando existem grandes aberturas no compartimento a taxa de combustão é controlada pelas características do material combustível. Desta forma, este tipo de incêndio é considerado controlado pela carga de material combustível. A Figura 2.8 apresenta, de uma maneira genérica, as fases em que um incêndio é controlado pela taxa de ventilação e pela carga de incêndio.

Figura 2.8 – Temperatura do incêndio em função da carga de incêndio / ventilação ao longo do tempo em um ambiente compartimentado (Fonte: MALHOTRA, 1982).

Sendo assim, em um edifício de escritórios, por exemplo, no início do incêndio, este é controlado pela taxa de ventilação, devido a escassez de ar no ambiente. Após o “*flashover*”, quando existe grande fluxo de ar devido ao rompimento dos vidros causado pelas altas temperaturas e pressão dos gases do incêndio, este passa a ser

controlado pela carga de incêndio.

Desta forma, é importante ressaltar que a taxa de ventilação no compartimento determina dois tipos de incêndio:

- **Incêndio dominado pela ventilação:** é o incêndio em que a taxa de ventilação é muito baixa, onde o pico de temperatura do incêndio é menor e o tempo de duração do incêndio é maior. Portanto, em compartimentos com baixa taxa de ventilação, os incêndios são chamados controlados pela ventilação. Estes incêndios são mais destrutivos, às vezes, até mesmo se a carga de incêndio é moderada. Desta forma, incêndios de baixa ventilação são mais danosos não apenas por causa de seu alto poder destrutivo, mas também por causa de sua maior duração, o que aumenta a probabilidade de propagação para outros ambientes;
- **Incêndio dominado pela carga de incêndio:** em um compartimento bem ventilado ou de pequena quantidade de material combustível o incêndio tende a ser mais curto, pois a taxa de ventilação é maior. Estes incêndios são os chamados incêndios controlados pela carga de incêndio. Estes incêndios possuem menor duração do incêndio e maior pico de temperatura. Este tipo de incêndio se aproxima dos incêndios a céu aberto onde não há limitação de ventilação. Edifícios com grandes aberturas (exemplo: prédios de escritórios) proporcionam incêndios desta natureza.

Segundo LAWSON (2001), a taxa de combustão dos materiais combustíveis, no incêndio compartimentado, é aproximadamente constante durante o período de redução do combustível de 80% para 30% do seu valor original. A temperatura máxima ocorre quando, aproximadamente 60% do material combustível é consumido. Para incêndios com madeira como material combustível, a máxima taxa de combustão é dada por uma fórmula empírica (Expressão [2.3]):

$$R = 0,09 * A_v \sqrt{h} \quad [2.3]$$

Onde:

R = taxa de combustão, em kg/segundo;

A_v = área total de ventilação, em m²;

h = altura das aberturas, em m.

A estrutura do compartimento (paredes e tetos) também pode contribuir para o rápido alastramento do fogo. A radiação emitida por estes elementos pode ignizar outras regiões dentro do compartimento mais rapidamente. A Tabela 2.2 abaixo apresenta alguns fatores que afetam a taxa de combustão dos combustíveis sólidos.

Tabela 2.2 – Fatores que afetam a taxa de propagação de chamas nos combustíveis sólidos (Fonte: DRYSDALE apud SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Material		Ambiente
Químicos	Físicos	
Composição do combustível	Temperatura inicial	Composição da atmosfera, temperatura
Presença de fogo-retardantes	Orientação da superfície	Fluxo de calor imposto
Geometria	Direção de propagação	Pressão inicial
	Espessura do corpo combustível	Velocidade do ar
	Condutividade térmica	
	Densidade	

Bem como os fatores listados na Tabela 2.2 outros fatores podem afetar a duração do período inicial do incêndio:

- Espaçamento dos materiais ou embalagens combustíveis dentro do compartimento;
- Massa e área de superfície dos materiais combustíveis dispersos dentro do compartimento;
- Tamanho e localização das fontes de ignição;
- Tamanho e localização das aberturas do compartimento que promovem a ventilação;
- Geometria do compartimento.

Nos projetos de engenharia, admite-se que o incêndio seja compartimentado, isto é, restrito a um compartimento da edificação (um pavimento de um edifício de múltiplos andares, uma sala ou um apartamento de um pavimento-tipo). Num incêndio compartimentado dos edifícios usuais, o calor é recluso ao compartimento em chamas,

em virtude dos elementos de vedação (paredes, teto e piso) serem construídos com materiais de baixa condutividade térmica, tais como tijolos de argila ou concreto. O calor conservado no mesmo ambiente eleva a temperatura dos gases quentes, catalisando a reação.

A intensidade do incêndio compartimentado é função de dois fatores principalmente:

- Carga de incêndio presente no compartimento;
- Taxa de ventilação do ambiente dado pelas aberturas do compartimento.

As propriedades térmicas das paredes, tetos e pisos do compartimento também corroboram para a severidade do incêndio (temperatura máxima dos gases no compartimento) e para a duração máxima do incêndio. Também são elas as responsáveis por manter o incêndio no compartimento de origem, evitando-se a propagação do fogo pelos diversos ambientes. Por fim, a segurança estrutural das edificações depende em grande parte das propriedades térmicas dos materiais de construção.

O incêndio é caracterizado por três fases: ignição, aquecimento e resfriamento. A Figura 2.9 apresenta a variação da temperatura em função do tempo de um incêndio compartimentado. Esta curva representa a média de temperaturas determinadas sob condição de ensaio. No período inicial, conhecido como “*pre-flashover*”, ocorre o crescimento gradual da temperatura, quase sem influência das características do compartimento (taxa de ventilação, características do material de compartimentação, etc). O risco à vida humana ou ao patrimônio por colapso estrutural é muito baixo, sendo que se as medidas de proteção contra incêndio forem eficazes, o fogo será controlado facilmente. Num segundo momento ocorre o “*flashover*”. Nesta etapa acontece uma mudança súbita na temperatura, sendo que todo o material combustível do compartimento entra em combustão. A terceira fase de um incêndio compartimentado ocorre a partir do pico de temperatura no ambiente, sendo que esta começa a se reduzir por todo o compartimento. Nesta fase existe ainda o risco de propagação do incêndio para outros compartimentos por radiação (penetração do calor nos elementos construtivos) ou ainda por convecção.

Fase I - Início do incêndio ou fase de ignição ou ainda "pré-flashover".

Fase II – Fase de aquecimento (inclui o "flashover" ou inflamação generalizada).

Fase III – Resfriamento, após o pico de temperatura.

Figura 2.9: Evolução da temperatura em um incêndio compartimentado (DRYSDALE, 1998).

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 em uma temperatura na 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.

Normalmente, todos os esforços para o combate ao incêndio (como meios de proteção ativos, brigada de incêndio, extintores, hidrantes, sprinklers, etc) são projetados para atuarem no “*pre-flashover*”, ou seja, eles são eficazes no momento da ocorrência do foco do incêndio. A etapa “*pre-flashover*” é, portanto, uma etapa importante no desenvolvimento do incêndio. Quanto mais longa for esta etapa, maiores serão as chances de escape do edifício e maior é o tempo disponível para chegada do Corpo de Bombeiros.

Após a inflamação generalizada, geralmente o controle do incêndio pelos bombeiros se faz no sentido de contê-lo dentro do edifício em que ele se iniciou, evitando-se, portanto, que o incêndio se propague para edificações circunvizinhas. As argamassas de proteção contra incêndio e outros revestimentos de proteção estrutural e de paredes de compartimentação atuam no “*pre-flashover*”, no “*flashover*” e no “*pos-flashover*”, uma vez que o objetivo deste tipo de proteção é aumentar a resistência das vedações e elementos estruturais a altas temperaturas.

Por fim, as Figuras 2.10 2.11, 2.12 e 2.13 apresentam, respectivamente, a variação da temperatura em função de distintas cargas de incêndio, dos distintos potenciais caloríficos (mesmo tipo de material combustível), das diferentes condições de ventilação para um mesmo potencial calorífico (carga de incêndio de 20 kg de madeira por m²) e das características térmicas das vedações, mostrando a influência do isolamento térmico. A apresentação destas figuras pretende aguçar no leitor a percepção do comportamento do incêndio em função de algumas condições de contorno fundamentais.

Figura 2.10 – Curva Temperatura x Tempo para incêndio de combustíveis distintos (Fonte: HART & HENN & SONTAG apud MELHADO, 1990).

$$W1 < W2 < W3 < W4$$

Onde W é a carga de incêndio de cada incêndio.

Figura 2.11 – Curva Temperatura x Tempo para incêndio com potenciais caloríficos (cargas de incêndio) distintos para um mesmo combustível (Fonte: HART & HENN & SONTAG apud MELHADO, 1990).

Figura 2.12 – Curvas de incêndios com diferentes condições de ventilação e mesmo potencial calorífico – carga de incêndio de 20 kg de madeira por m² (Fonte: AISI apud MELHADO, 1990).

Figura 2.13 – Temperaturas atingidas em ambientes incendiados com diferentes características térmicas das vedações, mostrando a influência do isolamento térmico nas superfícies de contorno (Fonte: LATHAM et al. apud MELHADO, 1990).

THOMAS *et al* apud SHIELDS & SILCOCK (1987) demonstra ainda que a disposição do material combustível no compartimento pode acarretar diferenças na taxa de combustão. A Figura 2.14 apresenta os resultados de taxa de combustão para a queima do mesmo tipo de material combustível em mesma quantidade, variando-se apenas a posição do mesmo.

Taxa de combustão por unidade de área

Curva 1 - Representa maior concentração de material combustível por unidade de área do compartimento

Curva 2 - Representa concentração intermediária de material combustível por unidade de área do compartimento

Curva 3 - Representa menor concentração de material combustível por unidade de área do compartimento

Figura 2.14 – Taxa de combustão para materiais combustíveis em diferentes posições dentro do compartimento (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

As curvas apresentadas na Figura 2.14 referem-se a materiais celulósicos, sendo que na Curva 1 os materiais são empilhados de tal forma que ocupam menos área do compartimento, ou seja, aumenta-se a densidade de material combustível no compartimento, ao passo que na Curva 3, o material combustível é disposto em pilhas que ocupam uma maior área do pavimento do compartimento (menor densidade). A disposição do material combustível no compartimento reflete diferença no incêndio desenvolvido, uma vez que existe diferença na taxa de combustão. Sendo assim, a dispersão de material combustível representa incêndios mais severos, ou seja, com maior taxa de liberação de energia devido a maior área de superfície exposta. A natureza, a disposição e a altura da carga de incêndio são componentes importantes no desenvolvimento do incêndio e devem ser considerados para cada edifício individualmente.

2.5 Duração do incêndio compartimentado

Diversos autores procuraram uma equação que exprimisse a duração de um incêndio compartimentado, uma vez que este parâmetro é fundamental na concepção e projeto de elementos estruturais, paredes corta-fogo e outros componentes dos edifícios.

INGBERG propôs, em 1928, uma primeira correlação entre a duração do incêndio compartimentado e a carga de incêndio (Expressão 2.4):

$$D = 1,2 * W \quad [2.4]$$

Onde,

D = duração do incêndio, em min;

W = potencial calorífico, expresso em massa equivalente de madeira por unidade de área (kg/m^2).

Foi a partir dos ensaios realizados por INGBERG que se definiu severidade do incêndio como diretamente relacionada com o potencial calorífico (MELHADO, 1990). INGBERG estabeleceu simplesmente a premissa de que um incêndio com 50 kg de madeira por m^2 duraria cerca de uma hora. Não está embutido, portanto, dentro desta equação a influência da ventilação. Assim, segundo a AISI apud MELHADO (1990), a expressão de INGBERG aplica-se tão somente a incêndios controlados pelo combustível. Ressalta-se que estes conceitos estão ligados à definição de incêndios em campo aberto e compartimentado e os mesmos serão definidos posteriormente. Segundo esta mesma fonte, esta proporcionalidade é válida para potenciais caloríficos do ambiente de até cerca de 150 kg de madeira por m^2 de piso, a partir do que a relação entre a duração do incêndio e o potencial calorífico passa a ser maior. Para $W > 200 \text{ kg de madeira por m}^2$, $D = 1,5 W$.

Mais tarde (década de sessenta) dois pesquisadores, KAWAGOE e SEKINE, introduziram a influência da ventilação no incêndio e propuseram a Expressão 2.5 para a velocidade de combustão dos materiais combustíveis (MELHADO, 1990):

$$R = 5,5 * A_v * H_v^{1/2} \quad [2.5]$$

Onde,

R = velocidade de combustão, em kg/min;

A_v = área das aberturas de ventilação, em m²;

H_v = dimensão vertical das aberturas, em m.

Tendo-se, portanto, a quantidade total de materiais combustíveis expressa em kg de madeira equivalente (G), a estimativa de duração do incêndio é então obtida pela Expressão 2.6:

$$D = \frac{G}{R} \quad [2.6]$$

Onde,

D = duração do incêndio, em min;

G = W * A_p;

A_p = área do piso do ambiente, em m²;

De acordo com LAW apud MELHADO (1990) a expressão do incêndio compartimentado é representado pela Expressão 2.7:

$$D = k * \frac{W * A_p}{(A_v * (A_T - A_v))^{1/2}} \quad [2.7]$$

Onde,

k = fator associado à distribuição da carga de incêndio no compartimento, sendo que, mais tarde LAW concluiu ser mais oportuno adotá-lo igual a 1;

A_T = somatório das áreas de piso, paredes e teto do ambiente, em m²;

O objetivo desta expressão é eliminar a necessidade de distinguir o incêndio entre regime de controle pela ventilação ou pelo combustível.

HARMATHY apud MELHADO (1990) constrói expressões que objetivam estimar a duração do incêndio controlado pela ventilação e pelo combustível. Para tanto, ele fornece uma expressão para delimitar a ocorrência de uma situação ou de situação. Com

relação a classificação do incêndio, esta é função do fluxo de ar em relação aos materiais combustíveis disponíveis no compartimento. Considerando-se mobiliário comum de madeira, o limite entre os dois regimes é dado pela Expressão 2.8:

$$\frac{U_A}{G} = 18,2 \quad [2.8]$$

Onde,

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

$U_A = 2.034 * A_v * (H_v)^{1/2}$, sendo A_v e H_v em m^2 .

Para valores de U_A/G superiores a 18,2 o incêndio é considerado como controlado pelo combustível, sendo que, para valores menores a 18,2, ocorre controle pela ventilação. As Expressões 2.9 e 2.10 indicam o tempo de duração previsto para o primeiro e o segundo casos respectivamente (HARMATHY apud MELHADO, 1990):

$$D = 19 \text{ min (controle pelo combustível)} \quad [2.9]$$

E, controle pela ventilação, conforme segue:

$$D = 0,17 \frac{W}{\frac{A_v}{A_p} * H_v^{1/2}} \quad [2.10]$$

Ainda segundo HARMATHY apud MELHADO (1990) é possível estimar qual a área de ventilação necessária para que ocorra a transição entre os dois regimes, conforme as expressões 2.11 e 2.12:

$$A_v = \frac{W * A_p}{150} \quad [2.11]$$

Ou

$$A_v = \frac{G}{150} \quad [2.12]$$

Assim, para cada 150 kg de madeira são necessários 1 m² de abertura de ventilação para que não falte oxigênio suficiente à queima do combustível.

Estas expressões foram desenvolvidas com base experimental e teórica, considerando, na maior parte dos casos a combustão de materiais celulósicos em certas condições particulares, o que impede a sua utilização de forma indiscriminada. De qualquer forma, a apresentação destas equações torna-se interessante na medida em que se discute os dois regimes de incêndio (controlado pelo combustível e pela ventilação) e os limites de transferência de um regime para outro.

2.6 Balanço térmico de um incêndio em um ambiente compartimentado

É importante evidenciar o balanço térmico em um compartimento para compreender o crescimento e o desenvolvimento de um incêndio. A Expressão 2.13 e a Figura 2.15 apresentam o balanço de energia térmica em um ambiente compartimentado. Desta forma, a taxa de liberação de calor por unidade de tempo em um incêndio deve ser igual a soma de todas as perdas de calor.

$$Q_T = Q_E + Q_B + Q_L \quad [2.13]$$

Onde,

Q_T = quantidade total de calor liberado por unidade de tempo na combustão em um compartimento;

Q_E = quantidade de calor perdido por unidade de tempo pela radiação e convecção nos elementos de vedação do compartimento;

Q_B = quantidade de calor perdido por unidade de tempo por radiação através das aberturas;

Q_L = quantidade de calor perdido por unidade de tempo por convecção através das aberturas;

Figura 2.15 – Balanço térmico de um incêndio em um compartimento desconsiderando-se o efeito da perda de calor por condução (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

No modelo de balanço térmico descrito anteriormente, a temperatura dentro do compartimento é presumida constante e as propriedades dos materiais do edifício também são considerados constantes. Na prática, entretanto, a temperatura dentro do compartimento varia durante o incêndio não somente com o tempo, mas também com a localização do foco de incêndio. Da mesma forma, as propriedades dos materiais de vedação do compartimento também sofrerão variação em função da temperatura e da própria degradação do material devido ao fogo.

2.7 Incêndio em grandes compartimentos

Incêndios em grandes compartimentos são diferentes dos que ocorrem em pequenos compartimentos devido, principalmente, a três razões:

- Distribuição não uniforme da carga térmica no ambiente;
- Propagação do fogo originário de uma pequena fonte de ignição (para ocorrer o “*flashover*” é mais difícil ou necessita-se de um tempo maior devido ao grande volume do ambiente);

- Devido ao grande volume de oxigênio disponível no ambiente, nos primeiros estágios do incêndio, este será influenciado pelas características e quantidade de material combustível (carga de incêndio ou carga térmica).

Em incêndios em grandes compartimentos, as condições de ventilação são menos importantes na determinação da taxa de entrada de ar no ambiente, porém, são mais importantes na determinação da maneira como os gases quentes são liberados, reduzindo, portanto, a temperatura do ambiente.

Edifícios com grandes volumes de compartimentos geralmente se encaixam em duas categorias:

- Comerciais, esportivos e edifícios públicos, de relativamente baixa carga de incêndio, mas com maiores cuidados relativos a segurança da vida das pessoas;
- Industriais, depósitos, onde a carga de incêndio geralmente é alta, porém, com baixo número de ocupantes.

2.8 Severidade de um incêndio

Severidade de um incêndio pode ser definido como o potencial destrutivo do fogo em um compartimento, ou seja, o impacto potencial do fogo sobre a estrutura e o conteúdo de um dado compartimento. Inevitavelmente a severidade de um incêndio está relacionada ao desempenho estrutural em termos de capacidade de resistência ao fogo. O conceito de se estabelecer uma relação entre a carga de incêndio e a severidade tem sido largamente usada nas legislações de incêndio de edifícios para determinação dos requisitos mínimos de resistência ao fogo dos componentes de edifícios divididos em classes de risco.

A severidade de um incêndio não é função apenas de um fator, como carga de incêndio, mas depende de outros parâmetros tais como: taxa de ventilação, taxa de combustão ou taxa de liberação de calor, duração do incêndio e propriedades térmicas dos elementos estruturais e de vedação do compartimento. O potencial destrutivo (severidade) de um incêndio no compartimento de origem é um aspecto importante na extensão dos danos causados pelo incêndio.

Para se medir a severidade de um incêndio, é comum examinar os escombros do cenário do incêndio. Pedacos de metal derretido, madeira queimada, etc, são observados para se estimar a temperatura máxima atingida. Ressalta-se, entretanto, que a temperatura máxima de um incêndio não representa o potencial destrutivo do mesmo, uma vez que o fator decisivo na extensão dos danos de um incêndio é a absorção de calor pelos elementos de vedação do compartimento juntamente com o grau de propagação das chamas. Assim, HARMATHY (1993) apresenta, através das Expressões 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17, uma curva de temperatura máxima de incêndio em função da carga térmica em um compartimento.

$$T_m - T_o \cong 0,435 * \frac{\kappa^{1/2}}{a} * H \quad [2.14]$$

Sendo que:

$$0,8 * \tau^{1/2} < \frac{a}{\kappa^{1/2}} < 1,2 * \tau^{1/2} \quad [2.15]$$

Onde:

a = profundidade máxima atingida no elemento estrutural pela temperatura máxima, em m;

T_m = temperatura máxima atingida na profundidade a, em K;

T_o = temperatura ambiente antes da exposição ao incêndio, em K;

H = carga térmica normalizada (definidas pelas Expressões 2.16 e 2.17), em s^{1/2}

K;

$$H = \frac{1}{\sqrt{\lambda \rho c}} \int_0^{\tau} q dt \quad [2.16]$$

Ou com um valor medido de tempo, qt (quantidade de tempo).

$$H = \frac{qt}{\sqrt{\lambda \rho c}} \quad [2.17]$$

κ = difusividade térmica do material, em m² s⁻¹;

Na Expressão 2.18 (HARMATHY, 1993) τ representa a duração de um incêndio dado por uma curva padrão, onde “a” é a profundidade da superfície do elemento estrutural atingida, sendo que a temperatura parte da inicial (ambiente, T_o) até a final (máxima,

T_m). Para satisfazer as Expressões 2.14 e 2.18, usa-se a profundidade máxima “a” de 50 mm para concretos normais e 30 mm para concretos com agregados leves para se atingir a temperatura máxima.

$$\tau = \left(1,57 * 10^{-3} * \frac{a}{K^{1/2}} * (T_m - T_o) + 42,1 \right)^2 - 1380 \quad [2.18]$$

Onde:

τ = duração da exposição ao fogo, em segundos;

A Figura 2.16 representa os parâmetros importantes que devem ser considerados na determinação do potencial de severidade de incêndio em um compartimento.

Figura 2.16 - Interação de processos e componentes de severidade de incêndio (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Pelo exposto na Figura 2.16, conclui-se que devido a grande quantidade de fatores envolvidos na severidade de um incêndio, podem existir diversos tipos de incêndio com diferentes impactos sobre a estrutura do compartimento.

2.9 O conceito de carga de incêndio

O conceito de carga de incêndio teve sua origem no “*Post-War Building Studies*”, em 1946 (SHIELDS & SILCOCK, 1987), significando a estimativa do potencial de risco. O termo “*carga de incêndio*” é usado para descrever a energia térmica que poderia ser liberada por metro quadrado de área de pavimento num compartimento pela combustão do conteúdo deste compartimento ou qualquer parte combustível incorporada a sua estrutura.

A legislação contra incêndio tem adotado uma divisão de grupos de ocupação de edifícios que na realidade refletem a carga de incêndio destes grupos. A classificação de edifícios / atividades da TSIB (Tarifa de Seguro de Incêndio do Brasil) para determinação da exposição do risco de incêndio dos edifícios também considera, indiretamente, a carga de incêndio decorrente das atividades desenvolvidas nos edifícios. A determinação da carga de incêndio em compartimentos é determinante no estabelecimento das características desejáveis de resistência ao fogo dos elementos de construção do edifício. Então, o conceito de carga de incêndio relaciona os materiais combustíveis do conteúdo dos edifícios ao potencial de severidade de um incêndio neste edifício e conseqüentemente à capacidade de resistência ao fogo dos seus elementos estruturais. É desejável assumir que o edifício esteja estruturalmente intacto após a queima dos materiais combustíveis. As relações descritas anteriormente são baseadas em algumas premissas para a composição do conceito de carga de incêndio:

- Os materiais combustíveis são uniformemente distribuídos pelo compartimento;
- Todos os materiais combustíveis serão consumidos pelo fogo;
- A combustão será completa;
- Os materiais não celulósicos se comportarão da mesma maneira que materiais celulósicos, isto é, a taxa de produção de calor será a mesma e poderá ser tratada como equivalente em madeira;
- O fogo por unidade de área poderá ser relacionado à resistência ao fogo dos elementos estruturais.

A carga de incêndio é representada pela soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive o revestimento das paredes divisórias, pisos e tetos (FERNANDES, 2004).

Na NBR 14432 (2000) e na Instrução Técnica 14/01 (Decreto Estadual 46.076/2001) são apresentadas tabelas de valores referentes de carga de incêndio em função do tipo de ocupação das edificações.

De uma forma genérica, podemos avaliar a carga de incêndio das edificações de acordo com a Expressão 2.19, a seguir:

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \quad [2.19]$$

Onde:

q_{fi} - valor da carga de incêndio específica, em MJ/m² de área de piso;

M_i - massa total de cada componente i de material combustível, em kg (Este valor não poderá ser excedido durante a vida útil da edificação exceto quando houver alteração de ocupação, ocasião em que M_i deverá ser reavaliado);

H_i - potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível, em MJ/kg, conforme Tabela 2.3 abaixo;

A_f - área do piso do compartimento, em m².

A Expressão 2.19 também pode ser escrita conforme a seguir (Expressão 2.20):

$$CI = \frac{M * C}{A} \quad [2.20]$$

Onde,

CI = Carga de Incêndio, em kJm⁻²;

M = Massa de material combustível no compartimento, em kg;

C = Calor específico do material, em kJ/kg;

A = Área do compartimento, em m²;

Tabela 2.3 - Valores do potencial calorífico específico de alguns materiais combustíveis (Fonte: Instrução Técnica 14/01 - Decreto Estadual 46.076/2001).

Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)
Acetona	30	Grãos	17	Poliéster	31
Acrílico	28	Graxa, Lubrificante	41	Poliestireno	39
Algodão	18	Lã	23	Polietileno	44
Benzeno	40	Lixo de cozinha	18	Polimetilmetacrilico	24
Borracha	Espuma – 37 Tiras – 32	Madeira	19	Polioximetileno	15
Celulose	16	Metano	50	Poliuretano	23
C-Hexano	43	Metanol	19	Polipropileno	43
Couro	19	Monóxido de carbono	10	Polivinilclorido	16
D-glucose	15	N-Butano	45	Propano	46
Epóxi	34	N-Octano	44	PVC	17
Etano	47	N-Pentano	45	Resina melamínica	18
Etanol	26	Palha	16	Seda	19
Eteno	50	Papel	17		
Etino	48	Petróleo	41		
Fibra sintética 6,6	29	Poliacrilonitríco	30		
		Policarbonato	29		

Apresenta-se a seguir, na Tabela 2.4, três exemplos (Residencial, Comercial e Industrial) de cargas de incêndio distintas relacionadas com a ocupação do edifício.

Tabela 2.4 - Classificação das ocupações em função da carga de incêndio (Fonte: IT 14/01 - Decreto Estadual 46.076/2001).

Ocupação/Usos	Descrição	Carga de incêndio (q_{fi}) em MJ/m ²
Residencial	Alojamentos estudantis	300
	Apartamentos	300
	Casas térreas ou sobrados	300
	Pensionatos	300
Comercial	Açougue	40
	Antigüidades	700
	Aparelhos domésticos	300
	Armarinhos	300
	Armas	300
	Artigos de bijouteria, metal ou vidro	300
	Artigos de cera	2100

Ocupação/Uso	Descrição	Carga de incêndio (q _{fi}) em MJ/m ²
Comercial	Artigos de couro, borracha, esportivos	800
	Bebidas destiladas	700
	Brinquedos	500
	Calçados	500
	Drogarias (incluindo depósitos)	1000
	Ferragens	300
	Floricultura	80
	Galeria de quadros	200
	Livrarias	1000
Comercial	Lojas de departamento ou centro de compras (Shoppings)	800
	Máquinas de costura ou de escritório	300
	Materiais fotográficos	300
	Móveis	400
	Papelarias	700
	Perfumarias	400
	Produtos têxteis	600
	Relojoarias	600
	Supermercados	400
	Tintas e vernizes	1000
	Vinhos	200
Industrial	Vulcanização	1000
	Aparelhos eletroeletrônicos, fotográficos, ópticos	400
	Acessórios para automóveis	300
	Acetileno	700
	Alimentação	800
	Artigos de borracha, coriça, couro, feltro, espuma	600
	Artigos de argila, cerâmica ou porcelanas	200
	Artigos de bijuteria	200
Industrial	Artigos de cera	1000
	Artigos de gesso	80
	Artigos de mármore	40
	Artigos de peles	500
	Artigos de plásticos em geral	1000
	Artigos de tabaco	200
	Artigos de vidro	80
	Automotiva e autopeças (exceto pintura)	300

Ocupação/Uso	Descrição	Carga de incêndio (q_{fi}) em MJ/m ²
Industrial	Automotiva e autopeças (pintura)	500
	Aviões	600
	Balanças	300
	Baterias	800
	Bebidas destilada	500
	Bebidas não alcóolicas	80
	Bicicletas	200
	Brinquedos	500
Industrial	Café (inclusive torrefação)	400
	Caixotes barris ou pallets de madeira	1000
	Carpintarias e marcenarias	800
	Cera de polimento	2000
	Cerâmica	200
	Cereais	1700
	Cervejarias	80
	Chapas de aglomerado ou compensado	300
Industrial	Chocolate	400
	Cimento	40
	Cobertores, tapetes	600
	Colas	800
	Colchões (exceto espuma)	500
	Confeitarias	400
	Congelados	800
	Couro sintético	1000
	Defumados	200
Industrial	Discos de música	600
	Doces	800
	Espumas	3000
	Farinhas	2000
	Feltros	600
	Fermentos	800
	Fiações	600
	Fibras sintéticas	300
	Fios elétricos	300
Industrial	Flores artificiais	300
	Fornos de secagem com grade de madeira	1000
	Forragem	2000
	Fundições de metal	40
	Galpões de secagem com grade de madeira	400
	Geladeiras	1000
	Gelatinas	800
	Gesso	80
	Gorduras comestíveis	1000

Ocupação/Uso	Descrição	Carga de incêndio (q_{fi}) em MJ/m ²
Industrial	Gráficas (empacotamento)	2000
	Gráficas (produção)	400
	Instrumentos musicais	600
	Janelas e portas de madeira	800
	Jóias	200
	Laboratórios farmacêuticos	300
	Laboratórios químicos	500
	Lápis	600
	Lâmpadas	40
Industrial	Laticínios	200
	Malharias	300
	Máquinas de lavar de costura ou de escritório	300
	Massas alimentícias	1000
	Mastiques	1000
	Materiais sintéticos ou plásticos	2000
	Motores elétricos	300
	Móveis	600
	Óleos comestíveis	1000
Industrial	Padarias	1000
	Papéis (acabamento)	500
	Papéis (preparo de celulose)	80
	Papéis (procedimento)	800
	Papelões betuminados	2000
	Papelões ondulados	800
	Pedras	40
	Perfumes	300
	Pneus	700
Industrial	Produtos adesivos	1000
	Produtos de adubo químico	200
	Produtos alimentícios (expedição)	1000
	Produtos com ácido acético	200
	Produtos com ácido carbônico	40
	Produtos com ácido inorgânico	80
	Produtos com albumina	2000
	Produtos com alcatrão	800
	Produtos com amido	2000
	Produtos com soda	40

Ocupação/Usos	Descrição	Carga de incêndio (q_f) em MJ/m ²
Industrial	Produtos de limpeza	2000
	Produtos graxos	1000
	Produtos refratários	200
	Rações	2000
	Relógios	300
	Resinas	3000
	Roupas	500
	Sacos de papel	800
	Sacos de juta	500
	Sorvetes	80
Industrial	Sucos de fruta	200
	Tapetes	600
	Têxteis em geral	700
	Tintas e solventes	4000
	Tintas látex	800
	Tintas não-inflâmáveis	200
	Tratamento de madeira	3000
	Vagões	200
	Vassouras ou escovas	700
	Velas de cera	1300
	Vinagres	80

A Tabela 2.4 apresentada traz alguns exemplos de ocupação e suas respectivas cargas de incêndio. Nota-se que algumas ocupações possuem altíssima carga de incêndio, a exemplo das Indústrias de Tintas e Solventes (4.000 MJ/m²). Para estes casos, a exigência de utilização de meios de proteção passivo e ativo deve ser mais rigorosa. Já para outras ocupações, apartamentos, por exemplo, a carga de incêndio é relativamente baixa (300 MJ/m²) e possui, portanto, menor exigência com relação a proteção contra incêndio.

2.10 Incêndio associado a um carregamento

O conceito de projetar edifícios para resistir a incêndios é fundamental para a segurança estrutural. Incêndios não têm sido considerados, tradicionalmente, como um carregamento, devido, principalmente, a sua dificuldade de modelagem e a incerteza da sua ocorrência. Existem basicamente dois tipos de carregamento: estáticos, como peso

próprio da estrutura, peso variável, neve, etc, e carregamentos dinâmicos, como, impactos, ventos, abalos sísmicos, etc. Os incêndios são considerados de forma diferente porque, em princípio, não afetam a estrutura como um todo. O efeito localizado do incêndio resulta em conseqüências diversas dependendo dos componentes do edifício e do conteúdo do compartimento onde está localizado o incêndio. Esta especificação traz dificuldades na concepção do incêndio como um carregamento estrutural. A interrelação entre projeto estrutural e sistemas de proteção contra incêndio se faz necessária para encontrar um tratamento adequado para o incêndio, garantindo um mínimo de segurança para o edifício em situação de incêndio. Este entendimento é extremamente útil para o gerenciamento de riscos de um edifício ou estrutura.

Uma outra abordagem deste tema prevê segurança das estruturas contra todos estes eventos já descritos. Porém, mesmo assim, ocorre uma diferença quando se trata de incêndio, uma vez que estes eventos são independentes das estruturas, são causas da natureza. O incêndio, na maioria das vezes, é originado no próprio edifício, dependendo da sua “*carga de incêndio*” e de seus sistemas de proteção contra o fogo (BUKOWSKI, 2001).

De acordo com MALHOTRA (1982), um método simplificado para o projeto de estruturas de concreto submetidas à flexão pode conter os seguintes passos:

1. Cálculo do carregamento máximo de projeto ou carregamento de serviço para a estrutura (F_d);
2. Cálculo do momento solicitante máximo aplicado (M_a);
3. Cálculo do momento resistente (M_u);
4. Determinação da temperatura média da armadura (T_s^0);
5. Cálculo da redução da capacidade resistente no aço (F_{sT});
6. Determinação da temperatura média do concreto na zona de compressão (T_c^0);
7. Cálculo da redução da capacidade resistente no concreto (F_{cT});
8. Equivalência das forças de tensão e compressão (F_{sT} e F_{cT});
9. Cálculo da redução do momento resistente (M_{uT});
10. Comparar item (9) com item (2). Se $M_{uT} > M_a$, então o projeto é satisfatório, se não, reprojeter.

Para a realização dos passos (5) e (7) expostos é necessário considerar curvas de redução de resistências ideais em função da temperatura para o material concreto e aço, respectivamente. As Figuras 2.17 e 2.18 sugerem modelos de perda de resistência mecânica para estes materiais.

Figura 2.17 – Curva ideal de redução de resistência mecânica para concretos (Fonte: MALHOTRA, 1982).

Figura 2.18 – Curva ideal de redução de resistência mecânica para aços (Fonte: MALHOTRA, 1982).

A Tabela 2.5 também apresenta um modelo de redução de resistência mecânica em função da temperatura (σ_T).

Tabela 2.5 – Fator (σ_T) de redução de resistência mecânica para aços e concretos em função da temperatura - T (Fonte: MALHOTRA, 1982).

Material	Faixa de Temperatura (°C)	σ_T
Concreto densidade normal	20 - 300	$1 - (T - 6000)$
	300 - 800	$0,95 - (T - 300) / 588$
Concreto de baixa densidade	20 - 300	1
	300 - 800	$1 - (T - 300) / 625$
Armadura pós-tensionada	20 - 300	$1 - (T - 6000)$
	300 - 800	$0,95 - (T - 300) / 421$
Armadura pré-tensionada	20 - 300	$1 - (T - 4000)$
	300 - 700	$0,95 - (T - 200) / 526$

Os modelos apresentados são apenas ilustrativos de um modelo ideal de perda de resistência mecânica para aços e concretos, uma vez que já se sabe, atualmente, que, por exemplo, concretos de alta resistência são muito susceptíveis à elevação de temperatura, sofrendo lascamentos explosivos e, perdendo, portanto, rapidamente, sua resistência mecânica em função da temperatura. Desta maneira, existe a necessidade de criação de novos modelos de determinação de perda de resistência mecânica dos concretos em função da temperatura, considerando-se seus parâmetros de dosagem, já que estes influenciam diretamente o comportamento do concreto frente ao fogo.

2.11 Breve histórico da evolução de testes de incêndio e normas no mundo

Depois de um grande incêndio em Londres em 1.136 seguiu-se um ato de construção londrino, em 1.189 (HALMILTON apud MALHOTRA, 1982). Depois do grande incêndio de 1.666, em Londres, que se propagou por um bairro inteiro (Puding Lane), medidas de contenção do fogo dentro do edifício de origem do incêndio foram implementadas. Inspeções em edifícios para seguro contra incêndio são datadas de 1.668, porém a proteção estrutural começa a ser desenvolvida seriamente somente na segunda metade do século XVIII. Avanços consideráveis na tecnologia dos materiais no século XIX tornou disponíveis materiais como gesso, concreto e aço, convergindo para os primeiros sistemas de proteção de estruturas contra o fogo. Houve também um acompanhamento da legislação contra incêndio, que passou a exigir não somente resistência ao fogo dos edifícios, mas também espaçamento adequado entre eles, para se evitar a propagação do fogo e a implantação de sistemas ativos e passivos de proteção contra fogo.

A criação do Comitê Britânico de Proteção contra Incêndio no final do século XIX marca o início de uma visão científica sobre a resistência estrutural contra incêndios dos edifícios. A Tabela 2.6 apresenta algumas datas importantes para o desenvolvimento de testes e normas de proteção estrutural contra incêndio.

Tabela 2.6 – Datas históricas no desenvolvimento de testes e normas de proteção estrutural contra incêndios (Fonte: MALHOTRA, 1982).

Ano	Evento
1666	O grande incêndio em Londres (Puding Lane)
1668	Inspeção de seguro contra incêndio em edifícios
1790	O primeiro teste de incêndio realizado pela Associação de Arquitetos
1890	Testes de incêndio em lajes em Denver, Colorado/EUA
1894	Ato de Proteção contra Incêndio em Londres
1897	Criação do Comitê Britânico de Prevenção contra Incêndio
1901	Testes de incêndio no Westbourn Park realizado pelo Comitê Britânico de Prevenção contra Incêndio
1902	Teste em sistemas de proteção contra incêndio nos Estados Unidos
1903	Primeiro Congresso Internacional de Proteção contra Incêndio em Londres
1910-20	Testes em sistemas de proteção contra incêndio nos EUA e Alemanha
1917	ASTM - C19 (alterada mais tarde para E119) estabelecida como curva-padrão
1932	BS 476 estabelecido como teste de resistência ao fogo
1947	Criação da Organização para pesquisa de incêndio
1948	CP 114 estabeleceu relatórios e informações sobre resistência ao fogo de estruturas de concreto
1961	Formação das especificações de testes de incêndio - Comissão ISO TC92
1962-5	Regulamentação de Incêndio em edifícios na Inglaterra
1972	CP 110 estabeleceu uma seção para resistência contra fogo
1975-8	Comitê formado pelo Instituto de Engenharia Estrutural e Sociedade do Concreto criaram um guia para projetos de estruturas de concreto com resistência ao fogo
1976	Testes em equipamentos de proteção contra incêndio em Borehamwood foram convertidos em testes utilizados pelas companhias de seguro
1978	FIP (Federação Internacional de Concreto Protendido) estabeleceu recomendações sobre incêndio em projeto de estruturas de concreto
1979	BS 5268 - Parte 4 - Seção 4.2 - considerações de incêndio no projeto de estruturas de madeira
1981	ECCS - recomendações sobre incêndio no projeto de estruturas de aço

O Comitê Britânico de Proteção contra Incêndio deixou de operar em 1920, porém continuou os estudos sobre prevenção contra incêndio e em 1932 foi publicada a norma (BS 476) definindo testes de resistência ao fogo baseada em pesquisas desenvolvidas nos Estados Unidos, Alemanha, Suécia e na própria Inglaterra.

Atualmente, estudos balizados em testes vêm sendo realizados em alguns países, principalmente Inglaterra, Estados Unidos, Alemanha e Suécia. Estes estudos ajudam a conhecer melhor o fenômeno do incêndio em compartimentos e também o comportamento dos materiais de construção frente ao fogo. Alguns Institutos destes países, citados ao longo do texto, vêm desenvolvendo pesquisas, sendo que o primeiro teste de resistência ao fogo nos Estados Unidos foi realizado em lajes na cidade de

Denver em 1890. O Departamento de Construção de Nova York adotou um código, por volta de 1900, que requeria resistência de lajes por quatro horas de exposição a um forno com temperatura de 1.100 °C e carregamento de 211 kg/m² e, subseqüentemente, um carregamento 4 vezes maior que este após 24 horas. Para realizar este teste foi instalado um forno na Universidade de Columbia. Em 1904, a ASTM (American Society for Testing and Materials) criou um comitê para preparar testes ao fogo padrão para desenvolver uma norma americana de resistência ao fogo de materiais e estruturas, sendo que a primeira norma foi lançada em 1908 com carregamentos similares ao código de Nova York, porém com uma temperatura menor, 927 °C. A partir de 1908 e nos próximos 10 anos, muitas instituições americanas conduziram testes de incêndio em elementos construtivos e estruturas tais como “*Factory Mutual*”, o “*National Board of Fire*”, o “*National Bureau of Standards*” e o “*Underwriters Laboratories*”. Normas de testes de resistência ao fogo para pilares com carga começaram a ser desenvolvidos pela UL em 1917. Em 1917, a ASTM lançou uma especificação padrão C19 para curva de temperatura x tempo. Cabe ressaltar que esta curva é muito próxima das curvas britânicas, sueca e alemã. Esta norma padrão mais tarde (1918) se tornaria a ASTM E119, abordando testes de resistência ao fogo para lajes e paredes usando uma curva de temperatura x tempo. Por fim, INGBERG do “*National Bureau*”, realizou esforços na década de 20, examinando diferentes combustíveis e sugerindo que a relação da temperatura com o tempo poderia ser uma via de comparação de desempenho entre vários cenários de incêndio e condições de contorno do forno (GROSSHANDLER, 2002).

Como exemplo do exposto anteriormente, apresenta-se na Figura 2.19 um edifício real sendo submetido a incêndio para fins do desenvolvimento da curva temperatura x tempo. Dentro do edifício existem paredes também preparadas para os testes da norma ASTM E119.

Figura 2.19 – Edifício em chamas como parte de uma série de testes realizados para desenvolver a curva temperatura x tempo (Fonte: NISTIR 6890, 2002).

Devido a essa grande quantidade de variáveis e intervenientes, para se compreender melhor o fenômeno do incêndio e conseguir resultados mais significativos, diversos experimentos têm sido desenvolvidos no mundo. Entre janeiro de 1995 e julho de 1996, foi desenvolvido um programa de ensaios de incêndio nos Laboratórios “*Building Research Establishment’s Cardington*” do Reino Unido. Os ensaios foram realizados em um edifício de estrutura metálica de oito pavimentos, onde as vigas secundárias não receberam proteção contra fogo, projetado e construído conforme um típico edifício de escritórios. O propósito dos ensaios era investigar o comportamento de uma estrutura real sob as condições de um incêndio real e coletar dados que permitissem elaborar programas para análises de estruturas em incêndio. Nas Figuras 2.20 e 2.21 apresentam-se as fotos do edifício antes e depois dos testes, respectivamente. Tanto as vigas como as lajes são mistas (aço/concreto). As lajes possuem 21 x 45 metros de área e houve um carregamento de carga de incêndio de 45 W/m^2 , equivalente à carga de incêndio de um escritório. Com 10 minutos de ignição, a temperatura do ambiente atingiu 900°C . A temperatura máxima medida no aço foi de 1.100°C , ponto no qual a estrutura já deveria ter colapsado. Entretanto, a flexa máxima das vigas foi de 640 mm depois de 62

minutos de fogo e a estrutura ainda resistiu aos carregamentos e não perdeu sua integridade após a passagem da fumaça e das chamas. Deste teste resultou que a proteção contra o fogo em vigas secundárias pode ser suprimida, pois a ação da membrana de aço das lajes e sua armadura podem resistir a transferência de carregamentos. Considerando-se que uma camada de proteção contra o fogo (argamassa de proteção térmica ou tintura intumescente) numa estrutura pode acrescer seu preço em até 30%, esta redução de aplicação de material de proteção em vigas secundárias pode reduzir o custo total da estrutura, sem diminuição da estabilidade estrutural da mesma frente a um incêndio.

Na pesquisa mencionada anteriormente, cabe ressaltar que dois projetos foram financiados respectivamente pela CORUS (British Steel) em associação com a “*European Coal Steel Community*” (ECSC) e pelo governo britânico por intermédio do “*Building Research Establishment*” (BRE). Outras organizações que colaboraram no programa de pesquisa foram a “*Sheffield University*”, o TNO (Países Baixos), o CTICM (da França) e o “*Steel Construction Institute*” (SCI).

Salienta-se do exemplo exposto acima, que o estudo do comportamento das estruturas em situação de incêndio deve ser amplo, englobando conceitos de gerenciamento de risco nos aspectos de utilização de materiais de construção civil, manutenção da carga de incêndio, concepção estrutural e utilização adequada de materiais de proteção contra incêndio com o objetivo principal de garantir estabilidade estrutural de um edifício em situação de incêndio.

Os ensaios de Cardington demonstraram que estruturas modernas de aço, atuando de maneira composta com as lajes de concreto, adquirem uma integração que resulta em uma resistência ao fogo maior do que o que é normalmente considerado para estes elementos individualmente.

Figura 2.20 – Edifício de estrutura metálica com lajes compostas no BRE Cardington. (Fonte: LAWSON, 2001).

Figura 2.21 – Foto de um andar do edifício da Figura 2.20 após o teste real de incêndio (Fonte: LAWSON, 2001).

Apesar da engenharia de segurança estrutural ainda carecer de avanços, pode-se dizer que progressos consideráveis, principalmente na Inglaterra e Estados Unidos, foram conseguidos no desenvolvimento de proteção térmica das estruturas desde as primeiras tentativas de implementação de medidas de segurança contra incêndio.

2.12 Curvas normalizadas de incêndio

Em meados de 1800 as normas de construção civil com relação a resistência ao fogo eram coletâneas de exigências inadequadas, tendo por base observações *in loco*, que determinavam materiais e métodos necessários para os níveis de proteção contra incêndio aceitáveis para aquela época (COSTA, 2002). Então, projetistas e industriais começaram a investigar métodos de ensaios e a configuração de corpos de prova que pudessem ser representativos da susceptibilidade das estruturas em situação de incêndio. A idéia de uma padronização dos resultados dos testes de incêndio surgiu em 1903, durante um congresso internacional de prevenção contra incêndio, realizado em

Londres. Como resultado destes estudos, tem-se o desenvolvimento de algumas “*curvas de incêndio*”, a exemplo da ISO 834, que são utilizadas para a avaliação da resistência ao fogo de estruturas de concreto e demais materiais de construção civil para incêndios a base de materiais celulósicos.

Ocorre que em um incêndio para materiais hidrocarbonetos, a temperatura alcança 1100 °C em 5 minutos de incêndio, enquanto para os materiais celulósicos, a temperatura pode chegar aos 800 °C após 40 minutos de incêndio. Comparando ambos os fluxos de calor, o do incêndio de celulósicos é de aproximadamente 100 kW/m², contra 200 kW/m² do incêndio de hidrocarboneto (WARD *et al.* apud COSTA, 2002). Desta forma, surgiu a necessidade do desenvolvimento de “*curvas de incêndio*” específicas para os incêndios a base de hidrocarbonetos devido a sua maior severidade em relação ao celulósico. Materiais de construção civil e estruturas de concreto que podem ser submetidas a um incêndio a base de hidrocarbonetos devem ser testados levando-se em consideração a severidade do incêndio dada pelas expressões de incêndios hidrocarbonetos.

Desta forma, o incêndio compartimentado pode ser modelado por expressões que correlacionam o crescimento da temperatura dos gases quentes no interior do compartimento com o tempo de duração do incêndio (CUOGHI et al., 2004). Estas expressões podem ser padronizadas para fins de ensaios de resistência ao fogo de componentes de construção civil, inclusive materiais de proteção térmica das estruturas, e ainda serem parametrizadas pelas características do cenário de incêndio que se deseja modelar, por exemplo: grau de ventilação, carga de incêndio e volume do compartimento do incêndio. Estas expressões também podem ser parametrizadas pelas propriedades térmicas dos materiais utilizados nos elementos de compartimentação (lajes, vigas e pilares). É importante a modelagem do incêndio compartimentado através destas expressões uma vez que se pode aferir a temperatura aproximada na superfície das estruturas durante o incêndio, além do que esta temperatura pode servir de parâmetro para o desenvolvimento de materiais de proteção térmica.

As curvas padronizadas mais utilizadas em projetos de estruturas são: a curva-padrão (ASTM E 119, ISO 834 e BS 476) para materiais celulósicos e as curvas de materiais hidrocarbonetos (UL 1709, "H" – hydrocarbon curve, RWS e RABT) utilizadas em

projetos de túneis ou edificações industriais com carga de incêndio de hidrocarbonetos líquidos (COSTA, 2002). Essas curvas estão ilustradas, respectivamente, pela Figura 2.22 e pela Figura 2.23.

Figura 2.22: Curva - padrão (ISO 834) para materiais celulósicos.

Figura 2.23: Curvas temperatura x tempo mais usadas para incêndio de materiais hidrocarbonetos (COSTA, 2002).

Materiais de proteção térmica bem como estruturas de concreto podem ser ensaiadas em função destas “*curvas de incêndio*”, a depender da sua exposição a incêndios gerados por materiais celulósicos ou hidrocarbonetos. A Tabela 2.7 apresenta um exemplo dos resultados dos ensaios de uma argamassa de proteção térmica (FIRESHIELD 1350) submetida a uma curva de temperatura de hidrocarbonetos.

Tabela 2.7: Temperatura crítica da interface entre o concreto projetado e o revestimento de argamassa FIRESHIELD 1350, em função do tempo de exposição à temperatura elevada (curva hidrocarboneto). Os valores são válidos para espessuras de concreto superiores a 200 mm (FSD, 2003).

Espessura Argamassa MEYCO® Fix Fireshield 1350 (mm)	Temperatura crítica na superfície do concreto, em função da espessura de argamassa de proteção térmica, de acordo com a curva HC - hidrocarbonetos (min)					
	30	60	90	120	180	240
25	205 °C	313 °C	379 °C	427 °C	498 °C	549 °C
30	163 °C	261 °C	324 °C	370 °C	438 °C	488 °C
35	137 °C	220 °C	279 °C	324 °C	389 °C	437 °C
40	119 °C	186 °C	242 °C	285 °C	348 °C	394 °C
45	102 °C	162 °C	211 °C	252 °C	313 °C	358 °C
50	90 °C	142 °C	185 °C	223 °C	282 °C	326 °C
55	81 °C	128 °C	165 °C	199 °C	255 °C	298 °C
60	73 °C	116 °C	148 °C	178 °C	231 °C	273 °C
65	66 °C	104 °C	135 °C	162 °C	210 °C	250 °C
70	59 °C	95 °C	124 °C	148 °C	191 °C	230 °C
75	54 °C	88 °C	115 °C	137 °C	176 °C	211 °C

2.13 Aspectos arquitetônicos de segurança contra incêndio

Edifícios são projetados e construídos para acomodar pessoas, processos, etc. Conseqüentemente, o fluxo de pessoas, os materiais e produtos estocados, bem como o desenvolvimento de processos no seu interior, devem ser considerados de tal forma a predeterminar um nível mínimo de segurança contra incêndio. Este nível mínimo de segurança contra incêndio deve ser exigido pela legislação de incêndio, pelas normas de seguro ou até mesmo por outras fontes. A Figura 2.24 apresenta um quadro dos parâmetros de projeto mínimos que devem ser contemplados quando do desenvolvimento de um projeto arquitetônico de um edifício.

Figura 2.24 – Quadro representativo de parâmetros de projeto para proteção contra incêndio.

Apresenta-se, a seguir, através de um exemplo de projeto, o desenvolvimento dos conceitos apresentados na Figura 2.24.

A Figura 2.25 mostra um esboço de um edifício de uma fábrica. Claramente percebe-se a divisão de dois blocos de edifícios separados por distâncias: o primeiro bloco abriga a parte administrativa da fábrica ao passo que o segundo bloco abriga a área de produção. Dentro da área de produção, existem muitas outras subdivisões relacionadas as atividades desenvolvidas em ambientes particulares, como por exemplo: estoque de matéria-prima. Para um edifício aparentemente simples, como apresentado na Figura

2.25, o projetista deve satisfazer o mínimo exigido na legislação contra incêndio o que o leva a desenvolver, mesmo que inconscientemente, conceitos de análise de risco de incêndio. Esta análise de risco de incêndio, num nível mais apurado, exigido nas seguradoras, poderia conduzir o projetista a uma estimativa de PMP (Perda Máxima Possível). O objetivo geral do projeto sempre é diminuir o PMP, ou seja, criar condições e concepções arquitetônicas que diminuam o risco de início de incêndio e caso ele ocorra, diminuir seus danos às pessoas e à propriedade. A sequência de análise de risco de incêndio no desenvolvimento do projeto pode ser discriminada conforme a seguir:

- **Definição do problema:** estabelecer claramente as necessidades de proteção;
- **Escolha dos objetivos:** definição das necessidades físicas de proteção e dos critérios de avaliação desta proteção;
- **Síntese do sistema de proteção:** criação de possíveis alternativas de proteção contra incêndio;
- **Análise do sistema de proteção:** análise da alternativa do sistema de proteção contra incêndio de acordo com os objetivos;
- **Seleção do sistema de proteção:** seleção da alternativa mais promissora em termos de diminuição de risco de incêndio, ou diminuição da sua propagação ou eficácia no seu combate.

A partir da determinação da natureza e escala do risco, o projetista, necessariamente, optará por uma das seguintes soluções arquitetônicas:

- **Isolamento dos ambientes:** se o risco é tal, devido a sua carga de incêndio associada a sua atividade, que ameaça as outras atividades do edifício, então, esta atividade deve ser isolada em um outro ambiente (edifício), separado por distância do edifício original;
- **Compartimentação dos ambientes:** se o risco de determinada atividade se assemelha ao primeiro caso descrito, porém não há espaço no terreno para construção de edifícios isolados, utiliza-se compartimentos, com elementos construtivos que resistam ao fogo, para isolar ambientes, e, portanto, atividades, dentro de um mesmo edifício;
- **Segregação de atividades:** para realização da segregação de atividades é necessária uma análise de riscos mais profunda, que seja capaz de identificar e classificar atividades. Assim, atividades de mesma natureza, com carga de incêndio similares, podem ser alocadas coletivamente em ambientes específicos

para este fim.

Figura 2.25 – Esboço das instalações de uma fábrica.

No caso apresentado na Figura 2.25, referente às instalações de uma indústria, o projetista, após a análise das atividades de cada ambiente, optou por separação de atividades (isolamento), ou seja, as de menor risco de incêndio (escritórios) estão isoladas por distância do outro bloco (área de produção) que concentra atividades de maior risco de incêndio. Assim, no caso exposto, o projetista realiza a separação de atividades por classes de risco de incêndio. Portanto, a segregação das atividades é o segundo passo do projetista, que pode, a partir destes parâmetros, determinar soluções de proteção contra incêndio mais econômicas e mais eficazes.

No exemplo da Figura 2.25, os depósitos de matéria-prima ou de produtos acabados são grandes galpões que não podem ter compartimentação interna, pois isto afetaria a funcionalidade do ambiente (movimentação de carga). Desta forma, devido a alta carga de incêndio e ao tamanho do ambiente, o que aumenta o fator de risco de incêndio, o uso de hidrantes, associado a sprinklers é plenamente justificável. No mesmo sentido,

na região dos escritórios, o uso de extintores e eventualmente hidrantes é uma medida de proteção contra incêndio compatível com a potencialidade do risco. Da mesma forma, se justificaria o uso de argamassa de proteção contra fogo, ou outro revestimento similar, nos depósitos ou até mesmo na área de pintura e produção, uma vez que as vedações devem possuir estabilidade suficiente para suportar as temperaturas do incêndio e evitar que ele se propaga para outros compartimentos do edifício.

Por fim, para a avaliação dos riscos de incêndio, sua intensidade e sua duração, na fase de projeto de um sistema de proteção contra incêndio, devem ser identificados, no mínimo, os itens a seguir:

- Determinação da atividade desenvolvida no edifício (ocupação), especificação e quantidade de material combustível (mobiliário, estoques, equipamentos, acabamentos, etc.), tecnicamente denominada “*carga de incêndio*”. Por exemplo, o risco de incêndio em uma tecelagem é maior do que em um edifício de escritórios;
- A forma do edifício (disposição arquitetônica), ou seja, em um edifício térreo com grande área, sem compartimentação, tipo galpão, há um risco maior de propagação do incêndio do que um edifício com diversos andares, de mesma atividade, subdividido em muitos compartimentos. Neste último caso, há uma tendência natural do confinamento do incêndio nos ambientes;
- As janelas e aberturas (posição e quantidade) determinam as condições de ventilação do ambiente;
- As propriedades térmicas dos materiais constituintes das paredes, do teto e do piso. Quanto mais isolantes forem esses materiais, menor será a possibilidade de propagação do fogo para outros ambientes, em contrapartida, mais severo (maior pico de temperatura) será o incêndio no compartimento.

Assim, os principais objetivos do conceito de segurança contra incêndio são:

- Garantir um cenário de combate ao fogo mais seguro possível;
- Controlar a movimentação da fumaça;
- Conter o fogo no compartimento para evitar que ele se espalhe horizontalmente através dos cômodos e verticalmente através dos shafts, escadas e demais aberturas;
- Evitar que o fogo passe de um edifício a outro;
- Evitar o colapso do edifício.

Um sistema de proteção contra incêndio em um edifício ou conjunto de edifícios surge na etapa de projeto com as considerações de análise de risco apresentadas posteriormente. Durante a fase de construção, toda a concepção de um sistema de proteção contra incêndio (como exemplo: a compartimentação, a implantação de hidrantes ou extintores) já está definida, porém, nesta fase, existe uma agravação do risco de incêndio uma vez que estes equipamentos de proteção não estão em operação e a própria atividade de construção aumenta o risco de início de incêndio. Assim, nesta etapa, diversos serviços são executados e a própria carga de incêndio dentro dos compartimentos muda ao longo da fase de construção, o que merece uma preocupação prévia do potencial de risco de incêndio. A última etapa refere-se ao uso do edifício, fase na qual todos os sistemas de proteção projetados já se encontram em operação. Em todas as fases da vida do edifício, desde o projeto, à construção e uso, a concepção de um sistema de proteção contra incêndio deve ser realizada à luz do gerenciamento de riscos, ou seja, buscando soluções eficazes e economicamente viáveis. A Figura 2.26 apresenta a relação entre os sistemas de proteção contra incêndio e as etapas de vida de um edifício.

Figura 2.26 – Sistema de proteção contra incêndio nas fases de concepção, construção e vida útil do edifício.

Cabe salientar que as três fases indicadas na Figura 2.26 são extremamente importantes na prevenção de incêndios. Quando ocorre um incêndio, significa que aconteceu falha na concepção do sistema de proteção ou na sua utilização. Durante a vida útil do edifício, a manutenção dos sistemas protecionais ou das instalações elétricas ou a manutenção da carga de incêndio são necessárias para não se aumentar o potencial de risco de incêndio. Igualmente, os usuários permanentes ou periódicos, que desenvolvem atividades de risco dentro do edifício, devem estar conscientizados ou obrigados a seguir as determinações de segurança contra incêndio. Deve-se salientar que as grandes corporações possuem programas mundiais de gerenciamento de riscos, o que torna as suas instalações mais “seguras” com relação ao incêndio, se comparadas aos demais edifícios que cumprem somente a legislação contra incêndio. Porém, o potencial de risco de incêndio existe para todo e qualquer edifício, em maior ou menor grau.

Para a avaliação do desempenho de um sistema de proteção contra incêndio com proteção passiva das estruturas, DINENNO & BEYLER apud NIRTIR 6890 (2002) propuseram um esquema para estudo conforme apresentado na Figura 2.27.

Figura 2.27 - Esquema estrutural de sistemas de proteção contra o fogo (Fonte: NISTIR 6890).

O esquema apresentado na Figura 2.28, proposto por SEITO e BERTO apud ASSIS (2001), mostra como conceber um sistema de proteção que garanta um nível adequado de segurança contra incêndio e como abordar as relações de interferência do incêndio no projeto. Este sistema pode ser expresso de acordo com a Expressão 2.21, a seguir:

$$RT = 1 - [(1 - r_1) * (1 - r_2) * (1 - r_3) * (1 - r_4) * (1 - r_5)] \quad [2.21]$$

Onde:

RT = Efetividade total do sistema;

ri = Efetividade de cada um dos elementos do sistema.

Se qualquer um dos elementos do sistema de proteção for perfeito (por exemplo: $r_1 = 1$), o sistema torna-se perfeito, independente da existência ou efetividade dos outros sistemas individuais. Ocorre que na prática, não há sistema perfeito, porém podem existir bons sistemas de proteção, então, se o resultado de todos os sistemas de proteção forem bons, a efetividade geral dos sistemas (RT) será próxima de 1, ou seja, 100%.

Figura 2.28 – Sistema de segurança contra incêndio dos edifícios (Fonte: ASSIS, 2001).

2.14 Aspectos de segurança estrutural

Os dois principais objetivos da segurança estrutural contra incêndio são: minimizar o risco à vida humana e reduzir a perda patrimonial. O risco à vida pode ser entendido como o eventual risco de desabamento de elementos construtivos sobre os usuários ou sobre a brigada de incêndio ou Corpo de Bombeiros. A perda patrimonial pode ser entendida como a destruição parcial ou total da edificação, do conteúdo dos ambientes, englobando equipamentos, estoques ou dos edifícios da vizinhança, a partir da desestabilização da estrutura.

Resistência ao fogo é um termo que se relaciona, de uma maneira geral, a resistência ao fogo de estruturas ou componentes estruturais ou de vedação. Desta forma, um elemento estrutural ou os elementos de vedação de um dado compartimento, para serem considerados resistentes ao fogo, devem suprir três condições mínimas:

- **Estabilidade:** cada elemento construtivo deve possuir estabilidade estrutural para evitar o seu próprio colapso e o de outros elementos estruturais;
- **Integridade física:** é importante na medida em que ela não permite a passagem das chamas pelo elemento construtivo ou de vedação e evita, portanto, a propagação do fogo para outros compartimentos do edifício através da convecção;
- **Isolamento térmico:** esta condição é muito importante na medida em que os elementos de vedação não podem propagar radiação para outros compartimentos afim de não promoverem, portanto, a ignição de materiais combustíveis em outros ambientes, evitando-se, desta forma, a propagação do incêndio.

A Figura 2.29 apresenta um esquema dos critérios de resistência ao fogo aqui mencionados.

Figura 2.29 – Condições mínimas para garantir resistência ao fogo de elementos estruturais ou de vedação.

As condições mínimas apresentadas na Figura 2.29 são critérios de desempenho de elementos de construção ou vedação com relação a resistência ao fogo. Estes critérios estão ligados aos conceitos de proteção contra o fogo referentes à prevenção do colapso estrutural dos edifícios e controle da propagação do fogo pelos diversos compartimentos do edifício. Paredes, tetos e pisos devem agregar a função de impedir a transferência de gases quentes por frestas (a temperatura máxima aceitável no outro compartimento por passagem de gases quentes por frestas é igual a 180°C) e pela restrição de transferência de calor por condução e radiação (a temperatura máxima aceitável no outro compartimento devido a radiação é igual a 140°C), ignizando materiais combustíveis em outros compartimentos que não foram atingidos diretamente pelo incêndio.

Com relação às estruturas, faz-se necessário restringir a deformação dos elementos estruturais quando submetidos ao incêndio. A Figura 2.30 apresenta um diagrama da relação entre perda de resistência devido ao fogo e sua deformação associada.

Figura 2.30 – Relação entre deformação e perda de resistência para estruturas submetidas à flexão em função do tempo (Fonte: MALHOTRA, 1982).

O objetivo de se limitar a deformação, como especificado na Figura 2.30, é evitar-se o colapso estrutural. Cada país adota um limite máximo de deformação aceitável de acordo com seus critérios e necessidades. As normas e exigências legais requerem testes de resistência ao fogo dos elementos estruturais e de vedação expressos em função dos minutos de manutenção dos três fatores mencionados (estabilidade, integridade física e isolamento térmico).

Por fim, nos capítulos anteriores foram apresentadas algumas curvas de modelagem da temperatura do incêndio para realização de testes de resistência ao fogo de componentes de construção civil. Nos capítulos subsequentes serão abordados alguns aspectos referentes ao risco de incêndio em edifícios, ao comportamento e às propriedades do concreto endurecido frente ao fogo, além da apresentação de casos de incêndio em edifícios e aspectos referentes aos materiais de proteção térmica das estruturas.

3. O RISCO DE INCÊNDIO

Risco, de uma forma geral, está relacionado a incerteza. Deve-se deixar claro, portanto, que para o caso em tela, a incerteza ocorre com relação ao princípio de um incêndio em um edifício. Assim, por exemplo, um edifício sem proteção contra incêndio, com sobrecarga nas instalações elétricas ou com grande carga de incêndio possui maior grau de risco de início de incêndio quando comparado a outro edifício em bom estado de conservação.

De qualquer forma, para o desenvolvimento de uma definição mais ampla de risco, é importante estabelecer uma correlação entre risco e a possibilidade de perda material ou de vidas humanas.

A análise de risco de incêndio, de acordo com KAPLAN & GARRICK apud HARMATHY (1993), consiste da resposta às três questões relacionadas a seguir:

- O incêndio pode ocorrer?
- Qual a probabilidade de que ele ocorra?
- Se ele ocorrer, quão sérias são as suas conseqüências?

A primeira questão é relacionada ao cenário de um incêndio, a segunda, à probabilidade de que este cenário ocorra, e, a terceira, faz menção, geralmente, à severidade de um incêndio. A definição de risco de incêndio segundo ASTM apud HARMATHY (1993) está explícita conforme a seguir:

Risco de Incêndio = (Probabilidade de ocorrência do evento) x (Probabilidade de exposição ao evento) x (Potencial do dano decorrente do incêndio).

3.1 Aspectos de análise de risco de incêndio

Para o dimensionamento estrutural de edifícios, é exigido, de acordo com a legislação de segurança contra incêndio (Decreto 46.076/2001), um tempo mínimo de resistência ao fogo das estruturas e elementos de compartimentação, denominado TRRF. Desta forma, o TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) é um tempo fictício de resistência ao fogo de determinado elemento estrutural, cujo objetivo é estabelecer-se

critérios de verificação da segurança estrutural em situação de incêndio. Analisam-se, a seguir, conceitos relacionados ao TRRF a partir de dois métodos simplificados: Método de Gretener e Método do Tempo Equivalente.

O tempo mínimo de resistência ao fogo das estruturas não corresponde ao tempo real de desocupação ou duração de um incêndio. Trata-se, tão somente, do tempo padrão ao qual os elementos estruturais deveriam resistir durante um ensaio de resistência ao fogo padronizado internacionalmente.

O Método de Gretener recebe o nome do engenheiro suíço Max Gretener, seu idealizador, e foi publicado em 1965, em princípio, com o objetivo de calcular o risco de incêndio em indústrias e grandes edifícios, atendendo às necessidades das companhias de seguro. Três anos depois, o Corpo de Bombeiros suíço passou a utilizar este método, que desde então, vem servindo de base para a formulação de normas, sendo constantemente revisado e atualizado de acordo com os conhecimentos internacionais (SANTANA & SILVA, 2002).

Cabe considerar ainda que o Método de Gretener não calcula efetivamente o TRRF das estruturas e sim um coeficiente global de segurança ao incêndio da edificação (γ_{fi}). Este coeficiente é calculado através da atribuição de “pesos” às características da edificação relevantes à situação de incêndio que são agrupados em classes (ex: N, S, E, R, etc). Cada classe é associada a fatores multiplicadores ou divisores na expressão de cálculo de γ_{fi} , conforme contribuam para a proteção ou exposição das estruturas ao incêndio. Uma estrutura é considerada segura se o coeficiente γ_{fi} for maior do que 1. O coeficiente γ_{fi} é determinado para cada compartimento e deve ser verificado para todos eles de acordo com a Expressão 3.1, a seguir:

$$\gamma_{fi} = 1,3 \frac{N * S * E}{R * A * M} \quad [3.1]$$

Onde N, S e E são classes de medidas favoráveis à proteção da estrutura, por isso, são multiplicadores:

N = refere-se às medidas normais de proteção: extintores portáteis, hidrantes, pessoal treinado no combate ao incêndio, etc;

S = refere-se às medidas especiais de proteção ao fogo: modo de detecção do fogo, tempo-resposta do Corpo de Bombeiros, exaustão de calor e fumaça, etc;

E = refere-se às medidas construtivas de proteção da estrutura: resistência ao fogo das estruturas, das fachadas e da vedação horizontal e dimensões das portas corta-fogo, etc.

Por outro lado, R, A e M são classes de medidas desfavoráveis à proteção da estrutura, por isso, são divisores:

R = refere-se ao risco de incêndio, englobando conceitos de carga de incêndio (mobiliária e imobiliária), combustibilidade da carga de incêndio, enfumaçamento causado pela carga de incêndio, toxidade dos gases, cota do andar considerado, área do compartimento, etc;

A = refere-se ao risco de ativação do incêndio em função do tipo de uso do compartimento;

M = refere-se à mobilidade das pessoas dentro da edificação.

A apresentação do Método de Gretener no texto não possui a intenção de aprofundamento no método, mas tão somente o despertar da sensibilidade, através análise da Expressão 3.1, para os fatores que contribuem favoravelmente na segurança contra o incêndio e quais são aqueles que aumentam o risco de incêndio de uma edificação.

O Método do Tempo Equivalente, que é apresentado na Instrução Técnica 08 (Decreto nº 46.076, de 31 de agosto de 2001), é uma simplificação do Método de Gretener e procura associá-lo ao TRRF, ou seja, fornece um valor de tempo de resistência requerida ao fogo da estrutura a partir de aspectos positivos e negativos de segurança contra incêndio. São, portanto, realizados ensaios de estruturas, materiais de proteção térmica, portas corta-fogo, e outros, a altas temperaturas, em fornos aquecidos de acordo com curvas de elevação de temperatura padronizadas, com o objetivo de se relacionar o tempo de resistência ao fogo encontrado nestes ensaios ao tempo equivalente num incêndio real.

O Tempo Equivalente seria um tempo fictício, resultado da correlação entre um ensaio de um material em forno com uma curva padronizada e uma possível curva real de incêndio. A Figura 3.1 apresenta a correlação entre as temperaturas máximas na estrutura em um incêndio natural e padrão.

Figura 3.1 – Método do Tempo Equivalente (Fonte: VARGAS & SILVA, 2003).

Ao longo dos anos foram propostos diversos métodos de associação da curva padrão (modelo simples e prático) à curvas reais de incêndio. Primeiro correlacionou-se a curva padrão a carga de incêndio (carga por unidade de área – $q_{fi,k}$ ou q_{fi}). Posteriormente incorporou-se o efeito da ventilação (W) no ambiente, depois a influência das características térmicas dos elementos de vedação (K). Foram também incorporados os efeitos positivos de dispositivos de proteção ativa, tais como: sprinklers, alarme de detecção de fumaça, etc. Por fim, os riscos devido ao porte da edificação (γ_n e γ_s), obtendo assim a Expressão 3.2, apresentada pela Norma Eurocode 1, norma da União Européia, na década de 90 e também na IT/08 (Decreto nº 46.076, de 31 de agosto de 2001):

$$t_{eq} = q_{fi,k} \gamma_n \gamma_s K W \quad [3.2]$$

Onde:

t_{eq} – tempo equivalente, em minutos;

$q_{fi,k}$ ou q_{fi} – carga de incêndio, em MJ/m²;

γ_n – coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa da edificação;

γ_s – coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das consequências do colapso da edificação;

K – fator que depende das características dos elementos de vedação (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Fator K, parte integrante da Expressão 3.2

$\sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}$ Inércia Térmica (J/m ² s ^{1/2} °C)	K (min . m ² / MJ)
$\sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} > 2500$	0,040
$720 \leq \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \leq 2500$	0,055
$\sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} < 720$	0,070

Onde:

ρ - massa específica do elemento de vedação do compartimento, em kg/m³;

c – calor específico do elemento de vedação do compartimento, em MJ/kg°C;

λ - condutividade térmica do elemento de vedação, em W/m°C;

W – efeito da ventilação conforme Expressão 3.3.

$$W = \left(\frac{6}{H} \right)^{0,3} \left[0,62 + \frac{90 \left(0,4 - \frac{A_v}{A_f} \right)^4}{1 + 12,5 \left(1 + 10 \frac{A_v}{A_f} \right) \frac{A_h}{A_f}} \right] \geq 0,5 \quad [3.3]$$

Onde:

H – altura do compartimento, em m;

A_v – área de ventilação vertical – janelas, em m²;

A_h – área de ventilação horizontal – piso, em m²;

A_f – área de piso, em m²;

O Grau de Ventilação ou Fator de Abertura (W) representa a quantidade de ventilação diretamente proporcional as aberturas existentes nas paredes do compartimento e as alturas destas aberturas (vãos de janelas, portas, etc) em relação a área total do ambiente (piso, parede, teto e aberturas).

A carga de incêndio também pode se determinada pela classe de risco do material combustível. A Tabela 3.2 apresenta uma divisão dos materiais combustíveis que formam a carga de incêndio das edificações. Cabe ressaltar que para cada uma destas classes de risco apresentada abaixo existe um sistema de proteção especificamente projetado para extinguir o fogo nestes materiais, os quais, pelo contrário, poderiam agravar o incêndio.

Tabela 3.2 – Classes de risco de materiais combustíveis ⁽⁵⁾

CLASSES DE INCÊNDIO	
Classe	Exemplos de Materiais Combustíveis
A	Incêndios em materiais sólidos fibrosos, tais como: madeira, papel, tecido, etc. que se caracterizam por deixar após a queima, resíduos como carvão e cinza.
B	Incêndios em líquidos e gases inflamáveis, ou em sólidos que se liquefazem para entrar em combustão: gasolina, GLP, parafina, etc.
C	Incêndios que envolvem equipamentos elétricos energizados: motores, geradores, cabos, etc.
D	Incêndios em metais combustíveis, tais como: magnésio, titânio, potássio, zinco, sódio, etc.

⁽⁵⁾ Fonte: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/fogo.htm> - acessado em 27/10/2005

3.2 Aspectos de gerenciamento de risco de incêndio

Dentro do contexto de “*Gerenciamento de Riscos de Incêndio*”, pode-se dizer que existe um ponto adequado de investimento em medidas de segurança contra incêndio compatível com a expectativa de ocorrência de sinistros de incêndio ao longo da vida útil. Na intercessão das curvas de “*gastos em meios de proteção contra incêndio*” e “*prejuízos em sinistros*” (Figura 3.2) recomenda-se a transferência dos riscos, através de coberturas de seguro, por exemplo. Na prática, este ponto só poderá ser identificado, se houver vontade e um plano de ação estruturado pelos administradores do edifício para tal verificação. A superposição das duas curvas (Figura 3.3), ou seja, a somatória das duas curvas apresentadas na Figura 3.2, permite uma visão dos gastos totais em medidas de proteção contra incêndio.

Figura 3.2: Relação entre os gastos em meios de proteção contra incêndio e os prejuízos com sinistros.

Figura 3.3: Relação entre os gastos totais em meios de proteção contra incêndio.

Nas Figuras 3.2 e 3.3, tempo representa a vida útil do edifício. O ponto adequado de investimento é o ponto ótimo da curva e representa o mínimo de investimento em sistemas de proteção para o qual se garante o máximo de proteção contra incêndio ou o mínimo de probabilidade de ocorrência de sinistros em um edifício. Para se manter o mesmo nível de proteção contra incêndio, são necessários investimentos maiores progressivamente ao longo dos anos, uma vez que ocorre deterioração do edifício pelo uso, gerando maior potencial de risco de incêndio ano após ano. Como exemplo desta obsolescência, cita-se a deterioração das instalações elétricas. Grande parte das ocorrências de início de incêndio em edifícios se deve a curto circuito das instalações elétricas devido a sobrecarga ou má conservação das mesmas.

A Tabela 3.3 mostra a relação entre o valor do benefício esperado e o custo do investimento em medidas de proteção para edifícios de um único pavimento, elaborado pelo “*Swedish Institute of Steel Construction*”. Valores maiores que 1 indicam saldo positivo e valores menores que 1 indicam que o investimento inicial não deve ser recuperado durante uma vida útil média de 20 anos.

Tabela 3.3 – Relação entre o valor do benefício esperado e o custo do investimento em medidas de proteção contra incêndio (FIRE ENGINEERING DESIGN FOR STEEL STRUCTURES apud VARGAS & SILVA, 2003).

Medidas de proteção contra incêndio em edifícios térreos				
Carga de Incêndio	Chuveiros Automáticos	Ventilação do Incêndio	Resistência ao fogo	
			Estrutura	Paredes
Alta	4	0,8	0,1	10
Média	1	2	0,2	3
Baixa	0,1	0,6	0,03	0,8
Todas: alta, média e baixa	1,3	1,2	0,1	4

De acordo com a Tabela 3.3, pode-se concluir que sistemas de chuveiros automáticos e resistência ao fogo de paredes de compartimentação, em edifícios com média e alta carga de incêndio fornecem um saldo positivo. Ainda de acordo com a Tabela 3.3 apresentada, investimentos em resistência ao fogo de estruturas não apresentam retorno para edifícios de 1 pavimento durante uma vida útil de 20 anos. Sabe-se que o colapso dos elementos estruturais em edifícios de um único pavimento tem pequena influência na perda do conteúdo, uma vez que este já é consumido pelo fogo, mas por outro lado, em edifícios de muitos pavimentos, a resistência ao fogo dos elementos estruturais assume maior importância, sobretudo para evitar danos ao conteúdo em outras partes do edifício distantes do local do incêndio. Desta forma, quanto mais pavimentos possui o edifício, maior é a importância da resistência ao fogo das estruturas.

Um adequado sistema de segurança contra incêndio deve ser selecionado após uma análise de risco de incêndio. Não é suficiente apenas identificar o dano provável a propriedade devido ao fogo, mas, sobretudo, torna-se necessário também identificar a extensão do dano material que pode ser suportável. Desta forma, dentro de um conceito mais abrangente do “*Gerenciamento de Riscos*”, é sempre necessário que se procure conhecer os riscos de incêndio, sua probabilidade de ocorrência e a magnitude de seus possíveis danos. Não é simples, contudo, manter uma noção mais precisa dos possíveis riscos de incêndio, na medida em que, as atividades desenvolvidas dentro de uma edificação modificam periodicamente a probabilidade de incêndio e o próprio uso da edificação cria condições para o aumento deste risco, como por exemplo: a falta de manutenção periódica nos extintores e hidrantes, o acúmulo de material combustível em determinados compartimentos, a não manutenção ou sobrecarga das instalações elétricas, etc.

Para se determinar o nível de segurança contra incêndio em um edifício, um pré-requisito é uma visão racional sobre quais decisões tomar, qual modelo de proteção utilizar. Os custos dos meios de proteção estão em um lado da balança e os benefícios estão em outro. Assim, uma simples análise de custo-benefício oferece uma quantidade de necessidades de proteção. A metodologia mais comum para a criação de um sistema de proteção contra incêndio é o do “*fim x meio*”, onde um objetivo é privilegiado e a solução que apresenta melhor custo-benefício é escolhida. Esta visão só é razoável quando um objetivo de segurança contra incêndio é eleito sobre todos os outros.

Um sistema de proteção contra incêndio possui mais de um objetivo. Conseqüentemente, com vários objetivos a considerar, uma matriz de objetivos é necessária e facilitará a avaliação de diversos sistemas de proteção em relação aos diversos objetivos. A análise de risco de incêndio em função do sistema de proteção revela complexas relações entre os constituintes do sistema, as políticas de seguros da empresa, as ações de gerenciamento de riscos, indicando as maiores exposições de risco de incêndio, nos piores cenários.

É importante ressaltar que a análise de risco de incêndio, a criação de um sistema de proteção contra incêndio e o gerenciamento de riscos são matérias multidisciplinares, que envolvem uma gama de profissionais e experiências desde o arquiteto, o engenheiro civil, mecânico, elétrico ou químico, até os engenheiros de risco das companhias de seguro, passando pelos profissionais do Corpo de Bombeiros ou dos Órgãos Municipais.

Diante da dificuldade de quantificação e avaliação do risco de incêndio e do desenvolvimento de sistemas de proteção contra incêndios em edifícios, muitas metodologias de abordagem deste tema foram desenvolvidas, porém, não existe apenas uma abordagem ou metodologia para o estudo do risco de incêndio ou desenvolvimento de um projeto de sistemas de proteção contra incêndio. A Tabela 3.4 apresenta vinte passos necessários para a avaliação do risco de incêndio e planejamento dos sistemas de proteção propostos por RASBASH apud SHIELDS & SILCOCK (1987).

Tabela 3.4 – Sistema de avaliação de risco de incêndio e desenvolvimento de sistemas protecionais passo a passo (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Passo		Critério
1	Definição do risco	Áreas de risco ocupadas na edificação
2	Definição dos objetivos	Balanceamento dos custos da prevenção de incêndio e dos riscos residuais
3	Identificação e quantificação dos materiais combustíveis	Materiais celulósicos, não-celulósicos e sua distribuição
4	Identificação e quantificação das fontes de ignição	Fontes de ignição
5	Identificação e quantificação das condições de propagação do fogo	Espaçamento de materiais combustíveis e relação entre compartimentos
6	Identificação e quantificação de agentes que podem causar incêndios	Falhas: humanas, mecânicas, elétricas, etc.
7	Estimativa da probabilidade de início de incêndio	Análise: árvore de eventos, árvore de decisões, métodos estatísticos, modelos de previsão de incêndio, etc
8	Pesquisa dos meios de proteção contra o fogo	Deteção, controle, extinção
9	Estimativa do comportamento do fogo	Análise sistêmica
10	Estimativa dos danos produzidos pelo fogo	Calor, pressão, fumaça, gases tóxicos, agentes corrosivos, etc.
11	Estimativa de produção de danos produzidos pelo fogo	Quantidades, interrelações
12	Pesquisa dos métodos de proteção contra incêndio	Isolamento, segregação, compartimentação, saídas de escape, projetos, controle da fumaça, etc
13	Estimativa dos danos diretos decorrentes de um incêndio	Análise da árvore de falha
14	Identificação de possíveis danos ao processo no risco/edifício	Resultado de análise de cada área do risco/edifício
15	Pesquisa sobre meios de proteção de processos na edificação	Passo 12, plano de contingência
16	Estimativa total de perdas e danos resultantes de um incêndio	Base de probabilidades de expectativa de perdas e danos
17	Proposição de mudanças numa situação de risco de incêndio	Rever todos os passos anteriores
18	Estimativa das mudanças efetivas	Cálculo do custo / benefício
19	Definição de uma metodologia aceitável para o atingimento dos objetivos	Formulação de metodologias para atingimento dos objetivos
20	Formulação de requisitos	Aumento do leque de possibilidades de sistemas de proteção oferecidas aos projetistas

Na prática, a grande dificuldade da implementação do “*Gerenciamento de Riscos*” é a administração diária do risco de incêndio dentro de um edifício, uma vez que não basta que ele apresente sistemas de proteção contra incêndio, mas é fundamental que eles mantenham um bom nível de manutenção, como por exemplo, recarga anual dos extintores, testes dos hidrantes mensalmente, etc. Além disto, a brigada de incêndio deve ser treinada periodicamente e as instalações elétricas devem estar em bom estado de conservação. A carga de incêndio também não deve ser majorada durante a vida útil do edifício. Um plano de ação contra incêndio deve contemplar ações diárias, do contrário, a probabilidade de que haja uma falha aumenta, incrementando o risco de incêndio. A Figura 3.4 apresenta dois grupos de edifícios, sendo que o primeiro grupo não possui um plano de gerenciamento de risco de incêndio, ao passo que o segundo grupo abriga edifícios com planejamento de ações que visam mitigar riscos de incêndio. Vale notar que ao longo da vida útil do edifício, pelo uso e obsolescência do próprio edifício, aumenta-se a probabilidade de ocorrência de um incêndio, na medida em que os sistemas de proteção contra incêndio perdem funcionalidade, as instalações elétricas envelhecem, aumentando-se o risco de curto circuito e existe a tendência de acúmulo de material combustível dentro dos compartimentos aumentando-se a carga de incêndio. Desta forma, a existência de um plano de “*Gerenciamento de Riscos*” bem estruturado ajuda a pelo menos manter em níveis aceitáveis o risco de início de incêndio dentro de um edifício.

É importante ressaltar que se menciona “*Gerenciamento de Risco de Incêndio*” e não “*Eliminação de Risco de Incêndio*”, uma vez que o risco de incêndio sempre existe, na medida em que haja 3 (três) componentes dentro de um edifício: material combustível, fonte de ignição e ventilação. Em havendo a possibilidade do surgimento de um foco de incêndio dentro do edifício e material combustível suficiente para sua propagação é impossível que se elimine totalmente o risco de incêndio. Desta forma, o termo “*Gerenciamento de Risco de Incêndio*” engloba uma série de medidas mitigadoras para que não surja o foco de incêndio e em surgindo, que ele seja extinto antes do “*flashover*”, e em ocorrendo o “*flashover*”, que o incêndio não se propague para outros compartimentos, e em se propagando para outros compartimentos que a empresa tenha seguro contra incêndio capaz de fazer frente aos seus prejuízos financeiros decorrentes do sinistro.

Figura 3.4 – Probabilidade de risco de incêndio em um edifício x idade do mesmo em função da existência de um plano de gerenciamento de riscos.

Por fim, a Tabela 3.5 apresenta um sumário dos fatores relacionados ao incêndio que podem influenciar na sua severidade, na segurança da vida e na segurança patrimonial.

Tabela 3.5 – Resumo dos fatores relacionados ao incêndio e suas influências (VARGAS & SILVA, 2003).

Fatores	Influência na:		
	Severidade do incêndio	Segurança da vida	Segurança do patrimônio
Tipo, quantidade e distribuição da carga de incêndio	A temperatura máxima de um incêndio depende da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício	O nível do enfumaçamento, toxidade e calor depende da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício	O conteúdo do edifício é consideravelmente afetado por incêndios de grandes proporções
Características da ventilação do compartimento	Em geral, o aumento da oxigenação faz aumentar a temperatura do incêndio e diminuir sua duração	A ventilação mantém as rotas de fuga livres de níveis perigosos de enfumaçamento e toxidade	A ventilação facilita a atividade de combate ao incêndio por evacuação da fumaça e dissipação dos gases quentes
Compartimentação	Quanto mais isolantes forem os elementos de compartimentação (pisos e paredes), menor será a propagação do fogo para outros ambientes, porém o incêndio será mais severo no compartimento	A compartimentação limita a propagação do fogo, facilitando a desocupação da área em chamas para áreas adjacentes	A compartimentação limita a propagação do fogo, restringindo as perdas
Resistência ao fogo das estruturas	A resistência ao fogo das estruturas de aço/concreto, por serem incombustíveis, não afeta a severidade do incêndio. Às vezes, o desmoronamento de parte da edificação (coberturas, por exemplo) aumenta a oxigenação e reduz a duração do incêndio	A resistência ao fogo das estruturas têm pequeno efeito na segurança à vida em edifícios de pequena altura ou área, por serem de fácil desocupação. No caso de edifícios altos é essencial prever a resistência ao fogo, indicada na legislação ou em normas, para garantir a segurança ao escape dos ocupantes, às operações de combate e à vizinhança	A resistência ao fogo dos elementos estruturais é fundamental para garantir sua estabilidade. Geralmente, o custo do conteúdo supera o custo da estrutura, porém, o colapso estrutural pode trazer consequências danosas às operações de combate ao fogo ou à vizinhança. Neste caso, há imposições legais ou normativas de resistência. Se o risco for mínimo, a verificação de resistência estrutural ao fogo pode ser dispensada
Rotas de fuga seguras	-	Rotas de fuga bem sinalizadas, desobstruídas e seguras estruturalmente são essenciais para garantir a evacuação e dependem do tipo de edificação. Em um edifício industrial, térreo, aberto lateralmente, a rota de fuga é natural. Em um edifício de muitos pavimentos podem ser necessárias escadas enclausuradas, elevadores de emergência, etc	-

Fatores	Influência na:		
	Severidade do incêndio	Segurança da vida	Segurança do patrimônio
Reserva de água	Água e disponibilidade de pontos de suprimento são necessárias para extinção do incêndio, diminuindo os riscos de propagação e seus efeitos à vida e ao patrimônio		
Detecção de calor ou fumaça	A rápida detecção do incêndio, apoiada na eficiência da brigada contra incêndio e corpo de bombeiros, reduzem o risco da propagação do incêndio	A rápida detecção do início do incêndio, por meio de alarme, dá aos ocupantes rápido aviso da ameaça, antecipando a desocupação	A rápida detecção do início de um incêndio minimiza o risco de propagação, reduzindo a região afetada pelo incêndio
Chuveiros automáticos (sprinklers)	Projeto adequado e manutenção de sistema de chuveiros automáticos são internacionalmente reconhecidos como um dos principais fatores de redução do risco de incêndio, pois contribuem, ao mesmo tempo, para a compartimentação, a detecção e a extinção	Chuveiros automáticos limitam a propagação do incêndio e reduzem a geração de fumaça e gases tóxicos	Chuveiros automáticos reduzem o risco de incêndio e seu efeito na perda patrimonial
Hidrantes e extintores	Hidrantes, extintores e treinamento dos usuários da edificação para o rápido combate reduzem o risco de propagação do incêndio e seu efeito ao patrimônio e à vida humana		
Brigada contra incêndio bem treinada	A presença de pessoas treinadas para prevenção e combate reduz o risco de início e propagação de um incêndio	Além de reduzir o risco de incêndio, a brigada coordena e agiliza a desocupação da edificação	A presença da brigada contra incêndio reduz o risco e as consequentes perdas patrimoniais decorrentes de um incêndio
Corpo de Bombeiros	Proximidade, acessibilidade e recursos do Corpo de Bombeiros otimizam o combate ao incêndio, reduzindo o risco de propagação	Em grandes incêndios, o risco à vida é maior nos primeiros instantes. Desta forma, deve haver medidas de proteção independentes da presença do Corpo de Bombeiros. Um rápido e eficiente combate por parte do CB reduz o risco à vida	Proximidade, acessibilidade e recursos do Corpo de Bombeiros facilitam as operações de combate ao incêndio, reduzindo perdas estruturais e do conteúdo
Projeto de engenharia de incêndio	Um projeto de engenharia de segurança contra incêndio deve prever um sistema de segurança adequado ao porte e à ocupação da edificação, de forma a reduzir o risco de início de um incêndio, a facilitar a desocupação e as operações de combate. Desta forma, reduzir a severidade do incêndio, as perdas de vidas e patrimoniais		

Com o surgimento da consciência de que os modernos edifícios de múltiplos pavimentos construídos nos Estados Unidos, projetados segundo padrões de construção, apresentavam pontos falhos quanto à segurança, a “*National Fire Protection Association*” criou um comitê de estudo voltado a este tema, na primeira metade do século XX, o qual se propunha a estudar problemas relativos às estruturas de edifícios de grande altura. Da proposição inicial, evoluiu-se para um objetivo mais abrangente, dirigido para sistemas de proteção 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*” (MELHADO, 1990). Esta “*Árvore de Decisões*” pode auxiliar na aplicação dos conceitos de “*Gerenciamento de Riscos*”.

A idéia foi propor um tratamento da questão da segurança contra incêndio em nível de projeto através de uma abordagem sistêmica, para a qual deveriam ser identificados os seus aspectos fundamentais, a participação ou influência de cada um e as inter-relações entre eles. Assim, foi possível definir um sistema a partir da definição das partes, onde comparecem relações hierárquicas, para se chegar à criação da “*Árvore de Decisões*”.

O “*Método de Gretner*” fornece uma avaliação quantitativa do projeto de segurança contra incêndio, porém, para uma análise qualitativa, pode-se utilizar a “*Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio*”. Este método de análise de risco de incêndio em um edifício baseia-se no NFPA 550 – “*Fire Safety Concepts Tree*”, do “*National Fire Protection Association*” dos Estados Unidos e é conhecido como “*Gerenciamento por Objetivos*”, sendo explicitados, a seguir, os três elementos básicos de segurança contra incêndio:

- Salvaguarda da vida humana;
- Proteção da propriedade;
- Continuidade das atividades (empresa ou edifício);

Existem duas estratégias a seguir dentro da árvore para atingir o objetivo de segurança contra incêndio:

- Prevenir a ignição de incêndio, ou;
- Gerenciar o impacto do incêndio;

Em tese, a aplicação de uma das estratégias acima mencionadas pode garantir um bom nível de segurança contra incêndio, porém, na prática, são aplicadas ambas as estratégias para aumentar a confiabilidade do sistema de proteção de incêndio como um todo.

Alguns conceitos devem ser fixados para melhor entendimento da árvore, conforme a seguir:

- Os quadros estão ligados por portas tipo “E” e “OU” nos diversos níveis;
- A porta tipo “OU” significa que uma ou outra estratégia ou elemento pode ser escolhido;
- A porta tipo “E” significa que os elementos que estiverem no mesmo nível devem ser atendidos conjuntamente;
- As estratégias são as medidas de segurança a serem executadas;
- As normas técnicas são os instrumentos básicos de projeto das medidas de segurança;

O fluxograma da “Árvore de conceitos de segurança contra incêndio” está apresentado em quatro figuras, conforme abaixo:

- Figura 3.5 – representa o objetivo de segurança contra incêndio;
- Figura 3.6 – representa os elementos de prevenção à ignição de incêndio;
- Figura 3.7 – representa os elementos de gerenciamento do incêndio;
- Figura 3.8 – representa os elementos de gerenciamento do exposto;

O ramo “*prevenir a ignição do incêndio*” representa as medidas regulamentadas no “Código de Prevenção contra Incêndio” (NFPA nº 1). Este código vem sendo aperfeiçoado ao longo de décadas com a participação de vários segmentos da sociedade que fazem parte da sua comissão regulamentadora.

Figura 3.5 – Ramo da Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio – Segurança contra Incêndio (Fonte: SEITO, 1995)

Figura 3.6 – Ramo da Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio – Prevenir Ignição do Fogo (Fonte: SEITO, 1995)

Figura 3.7 – Ramo da Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio – Elementos de Gerenciamento do Incêndio (SEITO, 1995)

Figura 3.8 – Ramo da Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio – Elementos de Gerenciamento de Exposto (SEITO, 1995)

A “*Árvore de Conceitos de Segurança contra Incêndio*” é um guia geral qualitativo para avaliação de segurança contra incêndio em edificações. Ela possui diversos usos, sendo os mais comuns:

- Guia para reorganização de normas;
- Organização de normas;
- Realimentar sistemas com informações;
- Investigação das causas de um incêndio;
- Ferramenta utilizada em projetos de sistemas de proteção contra incêndio;
- Ferramenta de verificação e avaliação de sistemas de proteção contra incêndio em edificações – guia de análise de risco de incêndio ou gerenciamento de risco de incêndio.

A principal limitação da “*Árvore*” é a incapacidade para a análise simultânea de múltiplos objetivos. Podem existir dez objetivos distintos em um edifício, entretanto, um ramo da árvore pode ser usado apenas para avaliar o sucesso da realização de cada objetivo individualmente, não existindo um caminho adequado para avaliar coletivamente múltiplos objetivos e suas inter-relações.

As várias expressões utilizadas na “*Árvore*” possuem significados conforme a seguir:

1. **Aplicar agentes extintores (automaticamente):** é o desempenho da ação automática de supressão do incêndio em resposta à detecção automática;
2. **Aplicar agentes extintores suficientes (manualmente):** é o desempenho da ação manual de supressão do incêndio em resposta ao local do incêndio;
3. **Calor – energia:** é o termo usado para indicar que somente a energia em forma de calor é considerada;
4. **Comunicar o sinal:** é transmitir o conhecimento da detecção de um incêndio por meio das pessoas ou automaticamente ou combinação de ambos para um painel de informações responsável;
5. **Confinar ou conter o incêndio:** é prover o edifício com construções ou equipamentos de modo a limitar o incêndio e/ou produtos do incêndio dentro de barreiras em redor da área de origem do incêndio;
6. **Controlar a distribuição do combustível:** é controlar o arranjo (distribuição) do combustível no ambiente;

7. **Controlar a fonte de calor – energia:** é limitar as características e usos das fontes de calor – energia;
8. **Controlar a ignitabilidade do combustível:** é controlar a ignição fácil do(s) combustível(eis) no ambiente;
9. **Controlar a interação fonte – combustível:** é o controle da relação existente entre a fonte de calor e o combustível, de modo a limitar o calor desenvolvido pela fonte de modo que a temperatura do combustível fique abaixo da de sua ignição;
10. **Controlar a propriedade do combustível:** é controlar as propriedades inerentes do combustível;
11. **Controlar a razão do desenvolvimento do calor – energia:** é o controle do fluxo de energia térmica desenvolvido pela fonte calor – energia;
12. **Controlar o ambiente:** é o controle das características inerentes ou situacionais do ambiente;
13. **Controlar o movimento do incêndio:** é controlar a propagação do incêndio e os produtos da combustão pelo projeto construtivo do edifício e instalação de equipamentos;
14. **Controlar o processo de transporte de calor – energia:** é alterar a razão de calor sobre o combustível, através do controle do mecanismo de transferência de calor, de modo a evitar sua ignição;
15. **Controlar o transporte da fonte de calor – energia:** é prevenir a movimentação da fonte de calor – energia para locais com risco de iniciar o incêndio;
16. **Controlar o transporte de combustível:** é prevenir que se coloque combustíveis em locais onde possam ignizar-se;
17. **Controlar:** significa controlar, alterar ou afetar o fator referenciado;
18. **Controle do combustível (gerenciar o incêndio):** é a influência do processo da combustão pelo controle da pré-ignição, levando em conta as características inerentes ou situacional do combustível;
19. **Controle do combustível (prevenir a ignição do incêndio):** é limitar as características e uso do combustível;
20. **Controle do incêndio pela construção:** é controlar o crescimento do incêndio e da movimentação dos produtos do incêndio através do projeto

construtivo e instalação de equipamentos, sem levar em conta o comportamento do processo do incêndio;

21. **Controle do processo de combustão:** é controlar o comportamento inerente do incêndio;
22. **Decidir ações:** é a determinação de ação própria na comunicação da existência do incêndio;
23. **Defender contra produtos do incêndio (combustão):** é salvaguardar o exposto usando meios que previnem a presença ou controlam o impacto dos produtos do incêndio no local;
24. **Defender o exposto no local:** é a defesa do exposto onde estão localizados no momento do início do incêndio;
25. **Defender o local:** é a defesa do local ocupado pelo exposto;
26. **Detectar o fogo (automático):** é a identificação do fogo sem a ação humana;
27. **Detectar o fogo (para supressão manual):** é a identificação do fogo por pessoas ou mecanismo automático;
28. **Eliminar a fonte de calor – energia:** é a eliminação de qualquer local, material ou objeto que possa originar energia térmica ou a partir deles a energia possa ser transferida;
29. **Eliminar o combustível:** é a eliminação de todo o material combustível;
30. **Exposto:** é qualquer ou todos os itens especificados no objetivo da segurança contra incêndio (pessoas, parte do edifício, edifício, atividades, ocupação, ou outra consideração valiosa);
31. **Gerenciar o exposto:** é a coordenação das medidas de controle de incêndio e ou produto da combustão;
32. **Gerenciar o impacto do incêndio:** é a coordenação das medidas para limitar qualquer aquecimento proveniente direta ou indiretamente do incêndio e ou produtos da combustão;
33. **Gerenciar o incêndio:** é a coordenação das medidas de controle do incêndio e ou produtos da combustão;
34. **Limitar a quantidade de combustível:** é a limitação da quantidade máxima do combustível que pode ser envolvida no incêndio, potencialmente;
35. **Limitar a quantidade do exposto:** é a limitação da quantidade máxima do exposto;

36. **Manter o ambiente essencial:** é assegurar a prevenção suficiente, remoção, dissipação ou neutralização das condições adversas, que são o fogo e ou os produtos da combustão conhecidos pela experiência obtida pelo exposto do local;
37. **Movimentação restrita do exposto:** é a prevenção da movimentação do exposto além do limite do lugar defendido;
38. **Movimentação do exposto:** é a movimentação do exposto para o local seguro;
39. **Prevenir a ignição do incêndio:** é a presença do início da combustão destrutiva ou incontrolada;
40. **Produtos da combustão:** são a chama, calor, fumaça e gases;
41. **Prover destinação segura (para o exposto):** é providenciar local seguro para colocar o exposto;
42. **Prover estabilidade estrutural:** é manter a efetividade construtiva do edifício e dos equipamentos instalados;
43. **Prover meios de movimentação:** é a providência de meios necessários para ter caminho seguro através do qual o exposto pode ser recolocado;
44. **Prover separação (transporte da fonte de calor):** providenciar e manter a separação entre o combustível e a fonte de calor agindo sobre a fonte de calor;
45. **Prover separação (transporte de combustível):** é providenciar e manter a separação entre o combustível e a fonte de calor agindo somente no combustível;
46. **Remover o fogo:** é providenciar na construção do edifício os meios para controlar o fogo pela sua remoção e ou produto da combustão;
47. **Resposta no local:** é iniciar no próprio local do incêndio a ação supressiva manual do fogo;
48. **Salvaguardar o exposto:** é o ato sobre o exposto e sua vizinhança para protegê-lo do impacto do incêndio;
49. **Supressão automática do incêndio:** é o desempenho da ação feita automaticamente sobre o processo do fogo de modo a limitar o desenvolvimento ou extinção do incêndio;

50. **Supressão manual do incêndio:** é o desempenho da ação manual sobre o processo do incêndio de modo a limitar seu crescimento ou fazer sua extinção;
51. **Suprimir o incêndio:** é o desempenho das ações sobre o processo do incêndio de modo a limitar seu desenvolvimento ou fazer sua extinção;

4. ASPECTOS DE SEGURO INCÊNDIO E LEGISLAÇÃO CONTRA INCÊNDIO DOS EDIFÍCIOS

O Seguro foi criado com o objetivo de servir como uma ferramenta que progressivamente se aperfeiçoa para restabelecer o equilíbrio perturbado pelo sinistro, atendendo total ou parcialmente a estas necessidades de reparo ou recomposição de danos que possam gerar algum prejuízo nas mais diversas atividades envolvendo o homem e a sociedade como um todo.

É importante destacar que o seguro incêndio visa primordialmente a segurança patrimonial e não a segurança à vida, na medida em que o objeto do contrato do seguro incêndio é o patrimônio do segurado. Cabe ressaltar, entretanto, que o aumento do nível de proteção provocado pelo seguro incêndio indiretamente provoca um incremento de segurança à vida. A legislação de segurança contra incêndio possui como objetivo principal a segurança a vida dentro do edifício. Esta diferença de foco entre o seguro e a legislação pode criar, em alguns casos, divergências no tratamento da questão risco de incêndio em edifícios.

4.1 Considerações sobre seguro incêndio

O seguro incêndio é o ramo do seguro que tem por objetivo atenuar o prejuízo, decorrente de um sinistro incêndio coberto em uma apólice de seguros, que um edifício ou instalação venha a sofrer. Por exemplo, pode-se citar uma indústria que deseja realizar o seguro contra incêndio de suas instalações. É necessário, preliminarmente, que exista um padrão mínimo de segurança contra incêndio e um plano de mitigação de riscos de incêndio para que esta empresa “se torne um risco aceitável” pelas Companhias Seguradoras. Explicando-se de uma outra forma, as Seguradoras exigem das empresas e das pessoas que comprem seguro um padrão mínimo de segurança, sem o qual estas pessoas e empresas não conseguem comprar seguro. Nesta medida, “risco aceitável” é, por exemplo, um determinado edifício que cumpre regras mínimas de segurança contra incêndio exigidas pelas seguradoras. As regras exigidas pelas seguradoras podem ser, em alguns aspectos (principalmente com relação à segurança patrimonial), mais severos que a legislação contra incêndio. Desta forma, o seguro incêndio apresenta duas dimensões importantes:

- Contribui para a segurança contra incêndio na medida em que suas normas exigem a existência de sistemas de proteção contra incêndio e as seguradoras realizam inspeção nos edifícios anualmente, gerando relatórios que apontam deficiências na prevenção de incêndios dentro destes edifícios;
- Contribui para o meio social na medida em que dá suporte à continuidade da atividade da empresa e por consequência ajuda a manter os empregos oferecidos pela mesma.

4.2 Matriz de Sinistralidade (Frequência x Severidade)

A Matriz de Sinistralidade é uma importante ferramenta para enquadramento de riscos / bens segurados dentro de uma Seguradora. A partir da análise da Matriz de Sinistralidade, a Seguradora irá se posicionar sobre a realização ou não de determinado seguro, ou até mesmo sobre a aplicação de algum desconto sobre o prêmio de seguro incêndio. Desta forma, a Matriz de Sinistralidade relaciona a frequência de ocorrência de alguns eventos (por exemplo: incêndio) com a severidade dos mesmos. Severidade, neste caso, refere-se aos prejuízos decorrentes do evento em questão, no exemplo dado: incêndio.

Na proposta de estudo em questão, analisa-se a Matriz de Sinistralidade somente para riscos de incêndio em um edifício, porém, ela pode ser estendida para qualquer tipo de construção ou instalação e também para qualquer tipo de evento, por exemplo, inundação, ciclones, terremotos, etc.

Os edifícios podem ser classificados em quadrantes A, B, C e D da Matriz de Sinistralidade, de acordo com a Figura 4.1. O quadrante A representa o conjunto de edifícios com menor frequência de ocorrência de sinistros de incêndio, porém, com maior severidade e conseqüentemente, maiores danos resultantes do incêndio. Neste caso, as empresas estão propensas a realizar o seguro quando, através de uma avaliação de riscos, as mesmas detectam a possibilidade de que um evento de incêndio seja severo e traga, portanto, grande prejuízo material. Para um edifício que sirva de depósito de material combustível, porém com a presença de bons sistemas de proteção contra incêndio, o mesmo se enquadra no quadrante “A”, porque, se existir o incêndio, a possibilidade de que ele seja severo e traga grande prejuízo material é bastante grande.

Por sua vez, as Seguradoras aceitam riscos que possuam a característica do quadrante A porque a frequência de ocorrência de sinistros de incêndio para este grupo é baixa, ou seja, a Seguradora realizará, em princípio, poucas indenizações. Portanto, esta baixa frequência permite um equilíbrio financeiro das Seguradoras, ou seja, do montante total de prêmio que elas arrecadam, em linhas gerais, somente uma parte será destinada ao pagamento de sinistros.

Quando um determinado edifício é classificado no quadrante B, significa que a severidade dos incêndios ocorridos é grande e a frequência em que eles ocorrem também é grande. Pode-se citar, como exemplo, de um edifício que se enquadre nesta situação, um depósito de artigos de papel, que possui, portanto, grande carga de incêndio e não possui sistemas de proteção contra incêndio (extintores, hidrantes ou sprinklers). Além disso, não existe compartimentação no edifício, o que facilita a propagação do fogo e as instalações elétricas estão em estado precário de manutenção. Neste caso específico, qualquer fonte de ignição pode gerar um incêndio de grandes proporções. Provavelmente, os responsáveis pelo depósito desejem realizar seguro contra incêndio do mesmo porque a severidade de um evento desta natureza seria muito grande, porém, dificilmente existirá uma Seguradora que aceite realizar o seguro de incêndio deste depósito devido a grande probabilidade ou grande potencial para início de um incêndio de grandes proporções.

Figura 4.1 – Matriz de Sinistralidade.

No quadrante C estão classificados aqueles edifícios que possuem baixa probabilidade de ocorrência de incêndios severos e, também, baixa frequência de sinistros ou baixo potencial para início e propagação de um incêndio. Estão classificados neste quadrante, aqueles edifícios com bom projeto de segurança contra incêndio: proteção passiva das estruturas, concepção arquitetônica adequada (compartimentação dos ambientes, utilização de paredes e portas corta-fogo, etc) e sistemas de proteção contra incêndio (extintores, hidrantes, sprinklers, alarmes de incêndio, etc) em bom estado de conservação. Nestes edifícios, o risco ou a probabilidade de início de um incêndio é baixo, e se ele ocorrer também é baixa a probabilidade que ele se propague por todo ou uma parte considerável do edifício. Portanto, neste caso, a frequência e a severidade são baixas. Para estes edifícios, os gerenciadores de risco não estão propensos a realizar seguro contra incêndio, ou requerem algum desconto sobre o prêmio de seguro, uma vez que a possibilidade de sinistros é remota. Por sua vez, as Seguradoras estão propensas a oferecer seguro contra incêndio para estes edifícios, e, geralmente, oferecem um desconto sobre o prêmio de seguro, uma vez que a possibilidade de que elas absorvam um prejuízo decorrente de um sinistro de incêndio também é remota.

O último quadrante (D) apresenta uma situação em que a frequência se eleva, porém a severidade permanece baixa. Neste caso, o risco de início de incêndio, dentro da edificação, é relativamente alto, sendo as suas conseqüências, em princípio, não tão

danosas. Portanto, dentro deste cenário, os gerenciadores de risco estão propensos a realizar o seguro devido a frequência de ocorrências de sinistros. A Seguradora, por sua vez, aceita realizar o seguro, porém estabelece uma franquia mínima, ou seja, uma participação do segurado na absorção dos prejuízos em cada sinistro ocorrido. Desta forma, na situação do quadrante D, a Seguradora, ao estabelecer uma franquia mínima para diminuir o pagamento de pequenas indenizações, torna menos interessante para os gerenciadores de risco a compra de um seguro contra incêndio.

4.3 O Conceito de PMP (Perda Máxima Possível)

O PMP (Perda Máxima Possível) é outra ferramenta importante no campo do seguro incêndio na medida em que ela norteia a perda máxima que a Seguradora pode incorrer realizando determinado contrato de seguro. Assim, o PMP (Perda Máxima Possível) é uma estimativa de perda máxima, decorrente de um sinistro de incêndio em um edifício, realizada a partir da elaboração de um cenário de incêndio extremamente desfavorável. Dentro do conceito de análise de risco de incêndio e gerenciamento de risco de incêndio, o tópico PMP, relaciona-se ao cenário mais severo de incêndio dentro de uma edificação. Para a estimativa do PMP, consideram-se inativos, falhos ou até mesmo inexistentes os sistemas de proteção ativa da edificação, a não atuação da Brigada de Incêndio e a chegada do Corpo de Bombeiros após o “*flashover*”. Este cenário crítico reflete o prejuízo máximo ou o máximo dano material que pode ocorrer em um edifício.

Este conceito é importante porque norteia os gerenciadores de risco, os administradores, as seguradoras, e outros diretamente envolvidos na administração e manutenção de edifícios. O enquadramento do edifício num dos quadrantes A, B, C e D, conforme a Matriz de Sinistralidade exposta anteriormente (Figura 4.1), auxilia na tomada de decisão dos administradores. Por exemplo, se é importante ou não a colocação de sistemas ativos de proteção, se é necessário ou não treinar mais a pessoas para compor a Brigada de Incêndio, ou até mesmo se é importante a realização do seguro incêndio do edifício. Da parte da Seguradora, a estimativa e a análise do PMP é fundamental para se exigir melhorias de manutenção do edifício, implementação de sistemas de segurança ou até mesmo avaliar uma indenização máxima possível que a Seguradora se veria obrigada a cumprir caso o cenário de incêndio mais desfavorável ocorresse. Além disto, o PMP auxilia na tomada de decisão da Seguradora com relação a realização de

resseguro de determinado seguro. Resseguro é a co-participação de outras empresas de seguro, chamadas Resseguradores, que estão presentes em uma determinada apólice de seguro com o objetivo de pulverizar o risco da Seguradora principal, ou seja, no caso de ocorrência de um sinistro, a indenização é distribuída entre os diversos parceiros da Seguradora, cada qual com sua percentagem previamente acordada. A partir da análise do PMP, estimado a partir de um relatório de inspeção de risco, a Seguradora pode até se negar a realizar o seguro de incêndio de determinado edifício.

Os fatores abaixo são determinantes na construção do cenário do PMP:

- **Sistemas de proteção (ativos e passivos) contra incêndio:** existência de chuveiros automáticos, extintores adequados à classe de risco (pó químico ou água para materiais celulósicos, gás carbônico para instalações e materiais elétricos, espuma para inflamáveis, etc), hidrantes, alarmes de detecção de fumaça, etc, e se eles estão em bom estado de conservação com a devida manutenção periódica, ou seja, os extintores são recarregados anualmente, os hidrantes e as bombas de pressão funcionam periodicamente, a tubulação e reservatório de incêndio são inspecionados periodicamente, etc;
- **Estado de manutenção da edificação:** o edifício apresenta ou não bom estado de conservação, sem acúmulo de material combustível, instalações elétricas inspecionadas periodicamente, com proteção de conduites metálicos quando necessário e sem sobrecarga;
- **Carga de incêndio da edificação:** cada edifício é projetado para determinado uso e por isso apresenta já em projeto uma série de medidas de proteção contra incêndio adequadas ao seu uso. Desta forma, um edifício projetado para ser uma escola não pode se tornar um depósito de papelão sem prévia adaptação. Além disto, ao longo da vida útil do edifício é importante que a carga de incêndio previamente estipulada não seja majorada, com acúmulo, por exemplo, de materiais combustíveis em seu interior. Os materiais de revestimento e acabamento também podem contribuir para o aumento da carga de incêndio;
- **Concepção arquitetônica da edificação:** existência de compartimentos que isolam ambientes evitando ou retardando a propagação do fogo. A fachada pode permitir a passagem do fogo de um andar inferior para outro superior. Os shafts podem apresentar ou não isolamento térmico;

- **Existência e qualidade dos materiais de vedação térmica das estruturas (sistema de proteção passiva):** os elementos estruturais podem possuir algum sistema de revestimento térmico, por exemplo, argamassa de proteção térmica, tinta intumescente para estruturas de aço, tijolos ou cerâmica refratária para paredes de vedação, etc.

4.4 Classificação de riscos para fins de seguro a partir da TSIB

A TSIB (Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil) é a base para classificação de edifícios com relação ao risco de incêndio para fins de seguro no Brasil. Aborda-se, a seguir, os aspectos mais relevantes como conceituação de risco isolado, classes de construção e classificação de atividades desenvolvidos dentro dos edifícios. Toda esta classificação visa separar os edifícios por categorias no sentido de aplicar diferentes prêmios de seguro para cada categoria de risco. Desta forma, torna-se claro que o seguro de edifícios com maior probabilidade de risco de incêndio custa mais, proporcionalmente, se comparado aos edifícios com menor probabilidade de risco de incêndio.

De acordo com a TSIB, risco isolado significa edifícios separados dos demais edifícios por paredes ou espaços desocupados na forma dos itens (1) e (2), conforme a seguir.

- (1) Considera-se parede suficiente para separação de riscos a que apresente, simultaneamente, as seguintes condições:
 - a. Construção total de concreto armado ou de alvenaria, isto é, na qual não sejam empregados outros materiais além de cimento, pedra, areia, ferro, tijolos ou argamassa a base de cimento, cal, saibro e areia;
 - b. Divida os telhados;
 - c. Não tenha abertura de qualquer espécie, salvo as estritamente necessárias para a passagem de tubulações (estas tubulações deverão ser providas de válvulas de segurança e registros apropriados se forem destinadas ao transporte de inflamáveis), rosca sem fim, eixo de transmissões, ou tenha aberturas protegidas;
- (2) Consideram-se espaços desocupados suficientes para separação de riscos aqueles que apresentarem as dimensões indicadas no quadro a seguir (Tabela 4.1):

Tabela 4.1 – Distanciamento para configuração de risco isolado entre edifícios (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

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

A Tabela 4.1 apresenta o distanciamento mínimo entre edifícios para que os mesmos sejam considerados riscos isolados de acordo com a TSIB. O conceito de risco isolado é importante na medida em que se aplica um prêmio de seguro incêndio específico para cada “*risco isolado*”, ou seja, para cada edifício isolado de acordo com os padrões da TSIB. Cada “*risco isolado*” receberá uma taxa de seguro incêndio, maior ou menor, de acordo com o grau de risco de incêndio. O prêmio de seguro é o preço a ser pago pelo seguro, sendo o resultado do valor do bem segurável multiplicado pela taxa de seguro, que neste caso representa, em linhas gerais, a probabilidade de perda patrimonial decorrente de um sinistro de incêndio. Para edifícios com maior probabilidade de perda patrimonial decorrente de um incêndio, as taxas de seguro incêndio aplicadas são maiores.

As classes de construção, mencionadas anteriormente, podem ser definidas, de acordo com a TSIB, conforme a seguir:

- 1) **Classe 1** – Entende-se por edifícios classe 1 aqueles que apresentarem, simultaneamente, as seguintes características:
 - a. Estrutura integral de concreto armado ou de aço protegido por concreto ou alvenaria, entendendo-se por estrutura integral os pilares, vigas e cintas de amarração;

- b. Pisos de todos os pavimentos constituídos por lajes 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 existentes, 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, permitindo-se o emprego de chapas de cloreto de polivinila (PVC) e de poliéster quando aplicadas diretamente e em escala não superior a 25% da área total destas paredes;
- f. Cobertura de material incombustível assente em armação metálica ou de concreto, permitindo-se o emprego na cobertura de chapas de cloreto de polivinila (PVC) e de poliéster em escala não superior a 25% da cobertura total;
- g. Havendo elevadores, os vãos próprios, se existentes, fechados com material incombustível;
- h. Instalação de alimentadores e distribuidores dos circuitos de energia de força e luz embutida ou, se aparente, protegida por eletrodutos metálicos ou de plástico rígido e caixas metálicas;

1.1 Não prejudicam esta classe de construção:

- 1.1.1 Acabamentos de madeira ou de outro material combustível aplicados sobre lajes, escadas ou paredes incombustíveis, tais como, marcos, esquadrias, lambris e semelhantes;
- 1.1.2 Ripamento de madeira aplicado exclusivamente para servir de base ao assentamento da cobertura;
- 1.1.3 Forros falsos de material combustível para fins acústicos, térmicos ou de iluminação, desde que aplicados imediatamente sob tetos de concreto ou laje pré-moldada;
- 1.1.4 O uso de materiais combustíveis para sustentação de forros de material incombustível, nos casos em que não é exigida laje de concreto armado;
- 1.1.5 As construções sobre a laje de cobertura de prédios de 3 ou mais pavimentos;

- 1.1.6 Reconstrução parcial e os acréscimos em prédios de 3 ou mais pavimentos;
 - 1.1.7 A existência de partes em aberto nas paredes externas, limitadas a 25% da área total dessas paredes, não se admitindo o emprego de materiais combustíveis nas partes fechadas;
 - 1.1.8 Instalação elétrica de força e luz exposta, desde que protegida por bandeja, esteiras, escadas, canaletas e semelhantes;
 - 1.1.9 Quadros, centros, painéis ou caixas de instalação elétrica de força e luz, quando de madeira, desde que embutidos;
 - 1.1.10 Instalação elétrica aparente, por necessidade de segurança, devendo, neste caso, ser apresentado laudo explicativo, assinado por engenheiro eletricista, no qual constará, obrigatoriamente, que as instalações obedecem às especificações das Normas Brasileiras NB-3 da ABNT e PNB-158 da ABNT;
- 1.2 São dispensáveis as seguintes exigências, desde que satisfeitas as demais da classe 1:
- 1.2.1 Estrutura integral de concreto armado ou de aço protegidos por concreto ou alvenaria:
 - 1.2.1.1 Nos prédios de 1 e 2 pavimentos em que haja laje, teto ou forro constituído por laje de concreto armado ou lajes pré-moldadas;
 - 1.2.1.2 Nos dois últimos pavimentos dos edifícios de 3 ou mais pavimentos;
 - 1.2.2 Assentamento de cobertura em armação metálica ou de concreto, permitindo-se, portanto, travejamento de madeira:
 - 1.2.2.1 Nos edifícios de 3 ou mais pavimentos;
 - 1.2.2.2 Nos edifícios de 1 ou 2 pavimentos, contanto que nestes exista teto ou forro de concreto armado;

Cabe ainda salientar que:

- Os edifícios de classe 1 não perdem esta classificação quando em franca comunicação com edifícios de classe de construção diferente;
- Cada um dos pavimentos constitui risco distinto, pelo que nenhum deles terá influência sobre os demais, não sendo, admitida a subdivisão de pavimentos em diversos riscos;
- Os pavimentos, como tais considerados também os subsolos, sobrelojas e galerias, que se comuniquem no todo ou em parte, constituem, em conjunto, um único risco isolado;
- Constitui também um único risco isolado o conjunto de pavimentos cujos vãos de elevadores não sejam fechados por alvenaria ou concreto armado;
- Os pavimentos que se intercomuniquem por escadas privativas livres, isto é, não situadas em vãos próprios dotados de porta incombustível de acesso (saída), com paredes de alvenaria, de tijolo (concreto armado), constituem um único risco isolado;
- As construções ou acréscimos sobre a laje de cobertura de edifícios de 3 ou mais pavimentos serão classificados de acordo com sua própria classe de construção;

2) **Classe 2** – Considera-se desta classe os riscos que se enquadram num dos tipos de construção a seguir:

- a. Paredes externas inteiramente construídas de alvenaria (pedra ou tijolo), isto é, em cuja construção não sejam empregados outros materiais além de cimento, pedra, areia, ferro, tijolos ou argamassas a base de cimento, cal saibro e areia; cobertura de material incombustível, permitindo-se assentamento sobre travejamento de madeira e ainda lanternins ou respiradores de qualquer material;
- b. Paredes externas de qualquer material construídas de tijolos com vigas metálicas ou de madeira embutida; cobertura de material incombustível, permitindo-se assentamento sobre travejamento de madeira e ainda lanternins ou respiradores de qualquer material;
- c. Construções abertas, cobertas de material incombustível, permitindo-se colunas de sustentação e fechamento externo das tesouras de qualquer material;

- d. Paredes externas e cobertas com as características exigidas no item a deste subitem, permitindo-se o emprego nas paredes externas, em escala inferior a 25% da área total destas paredes, de chapas metálicas ou de materiais incombustíveis da categoria fibro-cimento;
- e. Paredes externas com as características exigidas no item a deste subitem, permitindo-se o emprego nas paredes, o emprego de chapas metálicas ou de materiais ou de materiais incombustíveis da categoria fibro-cimento, sustentados por material incombustível, desde que o edifício possua estrutura integral de aço e cobertura de material incombustível assente em armaduras metálicas ou de concreto;

3) **Classe 3** – Considera-se desta classe os riscos que se enquadrem num dos tipos de construção previstos a seguir:

- a. Paredes externas construídas com menos de 25% de material combustível, desde que com cobertura de material incombustível, permitindo-se o assentamento sobre travejamento de madeira e ainda lanternins ou respiradores de qualquer material;
- b. Paredes externas de construção metálica com a cobertura de material incombustível, permitindo-se o assentamento sobre travejamento de madeira;
- c. Paredes externas e cobertura com as características exigidas no item (a) deste subitem, permitindo-se o emprego, nas paredes externas, em escala igual ou superior a 25% da área total dessas paredes, de chapas metálicas ou de materiais incombustíveis da categoria fibro-cimento;
- d. Quaisquer outros tipos de construção que não se enquadrem nas classes 1, 2 ou 4;

4) **Classe 4** – Considera-se desta classe os riscos que se enquadrarem num dos tipos de construção previstos a seguir:

- a. Cobertura de material combustível, paredes construídas de qualquer material;
- b. Paredes externas com 25% ou mais de material combustível, cobertura de qualquer material;

Para a classificação de riscos e composição do respectivo prêmio de seguro incêndio são considerados três fatores, também chamados LOC, conforme a seguir:

- **Localização** – Os edifícios são classificados pela cidade onde estão localizados. O fator localização possui quatro classes (1, 2, 3 e 4), sendo que as classes 1, 2 e 3 abrangem as principais cidades brasileiras em ordem decrescente. A classe 4 abrange as demais localidades. Este fator (localização) reflete a presença de Corpo de Bombeiros próximo ao edifício. Desta forma, edifícios localizados em grandes cidades brasileiras têm a disposição a estrutura de um Corpo de Bombeiro bem aparelhado e são, portanto, classificados como classe 1 de localização. Por outro lado, riscos classe 4 de localização estão dispostos em regiões afastadas do aparelhamento do Corpo de Bombeiros;
- **Ocupação** – Os edifícios são classificados em 13 classes de ocupação. Estas 13 classes de ocupação refletem a carga de incêndio inerente a cada atividade desenvolvida dentro do edifício. Sempre que um risco isolado, nos termos do conceito mencionado anteriormente, puder ser classificado em mais de uma rubrica na lista de ocupações, deverá ser aplicada, a todo risco, a classe mais alta de ocupação indicada por estas rubricas. A seguir, a Tabela 4.2 apresenta alguns exemplos de classificações de edifícios por atividades.

Tabela 4.2 – Tabela de Ocupações (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Lista de Ocupações - TSIB					
Rubrica	Ocupação do Risco			Classe de Ocupação	
22	Automóveis				
	10	Oficinas de montagem, permitindo-se pintura:			
		11	sem trabalhos de madeira		4
		12	com trabalhos de madeira		5
	20	Oficinas de conserto, permitindo-se pintura e consertos em câmara de ar:			
		21	sem trabalhos de madeira ou estofamento		5
		22	com trabalhos de madeira ou estofamento		6
	30	Depósitos ou lojas, sem acessórios ou sobressalentes			3
40	Depósitos ou lojas, com acessórios ou sobressalentes			4	
24	Bijuterias				
	10	Fábricas			5
	20	Lojas			3
68	Bolsas, cintos e congêneres				
	10	Fábricas			
		11	sem emprego de celulóide		4
		12	com emprego de celulóide		5
	20	Depósitos			
		21	sem oficina		4
22		com oficina		5	

Lista de Ocupações - TSIB				
Rubrica	Ocupação do Risco			Classe de Ocupação
103	Café			
	10	Engenhos de descascar e beneficiar, com instalação de exaustores:		
		11	com geradores de força isolados	5
		12	com geradores de força em comunicação	7
	20	Engenhos de descascar e beneficiar, sem instalação de exaustores:		
		11	com geradores de força isolados	6
		12	com geradores de força em comunicação	8
	30	Secadores		4
	40	Depósitos		
		41	café em coco	3
		42	beneficiado, permitindo-se o emprego de máquinas de costurar e de consertar sacaria, com ou sem torrefação e moagem de amostras, sem rebenefício	2
		43	beneficiado, permitindo-se o emprego de máquinas de costurar e de consertar sacaria, com ou sem torrefação e moagem de amostras, com rebenefício	3
50	Torrefação		6	
60	Moagem		4	
70	Fábrica de café solúvel, permitindo-se torrefação		3	
105	Câmbio e moedas			1
108	Cartórios			2
113	Cascas de árvores ou de plantas			
	10	Depósitos		
		11	sem moagem	5
		12	com moagem (exceto fábricas de tanino)	6
116	Celulose			
	10	Fábricas		4
	20	Depósitos		3
119	Cerveja			
	10	Fábricas		3
	20	Depósitos		3
123	Cimento			
	10	Fábricas		
		11	seções de preparação, mistura, fabricação e ensacamento	1
		12	depósitos	2
	20	Depósitos e lojas		3
	30	Artigos de		
		31	fábricas sem fornos	2
		32	fábricas com fornos	3
33		depósitos	2	
34	lojas	3		

Lista de Ocupações - TSIB					
Rubrica	Ocupação do Risco			Classe de Ocupação	
125	Cinematografia				
	10	Estúdios		9	
	20	Oficinas cinematográficas de revelação e impressão de filmes:			
		21	filmes de material inflamável, com emprego de lâmpadas de filamento metálico		9
		22	filmes de material inflamável, com emprego de lâmpadas de arco voltaico		10
	23	filmes de material não inflamável		5	
	30	Depósitos ou agências cinematográficas:			
		31	de filme de material não inflamável		4
		32	de filmes de material inflamável, guardados em cofre à prova de fogo		5
		33	de filmes de material inflamável, fora do cofre à prova de fogo		8
190	Edifícios				
	10	Desocupados		2	
	20	Em construção		3	
197	Escritórios				
	10	Permitindo-se a existência de mostruários, depósitos de bens de uso ou consumo, casas de máquinas e de força, bem como ambulatórios, auditórios (com ou sem palco), bar, restaurante e biblioteca, para uso exclusivo de seus empregados, e creches para o uso dos filhos destes		1	
	20	Permitindo-se também a existência de oficinas de encadernação e tipografia funcionando para atender exclusivamente ao segurado		2	
	30	Permitindo-se mais ainda a existência de oficina mecânica e de marcenaria, também funcionando para atender exclusivamente ao segurado		3	
203	Estopa				
	10	Fábricas			
		11	com processo de desfiamento de tecidos		12
		12	sem processo de desfiamento de tecidos		9
	20	Depósito de matéria-prima e produtos acabados:			
		21	com a cláusula 302 (*)		6
		22	sem a cláusula 302 (*)		7
23		com processo de prensagem		8	
204	Explosivos - com a cláusula 307 (**)				
	10	Fábricas		13	
	20	Depósitos		12	

Lista de Ocupações - TSIB			
Rubrica	Ocupação do Risco		Classe de Ocupação
301	Jornais e revistas		
	10	Oficinas de impressão, sem rotogravura	4
	20	Oficinas de impressão, com rotogravura	9
379	Moradias		
	10	Casas	1
	20	Edifícios de apartamentos	1
	30	Dependências de apoio (restaurante, bar, lavanderia, fisioterapia, sauna, auditório e outros semelhantes), instalados em edifícios de condomínio, ou no recinto ocupado pelo condomínio, desde que não sejam de uso comum, exclusivamente, de condomôminos ou ocupantes do condomínio	2
524	Teatros		7
529	Tipografias		
	10	Oficinas, sem rotogravura	5
	20	Oficinas, com rotogravura	9
NOTA: As classes de ocupação menores representam menor risco de incêndio			
(*) Cláusula 302: Acondicionamento em fardos prensados			
Fica entendido e acordado que as fibras vegetais, forragens, aparas, trapos e outras mercadorias semelhantes existentes no risco serão acondicionadas em fardos prensados, amarrados com arame ou verguinhas de ferro, fardos estes que, em se tratando de algodão ou resíduos de algodão, deverão pesar pelo menos 250 kg/m ³ .			
Fica, todavia, entendido que, nos casos de fibras de sisal, juta e malva, os respectivos fardos poderão ser amarrados com cordal de sisal, juta e malva, em vez de arame ou verguinhas de ferro.			
Fica, outrossim, entendido e acordado que a inobservância desta cláusula implicará, em caso de sinistro, na redução da indenização a que o segurado teria direito, na hipótese de haver cumprido o disposto acima, na mesma proporção do prêmio pago para o que seria devido se não constasse da apólice a presente cláusula.			
(**) Cláusula 307 Explosivos e inflamáveis			
Fica entendido e acordado que o presente seguro abrange perdas e danos consequentes de explosão ocorrida dentro da área do estabelecimento segurado			

➤ **Construção** – Conforme as classes de construção (1, 2, 3 e 4) já mencionadas.

É importante salientar que a TSIB distingue somente as estruturas de uma edificação, para fins de aplicação de prêmio de seguro incêndio, em combustíveis ou não combustíveis. Fatores como, tempo de resistência ao fogo das estruturas, não são contemplados pela TSIB no sentido de provocar um desconto no prêmio de seguro incêndio. Também não se considera para fins de desconto no prêmio de seguro incêndio

a melhoria da resistência ao fogo das estruturas dada pelo uso de materiais de proteção térmica. Assim, aço e concreto, quaisquer que sejam, são considerados materiais incombustíveis e por isto recebem a mesma classificação. Já as estruturas de madeira, por serem consideradas materiais combustíveis, possuem o prêmio de seguro incêndio agravado.

No futuro seria importante que:

- O comportamento mecânico das estruturas fosse considerado para fins de determinação do prêmio de seguro incêndio, não se considerando somente o fato de elas serem combustíveis ou não;
- A utilização de materiais de proteção térmica das estruturas deveria implicar em desconto no prêmio de seguro incêndio (a exemplo da utilização de sistemas protecionais, como: extintores, hidrantes e “sprinklers”), na medida em que eles poderiam ser considerados um meio adicional de proteção passiva contra incêndio;

4.5 Cálculo do prêmio do seguro incêndio de acordo com a TSIB

O prêmio de seguro incêndio segundo a TSIB é resultado da aplicação de uma taxa sobre um valor em risco declarado pelo segurado. Em outras palavras, multiplica-se uma determinada taxa pelo valor dos edifícios e conteúdo (máquinas, equipamentos, mobiliário, etc). A taxa reflete, em linhas gerais, a probabilidade de ocorrência de incêndio na edificação. Desta forma, quanto maior o risco de incêndio, maior a taxa a ser aplicada. Cabe ainda salientar que a taxa é uma composição dos 3 fatores (Localização, Ocupação e Construção) já mencionados. A Tabela 4.3 apresenta um quadro de taxas que devem ser aplicadas aos riscos ou edifícios situados nas localidades de classe 1 de localização.

Tabela 4.3 – Quadro de taxas a serem aplicadas sobre o valor segurável do edifício e do conteúdo para classe de localização 1 da TSIB (Fonte: TSIB - Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Ocupação	Construção					
	1		2		3	4
	Prédio	Conteúdo	Prédio	Conteúdo	Prédio / Conteúdo	Prédio / Conteúdo
1	0,10%	0,12%	0,12%	0,15%	0,45%	0,60%
2	0,10%	0,20%	0,20%	0,25%	0,50%	0,65%
3	0,15%	0,25%	0,25%	0,35%	0,65%	0,80%
4	0,20%	0,40%	0,35%	0,50%	0,80%	1,00%
5	0,25%	0,55%	0,50%	0,65%	1,00%	1,30%
6	0,35%	0,70%	0,65%	0,80%	1,20%	1,60%
7	0,35%	0,90%	0,80%	1,00%	1,50%	1,90%
8	0,35%	1,10%	1,00%	1,20%	1,80%	2,20%
9	0,50%	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%

Como exemplo, pode-se imaginar um edifício (Oficina de impressão, sem rotogravuras, de jornais e revistas com classe de localização 1) cujo valor seja de R\$ 2.000.000,00 e conteúdo (máquinas e mobiliário) de R\$ 850.000,00. Tem-se, então, uma ocupação classe 4 para esta atividade (rubrica 301.10 – Tabela 4.2). Se o edifício for ainda classificado como de classe 1 de construção (estrutura de concreto ou aço) tem-se, de acordo com a Tabela 4.3:

- Prêmio do seguro incêndio para prédio = R\$ 2.000.000,00 * 0,2% (classe de ocupação 4 x classe de construção 1) = R\$ 4.000,00;
- Prêmio do seguro incêndio para conteúdo = R\$ 850.000,00 * 0,4% (classe de ocupação 4 x classe de construção 1) = R\$ 3.400,00
- Prêmio do seguro incêndio para prédio + conteúdo = R\$ 4.000,00 + R\$ 3.400,00 = R\$ 7.400;

Para o exemplo dado no parágrafo anterior, considerando-se apenas a mudança da estrutura e paredes de compartimentação do edifício para madeira (classe de construção 4), tem-se, de acordo com a Tabela 4.3:

- Prêmio do seguro incêndio para prédio = (R\$ 2.000.000,00 + R\$ 850.000,00) * 1,0% (neste caso deve-se somar o valor do edifício ao valor do conteúdo) = R\$ 28.500,00;

Como constatado, tem-se uma agravação do prêmio de seguro incêndio em torno de 385% pelo fato de se utilizar estrutura de madeira no edifício no lugar de estrutura de aço ou concreto. Torna-se claro, pela análise dos cálculos dos prêmios de seguro incêndio apresentados, que a TSIB considera apenas a contribuição dos materiais combustíveis (no exemplo dado, estrutura e paredes de compartimentação de madeira) como meio de propagação do incêndio. A TSIB deveria contemplar também o comportamento mecânico das estruturas e paredes de vedação, para fins de desconto no prêmio de seguro, uma vez que um maior TRRF confere maior segurança contra o incêndio ao patrimônio segurado.

4.6 Desconto aplicado sobre o prêmio de seguro incêndio em função da instalação de equipamentos de proteção contra incêndio

É possível ainda a concessão de um desconto sobre o prêmio do seguro incêndio decorrente da utilização de sistemas de proteção contra incêndio dentro de um risco isolado, sendo conceituado risco isolado nos termos da TSIB. Para fins de desconto sobre o prêmio a ser pago, os riscos (edifícios) são categorizados em 3 classes de risco, de acordo com a natureza das ocupações:

- **Classe A** – São os riscos isolados cujas classes de ocupação na TSIB sejam 1 e 2, excluídos os depósitos;
- **Classe B** – São os riscos isolados cujas classes de ocupação na TSIB sejam 3, 4, 5 e 6, bem como os depósitos de classe de ocupação 1 e 2;
- **Classe C** – São os riscos isolados cujas classes de ocupação na TSIB sejam 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13;

Vale notar que os equipamentos de proteção contra incêndio (substâncias extintoras) também requerem uma classificação para concessão de desconto, em função da natureza do fogo a extinguir (Tabela 4.4), de acordo com a TSIB.

Tabela 4.4 – Classificação dos tipos de fogo em função do material combustível (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Classe	Natureza do Fogo
A	Fogo em materiais combustíveis, comuns, tais como materiais celulósicos (madeira, tecido, algodão, papéis, etc), onde o efeito de " resfriamento " pela água ou por soluções contendo muita água é de primordial importância
B	Fogo em líquidos inflamáveis, graxa, óleos e semelhantes, onde o efeito de " abafamento " é essencial
C	Fogo em equipamento elétrico, onde a extinção deve ser realizada com material não condutor de eletricidade
D	Fogo em materiais onde a extinção deverá ser feita por meios especiais, por exemplo: fogo em metal magnésio, em aparas, pó, etc

Desta forma, o fogo é classificado em função das características de sua origem. Por exemplo, um fogo em um depósito de tecidos é considerado um fogo classe A pelas necessidades de extinção por água. Daí decorre uma classificação das substâncias a serem utilizadas para extinção do fogo (Tabela 4.5):

Tabela 4.5 – Substâncias apropriadas para extinção de cada tipo de fogo (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Natureza do Fogo	Substâncias
A	Água, espuma, soda ácida ou outras soluções do mesmo efeito
B	Espuma, compostos químicos em pó, gás carbônico, compostos halogenados
C	Compostos químicos em pó (pó químico), gás carbônico, compostos halogenados
D	Compostos químicos especiais, limalha de ferro, sal-gema, areia e outros

A má utilização de um agente extintor pode gerar o efeito inverso, ou seja, o agente extintor pode servir como propagador do incêndio.

Para o caso específico da implementação do sistema de proteção “hidrante”, é exigido um nível mínimo de desempenho para concessão de desconto sobre o prêmio de seguro, determinado por uma pressão de funcionamento medida nos requintes por meio de tubo “Pitot” quando em operação simultânea duas linhas de mangueiras de 30 metros cada uma, providas de esguichos e requintes conectados ao hidrante hidráulicamente mais desfavorável em relação às fontes de abastecimento (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Níveis mínimos de desempenho dos hidrantes para concessão de desconto (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Classes de Proteção	Requisitos de Proteção
A	Vazão de 200 litros por minuto em cada requinte
	Mangueira de 38 mm de diâmetro (1 1/2 ")
	Esguicho e requinte de 13 mm de diâmetro
	Pressão mínima de 3,5 bares (35 metros de coluna d'água)
B	Vazão de 500 litros por minuto em cada requinte
	Mangueira de 64 mm de diâmetro (2 1/2 ")
	Esguicho e requinte de 25 mm de diâmetro
	Pressão mínima de 1,5 bares (15 metros de coluna d'água)
C	Vazão de 900 litros por minuto em cada requinte
	Mangueira de 64 mm de diâmetro (2 1/2 ")
	Esguicho e requinte de 25 mm de diâmetro
	Pressão mínima de 4,5 bares (45 metros de coluna d'água)

Então, quando da utilização de sistemas de proteção contra fogo dentro de um risco isolado, nos termos da TSIB, é possível realizar um desconto sobre o prêmio de seguro incêndio, conforme a seguir:

- Para sistemas de proteção por extintores – 5%;
- Para sistemas de proteção por mangueiras semi-rígidas – 10%;

- Para sistemas de proteção por hidrantes os descontos serão os constantes das Tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente:
 - Sistemas de hidrantes internos ou externos, de abastecimento por gravidade:

Tabela 4.7 – Tabelas de descontos sobre o prêmio do seguro incêndio em função da utilização de sistema de hidrantes – abastecimento por gravidade (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Classes de Proteção	Classe de Riscos		
	Classe A	Classe B	Classe C
A	20%	15%	10%
B	20%	20%	15%
C	20%	20%	20%

- Sistemas de hidrantes internos ou externos, de abastecimento por bombas fixas de acionamento automático para o suprimento no momento do combate ao incêndio:

Tabela 4.8 – Tabelas de descontos sobre o prêmio do seguro incêndio em função da utilização de sistema de hidrantes – abastecimento por bombas (Fonte: TSIB – Tarifa de Seguro Incêndio do Brasil).

Classes de Proteção	Classe de Riscos		
	Classe A	Classe B	Classe C
A	15%	10%	5%
B	15%	15%	10%
C	15%	15%	15%

- Para sistemas de detecção e alarme – 10%;
- Para instalações de chuveiros automáticos (sprinklers):
 - 60% com duas fontes de abastecimento de água e acionamento automático;
 - 40% com uma fonte de abastecimento e acionamento automático;
 - 30% com duas fontes de abastecimento manual;
 - 20% com uma fonte de abastecimento e acionamento manual.

Os riscos (edifícios) que dispuserem de mais de um tipo de proteção contra incêndio gozarão de descontos correspondentes a cada tipo de proteção, limitado, porém, ao máximo final conforme a seguir:

- Pela conjunção de aparelhos sob comando e instalações de sistemas de detecção e alarme – 40%;
- Pela conjunção de aparelhos sob comando, instalações de sistemas de detecção e alarme e chuveiros automáticos contra incêndio – 70%.

Depreende-se do exposto anteriormente, que a utilização de sistemas de proteção contra incêndio em edifícios é incentivado pelas Seguradoras na medida em que são oferecidos descontos sobre o prêmio de seguro incêndio a ser pago pelo segurado. Diversos meios de proteção contra incêndio (extintores, hidrantes, sprinklers, alarmes, etc) são reconhecidamente eficazes pelas Companhias Seguradoras e geram descontos nos prêmios cobrados, porém, sistemas de proteção estrutural, como por exemplo, revestimentos de proteção térmica, ainda não são reconhecidos e, portanto, não geram descontos para o segurado quando da compra de um seguro incêndio para a edificação. Porém, na medida em que a utilização de uma argamassa ou revestimento de proteção térmica das estruturas de concreto, melhora seu desempenho frente ao incêndio, como apresentado no estudo de caso do Aeroporto Santos Dumont (pilares com pastilhas tiveram melhor desempenho frente ao fogo), natural seria que um desconto sobre o prêmio de seguro fosse contemplado, uma vez que o incremento do TRRF aumenta a segurança do patrimônio segurado. Outro aspecto a ser ressaltado é o fato de o material concreto ser tratado de maneira totalmente genérica perante a TSIB, não interessando sua susceptibilidade ao fogo, sendo apenas destacado o fato de ele, juntamente com o aço, ser um material incombustível, e, portanto, que não propaga o fogo. Esta visão é inadequada na medida em que os diversos concretos não apresentam o mesmo comportamento em situação de incêndio. Como exemplo, pode-se destacar o concreto de alta resistência (CAR), sujeito a lascamentos explosivos e, portanto, mais susceptível ao incêndio em relação a outros concretos. Também, do experimento realizado neste trabalho, observou-se que concretos com maior relação a/c apresentaram maior susceptibilidade à elevação da temperatura.

Desta forma, espera-se que no futuro, depois de melhor compreendido os efeitos da temperatura sobre o material concreto, juntamente com o desenvolvimento e

comprovação da eficácia de sistemas de proteção térmica estrutural, os descontos relativos a estes meios de proteção possam ser adotados pelas Seguradoras. Dentro desta concepção, todos os atores envolvidos na proteção contra incêndio das estruturas de concreto apresentam interesse no desenvolvimento de revestimentos de proteção térmica que possam garantir um mínimo de segurança das estruturas em situação de incêndio.

4.7 Legislação de segurança contra incêndio no Estado de São Paulo - Decreto nº 46.076

Desde os grandes sinistros da década de 70 (Joelma e Andraus), a legislação no Estado de São Paulo vem sendo modificada e atualizada, tornando-se mais rigorosa com relação à proteção dos edifícios contra incêndio. A resposta a esta evolução na legislação é a diminuição de casos de incêndios de grandes proporções em edifícios altos, com ocupação de escritório ou residência. Porém, ainda vem ocorrendo incêndios de grandes proporções em edifícios de outras ocupações como: depósitos de pneus, depósitos de mercadorias em geral, fábricas, etc. Ocorre que nestes tipos de edifícios, pela própria natureza das atividades desenvolvidas em seu interior, não há grande concentração de pessoas, porém existe grande concentração patrimonial (carga de incêndio). Assim, o incêndio ainda causa grandes prejuízos financeiros a estas construções.

Salienta-se ainda que a legislação contra incêndio no Brasil é responsabilidade dos Estados. Assim, da mesma forma que o Estado de São Paulo lançou uma legislação bastante rigorosa e atualizada com o desenvolvimento científico da nossa época, outros Estados da Federação não dispõem do mesmo rigor legal, permitindo-se ainda a ocorrência de grandes incêndios em edifícios altos (escritórios e residências) como é o caso dos incêndios nos edifícios na Eletrobrás e Petrobrás, nos anos de 2004, ambos na cidade do Rio de Janeiro. Desta forma, a legislação contra incêndio, quando bem elaborada e aplicada, torna-se uma maneira eficaz de mitigação de risco de incêndio em edifícios.

Apresenta-se, a seguir, alguns tópicos relevantes da mais recente legislação de incêndio no Estado de São Paulo que foi decretada em 31 de agosto de 2001 e dispõe sobre as

medidas de segurança contra incêndio nas edificações e áreas de risco. Este tipo de regulamento está previsto no artigo 144 § 5º da Constituição Federal, no artigo 142 da Constituição Estadual, na Lei Estadual nº 616, de 17 de dezembro de 1974 e na Lei Estadual nº 684, de 30 de setembro de 1975.

Os objetivos deste Decreto são:

- Proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;
- Dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;
- Proporcionar meios de controle e extinção do incêndio;
- Dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros.

O Decreto traz ainda diversas definições sobre a segurança contra incêndio, a saber:

- **Carga de Incêndio:** é a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis contidos em um espaço, inclusive o revestimento das paredes, divisórias, pisos e tetos;
- **Compartimentação:** são medidas de proteção passiva, constituídas de elementos de construção resistentes ao fogo, destinados a evitar ou minimizar a propagação do fogo, calor e gases, interna ou externamente ao edifício, no mesmo pavimento ou para pavimentos elevados consecutivos;
- **Medidas de Segurança Contra Incêndio:** é o conjunto de dispositivos ou sistemas a serem instalados nas edificações e áreas de risco necessários para evitar o surgimento de um incêndio, limitar sua propagação, possibilitar sua extinção e ainda propiciar a proteção à vida, ao meio ambiente e ao patrimônio.

As definições acima apresentadas demonstram que o decreto traz na essência algumas definições importantes relacionadas à segurança contra incêndio. O decreto prevê ainda que constituem medidas de segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco:

- Segurança estrutural nas edificações;
- Compartimentação horizontal;
- Compartimentação vertical;
- Controle de materiais de acabamento.

Para garantir a segurança estrutural, as edificações devem ser projetadas e construídas para apresentar um desempenho estrutural aceitável em situações excepcionais como o incêndio.

Para detalhar as exigências presentes no Decreto, foram criadas as Instruções Técnicas, sendo que a IT 08/01 apresenta as exigências de segurança estrutural nas edificações e tem por objetivo estabelecer as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural por tempo suficiente para possibilitar o atendimento das prescrições contidas nos objetivos do Decreto citado, ou seja, evacuação do edifício e menor perda patrimonial possível. Adotam-se, na IT 08/01, as instruções presentes na NBR-14432/2000 – Exigência de resistência ao fogo de elementos de construção de edificações. São exigidos também os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) que são aplicados aos elementos estruturais e de compartimentação.

Para se comprovar os TRRF constantes da IT 08/01 são aceitas as metodologias abaixo:

- Execução de ensaios específicos de resistência ao fogo em laboratórios;
- Atendimento a tabelas elaboradas a partir de resultados obtidos em ensaios de resistência ao fogo;
- Modelos matemáticos (analíticos) devidamente normatizados ou internacionalmente reconhecidos.

Com relação aos ensaios, estes devem ser realizados em laboratórios reconhecidos, de acordo com as normas técnicas nacionais ou, na ausência destas, de acordo com normas ou especificações estrangeiras internacionalmente reconhecidas.

Com relação ao dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio é descrito no decreto como segue:

- **Aço:** Recomenda-se que a temperatura crítica do aço seja tomada como um valor máximo de 550° C para os aços convencionais ou calculada para cada elemento estrutural de acordo com a norma NBR-14323 - Dimensionamento de estruturas de aço em edifícios em situação de incêndio;
- **Concreto:** Deverá ser calculado de acordo com a norma NBR-6118 – Projeto e execução de obras de concreto – Procedimento;

- **Outros materiais estruturais:** na ausência de normas nacionais, poderão ser utilizadas normas ou especificações estrangeiras internacionalmente reconhecidas.

Com relação aos elementos de compartimentação estes devem possuir TRRF como segue:

- Para as escadas e elevadores de segurança, os elementos de compartimentação, constituídos pelo sistema estrutural das compartimentações e vedações das caixas, dutos e antecâmaras, devem atender, no mínimo, ao TRRF igual ao estabelecido no Anexo A da Instrução Técnica 08/01 (Tabela 4.9), porém, não podendo ser inferior a 120 (cento e vinte) minutos;
- Os elementos de compartimentação (externa e internamente à edificação, incluindo as lajes, as fachadas, paredes externas e as selagens dos shafts e dutos de instalações) e os elementos estruturais essenciais à estabilidade destes elementos devem ter, no mínimo, o mesmo TRRF da estrutura principal da edificação, sendo que o TRRF mínimo para as selagens dos shafts e dutos de instalações será de 60 (sessenta) minutos;
- As paredes divisórias entre unidades autônomas devem possuir TRRF mínimo de 60 (sessenta) minutos, independente do TRRF da edificação;
- Os elementos de compartimentação usados como isolamento de riscos e os elementos estruturais essenciais à estabilidade desta compartimentação devem ter, no mínimo, TRRF de 120 (cento e vinte minutos).

Segundo ainda a IT 08/01, a escolha, dimensionamento e aplicação de materiais de proteção térmica são de responsabilidade exclusiva do(s) responsável(eis) técnico(s) do projeto: *“As propriedades térmicas e o desempenho dos materiais de proteção térmica quanto à aderência, combustibilidade, fissuras, toxidade e outras propriedades, devem ser determinados por ensaios realizados em laboratório nacional ou estrangeiro reconhecido internacionalmente, de acordo com norma técnica nacional ou, na ausência desta, de acordo com norma estrangeira reconhecida internacionalmente”*.

A Tabela 4.9 apresenta as exigências de TRRF no Decreto 46.076/2001, para o Estado de São Paulo. As exigências de TRRF variam com a ocupação/uso de cada edificação e com a profundidade do subsolo e altura das edificações. Para a classificação detalhada

das ocupações (Grupo e Divisão) deverá ser consultada a Tabela 1 do Decreto Estadual 46.076/2001.

Tabela 4.9 - Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF) – (Fonte: Anexo A da Instrução Técnica 08/01, Decreto 46.076/2001).

Grupo	Ocupação / Uso	Divisão	Profundidade do Subsolo hs		ALTURA DA EDIFICAÇÃO H					
			Classe S ₂ hs >10m	Classe S ₁ hs ≤ 10m	Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m	Classe P ₃ 12m < h ≤ 23m	Classe P ₄ 23m < h ≤ 30m	Classe P ₅ 30m < h ≤ 80m	h > 80m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	CT
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120	CT
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60 (30)	60	60	90	120	CT
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	CT
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60 (30)	60	90	120	CT
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	CT
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60 (30)	60	60	90	120	CT
		F-3, F-4 e F-7	90	60	ver IT 08/01			60	CT	CT
		F-9	CT							
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120	CT
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60	120
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	CT
		H-2, H-3 e H5	90	60	30	60	60	90	120	CT
I	Industrial	I-1	90 (60)	60 (30)	30	30	30	60	120	CT

		I-2	120	90	30	30	60 (30)	90	120	CT
		I-3	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120	CT
J	Depósitos	J-1	60	30	ver IT 08/01				60	CT
		J-2	90	60 (30)	30	30	30	30	60	CT
		J-3	90	60 (30)	30	60	60	120 (90)	120	CT
		J-4	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120	CT
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	CT	CT			
M	Especial	M-1	150	150	150	CT				
		M-2	CT							
		M-3	120	90	90	90	120	CT		

NOTAS:

- 1. CT = Utilizar Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo.**
- 2. Os tempos entre parênteses podem ser usados nas edificações nas quais cada pavimento tenha área menor ou igual a 750m², desde que haja compartimentação vertical entre os pavimentos.**
- 3. TRRF dos subsolos não pode ser inferior ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo.**

Portanto, a partir da análise da Tabela 4.9, os TRRF para elementos estruturais, segundo a IT 08/01, são exigidos para edifícios em função de sua ocupação / uso (carga de incêndio) e de sua altura (inclusive do subsolo). Desta forma, edificações mais altas possuem maior exigência com relação a resistência ao fogo das estruturas. Edificações mais baixas, devido a facilidade de desocupação do edifício em caso de incêndio, podem até estar isentas com relação ao tempo mínimo de resistência ao fogo de suas estruturas.

Depreende-se do acima exposto que este decreto aborda aspectos de segurança estrutural com relação ao projeto de estruturas e elementos de compartimentação. Interessante seria que este decreto e os aspectos nele abordados servissem de base para o desenvolvimento de regulamentações de incêndio em todos os Estados da Federação ou mesmo para uma legislação única de abrangência nacional. É bem verdade que, pela própria diferença regional do Brasil, muitos aspectos desta norma tornam-se muito rígidos para serem cobrados pelo poder público na íntegra, porém, é importante haver um esforço para a convergência de regulamentações por todo o país, para não se correr o risco de o próprio Estado (regulador das normas de incêndio) permitir a coexistência de normas muito pouco exigentes (a favor do risco de incêndio) e normas mais avançadas e exigentes, a exemplo do que ocorre no Estado de São Paulo. Os conceitos de proteção térmica das estruturas e elementos de compartimentação devem se propagar por todo o país para garantir uniformemente a segurança à vida e ao patrimônio.

4.8 Considerações sobre as perdas econômicas decorrentes de um incêndio em um edifício

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 a sua vizinhança.

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, em princípio, 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 4.2 procura ilustrar os conflitos atualmente existentes.

Figura 4.2 – Confronto entre os níveis técnico e institucional na avaliação do potencial de risco da edificação (Fonte: MELHADO, 1990).

É necessário ressaltar que o confronto entre as avaliações feitas no nível institucional e no nível técnico mostra a divisão clara entre segurança da vida humana e segurança patrimonial. Algumas características do edifício contribuirão notadamente mais para a segurança patrimonial (por exemplo, seguro). Dentro do nível institucional, restará, portanto, à legislação a tarefa de privilegiar a segurança da vida humana.

Dentro do contexto de segurança ótima contra incêndio (segurança adequada), alguns autores, por exemplo, LIE (1972), procuraram abordar o assunto de forma mais coerente dentro do enfoque no qual se apresenta, de preocupação exclusivamente econômica, propondo uma minimização de soma dos custos envolvidos, levando a determinação da resistência ao fogo “ótima” para a estrutura.

Segundo LIE (1972), as perdas devido a um incêndio dependem de três fatores, a saber:

- Probabilidade de ocorrência do incêndio;
- Probabilidade de colapso do edifício ou de seus elementos;
- Patrimônio (Valor em Risco);

A Figura 4.3 explica a relação entre estes fatores.

Figura 4.3 – Fatores a se considerar na determinação da resistência ao fogo ótima sob o prisma do seguro (Fonte: LIE apud MELHADO, 1972).

Assim, segundo LIE (1972), uma lista das variáveis que determinam a soma de perdas econômicas esperadas em caso de incêndio seriam:

- Dimensões do edifício;
- Vida útil do edifício considerado;
- 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);
- Fator de segurança adotado para o conteúdo em materiais combustíveis esperados para os ambientes do edifício;
- Variabilidade da resistência ao fogo adotada para os elementos estruturais;
- Variabilidade do valor adotado para o conteúdo em materiais combustíveis;
- Valor patrimonial do edifício;
- Valor do conteúdo;
- Perdas devido à paralisação de atividades;
- Custos de reparo após o incêndio;
- Taxa de retorno considerado;
- Número de ambientes do edifício;
- Número de ambientes que podem ser atingidos pelo incêndio;

Para demonstrar os resultados da metodologia de avaliação proposta, LIE (1972) desenvolveu alguns exemplos, calculando em diferentes situações a soma dos custos envolvidos (de proteção da estrutura mais o custo de perdas em caso de incêndio), variando em cada caso o fator de segurança adotado. Estes resultados, expressos na forma de curvas, estão reproduzidos na Figura 4.4.

$$n = \frac{W_D}{W_M} \quad \begin{array}{l} \text{- Potencial calorífico do projeto} \\ \text{- Potencial calorífico médio (para o tipo de edifício definido)} \end{array}$$

Curvas:

- (A) 50 pavimentos – Área pavimento = 1.000 m² – Total = 50.000 m²;
- (B) 10 pavimentos – Área pavimento = 1.000 m² – Total = 10.000 m²;
- (C) 2 pavimentos – Área pavimento = 1.000 m² – Total = 2.000 m²;

Figura 4.4 – 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 das estruturas, especialmente nos casos de edifícios de grandes dimensões.

LIE (1972) considerou os dados existentes, particularmente os dados estatísticos, inadequados para elaborar com precisão o balanço econômico entre investimento em proteção e perdas devido ao incêndio. Contudo, algumas conclusões acerca da proteção da estrutura puderam ser tiradas com aqueles dados (em 1972). Ao final de sua análise,

LIE (1972) enumera alguns “princípios básicos a seguir na proteção contra fogo na 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 com cerca de 10 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, em geral, 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 à vida;
- (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;

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 combate.

Por fim, acrescenta-se ainda, como mais uma dificuldade na questão do “*Gerenciamento de Riscos*”, as 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.

A metodologia ideal, e jamais criada, para a 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 (MELHADO, 1990).

5. COMPORTAMENTO DO CONCRETO ENDURECIDO EM ALTAS TEMPERATURAS

As estruturas de concreto armado perdem capacidade resistente quando submetidas a altas temperaturas porque tanto o aço, como o concreto, têm suas características mecânicas reduzidas gradativamente com o aumento progressivo da temperatura. Porém, o detalhamento do comportamento do concreto frente ao fogo ainda é controverso na literatura. O concreto, por ser um material heterogêneo, composto por água, agregados (às vezes com a presença de agregados finos, tipo pozolana, utilizados nos concretos de alta resistência mecânica) e cimento em diversas proporções e com diferentes propriedades térmicas, dificulta o estudo detalhado da sua degradação frente ao incêndio. Por toda esta dificuldade de caracterização das principais causas de danos ao concreto decorrentes da elevação da temperatura devido ao incêndio, a literatura ainda não apresenta posições totalmente convergentes sobre o tema em tela. Como exemplo, são apresentadas a seguir, algumas posições de alguns autores em relação ao detalhamento do processo de perda de resistência mecânica do concreto armado com a elevação da temperatura.

De acordo com TAYLOR (1990) a pasta de cimento sofre expansão com a elevação da temperatura, mas a partir dos 300 °C ocorre contração, associado à perda de água na forma de vapor. Os agregados, de uma forma geral, continuam a se expandir em qualquer temperatura, gerando aumento da tensão interna na matriz de concreto que resulta na perda de resistência mecânica ou até mesmo “*spalling*” ou lascamento explosivo. A decomposição do Hidróxido de Cálcio (C-H), responsável pela apassivação da armadura do concreto armado e que forma algo em torno de 45% da pasta de cimento, ocorre entre 450 ~ 550 °C. Já o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica e que forma aproximadamente 55% da pasta de cimento, decompõe-se quase que totalmente em temperaturas de até 600 °C.

Os poros na estrutura de concreto podem ser classificados em micro (menos de 1 µm), meso (entre 1 µm e 1 cm) e macro-poros (maiores de 1 cm). Para concretos submetidos a altas temperaturas, a resistência mecânica e o Módulo de Young caem e a estrutura interna se degenera, as fissuras se desenvolvem nos micro e meso-poros (CHAN *et al.*, 2000).

Concretos de cimento Portland comum começam a perder resistência em temperaturas em torno de 100 °C e a temperaturas de aproximadamente 300 °C os danos são permanentes. Por volta de 600 °C, o concreto perde praticamente toda a sua resistência mecânica, pois o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), responsável pela resistência mecânica do concreto, está, praticamente, totalmente decomposto (SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Segundo BRANCO & SANTOS (2000), a evolução do comportamento do concreto com as temperaturas traduz-se pelos efeitos abaixo:

- 100 °C – ocorrência de evaporação da água, embora sem diminuição da resistência mecânica;
- 200 °C – resistência residual do concreto em torno de 80% a 90% da resistência original;
- 300 °C – decomposição dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), resistência em torno 70% da original;
- > 500 °C – decomposição da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resistência residual de 30% a 40% da resistência inicial.

Concretos de alta resistência à compressão e resistência normal perdem resistência mecânica frente ao incêndio da mesma maneira (CHAN *et al.*, 1999). Pode-se dividir a perda de resistência à compressão frente ao incêndio em 3 etapas:

- 0 – 400 °C, onde pouca resistência é perdida, uma vez que a decomposição completa do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ocorre em até 600 °C;
- 400 – 800 °C representa a faixa crítica de perda de resistência mecânica;
- Acima de 800 °C, onde se atinge a resistência residual, uma vez que a estrutura resistente do concreto (C-S-H) já foi decomposta.

O concreto endurecido decompõe-se quimicamente aproximadamente a partir dos 100 °C. Em altas temperaturas, as estruturas de concreto sofrem os efeitos da ação térmica na microestrutura (decomposição termoquímica e microfissuração excessiva) e na macroestrutura (escoriações e lascamentos). A degradação térmica compromete a segurança estrutural. O concreto de densidade normal apresenta uma boa resistência ao fogo em relação ao aço estrutural sem proteção térmica. No entanto, o concreto é

constituído de vários materiais, com características térmicas diferentes entre si, sendo que o comportamento diferencial entre os agregados, a pasta e a água levam à desestruturação do material quando submetido a temperaturas elevadas (COSTA *et al.*, 2002b).

O concreto de alta resistência (CAR), embora apresente excelente desempenho contra a corrosão das armaduras e penetração de umidade, é mais susceptível ao calor do que o concreto usual em virtude de sua baixa porosidade. Além das decomposições químicas, comuns a qualquer concreto submetido a temperaturas elevadas, o CAR apresenta uma tendência a lascamentos instantâneos e que podem ser violentos (COSTA *et al.*, 2002a).

Os fatores que influenciam a resistência mecânica de concretos e argamassas podem ser divididos em materiais e ambientais. Os fatores materiais incluem o tipo de agregado, a interface pasta de cimento – agregado, a incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento. Já os fatores ambientais referem-se à taxa de aquecimento, duração à exposição de temperatura máxima, taxa de resfriamento, condições de carregamento e umidade da pasta de cimento (CÜLFİK *et al.*, 2002).

De acordo com HAMMER & LINGARD (1995), concretos com agregados leves podem não ser mais resistentes ao incêndio como apregoa a literatura específica. Existem fatores como o tipo de incêndio (celulósico ou hidrocarboneto), relação *a/c*, permeabilidade e carregamento das estruturas durante o incêndio que podem fazer com que um concreto composto por agregados leves possa ser menos resistente ao incêndio ou mais susceptível ao lascamento explosivo que os concretos comuns. Há três fatores que diminuem as condições de resistência dos concretos leves com relação ao incêndio de hidrocarbonetos: a relação *a/c* dos concretos com agregados leves é maior se comparado ao concreto comum, uma vez que o agregado funciona como uma reserva de água, absorvendo parte da água da pasta, aumentando, portanto, a quantidade de água disponível para evaporação; a menor permeabilidade destes agregados conduz a uma maior pressão de vapor no poro do agregado e, a menor condutividade térmica conduz a maiores gradientes de temperatura. Uma vez ocorrido o lascamento explosivo, agravado por qualquer dos motivos mencionados acima, a armadura da estrutura de concreto se expõe e o processo de perda de resistência mecânica juntamente com o possível colapso da estrutura se acelera.

5.1 Propriedades térmicas dos materiais não combustíveis

Propriedade térmica de um material pode ser entendida, de forma genérica, como sendo a sua reação ao calor. Um sólido, à medida que absorve energia na forma de calor, expande-se e a sua temperatura aumenta. A energia pode ser transportada para regiões mais frias do corpo sólido e, por fim, o corpo se funde. A condutividade térmica, o calor específico e o coeficiente de dilatação térmica são as propriedades térmicas dos sólidos. A difusividade térmica e a inércia térmica são propriedades decorrentes das três primeiras citadas. A seguir, são descritas as propriedades térmicas aqui mencionadas.

A Tabela 5.1 apresenta um quadro comparativo com algumas propriedades térmicas de alguns materiais de construção civil.

Tabela 5.1 – Quadro comparativo das propriedades térmicas dos materiais (Fonte: INCROPERA, 1992).

Quadro Comparativo de Propriedades Térmicas dos Materiais			
	Massa Aparente (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor Específico (kJ/kg.K)
Concreto Comum	2.200 - 2.500	0,5 - 2,0	1,0
Concreto com Vermiculita	400 - 800	0,24 - 0,31	1,0
Concreto Celular Autoclavado	400 - 500	0,17	1,0
Argamassa comum	1.800 - 2.100	1,15	1,0
Argamassa de gesso	1.200	0,70	0,84
Argamassa Celular	600 - 1.000	0,40	1,0
Cerâmicas	1.000 - 2.000	0,70 - 1,05	0,92
Gesso	750 - 1.000	0,35	0,84
Argila Expandida	< 400	0,16	-
Betume Asfáltico	1.000	0,17	1,46
Lã de Rocha	20 - 200	0,045	0,75
Lã de Vidro	10 -100	0,045	0,70
Aço	7.800	55	0,46
Cobre	8.900	380	0,38
Ar	-	0,026	-

A condutividade térmica é a propriedade mais importante para o estudo do comportamento dos concretos em altas temperaturas. É caracterizada pela capacidade do concreto em conduzir calor. Os materiais utilizados como revestimento de proteção térmica apresentam baixa condutividade, se comparados aos materiais estruturais (Tabela 5.1).

Segundo ZHENG (1990), a elevação da porosidade de um material de proteção térmica determina a diminuição da condutividade térmica, pois o ar alojado nos poros possui baixa condutividade térmica, aproximadamente 0,026 W/mK a 300K. Assim, a condutividade térmica dos concretos, da mesma forma que em outros materiais de construção, diminui com o aumento da temperatura (Figura 5.1), uma vez que ocorre a substituição da água retida nos poros da pasta de cimento, liberada na forma de vapor, por ar do ambiente.

De acordo com CERNÝ *et al.* (2003), a diminuição da condutividade térmica de concretos e argamassas, devido ao aumento da temperatura, ocorre devido a dois mecanismos correlatos: aumento da porosidade da pasta de cimento, em função da liberação do vapor de água, e, intensificação da transferência de calor devido à radiação e convecção (estes dois fenômenos são impulsionados pelo aumento da porosidade). Tanto nos concretos como nas argamassas, a pasta de cimento sofre os efeitos do carregamento térmico, com o aumento da porosidade e a conseqüente redução da condutividade térmica.

Figura 5.1: Variação da condutividade térmica do concreto em função da elevação da temperatura (WICKSTRÖM & HADZISELIMOVIC, 1996).

Apresenta-se a seguir, na Figura 5.2, alguns domínios de condutividades térmicas de diversos estados da matéria em temperatura e pressões normais.

Figura 5.2 - Domínios de condutividades térmicas de diversos estados da matéria em temperatura e pressões normais (Fonte: CALLISTER Jr, 2002).

A Figura 5.3, por sua vez, apresenta valores de condutividade térmica para diversos materiais de construção civil em função de sua densidade.

Figura 5.3 – Coeficiente de condutividade térmica de alguns materiais de construção civil em função de sua densidade (Fonte: MAI, 2002).

O calor específico representa a capacidade térmica do material, ou seja, é uma propriedade que serve como indicativo da habilidade de um material em absorver calor de sua vizinhança externa. O calor específico é definido pela quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário de temperatura no material (Expressão 5.1).

$$c_c = \frac{dQ}{d\theta} \quad [5.1]$$

Onde:

c_c = calor específico do material, em J/mol.K;

dQ = energia exigida para produzir uma variação de temperatura $d\theta$ em um mol do material, em J/mol;

$d\theta$ = variação de temperatura no material, em K.

O concreto, como a grande parte dos materiais utilizados pela engenharia, possui coeficiente de dilatação térmica positivo, cujo valor depende da composição da mistura e do estado higrotérmico da matéria no momento da variação da temperatura.

As proporções da mistura dos principais materiais do concreto: a água, a pasta de cimento, os agregados e o aço refletem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Em altas temperaturas, cada constituinte da mistura apresenta dilatação térmica diferente, levando-se ao aumento de fissuração da matriz.

A influência do estado higrotérmico da matéria também é importante porque o coeficiente de expansão térmica da pasta pode ser dividido em 2 parcelas: o coeficiente de expansão térmica, propriamente dito, e o coeficiente de pressão de vapor. A elevação de temperatura aumenta o coeficiente de pressão, gerando pressões na rede de poros que podem conduzir ao “*spalling*” ou lascamento explosivo do concreto.

A difusividade térmica representa a velocidade em que ocorrem variações de temperatura no interior da massa de um sólido, e descreve, portanto, a facilidade com que o material pode sofrer estas variações. A difusividade é relacionada com a condutividade térmica pela Expressão 5.2:

$$\kappa = \frac{\lambda}{c_c \cdot \rho} \quad [5.2]$$

Onde:

κ = difusividade térmica do material, em W/m.K;

λ = condutividade térmica do material, em J/m.s.K;

c_c = calor específico do material, em J/kg.K;

ρ = massa específica do material, em kg/m³.

A difusividade térmica é diretamente proporcional à condutividade térmica (Expressão 5.2). Medir a difusividade térmica consiste, em princípio, em se determinar a relação entre o tempo e o diferencial térmico entre o interior e a superfície de um corpo de prova, ou seja, a velocidade de ganho e perda de calor de um corpo sólido.

Materiais com grande difusividade térmica respondem rapidamente ao aumento ou diminuição da temperatura, por outro lado, materiais com baixa difusividade térmica respondem mais lentamente. Portanto, argamassas de proteção térmica ou materiais isolantes devem, necessariamente, possuir baixo coeficiente de difusividade térmica.

Os elementos de construção apresentam uma certa resistência inicial para variar a temperatura quando incide sobre eles um fluxo de calor. Esta resistência inicial é chamada inércia térmica. A inércia térmica é determinada de acordo com a Expressão 4.3 (MALHOTRA, 1982):

$$b = \sqrt{\rho \cdot c_c \cdot \lambda} \quad [5.3]$$

Onde:

b = inércia térmica, em J/m².s^{1/2}.K];

ρ = massa específica do material, em kg/m³;

c_c = calor específico do material, em MJ/kg.K;

λ = condutividade térmica do elemento de vedação, em W/m.K;

O termo inércia térmica, como se pode observar, é decorrente de três propriedades dos materiais e poderia ser definido como coeficiente de inércia térmica. Cabe salientar que materiais com alta inércia térmica permitem o rápido crescimento da temperatura, sendo que, seriam protetores ou refratários os materiais com baixa inércia térmica (MALHOTRA, 1982 *apud* COSTA, 2002).

De acordo com SHIELDS & SILCOCK (1987), o tempo de “*flashover*” ou o tempo de crescimento da temperatura em um incêndio depende da inércia térmica da superfície dos materiais de revestimento das paredes, teto e piso do compartimento em chamas.

A Tabela 5.2 apresenta a inércia térmica de alguns materiais de construção civil.

Tabela 5.2 – Inércia Térmica de alguns materiais de construção civil (Fonte: SHIELDS & SILCOCK, 1987).

Material	Condutividade Térmica – λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Densidade – ρ (kgm^{-3})	Calor Específico – c_c ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Inércia Térmica – $\lambda \rho c_c$ ($\text{W}^2\text{m}^{-4}\text{K}^{-2}$)
Tijolo	0,8	2,6	800	$1,66 \cdot 10^6$
Gesso	0,16	950	840	$1,276 \cdot 10^5$
Fibra isolante	0,05	240	1,25	$1,5 \cdot 10^4$

5.2 Decomposição química do concreto endurecido

A água livre no concreto endurecido é evaporada a aproximadamente 100 °C. A água de gel e a água de cristalização são liberadas da matriz de concreto a partir de temperaturas não muito superiores a 100 °C.

A pasta de cimento começa a perder estabilidade entre 100 e 200 °C, na forma de redução de resistência à compressão. Acima dos 200 °C ocorre uma reação físico-química: a água evaporada reduz as forças de Van Der Walls entre as camadas de C-S-H. A redução parcial da adesão química acentua o aparecimento de fissuras e ocorre uma ligeira perda de resistência, podendo persistir até os 300 °C. Aos 200 °C aproximadamente, o módulo de elasticidade apresenta de 70% a 80% do seu valor inicial, enquanto que aproximadamente aos 420 °C ele apresenta de 40% a 50% (NEVILLE, 1997).

Uma série de reações na pasta de cimento endurecida ocorre em temperaturas até 600 °C: dissecação dos poros seguida da decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H. A reação endotérmica da desidratação do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 libera o óxido de cálcio CaO e água, sendo esta última evaporada.

Os dois principais produtos da hidratação do cimento são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que é a parte resistente do concreto e representa cerca de 60% da massa de

concreto e o hidróxido de cálcio (C-H) que representa aproximadamente 40% da massa de concreto, cuja principal função é apassar a armadura de aço dentro da estrutura de concreto. As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam o comportamento destes produtos da hidratação frente à elevação da temperatura.

Figura 5.4 – Termogravimetria do Silicato de Cálcio Hidratado – C-S-H (Fonte: H. F. W. TAYLOR, 1990).

Figura 5.5 – Termogravimetria do Hidróxido de Cálcio – C-H (Fonte: H. F. W. TAYLOR, 1990).

5.3 Degradação da macroestrutura do concreto endurecido

As reações do concreto ao calor são visíveis: esfarelamento da superfície calcinada, delaminação progressiva das camadas superficiais do concreto ("*sloughing*") e lascamentos instantâneos de porções consideráveis de concreto do elemento estrutural ("*spalling*").

Os lascamentos são causados por vários fatores, sendo o mais importante a pressão interna de vapor gerada na rede de poros do concreto, a medida que a temperatura se eleva. Os concretos de baixa porosidade (CAR) tendem a apresentar lascamentos explosivos ("*spalling*"), com grande liberação de energia, nos primeiros 30 minutos de incêndio, quando a taxa de elevação de temperatura é muito severa.

Como a condutividade térmica dos concretos em geral é baixa, pode-se dizer que a decomposição química dos produtos da hidratação ocorre da área externa em direção ao interior do elemento estrutural. Nas Figuras 5.6 e 5.7, respectivamente, apresentam-se as evoluções de temperatura em elementos de concreto de densidade normais e concretos de baixa densidade até a profundidade de 110 mm quando submetidas à elevação de temperatura em um forno durante 4 horas. Observa-se, portanto, que concretos de menor densidade conduzem menos calor para o interior da estrutura porque possuem menor coeficiente de condutividade térmica.

Figura 5.6 – Perfil de temperatura em um elemento de concreto de densidade normal (Fonte: MALHOTRA, 1982).

Figura 5.7 – Perfil de temperatura em um elemento de concreto de baixa densidade (Fonte: MALHOTRA, 1982).

A adição de pozolanas e outros finos na matriz de cimento é um método eficaz na produção de concretos de alta resistência na medida em que ocorre diminuição da porosidade. Além do mais, a durabilidade do concreto com relação a entrada de agentes agressivos, como: sulfatos, cloretos, etc, é também melhorada devido a uma microestrutura mais compacta, que diminui a difusão de íons. Entretanto, a grande compactidade interna pode ser responsável pela diminuição da resistência destes concretos a altas temperaturas. Embora, os parâmetros térmicos de concretos de alta resistência sejam similares aos de resistência normal, como o calor específico, a difusividade, a condutividade térmica e o coeficiente de expansão térmica, os concretos de alta resistência apresentam maior risco de ocorrência de “spalling” devido a menor permeabilidade de sua estrutura interna se comparados aos concretos de resistência normal (MIN *et al.*, 2003).

5.4 Evolução da zona de baixa condutividade térmica no elemento estrutural

Durante o incêndio, a temperatura na superfície externa da estrutura de concreto aumenta, sendo que a profundidade da zona de baixa condutividade térmica também aumenta. Existe, então, uma zona de evaporação que se forma e se movimenta no sentido do interior do elemento estrutural (MAI, 2002). Portanto, na medida do progresso do incêndio, torna-se cada vez menor a zona úmida e de baixas temperaturas dentro da peça de concreto. A Figura 5.8 apresenta a evolução das temperaturas na matriz de concreto durante um incêndio quando do uso de argamassa de proteção contra incêndio.

Figura 5.8 – Modelo esquemático da evolução da temperatura na matriz de concreto em um incêndio utilizando-se argamassa de proteção térmica (MAI, 2002).

A Figura 5.9 apresenta a variação da condutividade térmica do concreto, sem proteção por argamassa, em função da evolução do incêndio. Nota-se que a zona de baixa condutividade térmica cresce na direção do exterior do elemento estrutural. Esta zona está sujeita ao lascamento explosivo ou ao esfarelamento do concreto, expondo a armadura de aço que se localiza próxima à superfície da peça de concreto.

Figura 5.9 – Variação da zona de baixa condutividade térmica em função da evaporação da água.

5.5 Evolução da perda de resistência mecânica do concreto em função da elevação da temperatura a partir dos parâmetros de dosagem (Parte Experimental)

Em função das diversas visões presentes no meio acadêmico sobre o comportamento do concreto em altas temperaturas, como constatado anteriormente, foi desenvolvido um plano experimental, que procura verificar a evolução da perda de resistência mecânica do concreto em função da elevação da temperatura. Como também não foi verificado na literatura pesquisada, nenhum estudo que relacione perda de resistência mecânica do concreto em função da elevação da temperatura a partir de um estudo de dosagem, utilizou-se preliminarmente, cinco tipos de concreto, variando-se alguns parâmetros de dosagem, submetendo-se os corpos de prova a algumas curvas de temperatura em mufla, para se verificar a diferença de comportamento de resistência à compressão dos concretos pesquisados em função dos seus parâmetros de dosagem. Obviamente, a condição de ensaios em mufla não corresponde à situação real de um incêndio, uma vez que a mufla não apresenta uma curva de temperatura tão acentuada como pode ser verificada em um incêndio com materiais celulósicos ou hidrocarbonetos. Os concretos ensaiados apresentam resistência média. Desta forma, o

fenômeno do “*spalling*”, que é um grande fator destrutivo de estruturas de concretos de baixa porosidade, não foi verificado.

5.5.1 Objetivos do experimento

O objetivo do experimento realizado é a constatação ou não da influência dos parâmetros de dosagem na perda de resistência mecânica dos concretos submetidos à altas temperaturas, sendo que necessita-se ainda da realização de experimentos mais próximos da realidade de um incêndio para se verificar a validade destes resultados com o objetivo de transportá-los para o meio prático. Depreendeu-se ainda, dos ensaios realizados, que a elevação da relação a/c na dosagem de concretos comuns determinou maior perda de resistência à compressão dos mesmos quando submetidos à elevação de temperatura em mufla.

5.5.2 Descrição do experimento

Os ensaios foram realizados em duas etapas, sendo que na primeira etapa, a partir de um estudo de dosagem, procurou-se identificar quais parâmetros de dosagem são mais significativos para a perda de resistência à compressão do concreto submetido à temperaturas elevadas. Para tanto, foram confeccionados cinco traços de concretos, moldando-se corpos de prova cúbicos (aresta = 10 cm), variando-se a relação a/c e a quantidade de agregados, sendo que, os concretos com maior relação a/c foram submetidos à cura úmida (condição de saturação) para melhor identificação da influência da relação a/c e os concretos de menor relação a/c foram submetidos à cura seca (em estufa) a fim de se minimizar o efeito da relação a/c. Após 30 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos à mufla (200 °C, 400 °C e 600 °C) e sua resistência à compressão residual foi medida através dos resultados do rompimento dos corpos de prova na prensa. Foram confeccionados, portanto, 8 corpos de prova de cada traço para serem submetidos em dupla, a cada temperatura (200 °C, 400 °C e 600 °C) previamente estipulada dentro da mufla. Os 2 últimos corpos de prova foram rompidos sem terem sido submetidos à mufla para servirem de parâmetro de resistência referencial. O experimento consiste, então, em submeter os corpos de prova às temperaturas mencionadas e, imediatamente após deixá-los resfriar. Depois de 15 dias houve o rompimento de todos os corpos de prova. As temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C

são as temperaturas medidas na mufla, ou seja, a temperatura dos gases no interior da mufla.

Na segunda etapa, todos os passos da primeira etapa foram repetidos, porém, trabalhou-se apenas com 2 traços de concreto, variando-se apenas a relação a/c (parâmetro de dosagem que apresentou maior influência na perda de resistência a compressão nos corpos de prova da primeira etapa). É importante salientar que todos os corpos de prova foram rompidos comprimindo-se as faces laterais, com o objetivo de se diminuir o efeito da rugosidade na leitura dos resultados. Também é importante destacar que os corpos de prova sempre obedeceram a uma mesma posição dentro da mufla com o objetivo de se diminuir desvios na medição de resultados.

A resistência residual à compressão é uma medida indireta da resistência ao fogo da estrutura de concreto. Quanto maior a resistência residual de um concreto submetido à altas temperaturas, melhor seu desempenho frente ao incêndio no sentido de garantir às estruturas integridade física, isolamento térmico e estabilidade estrutural.

5.5.3 Seleção de Materiais

Optou-se por utilizar-se cimento ARI (alta resistência inicial) uma vez que se deseja diminuir o efeito da hidratação do cimento (ganho de resistência ao longo do tempo) nos resultados obtidos. Todos os ensaios na mufla e prensa foram realizados após os 30 dias de cura úmida para os concretos com elevada relação a/c e cura seca (em estufa) para concretos com baixa relação a/c. Os agregados são comuns tipo areia lavada de rio de granulometria média e pedra britada (granito) com granulometria de 2,5 cm. Estes materiais são os mais largamente usados em edifícios na região Sudeste do país.

5.5.4 Estudo de Dosagem

Na primeira etapa, foram selecionados 5 traços variando-se a quantidade de agregados e a relação a/c. O objetivo principal do estudo de dosagem é identificar entre os parâmetros “quantidade de agregados” e “relação a/c” aquele que possui maior influência na perda de resistência mecânica dos concretos submetidos à altas temperaturas. Obviamente, outros parâmetros poderiam ser avaliados como tipo de

agregado, dimensão do agregado, uso de aditivos, etc, porém, optou-se por escolher o parâmetro relação a/c por este influir diretamente na porosidade, apontada pela literatura como fator importante no fenômeno do “spalling”, e o parâmetro volume de agregados, porque, em princípio, os agregados suportam temperaturas maiores sem sofrerem grandes transformações. Desta forma, o que se pretende avaliar é o desempenho de concretos com volumes de pasta diversos, uma vez que se imagina que a pasta de cimento seja em grande parte responsável pelo desempenho do concreto frente à altas temperaturas. Com a variação dos parâmetros relação a/c e volume de agregados, observa-se, ao final, o desempenho dos concretos frente à variação de temperatura em mufla.

5.5.5 Influência do tipo de agregado

Segundo a literatura, o agregado pode apresentar influência na perda de resistência a compressão. Isto vale principalmente para os agregados calcários que são expansivos. Porém, no experimento realizado não consideramos o efeito do tipo de agregado.

5.5.6 Influência da relação a/c

O efeito da relação a/c está sendo considerado nas duas etapas do experimento, na medida em que foram confeccionados traços iguais, variando-se apenas a relação a/c. Escolheu-se o parâmetro relação a/c porque ela é função direta da porosidade dos concretos e argamassas, sendo a porosidade função direta da condutividade térmica. A condutividade térmica é um fator determinante no comportamento de materiais de boa resistência térmica.

5.5.7 Influência do volume de argamassa

A variação no volume de argamassa foi considerada na primeira etapa do experimento na medida em que a quantidade de agregado foi alterada nos diversos traços estudados, porém, pelo fato desta variação não ter se apresentado relevante, os testes da segunda etapa não contemplaram variação do teor de argamassa.

5.5.8 Influência da porosidade

A partir da revisão bibliográfica, percebe-se que este parâmetro é fundamental na resistência ao fogo de materiais isoladores térmicos. Já se sabe que a baixa porosidade, presente nos concretos de alta resistência mecânica, pode conduzir a estrutura a sofrer lascamento explosivo no caso de incêndio. Sabe-se ainda que este parâmetro é razão direta da relação a/c , um dos fatores analisados neste experimento.

5.5.9 Influência da curva temperatura x tempo (mufla)

Esta é uma condição de exposição importante na medida em que, a partir dela, se pode simular uma situação de incêndio ou, pelo menos, seguir as curvas padronizadas de ensaio de resistência ao fogo de materiais de construção. No caso, a mufla utilizada, em princípio, apresenta curva temperatura x tempo linear, ou seja, não representa nem as curvas padronizadas dos materiais celusósicos (ISO 834) nem dos hidrocarbonetos. Assim, a taxa de aquecimento da mufla é menos severa que a de um incêndio real ou que a das curvas padronizadas de incêndio. Com o uso da mufla, é possível medir a perda de resistência a compressão dos concretos submetidos à temperaturas elevadas, porém os corpos de prova não foram submetidos à condições extremas de temperatura pela própria limitação do equipamento.

Apresenta-se, a seguir, na Figura 5.10 a curva real de elevação de temperatura da mufla, medida durante a realização dos ensaios. A curva de elevação de temperatura da mufla foi aferida com a mesma vazia e na prática, esta curva não é linear, conforme especificação do fabricante.

Figura 5.10 – Curva temperatura x tempo real, levantada a partir do aquecimento da mufla sem corpos de prova.

5.5.10 Apresentação dos dados e análise de resultados da primeira etapa

Como mencionado anteriormente, na primeira etapa foram confeccionados cinco traços (Tabela 5.3), variando-se a quantidade de agregados (volume de pasta) e a relação a/c. Os concretos com baixa relação a/c são mantidos em ambiente seco até o momento de entrada na mufla, sendo que os de alta relação a/c são mantidos em cura submersa, para garantir que não haja perda de água para o ambiente ou retração por secagem. Desta forma, os corpos de prova do primeiro grupo, ao irem para a mufla, apresentam muito baixa relação a/c e poros mais secos, sendo que os corpos de prova do segundo grupo estão próximos da saturação.

Tabela 5.3 – Perfil de dosagem para os cinco traços em massa confeccionados na primeira etapa do experimento.

Traços			Relação a/c
1	1:3	1:1:2	0,38
2	1:4	1:1,5:2,5	0,47
3	1:5	1:2:3	0,55
4	1:3	1:1:2	0,47
5	1:5	1:2:3	0,47

Nota-se que nos traços T1 e T4, variou-se apenas a relação a/c, assim como nos traços T3 e T5. Porém, se forem analisados os traços T2, T4 e T5, percebe-se que os mesmos possuem mesma relação a/c (0,47), variando-se, portanto, a quantidade de agregados (volume de pasta de cimento).

A Figura 5.11 apresenta o perfil de resistência a compressão dos concretos (T1, T2, T3, T4 e T5) à temperatura ambiente (após a cura) em função da relação a/c.

Figura 5.11 – Perfil de resistência a compressão dos traços em função da relação a/c à temperatura ambiente (Eixo vertical à direita representa a resistência mecânica em MPa e à esquerda a relação a/c).

Nota-se que as barras azuis apresentam a relação a/c e as vermelhas a resistência a compressão. Após os corpos de prova serem rompidos, depois de submetidos a 600 °C de temperatura na mufla, constatou-se que o traço 3 registrou maior perda percentual de resistência mecânica (Figura 5.12).

Figura 5.12 – Perda de resistência mecânica percentual dos traços confeccionados na etapa 1 a 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova).

As Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam os perfis de perda de resistência mecânica percentual de cada traço em função da temperatura. Cada traço de concreto foi submetido a três perfis de temperatura (200, 400 e 600 °C). A disposição dos corpos de prova na mufla também foi registrada. Assim, CP M significa o corpo-de-prova que se posiciona no interior da mufla e CP P significa corpo-de-prova que se posiciona na parte frontal da mufla, próxima à saída.

Figura 5.13 – Perda de resistência percentual para o traço 1 nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 1).

Figura 5.14 – Perda de resistência percentual para o traço 2 nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 2).

Figura 5.15 – Perda de resistência percentual para o traço 3 nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 3).

Figura 5.16 – Perda de resistência percentual para o traço 4 nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 4).

Figura 5.17 – Perda de resistência percentual para o traço 5 nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 5).

A Tabela 5.4 e a Figura 5.18 apresentam a evolução, em termos absolutos, da perda de resistência a compressão para cada traço de concreto em cada temperatura.

Tabela 5.4 – Evolução da perda de resistência mecânica (MPa) para traço em cada temperatura.

Temperatura	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5
20 °C	47	34	33	33	43
200 °C	45	32	32	27	38
400 °C	32	22	16	20	28
600 °C	22	16	9	13	17

Figura 5.18 – Perfil de perda de resistência mecânica em função da temperatura (Eixo vertical representa a resistência residual dos corpos de prova em MPa).

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 5.18, determinados pelas curvas de perda de resistência mecânica dos concretos em função da elevação da temperatura, poder-se-ia imaginar, no futuro, o estabelecimento de um nível mínimo de resistência residual para uma determinada temperatura (300 °C, por exemplo) com o objetivo primordial de se diminuir o risco de colapso estrutural de uma estrutura de concreto exposta ao incêndio. Desta forma, para o desenvolvimento da segurança de estruturas de concreto em relação ao incêndio, seria importante a definição de uma temperatura máxima aceitável na superfície do elemento de concreto para a qual um nível mínimo de segurança estrutural fosse garantida.

Comparando-se os resultados do experimento com os colhidos na literatura (BRANCO & SANTOS, 2000), tem-se que:

- Aos 200 °C todos os traços ensaiados apresentam resistência residual acima dos 80%, conforme descrito por estes autores;
- Acima dos 500 °C a resistência residual dos traços ensaiados está acima dos 40% da resistência original, a exceção do Traço 3 que está ligeiramente abaixo. Desta forma, embora exista divergência com relação ao afirmado por estes autores, considera-se que os resultados do experimento estão de acordo com a bibliografia pesquisada.

A Tabela 5.5 apresenta uma visão geral dos resultados de perda de resistência mecânica em função da elevação da temperatura. As Tabelas 5.6 e 5.7, respectivamente, apresentam a análise da influência dos dois parâmetros escolhidos para serem variáveis dos traços confeccionados: quantidade de agregados (volume de pasta) e relação a/c.

Nota-se que na Tabela 5.6, onde ocorre a separação dos traços por mesma quantidade de agregados, não há convergência de resultados, ou seja, os traços T3 e T5 apresentam resultados de resistência residual muito distantes (28% e 40% respectivamente). Todavia, em todos os resultados do experimento, sempre que ocorrer comparação de resistência mecânica entre traços com diferentes relação a/c, os de maior relação a/c apresentam sempre a menor resistência mecânica residual. A partir desta análise, descartou-se o parâmetro quantidade de agregados (volume de pasta) como de grande influência para se trabalhar na segunda etapa do experimento.

Na Tabela 5.7, onde existe a análise dos traços com mesma relação a/c, nota-se que estes traços apresentaram resistência residual após a aplicação da temperatura em torno de 40% da resistência inicial. Esta uniformidade de resultados, aliado ao fato da constatação de que o aumento na relação a/c implica em menores resistências residuais para todos os concretos estudados, fez com que o parâmetro relação a/c fosse escolhido

para ser novamente verificado numa segunda etapa experimental. Na segunda etapa, portanto, somente o impacto da variação da relação a/c na perda de resistência mecânica em função da elevação da temperatura foi analisada.

Tabela 5.5 – Tabela geral dos resultados obtidos com os traços confeccionados para a primeira etapa.

Traços			Relação a/c	Perda de resistência à compressão	Resistência residual	Resistência inicial à temperatura ambiente (MPa)	Resistência residual - 600 °C (MPa)
T1	1:3	1:1:2	0,38	53%	47%	47	22
T2	1:4	1:1,5:2,5	0,47	54%	46%	34	16
T3	1:5	1:2:3	0,55	72%	28%	33	9
T4	1:3	1:1:2	0,47	59%	41%	33	13
T5	1:5	1:2:3	0,47	60%	40%	43	17

Tabela 5.6 – Comparação de perda de resistência mecânica para grupos de mesma quantidade de agregados.

Análise dos traços com mesma quantidade de agregados							
Traços			Relação a/c	Perda Resistência	Resistência Residual	Quantidade de cimento (kg/m ³)	Volume de Pasta (%)
T1	1:3	1:1:2	0,38	53%	47%	538	31,5
T4	1:3	1:1:2	0,47	59%	41%	513	33,0
T3	1:5	1:2:3	0,55	72%	28%	357	24,0
T5	1:5	1:2:3	0,47	60%	40%	368	22,8

Tabela 5.7 – Comparação de perda de resistência mecânica para grupos de mesma relação a/c.

Análise dos traços com mesma relação a/c							
Traços			Relação a/c	Perda de Resistência	Resistência Residual	Quantidade de cimento (kg/m³)	Volume de Pasta (%)
T4	1:3	1:1:2	0,47	59%	41%	513	31,5
T2	1:4	1:1,5:2,5	0,47	54%	46%	429	33,0
T5	1:5	1:2:3	0,47	60%	40%	368	22,8

A Figura 5.19 apresenta a correlação entre a perda resistência a compressão e a relação a/c. Nota-se que a correlação (R) está em torno de 0,77, sendo que, para que exista uma forte interdependência entre a relação a/c e a perda de resistência a compressão em função da temperatura seria necessário uma correlação maior que 0,9. Desta forma, na segunda etapa repetiu-se o experimento em tela, variando-se somente a relação a/c.

Figura 5.19 – Correlação entre perda de resistência a compressão e relação a/c.

A seguir, apresenta-se nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 a desmoldagem dos corpos de prova, a sua colocação na mufla e sua disposição na prensa.

Figura 5.20 – Desforma dos corpos de prova cúbicos (aresta 10 cm).

Figura 5.21 – Corpos de prova após desforma.

Figura 5.22 – Corpo de prova dentro da mufla.

Figura 5.23 – Disposição do corpo de prova na prensa.

Os corpos de prova cilíndricos não foram enviados à mufla. Eles serviram de parâmetro apenas para se medir a resistência a compressão dos corpos de prova cúbicos à temperatura ambiente.

5.5.11 Apresentação dos dados e análise de resultados da segunda etapa

Como já mencionado anteriormente, na segunda etapa, todos os passos da primeira etapa foram repetidos, porém, utilizou-se apenas dois traços (Tabelas 5.8 e 5.9), variando-se apenas a relação a/c (fator que demonstrou maior influência na primeira etapa). Cabe considerar que foram produzidos corpos de prova cúbicos como na primeira etapa, porém, de duas dimensões: de 10 cm aresta e de 13 cm de aresta. O objetivo, neste caso, é verificar se a dimensão do corpo de prova influência na perda de resistência a compressão.

Tabela 5.8 – Composição do traço 1

Traço 1				
cimento	areia	pedra	a/c	ab (cm)
1	1	2	0,3	0 +/- 1

Tabela 5.9 – Composição do traço 2

Traço 2				
cimento	areia	pedra	a/c	ab (cm)
1	1	2	0,5	9 +/- 1

Para o rompimento dos corpos de prova nesta etapa, ao contrário da primeira etapa, em que se passaram 30 dias, foram esperados 90 dias para realização dos testes de resistência a compressão. O objetivo do aumento deste prazo é observar a evolução da perda de resistência mecânica em função da temperatura nos concretos analisados, diminuindo-se ao máximo o efeito da hidratação do cimento. Novamente, como na primeira etapa, foi escolhido cimento ARI, buscando minimizar o efeito já mencionado.

As Tabelas 5.10 e 5.11 e Figuras 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam os resultados da resistência a compressão residual após os corpos de prova terem sido submetidos à temperaturas de 400 °C e 700 °C, em mufla. A temperatura ambiente também pode ser lida como temperatura de 20 °C.

Tabela 5.10 – Comparativo entre perda de resistência mecânica entre os dois traços para arestas de somente 10 cm.

Traços			Relação a/c	Abatimento (cm)	Perda de resistência à compressão	Resistência residual	Resistência inicial - 20 °C (MPa)	Resistência residual - 700 °C (MPa)
T1	1:3	1:1:2	0,30	0	43%	57%	91	52
T2	1:3	1:1:2	0,50	9	55%	45%	69	31

Tabela 5.11 –Apresentação da evolução da perda de resistência a compressão para os corpos de prova de arestas de 10 e 13 cm.

Aresta (cm)	Temperatura (°C)	Traço 1 (MPa)	Traço 2 (MPa)	Traço 1	Traço 2
10	ambiente	91	69	100%	100%
10	400	77	52	85%	75%
10	700	52	31	57%	45%
13	700	38	21	41%	30%

Figura 5.24 – Evolução da perda de resistência (traço 1:1:2 e relação a/c = 0,3 - Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 1 da segunda etapa).

Figura 5.25 - Evolução da perda de resistência (traço 1:1:2 e relação a/c = 0,5 - Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova do traço 2 da segunda etapa).

Figura 5.26 – Comparativo de perda de resistência a compressão dos traços 1 e 2.

Figura 5.27 – Comparativo percentual de perda de resistência a compressão dos traços 1 e 2 (Eixo vertical representa a resistência residual percentual dos corpos de prova dos traços 1 e 2 da segunda etapa).

A Figura 5.28 apresenta a diferença de coloração adquirida pelos corpos de prova após aplicação de temperatura de 700 °C, em mufla. O traço 2, com maior relação a/c (0,5), apresentou coloração cinza claro e visivelmente se nota mais fissurações no corpo-de-prova.

Figura 5.28 – Verificação visual da coloração e fissuração dos corpo-de-prova referentes aos traços 1 e 2 (segunda etapa) à temperatura ambiente e submetidos à temperatura de 700 °C, em mufla.

Na Figura 5.28, na linha superior estão dispostos os corpos de prova de aresta de 13 cm e na inferior estão dispostos os corpos de prova com aresta de 10 cm. Na coluna da esquerda estão dispostos os corpos de prova que foram rompidos à temperatura ambiente, os quais demonstram a coloração original dos traços moldados (cinza escuro). O restante dos corpos de prova foi submetido à temperatura de 700 °C. Na coluna do meio estão dispostos os corpos de prova referentes ao traço 1, com relação a/c igual a 0,3. Notar que praticamente não há fissuração e nem mudança de coloração comparado aos corpos de prova da coluna da esquerda. Já na coluna da direita, onde estão dispostos

os corpos de prova referentes ao traço 2 (relação a/c = 0,5), tanto a coloração, cinza claro como a fissuração, são bem visíveis.

Analisando-se os resultados obtidos, destacam-se três fatores relevantes:

- ❖ O concreto de maior resistência a compressão apresenta maior resistência residual de acordo com os resultados da bibliografia pesquisada e os resultados da primeira etapa, ou seja, a menor relação a/c no concreto conduziu a uma maior resistência residual. Nos concretos de alta resistência a mesma situação se apresenta (CHAN *et al.*, 1999), ou seja, eles perdem menos resistência a compressão (percentualmente) se comparados aos concretos de maior relação a/c. Depreende-se ainda dos resultados obtidos na primeira e segunda etapa que a elevação da relação a/c nos concretos implica num incremento da susceptibilidade destes concretos com relação ao fogo;
- ❖ Acima dos 300 °C os corpos de prova apresentaram resistência residual próxima aos 70% como apontado na bibliografia pesquisada (BRANCO & SANTOS, 2000);
- ❖ Os corpos de prova com maior dimensão apresentaram menor resistência residual, o que está em desacordo com os resultados da bibliografia pesquisada (MIN *et al.*, 2003). Isto pode ter ocorrido devido a condição de saturação dos corpos de prova de maior relação a/c, uma vez que tanto na primeira como na segunda etapa os corpos de prova foram mantidos em cura submersa até o momento de serem levados à mufla. A saturação dos poros pode ter favorecido a maior perda de resistência dos corpos de prova de dimensões maiores (Aresta = 13 cm), uma vez que o processo de vaporização da água gera pressão interna nos poros e conseqüente ruptura da estrutura da pasta de cimento facilitando a perda de resistência mecânica;

Por fim, os resultados até aqui apresentados apontam para o fato de que concretos com menor relação a/c são menos susceptíveis a perda de resistência mecânica em função da elevação da temperatura. Desta forma, concretos de alta resistência, apesar de também apresentarem perda de resistência mecânica em função da temperatura, seriam concretos menos susceptíveis à ação deletéria do fogo. Ocorre que existem dois fenômenos que agravam a situação de colapso estrutural destes concretos perante o incêndio:

- Concretos de alta resistência são mais susceptíveis ao lascamento explosivo

devido a sua baixa porosidade, dada pela sua baixa relação a/c. Ocorre ainda que o “*spalling*” não se encerra em si mesmo, uma vez que ele expõe a armadura do concreto armado, o que faz com que esta perca resistência mecânica mais rapidamente do que se estivesse protegida pelo cobrimento de concreto. Assim, este círculo vicioso (lascamento explosivo seguido de exposição da armadura) aumenta a condição de risco de colapso estrutural em concretos de alta resistência;

- Outro fator que aumenta a condição de risco de colapso de concretos de alta resistência é o fato das peças estruturais serem mais esbeltas. Isto ocorre porque, em princípio, não faz sentido o desenvolvimento de concretos com maior resistência mecânica sem a diminuição das seções de pilares e vigas. No estudo de caso apresentado, incêndio no Aeroporto Santos Dumont, resta claro que pilares mais esbeltos foram mais danificados pelo fogo.

Pelos motivos expostos acima, concretos com elevada relação a/c e concretos de baixa relação a/c (CAR) podem ser considerados susceptíveis à ação deletéria do fogo, mas por razões diferentes: enquanto o concreto de maior relação a/c perde mais resistência, o CAR é mais susceptível ao “*spalling*”. Assim, para o primeiro deve-se pensar em uma forma de se isolá-lo da fonte de calor e, com isto minorar a perda de resistência e o risco associado a esta estrutura. Já para o CAR, medidas de prevenção ao “*spalling*”, como a utilização de fibras de polipropileno, e mesmo a proteção térmica devem ser tomadas no mesmo sentido. Obviamente, mais pesquisas deverão ser desenvolvidas no sentido de se melhorar o controle da ocorrência de lascamentos explosivos em concretos de alta resistência. Também se faz necessário a realização de estudos que envolvam o comportamento de peças de concreto de alta resistência em função da sua esbeltez. No entanto, é claro que diferentes estruturas de concreto possuem diferentes níveis de risco em caso de incêndio e isto deve ser levado em conta nesta avaliação.

6. ESTUDO DE CASO DE SINISTRO DE INCÊNDIO

Este capítulo apresenta um caso real de incêndio e o objetivo principal é, a partir da descrição do sinistro de incêndio e suas condições de contorno, destacar os danos causados pelo fogo nas estruturas de concreto. São realizadas também considerações sobre a recuperação de estruturas de concreto submetidas ao incêndio.

6.1 Incêndio no Aeroporto Santos Dumont

6.1.1 Descrição do edifício sinistrado

Apresenta-se, a seguir, a descrição do incêndio, dos danos e das ações de recuperação da estrutura do edifício que abriga o Terminal de Passageiros do Aeroporto Santos Dumont, na cidade do Rio de Janeiro. Este prédio foi projetado em 1937 pelos Irmãos Roberto, sendo o seu projeto estrutural realizado pelo engenheiro Glebe Zaharov. A sua construção foi iniciada em 1938, porém, interrompida durante a segunda guerra mundial (BATTISTA *et al.*, 1998). Foi concluído em 1947 após sofrer várias alterações do projeto arquitetônico. Estas mudanças aumentaram as cargas nas fundações que foram reforçadas para suportar tanto a estas cargas quanto a adição de mais um pavimento e um terraço. O edifício possui dimensão de 35 x 195 m em planta e 4 pavimentos, sendo formado por sete setores independentes, separados por juntas de dilatação térmica transversais. Na área projetada do saguão principal, as estruturas são esbeltas e arrojadadas para a época de sua construção (1939/1947), já que os vãos livres da laje em grelha alcançam 28,8 m e 20 m, respectivamente, nas direções transversal e longitudinal do edifício. Esta laje em grelha tem uma borda livre e os pilares, com seção transversal circular originalmente com diâmetro de 0,65 m, alcançam, nesta área, 8 m de altura.

6.1.2 Danos provocados pelo incêndio às estruturas de concreto armado

O incêndio iniciou-se na madrugada de 13 de fevereiro de 1998 e se estendeu por 8 horas. Danificou seriamente as estruturas do edifício que servia como Terminal de Passageiros no Aeroporto Santos Dumont. Grande volume de material de decoração altamente combustível e de papéis armazenados nos arquivos dos escritórios situados nos mezaninos e pavimentos superiores manteve o incêndio por 8 horas. Isto provocou danos acentuados e rupturas locais de alguns componentes estruturais e, ao todo, uma

severa degradação da estrutura de concreto armado do edifício. Os pavimentos superiores tiveram uma área danificada de cerca de 2/3 da área total construída, incluindo o pavimento de cobertura, atingindo em torno de 25.000 m². O incêndio auxiliado pelo vento atingiu em cerca de 4 horas, toda a extensão em área dos pavimentos superiores. Estima-se que a temperatura do incêndio tenha alcançado 900 °C nos 3 pavimentos superiores, uma vez que houve fusão de chapas de vidro das luminárias e janelas e amolecimento e retorcimento completo de toda estrutura metálica de suporte do teto falso, das luminárias e das calhas dos vários dutos de instalações. BATTISTA *et al.*(1998), no entanto, não descreveram qual o tipo de metal presente nas estruturas metálicas, luminárias e janelas. Dependendo do tipo de metal, aço, latão ou alumínio, pode-se saber o ponto de fusão e amolecimento e se ter uma idéia mais precisa da temperatura máxima atingida no incêndio. A coloração do concreto também pode não ser um indicativo preciso da temperatura máxima do incêndio, uma vez que, embora os agregados calcáreos pareçam ser mais sensíveis à mudança de cor do que os agregados silicosos, a tonalidade associada às características mineralógicas (impurezas contidas e tipo de agregado) e a forma de resfriamento do material é um indicativo inseguro para estimar a temperatura máxima atingida pelo concreto e conseqüentemente, sua resistência residual. Desta forma, é importante ressaltar que a natureza dos agregados influi na coloração dos concretos, pois eles constituem a maior parte dos mesmos (COSTA, 2002).

De acordo com BATTISTA *et al.* (1998), os maiores e mais evidentes efeitos da ação intensa e prolongada do fogo sobre as estruturas de concreto armado foram:

- Ruptura evidente e colapso de pilares de seção transversal circular ($D = 0,65$ m) dos 2º e 3º tetos estruturais (Figura 6.1 e Figura 6.2).

Figura 6.1 – Ruptura do pilar de concreto armado com seção circular causada pela intensa ação do fogo na estrutura (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Observa-se na Figura 6.1 as linhas inclinadas ($\sim 45^\circ$) de ruptura do concreto dos pilares, e na Figura 6.2, a redução severa da seção transversal por delaminação e desagregação do concreto, deixando as armaduras à mostra.

Figura 6.2 – Pilar de seção circular danificado pela ação de fogo intenso – situação após escoramento e limpeza (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

- Delaminação da massa de concreto dos pilares de seção circular dos 2º e 3º tetos estruturais, sob a ação intensa do fogo, com temperaturas em torno de 900 °C. A Figura 6.3 apresenta exemplo deste tipo de dano e o aspecto particular da superfície do concreto, com coloração rosa, tal como descrita na bibliografia técnica especializada (CEB/FIP MODEL CODE 90, 1991, SCHNEIDER e NAGALE, 1987 apud BATTISTA *et al.*, 1998). Estes pilares, com seção transversal circular de diâmetro $D = 0,65$ m, sofreram danos que podem ser considerados pequenos, se comparados àqueles sofridos pelos pilares de seção quadrada ou retangular. Nesses pilares circulares a delaminação é mais uniforme, salvo os casos de falhas construtivas tal como vazios de concretagem, onde o gradiente térmico é mais acentuado entre a superfície e o núcleo. Modelos teórico-computacionais mostram que para uma temperatura na superfície de 900 °C, a temperatura no núcleo desses pilares de seção circular

não deve ter ultrapassado 300 °C (CEB/FIP MODEL CODE 90, 1991; SCHNEIDER e NAGALE, 1987, apud BATTISTA *et al.*, 1998). A verdadeira temperatura do núcleo é possivelmente menor do que este valor numérico em função da proteção adicional dada pelas camadas de ar existentes entre as multicamadas (ou “*mil-folhas*”) formadas com a delaminação das massas de reboco e concreto de cobrimento das armaduras. Esses pilares de seção transversal circular tiveram então um bom comportamento estrutural, com o núcleo de concreto, ainda resistente, suportando as cargas instaladas sem necessitar do auxílio da já pequena taxa de armadura (em geral em torno de 1,5%). Um caso interessante, dentre os pilares de seção circular em regiões de fogo intenso, foi aquele com superfície de acabamento em pastilhas cerâmicas. Estas proporcionaram resistência excepcional à ação do fogo, formando uma barreira protetora mais eficiente do que no caso dos pilares sem esse tipo de revestimento, retardando, portanto, o aumento da temperatura no interior do núcleo de concreto. Cabe mencionar que há casos em que o lascamento é consequência da natureza mineralógica do agregado ou da concentração de tensões térmicas desenvolvidas durante o aquecimento e que confluem para as camadas próximas aos cantos do elemento estrutural (COSTA, 2002). Neste caso, a seção circular do pilar parece contribuir para seu melhor comportamento perante o fogo. Ainda tem-se que algumas pesquisas mostram que a esbeltez dos elementos estruturais e elevadas tensões de compressão na seção transversal de concreto durante o incêndio também aumentam a possibilidade dos lascamentos ocorrerem (BUCHANAN apud COSTA, 2002). No caso do Aeroporto Santos Dumont, houve sobrecarga da estrutura por alteração do projeto arquitetônico. Apesar disto, alguns pilares, com revestimento de pastilhas cerâmicas, apresentaram bom desempenho frente ao incêndio.

Figura 6.3 – Delaminação e coloração rosácea da superfície do pilar de concreto sob a ação do fogo (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

- Danos severos, com deformações residuais excessivas, delaminações e rupturas das peças mais delgadas, tais como:
 - Os painéis em concreto armado das lajes de forro de pequena espessura ($e \approx 5$ cm), os quais nas regiões com maior intensidade de fogo, ficaram excessivamente deformados e delaminados. Estes painéis de laje inferior (ou de forro) do sistema estrutural de laje dupla existente nos 2º e 3º tetos, protegeram a laje superior (ou de piso) da ação direta do fogo, além das faces laterais das vigas. Uma outra proteção das lajes de piso foi dada, na face superior, pelas espessas camadas de contrapiso e enchimento existentes.
 - Os pilaretes de seção quadrada, com comprimento $L = 325$ cm e seção transversal 25×25 cm, dos 2º e 3º tetos, na área projetada do saguão principal, sofreram delaminação explosiva nos estágios iniciais da

intensa ação do fogo, levando a severa perda da seção de concreto. Este dano teve como consequência um aumento da excentricidade da carga instalada e do efeito de segunda ordem, exacerbado pelo acréscimo da deformação lateral devido a redução do módulo de elasticidade e da resistência do concreto sob temperaturas elevadas.

No 1º pavimento, nenhum dentre os 265 pilares de seção transversal circular ($D = 65$ cm), mesmo os da ala da esquerda do prédio onde foi iniciado o incêndio, apresentou sinais de ruptura do concreto, ficando, assim, garantida a estabilidade global da estrutura.

O uso crescente de concretos com alta resistência a compressão permitiu a construção de estruturas mais esbeltas, de menor dimensão, para suportar os mesmos carregamentos. As peças estruturais perderam massa e volume, alterando o fator de massividade ⁽⁶⁾ comum aos elementos da construção. O calor se propaga mais rápido para o interior das peças, fazendo com que a temperatura se eleve mais no centro da massa do concreto. Como consequência, a perda de resistência e rigidez é maior. Por esta razão, lajes e elementos de pequena espessura (alto fator de massividade), sofrem os efeitos mais danosos do incêndio, onde frequentemente são observados flechas excessivas (NEVILLE apud COSTA, 2002a). O efeito dos lascamentos, de certa forma, também é maior nas seções finas porque os estilhaços podem ser inversamente proporcionais em relação as dimensões do elemento (PURKISS apud COSTA, 2002a).

⁽⁶⁾ Fator de massividade é determinado pela razão entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal de um elemento estrutural.

6.1.3 Conclusões sobre o sinistro

Apesar dos severos danos causados pelo fogo a cerca de 50% dos pilares de seção circular dos pavimentos superiores, poucos foram os casos de ruptura. A espessa sobre-camada de argamassa usada para fixação das placas de mármore aplicada sobre a superfície de concreto desses pilares, serviu como camada protetora. No 3º pavimento, apenas 8 dentre os 265 pilares de seção circular apresentaram claras e graves configurações de ruptura e/ou severa perda da massa de concreto. Um número ainda menor desses pilares do 4º pavimento apresentou ruptura e/ou perdas similares. Nestes pavimentos, muitos outros desses pilares mostravam considerável redução de seção de concreto, devido muito mais as falhas originais de concretagem do que a ação intensa e prolongada do fogo (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

6.2 Considerações sobre avaliação e recuperação de estruturas submetidas a incêndio a partir de um estudo de caso

A Sociedade do Concreto de Londres sugere que cada elemento estrutural sinistrado por incêndio seja avaliado e receba uma classificação de danos em quatro classes (MALHOTRA, 1982):

- **Classe 1:** Danos superficiais na estrutura onde são necessárias reparações superficiais;
- **Classe 2:** Danos superficiais sem afetar a resistência mecânica;
- **Classe 3:** Danos significativos com necessidade de reparação e substituições parciais das estruturas;
- **Classe 4:** Danos severos com substituição ou considerável reparação de partes essenciais das estruturas.

A inspeção visual das estruturas de concreto deve avaliar a ocorrência de “*spalling*” e intensidade de ocorrência. Cantos de vigas e pilares estão particularmente propensos a ocorrência deste tipo de fenômeno, porém lajes também podem sofrer danos devido ao “*spalling*”. Suas conseqüências não são significativas se os danos não expuserem a armadura ao fogo. Se ocorrer exposição da armadura principal ou secundária ao fogo durante um longo período de tempo, uma análise acurada deve ser realizada, uma vez que pode ter ocorrido grande perda de resistência do aço na estrutura de concreto. Além

do “*spalling*” deve ser verificado a existência de fissuras em lajes, vigas ou pilares. Fissuras transversais no topo das lajes, fissuras horizontais em vigas ou a 45° em pilares indicam a redução da capacidade portante ou até mesmo sugerem a iminência de um colapso.

É, portanto, necessário medir a resistência residual do concreto e da armadura e, para este propósito, existem algumas técnicas que podem ser consideradas. Um dos métodos consiste em se estimar a taxa de crescimento da temperatura na seção e associá-la a resistência residual. BESSEY apud MALHOTRA (1982) observou que ocorre uma mudança de cor no concreto quando ele é aquecido, o cinza, presente no cimento Portland, ganha tom rosado em temperaturas em torno de 300 °C e, depois, até os 800 °C, a cor do concreto passa para cinza claro (Figura 6.4). Nota-se que alguns pilares do Aeroporto Santos Dumont apresentaram coloração rosácea, onde foi estimado uma temperatura máxima no elemento de concreto em torno dos 300 °C. Vale ressaltar também que nos experimentos realizados na segunda etapa (Figura 5.28) os corpos de prova submetidos à temperatura de 700 °C apresentaram cor cinza clara.

Figura 6.4 – Resistência x mudança de cor de concretos comuns submetidos à elevação de temperatura (Fonte: MALHOTRA, 1982)

A mudança de cor ocorre devido a transformação dos componentes férricos do concreto, presentes nas impurezas da areia. A intensidade da cor depende do nível de impureza e mudanças de cor têm sido observadas tanto em agregados calcáreos como silicosos. A Sociedade do Concreto de Londres tem usado esta classificação para avaliar a possibilidade de reuso de estruturas de concreto submetidas a incêndios, sugerindo que se não há mudança de coloração, então nenhum dano sério é causado ao concreto. A perda de resistência mecânica pode ser expressa como um fator de dano decorrente do fogo, sendo que aos 300 °C aproximadamente, o fator possui valor em torno de 0,7 a 0,8, ou seja, o concreto mantém de 70% a 80% da resistência residual. Assim, pedaços de concreto da estrutura devem ser retirados e suas cores analisadas. A última profundidade na qual a cor rosa puder ser observada indica a fronteira da isoterma dos 300 °C. Esta análise ainda pode ser utilizada ainda para uma medida indireta da severidade de um incêndio. É importante também que se verifique as condições de resistência residual da armadura das estruturas.

No caso de estruturas de concreto protendido, vale ressaltar que estas sofrem duplamente os efeitos danosos do incêndio:

- Primeiramente existe uma grande perda de resistência mecânica;
- Em segundo plano ocorre um efeito de relaxação, devido ao aumento da temperatura, que resulta numa deformação e perda de tensão permanente.

Conseqüentemente, a estimativa de temperatura máxima atingida no incêndio torna-se extremamente importante na avaliação da resistência residual de elementos de concreto armado ou protendido para se verificar a possibilidade de reutilização destas estruturas.

No caso do incêndio no Aeroporto Santos Dumont, algumas medidas emergenciais foram tomadas, já no início dos trabalhos no local do sinistro, tanto para garantir a segurança provisória das estruturas dos 2º e 3º teto, quanto, principalmente, de todo o pessoal envolvido na retirada dos escombros do incêndio, na limpeza das áreas internas e nos serviços de demolição parcial e de recuperação estrutural.

Algumas dessas medidas emergenciais se mostraram efetivas:

- Cintamento por meio de fitas de aço, com 30 cm de largura e 5,0 mm de espessura, dos vários pilares rompidos (Figura 6.5);
- Escoramentos leves das vigas dos diversos tetos e outros mais robustos dos vários pilares muito danificados;
- Retirada de todo o espesso contrapiso existente nos 3º e 4º pavimentos em toda a extensão do prédio, proporcionando alívio de carga permanente, além da exposição da superfície das lajes de piso para a devida inspeção e posterior recuperação;
- Retirada dos painéis de laje de forro, entre vigas das grelhas dos tetos, por meio de demolição da massa de concreto e corte das armaduras. A retirada destes painéis dos 2º e 3º tetos, em toda a extensão do prédio, proporcionou alívio substancial da carga de peso próprio.

Outras medidas representam demolições de partes que constituíam alterações arquitetônicas e estruturais do prédio original, tais como:

- Das lajes pré-fabricadas/nervuradas das regiões do 3º teto (4º pavimento);

- Da estrutura, em concreto armado, do 4º teto (ou cobertura do 5º pavimento) e das estruturas metálicas do telhado;
- Dos “*brize-soleil*” da fachada principal: elementos esbeltos não-estruturais severamente danificados pela ação do fogo.

Figura 6.5: Cintamento metálico emergencial para estabilização dos pilares rompidos (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Para a avaliação da resistência do aço, que constitui as barras das armaduras principais dos pilares, foram realizados os seguintes procedimentos:

- **Ensaio de amostras de aço:** foram retiradas cerca de 30 amostras das barras de aço da armadura longitudinal dos pilares para ensaios de tração (Tabela 6.1). Foi definida a extração de uma amostra por pilar a ser investigado. Esses ensaios serviram para definir as propriedades mecânicas do aço, após sofrer a ação intensa do fogo. Baseado nestes resultados foi realizada uma avaliação da resistência característica do aço em função da distribuição dos resultados. Obteve-se um valor característico da tensão de escoamento f_{yk} (em todos os ensaios foi identificado patamar de escoamento do aço) igual a 244 MPa, para um quantil de 5% aplicado sobre um total de 25 ensaios de amostras distintas. O

valor médio obtido é igual a 295 MPa e o coeficiente de variação igual a 10,5%. O valor medido da deformação residual após a ruptura foi da ordem de 30%, indicando que o aço conservou sua ductilidade. Os ensaios de dobramento indicaram sempre resultados sem fissuração.

Tabela 6.1: Resultados de tensão de escoamento do aço, a partir dos ensaios de tração de barras de aço das armaduras longitudinais de pilares (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Tensão de Escoamento Média		
Valor Médio	m	295 MPa
Desvio Padrão	s	31 MPa
Coeficiente de Variação	s/m	10,50%
f_{yk}	m - 1,64s	244 MPa

- **Análise micro-estrutural do aço:** foram encaminhadas para o Laboratório de Microscopia Eletrônica do PEMM da COPPE, amostras de barras longitudinais de 5 pilares, retiradas do mesmo lote de amostras encaminhadas para os ensaios de tração descritos no item anterior. As amostras foram observadas em microscopia ótica na sua seção transversal. A microestrutura constituída de ferrita com perlita é típica nas proporções apresentadas por estas duas fases de um aço genericamente classificado como SAE 1015. Uma amostra foi levada ao microscópio eletrônico de varredura onde se procedeu uma análise espectral. Foram ainda realizados ensaios de tração em quatro corpos de prova usinados cilíndricos de seção transversal de 4 mm² e comprimento útil de 20 mm, retirados das amostras do aço das armaduras dos pilares. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, a uma taxa de $3,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, segundo prescrições normativas. A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ensaios dos quatro corpos de prova de aço usinados.

Tabela 6.2: Resultados dos ensaios de tração de corpos de prova de aço usinados - seção transversal $A = 2 \text{ mm}^2$ e comprimento $L = 20 \text{ mm}$ (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Amostra	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ (%)
P-101	330	414	22,5
P-100	340	404	25,9
P-107	298	368	24,2
P-138	352	372	22,9

Baseado nas análises apresentadas, BATTISTA *et al.* (1998) concluiu que (mesmo as armaduras atingindo temperaturas da ordem de 800°C ou mesmo superiores em algumas regiões do prédio) o aço permaneceu com propriedades mecânicas compatíveis com as de um aço dúctil, com patamar de escoamento definido, embora, durante o incêndio, temperaturas dessa ordem tenham certamente reduzido a resistência e rigidez do aço. Desta forma, o material recuperou suas propriedades mecânicas após resfriamento, por vezes, rápido, devido a água jogada pelos bombeiros. Porém, deve-se comparar, fundamentalmente, a tensão de escoamento obtida após o incêndio com a que foi especificada para o material no projeto da obra, para aí sim saber se tensão residual é igual ou superior a especificada. Esta comparação daria mais confiabilidade nos procedimentos de recuperação das estruturas de concreto, no sentido de se saber quais trechos de armaduras deveriam ser removidos e substituídos.

A avaliação da resistência a compressão do concreto, tanto para pilares quanto para vigas, foi realizada através de ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, preparados a partir de mais de 200 amostras retiradas por carotagem. As amostras foram extraídas através de broca cilíndrica diamantada com diâmetro de 4" (aproximadamente 10 cm), conforme apresentado nas Figuras 6.6 e 6.7.

Figura 6.6: Extração de amostra cilíndrica de um pilar no saguão principal. Ao fundo o painel de Santos Dumont com pintura danificada pelo calor do incêndio (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Figura 6.7: Detalhe de um corpo de prova cilíndrico extraído por “carotagem” (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

No caso das vigas, as amostras foram retiradas da região a meia altura da alma. Nos pilares, procurou-se retirar o maior número de amostras do concreto das regiões onde supostamente houve maior incidência do fogo e aumento de temperatura. Após extração, as amostras foram levadas para corte em serra circular das extremidades, de modo a se obter corpos de prova nas dimensões padrão, com relação diâmetro x altura igual a 1:2. Para os corpos de prova em que não foi possível respeitar a relação 1:2, resultando em alturas pouco menores do que 2 vezes seu diâmetro, os resultados dos ensaios de compressão foram corrigidos, conforme as recomendações normativas (ASTM C42-90, 1990).

A partir dos resultados dos ensaios de compressão, foi realizada a análise da distribuição desses resultados. Nesta análise foram desprezados todos os corpos de prova em que se verificou a presença de barras de aço de armadura principal ou de estribos, tendo em vista que os corpos de prova desse tipo apresentam em geral resultados de resistência a compressão alterados. Os resultados obtidos da análise estatística da resistência a compressão do concreto estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resultados dos ensaios de resistência a compressão dos corpos de prova de concreto extraídos dos pilares e das vigas (Fonte: BATTISTA *et al.*, 1998).

Conjunto de Corpos-de-Prova (CP)	Valor Médio (MPa) - f_c	Desvio Padrão (MPa) - s	Coefficiente de Variação (MPa) - s/f_c	Valor Característico (MPa) - $f_{ck} = m - 1,64s$	Número de corpos de prova (N)
Pilares	17,3	5,0	29%	9,1	63
Vigas	17,2	4,7	27,3	9,5	139
Pilares + Vigas	17,3	4,5	26,2	9,9	202

Concluiu-se, portanto, que a resistência característica f_{ck} do concreto dos pilares deveria ser tomada igual a 9,1 MPa, enquanto que para as vigas deveria-se adotar 9,5 MPa. Esses resultados foram considerados bastantes confiáveis, devido a grande quantidade de amostras retiradas da estrutura do prédio e sua distribuição nas áreas mais afetadas pela ação do fogo.

Após execução de todas as medidas emergenciais, foram iniciados os trabalhos de recuperação e reforço estrutural do vários componentes severamente danificados pela exposição prolongada ao fogo intenso. Os reforços principais foram executados nos pilares através de ancoragens típicas e cintamento por estribos dos pilares reforçados por meio de encamisamento executado em concreto armado. As ancoragens das armaduras ao longo da prumada de cada pilar foram de três tipos: passantes através da espessura da laje dupla, ancoragens por groutamento na massa de concreto das vigas principais e ancoragens por solda nas armaduras negativas das vigas principais.

Na ala esquerda do térreo, vizinha ao saguão principal, região dos mezaninos metálicos onde se iniciou o incêndio, os pilares esbeltos, com cerca de 8,0 metros de altura e seção de concreto com $D = 65$ cm, foram reforçados por meio de encamisamento executado com chapas de aço.

De acordo com BRANCO & SANTOS (2000), concretos submetidos à temperaturas em torno de 300°C , como é o caso, aparentemente pela coloração rosácea dos pilares do Aeroporto Santos Dumont, devem conservar algo em torno de 70% da sua resistência mecânica original. No experimento realizado, etapa 1, pode-se constatar que aos 300°C , aproximadamente, todos os cinco traços analisados conservaram 70% ou mais da sua resistência mecânica original. Na avaliação de recuperação estrutural realizada, restou ainda aferir, através da comparação da resistência mecânica residual de corpos de prova extraídos de pilares não atingidos pelo fogo com corpos de prova de pilares atingidos pelo fogo, se esta proporção de 70% se confirma.

Através do caso real do sinistro de incêndio do Aeroporto Santos Dumont e da metodologia de avaliação dos danos decorrentes às estruturas de concreto anteriormente descrita, é importante ressaltar a necessidade de desenvolvimento de metodologias de análise de extensão de danos à estruturas de concreto decorrentes de incêndio e formas de tratamento e recuperação destas estruturas para melhor entendimento do fenômeno de degradação do concreto frente ao fogo. Na maioria dos casos, estruturas de concreto quando submetidas ao incêndio são demolidas, sendo que quase nenhum esforço é dispensado para a sua recuperação. Isto ocorre pela falta de conhecimento técnico no meio da engenharia com relação às formas de avaliação e recuperação de estruturas danificadas por incêndio. O caso do Aeroporto Santos Dumont torna-se, então, uma exceção, tanto com relação à metodologia de avaliação quanto na forma de recuperação das estruturas de concreto.

Cabe destacar ainda o bom comportamento, frente ao fogo, dos pilares que tinham revestimentos de pastilhas cerâmicas. Este fato corrobora para a idéia de utilização de revestimento protetor contra o fogo em estruturas de concreto, a exemplo do que já é fato para as estruturas de aço. O capítulo seguinte aborda alguns aspectos tecnológicos importantes para a redução de riscos de colapso estrutural devido ao incêndio em estruturas de concreto e apresenta ainda alguns materiais de proteção térmica já

largamente utilizados em estruturas de aço que poderiam servir de base para o desenvolvimento de materiais de revestimento para proteção térmica de estruturas de concreto.

7. ASPECTOS TECNOLÓGICOS A SEREM OBSERVADOS PARA A REDUÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELO INCÊNDIO ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Este capítulo tem por objetivo apresentar algumas sugestões para redução dos danos causados pelo incêndio às estruturas de concreto, através da apresentação de argamassas de proteção térmica de estruturas de aço que poderiam se estender para a proteção térmica de estruturas de concreto.

Nos últimos anos, algumas empresas vêm desenvolvendo materiais de proteção térmica para estruturas de concreto, a exemplo do que já acontece com as estruturas de aço. Isto é devido aos recentes incêndios ocorridos em alguns túneis europeus. Nestes locais, a carga de incêndio pode ser extremamente alta (ex: caminhões de combustível – carga altamente inflamável) e, portanto, podem ocorrer incêndios de elevada taxa de aquecimento, aumentando-se a severidade do fenômeno. Os “*incêndios históricos*” da década de 90 ocorreram nos principais túneis europeus (Eurotunnel, Mont Blanc, Tauern Road e Sankt-Gotthard Basel), cuja segurança estrutural foi severamente comprometida devido ao fenômeno chamado “*spalling*” (COSTA *et al.*, 2002a). Estes sinistros corroboraram para o desenvolvimento de argamassas de proteção térmica para estruturas de concreto utilizadas primordialmente em túneis.

Em edifícios de concreto armado, a solução de proteção térmica das estruturas também é bem vista uma vez que alguns edifícios podem abrigar produtos com alta carga de incêndio (por exemplo: inflamáveis) ou comportarem grande número de pavimentos, o que pode representar um sério risco à estabilidade das estruturas na eventualidade de um incêndio.

7.1 Espessura equivalente de concreto para argamassa protetora

A armadura é usualmente protegida contra as altas temperaturas e agentes agressivos somente por uma cobertura de concreto. Algumas vezes, a partir de uma análise de risco de incêndio no edifício, pode ser necessária a aplicação de um cobrimento adicional de material isolante ou de proteção térmica sobre a superfície de concreto ou paredes de

vedação para se conseguir uma melhor resistência ao fogo ou a TRRF mínima exigida pela legislação de segurança contra incêndio (CUOGHI *et al.*, 2004).

De acordo com WICKSTRÖM & HADZISELIMOVIC (1996), a resistência térmica é definida em função de uma espessura de concreto equivalente (d_e) em relação a uma espessura de argamassa protetora (d) (Figura 7.1). Espessura de concreto equivalente significa uma espessura tal de concreto sobre a armadura, além do cobrimento, que garante a mesma proteção térmica de uma determinada espessura de material de revestimento térmico. Em face das propriedades térmicas diferentes, a espessura equivalente do concreto será maior do que a espessura da argamassa protetora, necessária para oferecer a mesma proteção térmica. A argamassa de proteção térmica deve apresentar, por princípio, condutividade térmica menor que o concreto.

Figura 7.1: Configuração unidimensional de estruturas de concreto protegidas e não protegidas (WICKSTRÖM & HADZISELIMOVIC, 1993), onde:

c = cobrimento (m).

d_e = espessura de concreto equivalente a uma determinada espessura de argamassa de proteção térmica (m).

Assim, a espessura equivalente de concreto é proporcional a resistência térmica “R” da argamassa protetora, independente da espessura da camada de cobrimento da armadura (Expressão 7.1).

$$R = \frac{d_e}{\lambda} \quad [7.1]$$

Onde:

R = resistência térmica da camada protetora, em $m^2.K/W$;

d_e = espessura de concreto equivalente, em m;

λ = condutividade térmica da argamassa protetora, em $W/m.K$.

Para melhor elucidar esta relação entre espessura de concreto equivalente (d_e) e espessura de argamassa protetora, apresenta-se o exemplo de uma estrutura de concreto com 10 mm (0,01 m) de espessura de argamassa protetora ($\lambda_{\text{argamassa}} = 0,1 \text{ W/m.K}$) que possui uma resistência térmica $R = 0,1 \text{ m}^2.K/W$. Para manter esta mesma resistência térmica, ou seja, o mesmo nível de proteção térmica, é necessário que o concreto ($\lambda_{\text{concreto}} = 1,0 \text{ W/m.K}$) tenha uma espessura equivalente $d_e = 0,1 \text{ m}$, ou seja, 10 vezes maior que o cobrimento de argamassa de proteção térmica. No exemplo dado a condutividade térmica do concreto é considerada 10 vezes maior que a condutividade térmica da argamassa de proteção térmica.

A presença de uma camada de proteção térmica prevê uma barreira a passagem do calor e retarda o aumento da temperatura dentro da estrutura de concreto. MALHOTRA (1982) também relaciona espessura de revestimento protetor a uma espessura de concreto equivalente, conforme a seguir:

- Para concreto de densidade normal: $d_p = d_c$;
- Para pasta de gesso: $d_p = 1,5 d_c$;
- Para pasta de gesso de baixa densidade: $d_p = 2,0 d_c$;
- Para fibra mineral projetada: $d_p = 2,0 d_c$.

Sendo,

d_p = espessura de proteção;

d_c = espessura do concreto.

Ainda de acordo com MALHOTRA (1982), a espessura de laje mínima necessária para concretos normal e leve serem equivalentes com relação a resistência ao fogo estão expressos na Figura 7.2.

Figura 7.2: Espessura de lajes para várias resistências ao fogo (Fonte: MALHOTRA, 1982).

7.2 Influência da porosidade na composição de materiais refratários

Os materiais refratários são basicamente as cerâmicas refratárias. As propriedades dos materiais cerâmicos incluem a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem se fundir ou se decompor, e a capacidade de permanecer inerte, quando expostos a ambientes severos. Além disto, a capacidade de proporcionar isolamento térmico é a propriedade mais importante.

Dentre as aplicações típicas dos materiais refratários, pode-se citar: revestimentos de fornos para refino de metais, a fabricação de vidro, tratamento térmico metalúrgico e a geração de energia.

A porosidade é uma variável microestrutural que deve ser controlada para produzir materiais refratários. A resistência, a capacidade de suporte de carga e a resistência ao ataque por materiais corrosivos aumentam em função de uma redução da porosidade. Ao mesmo tempo, a redução da porosidade provoca diminuição da capacidade de isolamento térmico e diminuição da resistência a choques térmicos (CALLISTER Jr., 2002).

É importante o estudo das propriedades térmicas dos materiais refratários no sentido de se conhecer o seu comportamento frente a altas temperaturas e, a partir deste conhecimento, aplicar estes conceitos no desenvolvimento de argamassas de proteção térmica de estruturas.

A Tabela 7.1 apresenta a composição química e a porosidade de alguns materiais refratários. Nota-se que todos eles apresentam alta porosidade ($> 10\%$) se comparadas a argamassas comuns de revestimento ($\sim 5\%$).

Tabela 7.1 - Composições de cinco materiais refratários Cerâmicos típicos (Kingery W. D., Bowen H. K., e Uhlmann D. R., 1976).

Tipo de Material Refratário	Composição (%)							Porosidade Aparente (%)
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	
Argila Refratária	25 – 45	70 - 50	0 - 1	-	0 - 1	0 - 1	1 – 2	10 – 25
Argila Refratária com alto teor de alumina	90 - 50	10 - 45	0 - 1	-	0 - 1	0 - 1	1 – 4	18 – 25
Sílica	0,2	96,3	0,6			2,2	-	25
Periclásio	1	3	90	0,3	3	2,5	-	22
Minério de Magnesita-Cromo	9	5	73	8,2	2	2,2	-	21

Assim, como a porosidade é um parâmetro extremamente importante na fabricação de um material refratário, tem-se, a partir desta constatação, a determinação do parâmetro porosidade como de grande relevância para o desenvolvimento de argamassas de proteção térmica de estruturas e paredes de compartimentação.

7.3 Considerações sobre a porosidade das argamassas

É interessante ressaltar que uma medida de desempenho de argamassas de proteção térmica não é apenas o isolamento da temperatura e sim a capacidade que estas argamassas possuem de preservar o máximo possível a resistência inicial dos concretos e diminuir os riscos de lascamentos explosivos.

Argamassas com agregados leves são consideradas de bom desempenho com relação ao fogo devido a sua reduzida densidade e a sua baixa condutividade térmica (MAI, 2002). Com baixa densidade, estas argamassas possuem inerentemente baixa resistência mecânica e não oferecem bom desempenho estrutural, porém, argamassas de proteção térmica devem possuir primordialmente o objetivo de conduzir menos calor para o interior da estrutura e resistência mecânica suficiente somente para garantir a aderência destas argamassas no substrato. A Tabela 7.2 apresenta alguns materiais agregados utilizados em argamassas de proteção térmica, onde a resistência mecânica destas argamassas, com exceção da vermiculita e perlita, está acima de 5 MPa, ou seja, próxima a resistência mecânica média apresentada por argamassas comuns de revestimento.

Tabela 7.2 – Agregados naturais e artificiais utilizados em argamassas de proteção térmica (Fonte: MAI, 2002).

Tipo de Agregado	Densidade Concreto (kg/m³)	Resistência Compressão (MPa)	Condutividade Térmica (W/mK)
Vermiculita	480	0,9	0,1 - 0,3
Perlita	520	3,0	0,1 - 0,2
Leca ®	1.300	14,0	0,3 - 0,6
Aglite ®	1.550	26,0	0,6
Lytag ®	1.600	37,5	0,5
Escória	2.000	27,5	0,9

Obs: As densidades dos concretos acima apresentadas referem-se a utilização destes tipos de agregados na confecção dos respectivos concretos.

Diversos fatores como, relação a/c, tipo e finura do agregado, etc, influenciam nas propriedades mecânicas das argamassas. Para a finalidade desta dissertação, serão discutidos somente alguns tópicos relativos ao teor de ar incorporado nas argamassas uma vez que este interfere diretamente na condutividade térmica das argamassas, principal propriedade das argamassas de proteção térmica.

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar na argamassa fresca e influencia diretamente a densidade de massa relativa da argamassa nos estados fresco e endurecido, pois o ar possui densidade menor que a da argamassa e ocupa uma fração do seu volume. De fato, o teor de ar incorporado interfere diretamente em diversas

propriedades da argamassa, por exemplo, a resistência a compressão e a condutividade térmica.

Durante a mistura, o ar incorporado atinge, no máximo, 3 a 4% do volume total em argamassas, mas pode ser aumentado com o emprego de aditivos incorporadores de ar (NAKAKURA, 2003). Esta propriedade é determinada através de procedimento de ensaio prescrito na norma NBR 13 277. A determinação é indireta, calculada pela relação entre densidade de massa no estado fresco e a densidade de massa teórica. Esta relação representa o volume de cheios da argamassa, sendo o complemento para a unidade de massa a fração correspondente ao volume de ar. O resultado é expresso em porcentagem.

Os principais passos para determinação do ar incorporado são:

- Determinação da massa específica da argamassa anidra, segundo a NBR NM 23;
- Preparo da argamassa fresca, segundo o procedimento NBR 13 276, na consistência determinada pela mesa de espalhamento e tempo de mistura fixados;
- Em seguida, determinação da densidade de massa da argamassa.

As resistências mecânicas a compressão e a tração e, a capacidade de deformação, assim como a resistência térmica (condutividade térmica) são influenciadas pela porosidade total da argamassa, resultante do somatório dos poros de gel, dos capilares e do ar incorporado.

O gráfico qualitativo da Figura 7.3 demonstra que a resistência a compressão diminui com o aumento da porosidade da argamassa. Não é apenas a porosidade total que deve influenciar nessa resistência, mas também a distribuição dos poros e a natureza da fase endurecida do aglomerante (JIANG apud CARNEIRO, 1999).

Figura 7.3 – Relação entre a resistência a compressão e a porosidade total da argamassa (JIANG apud CARNEIRO, 1999).

Da mesma forma, a relação entre o índice de vazios e a resistência mecânica é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o índice de vazios maior a resistência a compressão (Figura 7.4).

Figura 7.4 – Relação índice de vazios e resistência a compressão (CARNEIRO *et al.* apud CARNEIRO, 1999).

Com exceção da norma britânica BS 4887/86, não existem normas específicas para avaliação de aditivos incorporadores de ar em argamassas e os fabricantes fornecem informações insuficientes para diferenciar os produtos do mercado. A maioria das

normas especificam os aditivos visando apenas sua utilização em concretos com o objetivo principal de resistir ao gelo e degelo. Nos últimos anos, estes aditivos também vêm sendo usados em argamassas industrializadas ou dosadas em obras, proporcionando uma melhor trabalhabilidade e um maior rendimento (MONTE, 2003). Porém, as normas brasileiras de aditivos não especificam sua aplicação em argamassas, e visam apenas sua aplicação em concretos.

A Figura 7.5 apresenta a relação entre a densidade de massa aparente e o teor de ar incorporado de argamassas comuns de revestimento, resultado das análises experimentais desenvolvidas por MONTE *et al.* (2003). Com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,99$, mostra-se que a redução de densidade das argamassas é inversamente proporcional ao teor de ar incorporado.

Figura 7.5 – Correlação entre a densidade de massa aparente e o teor de ar incorporado (MONTE *et al.*, 2003).

Ainda segundo MONTE *et al.* (2003) pode-se estabelecer a correlação existente entre resistência a compressão e densidade de massa aparente (Figura 7.6).

Figura 7.6 – Correlação entre densidade de massa aparente e resistência a compressão (MONTE et al., 2003).

7.4 Exemplos de materiais de proteção térmica para estruturas de aço e de concreto

Como o aço, em princípio, é mais susceptível ao incêndio do que o material concreto, materiais de proteção térmica para estruturas de aços sofreram maior evolução tecnológica. Estes materiais podem servir de base também para o desenvolvimento de materiais de proteção térmica para estruturas de concreto. Em termos gerais, materiais de proteção térmica para estrutura de aço ou de concreto, para apresentar bom desempenho frente ao fogo, necessitam possuir as seguintes características.:

- Baixa massa específica aparente;
- Baixa condutividade térmica;
- Adequada resistência mecânica (quando expostos a impactos);
- Garantia de integridade durante a evolução do incêndio;
- Boa resistência contra lascamento explosivo;
- Custo compatível;
- Boa durabilidade durante a vida útil.

Recentemente, a empresa suíça DEGUSSA MBT AG desenvolveu uma argamassa de proteção térmica formada por uma mistura de cimento Portland, agregados leves (vermiculita, perlita e pedra-pomes) e aditivos LECA®, LITAG® e AGLILE®, para

proteção passiva de túneis de concreto (MAI, 2002). A argamassa tem sido comercializada com o nome de MEYCO® FIX FIRESHIELD 1350.

O laboratório sueco FSD avaliou o desempenho desta argamassa para seis cenários de incêndio, a fim de se determinar a temperatura da interface do concreto projetado com argamassa de proteção térmica (FSD, 2003):

- Curva ISO 834 ou a similar BS 475;
- Curva de hidrocarbonetos (HC) de acordo com o Eurocode 1;
- Curva RWS para túneis;
- Curva VIG-1 para túneis, na qual a temperatura sobe rapidamente até 1.000 °C em 5 minutos;
- Curva RABT para túneis, na qual a temperatura sobe rapidamente até 1.200 °C em 5 minutos;
- Curva DPT (Dublin Port Tunnel) para túneis, na qual a temperatura sobe rapidamente até 1.020 °C em 4 minutos.

A Tabela 7.3 apresenta os resultados obtidos para concreto projetado de agregado calcáreo, em função do tempo de exposição a temperatura elevada de acordo com a curva RWS.

Tabela 7.3: Temperatura crítica da interface entre o concreto projetado e o revestimento de argamassa FIRESHIELD 1350 em função do tempo de exposição a temperatura elevada (curva RWS). Os valores são válidos para espessuras de concreto superiores a 200 mm (FSD, 2003).

Espessura Argamassa MEYCO® Fix Fireshield 1350 (mm)	Temperatura crítica na superfície do concreto, em função da espessura de argamassa de proteção térmica, de acordo com a curva RWS (min)					
	30	60	90	120	180	240
25	234 °C	383 °C	474 °C	521 °C	581 °C	634 °C
30	182 °C	316 °C	401 °C	450 °C	511 °C	562 °C
35	148 °C	261 °C	343 °C	393 °C	452 °C	503 °C
40	126 °C	217 °C	295 °C	345 °C	404 °C	453 °C
45	108 °C	182 °C	234 °C	304 °C	363 °C	410 °C
50	94 °C	157 °C	219 °C	267 °C	327 °C	373 °C
55	84 °C	139 °C	190 °C	236 °C	296 °C	340 °C
60	75 °C	124 °C	167 °C	208 °C	267 °C	311 °C
65	67 °C	112 °C	149 °C	185 °C	242 °C	285 °C
70	61 °C	100 °C	136 °C	167 °C	220 °C	261 °C
75	55 °C	92 °C	124 °C	151 °C	199 °C	240 °C

A utilização da curva ISO 834 foi originalmente pensada para aplicação em estruturas de concreto em edifícios, porém, atualmente está sendo proposta também para túneis. A curva de hidrocarbonetos foi pensada inicialmente para ser utilizada em petroquímicas, mas está também sendo proposta, atualmente, para túneis. É importante notar que estas curvas representam a severidade do incêndio para o qual a argamassa de proteção térmica está sendo projetada. Vale ressaltar, que neste caso, severidade do incêndio não representa apenas a taxa de aquecimento ou a temperatura máxima do incêndio, mas também a duração do incêndio.

A argamassa FIRESHIELD 1350 pode ser aplicada como proteção térmica de estruturas de concreto ou de aço, sendo que, atualmente estas argamassas de proteção térmica estão sendo mais utilizadas em túneis, em decorrência dos grandes sinistros ocorridos na década de 90, porém, já existem casos de aplicação desses tipos de argamassas em estruturas de edifícios usuais de concreto armado, a semelhança dos edifícios de aço.

A seguir são apresentados alguns materiais de proteção térmica de estruturas de aço largamente utilizados atualmente e que poderão servir de base para o desenvolvimento de novos materiais de proteção térmica de estruturas de concreto (Tabela 7.4).

Tabela 7.4 – Materiais de proteção térmica aplicados em estruturas metálicas (VARGAS & SILVA, 2003).

Materiais de Proteção Térmica	Descrição
Argamassa Projetada "Cimenticius"	Consiste de agregados e aglomerados misturados com água, formando uma massa fluida, que é projetada nas estruturas metálicas. O resultado é uma superfície rugosa, mais apropriada para elementos acima do forro ou para ambientes menos exigentes em termos que acabamento arquitetônico. A argamassa geralmente é constituída de vermiculita, cimento, resinas acrílicas e cargas inertes, tais como poliestireno expandido e celulose.
Fibra Projetada	É constituída por agregados, fibras minerais e aglomerantes que são projetados sobre a superfície do aço. Resulta também em uma superfície rugosa.
Placas	São elementos pré-fabricados fixados na estrutura por meio de pinos ou perfis leves de aço. Geralmente são compostas por materiais fibrosos, vermiculita, gesso ou combinação destes materiais.
Pintura Intumescente	É constituída por polímeros com pigmentos intumescentes, que reagem na presença de fogo, em geral a 200 °C, aumentando seu volume. Os poros resultantes são preenchidos por gases atóxicos que, junto com resinas especiais que constituem as tintas, formam uma espuma rígida na superfície do aço, retardando o efeito do calor da chama. É aplicada por meio convencionais como pistola ou rolo.

As fibras e argamassas projetadas de proteção térmica das estruturas devem trabalhar monoliticamente com a estrutura e acompanhar seus movimentos sem que ocorram fissuras ou desprendimento, formando um revestimento homogêneo e contínuo que penetre em todos os cantos e reentrâncias da estrutura. Não podem conter asbestos ou outro material agressivo a saúde dos usuários do edifício, nem apresentar desprendimento por ressecamento superficial ou por ação de correntes de ar para não

contaminar o ambiente. Devem, portanto, atender as normas para as quais são exigidos ensaios de erosão sob correntes de ar com velocidade de teste de 24 km/h, sem que o material apresente perdas após 4 horas de testes. Qualquer produto de proteção que sofra perda de material decorrente de erosão causada por correntes de ar terá, com o tempo, sua espessura reduzida e conseqüentemente uma redução na proteção. Sua durabilidade deverá ser a mesma da estrutura, dispensando manutenção e permitindo facilidade para reparos manuais, garantindo perfeita aderência entre camadas sucessivas, no caso de eventuais danos causados pelas demais atividades da obra. Não devem ser higroscópicas e devem apresentar índice zero de combustibilidade e propagação das chamas. Não devem conter espaços vazios que permitam o alojamento de insetos e sua formulação deve apresentar fungicidas e bactericidas para estabilizar seus componentes, não permitindo a proliferação de bactérias e fungos. A Tabela 7.5 apresenta um conjunto de propriedades físicas relevantes para fibras e argamassas projetadas.

Tabela 7.5 – Propriedades físicas das fibras e argamassas projetadas (VARGAS & SILVA, 2003).

Propriedades Físicas	Mínimos Recomendados	Método de Teste
Densidade seca média	240 kg/m ³	ASTM E 605
Aderência ao aço	9,6 kPa	ASTM E 736
Compressão - 10% deformação máxima	57 kPa	ASTM E 761
Erosão - ar a 24 km/h	Máximo 0,53 g/m ³	ASTM E 859
Corrosão	Não contribui	ASTM E 937

Apresenta-se, a seguir, algumas características das argamassas projetadas tipo “Cimentitious”:

- **Monokote MK-6** – É uma argamassa projetada muito utilizada no Brasil que é importada dos EUA. Possui baixa massa específica (240 kg/m³), é atóxica, aplicada por projeção diretamente sobre a estrutura, dispensando o uso de pinos ou telas para fixação. É composta basicamente por 82% de cimento Portland e por resinas acrílicas, não existindo nenhum tipo de reação química após sua aplicação ou quando exposto a altas temperaturas. A Tabela 7.6 apresenta um resumo das principais características.

Tabela 7.6 – Propriedades físicas da argamassa projetada “Cimentitious” (Fonte: VARGAS & SILVA, 2003).

Propriedades Físicas	Mínimos Recomendados	Resultados de Testes
Densidade seca média	240 kg/m ³	240 kg/m ³
Aderência ao aço	9,6 kPa	9,6 kPa
Compressão - 10% deformação máxima	57 kPa	68,9 kPa
Erosão - ar a 24 km/h	Máximo 0,53 g/m ³	0
Corrosão	Não contribui	Não contribui

- **Isopiro** – É um pré-misturado a seco de vermiculita expandida, cimento hidráulico e aglomerantes minerais. Após adição de água, torna-se uma argamassa de proteção térmica. A vermiculita é um agregado mineral incombustível de estrutura lamelar que, exposto a uma determinada temperatura expande-se, tornando-se o principal agregado da argamassa. O Isopiro é um produto nacional e pode ser aplicado por jateamento ou espátulas, sendo necessário o uso de telas para a perfeita aderência a superfície metálica. A Tabela 7.7 apresenta um resumo das propriedades físicas deste material.

Tabela 7.7 – Propriedades físicas de argamassa vermiculita – (Fonte: VARGAS & SILVA, 2003).

Propriedades Físicas	Valores
Comportamento ao fogo	Incombustível
Condutividade Térmica (W/mK)	0,23
Calor Específico (MJ/kg°C)	92,1
Resistência à Compressão (MPa)	2,25

- **Termosist** – É também um pré-misturado a seco, composto basicamente de vermiculita expandida, gesso, aglomerantes hidráulicos, resinas acrílicas, fibras de celulose e pérolas de poliestireno. Após a adição de água torna-se uma argamassa de proteção térmica. É um produto nacional e apresenta densidade de 300 kg/m³. É aplicada por jateamento ou com uso de espátulas, não sendo necessário o uso de telas ou pinos para aderência à superfície metálica.

- **Blaze Shield** – É uma fibra projetada, importada dos EUA, e muito usada no Brasil. É um produto de baixa densidade (240 kg/m^3), atóxica, e aplicada por projeção diretamente na estrutura, dispensando o uso de telas ou pinos para fixação. É composta basicamente por fibras de rocha, não existindo nenhum tipo de reação química após sua aplicação ou mesmo quando exposto a altas temperaturas. A Tabela 7.8 apresenta algumas propriedades físicas da referida fibra.

Tabela 7.8 – Propriedades físicas – fibra projetada (Fonte: VARGAS & SILVA, 2003).

Propriedades Físicas	Mínimos Recomendados	Resultados de Testes
Densidade seca média	240 kg/m^3	294 kg/m^3
Aderência ao aço	9,6 kPa	19,1 kPa
Compressão - 10% deformação máxima	57 kPa	81,4 kPa
Erosão - ar a 24 km/h	Máxima $0,53 \text{ g/m}^3$	0
Corrosão	Não contribui	Não contribui
Condutividade - 600°C	-	$0,173 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Calor Específico - 600°C	-	$2.344 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Também cumprem a função de proteger estruturas de aço contra o fogo placas de gesso acartonado que são constituídas por placa de gesso com fibras de vidro e vermiculita expandida incorporadas. A Tabela 7.9 apresenta as características físicas destas placas.

Tabela 7.9 - Propriedades físicas – placas de gesso (Fonte: VARGAS & SILVA, 2003).

Descrição	Valores
Comportamento ao fogo	Incombustível
Condutividade Térmica (W/mK)	0,15
Calor Específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	1.200

Existem ainda painéis de lã de rocha, feitos com materiais fibrosos, aglomerados por pulverização de resinas termo-endurecíveis. A lã de rocha é obtida da fusão da rocha de origem balsática cujas características são apresentadas na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Propriedades físicas – placas de lã de rocha (VARGAS & SILVA, 2003).

Descrição	Valores
Comportamento ao fogo	Incombustível
Condutividade Térmica (W/mK)	0,099
Calor Específico (J/kg°C)	837,4

As mantas cerâmicas são formadas por aglomerantes de fibras silico-aluminosas, apresentando baixa densidade (64 kg/m^3). São aplicadas de modo a envolver a estrutura, fixadas com pinos de aço já soldados na estrutura. A Tabela 7.11 apresenta suas características físicas.

Tabela 7.11 – Propriedades físicas – manta cerâmica (VARGAS & SILVA, 2003).

Descrição	Valores
Comportamento ao fogo	Incombustível
Condutividade Térmica (W/mK)	0,087
Calor Específico (J/kg°C)	1.130

Muitos revestimentos comerciais utilizados como isoladores ou elementos de proteção contra o fogo tem como matéria-prima o silicato de cálcio, a perlita e a vermiculita, que por sua vez, possuem a mesma composição química e propriedades físicas similares a cinza volante (PEREIRA et al., 2001). De acordo com FERNÁNDEZ (2003), materiais recicláveis como a cinza volante podem ser utilizados na produção de argamassas de proteção contra o incêndio.

Foram apresentados neste capítulo alguns sistemas de proteção passiva de estruturas de aço. O objetivo principal desta apresentação é mostrar o que já existe e é largamente usado para estruturas de aço no sentido de traçar um paralelo com proteção passiva de estruturas de concreto, ou seja, muitos dos materiais utilizados hoje para compor estas argamassas: fibras, placas de gesso, lã de rocha ou manta cerâmica (vermiculita, gesso, cimento Portland, resinas acrílicas, etc), podem ser também utilizados para compor argamassas de proteção térmica de estruturas de concreto.

Atualmente, o fato de o engenheiro utilizar um sistema de proteção térmica para estruturas de concreto não faz com que o prêmio de seguro incêndio do edifício seja diminuído. A intenção é, por assim dizer, que no futuro, após a verificação da diminuição da condição de risco das estruturas de concreto após a aplicação de uma cobertura de proteção térmica, o engenheiro ou administradores do edifício sejam beneficiados com uma redução do prêmio de seguro incêndio a ser pago.

8. CONCLUSÕES

Muitos avanços têm sido registrados no campo de segurança contra incêndio em edifícios. É bem certo que grandes sinistros de incêndio por um lado geram grandes prejuízos à sociedade, e por outro lado, promovem um estado de mobilização da mesma que movida pelo “*espírito da catástrofe*” consegue avançar alguns passos no desenvolvimento da segurança contra incêndio em edifícios. Os casos dos incêndios nos edifícios Joelma e Andraus, na década de 70, na cidade de São Paulo, são exemplos disto, uma vez que se constatou uma grande evolução na legislação de segurança contra incêndio no Estado de São Paulo, que culminou com o Decreto 46.076/2001, em que conceitos de segurança estrutural das edificações já estão sendo contemplados, embora ainda de maneira superficial.

O material concreto, no início utilizado como recobrimento das estruturas de aço para garantir proteção ao fogo das mesmas, evoluiu para o concreto armado, cuja resistência mecânica não era superior a 30 MPa até algumas décadas atrás. Porém, nos últimos 30 anos, pelo menos, o concreto sofreu grande evolução. Hoje, concretos de alta resistência (> 40 MPa) já são uma realidade aplicada em edifícios. Diversos tipos de aditivos e outros materiais (ex: fibras) já vêm sendo adicionados ao concreto com o objetivo de melhorar seu desempenho para fins específicos. Como resultado negativo desta evolução tem-se o fenômeno do “*spalling*”, que ocorre em concretos de alta resistência durante os primeiros instantes do incêndio. Da literatura pesquisada, sabe-se que concretos de alta resistência apresentam susceptibilidade ao incêndio devido a baixa porosidade, o que agrava o fenômeno do lascamento explosivo. Desta forma, é necessário que se estude o comportamento dos diversos tipos de concreto frente ao fogo, a partir de suas variáveis, ou seja, seus parâmetros de dosagem. Dentro desta concepção, materiais de recobrimento que protegem estruturas de concreto contra incêndio já estão sendo utilizadas com relativa frequência em túneis, principalmente na Europa.

Da análise da TSIB concluiu-se que o TRRF não influencia no cálculo do prêmio de seguro incêndio. Desta forma, sob o ponto de vista do seguro, os materiais estruturais e de compartimentação são divididos em combustíveis e não-combustíveis, na medida em que eles podem contribuir ou não na propagação do incêndio. Assim, não importa o seu comportamento mecânico em situação de incêndio porque nenhum tipo de redução de

prêmio é aplicado. A TSIB contempla somente desconto sobre o prêmio de seguro incêndio quando existem sistemas protecionais instalados no edifício (extintores, hidrantes, sprinklers, etc), exceto para a utilização de revestimento protetor de estruturas e paredes de compartimentação.

No estudo de caso “Aeroporto Santos Dumont”, constatou-se que os pilares com revestimento cerâmico tiveram melhor comportamento frente ao fogo, fato este que motiva o desenvolvimento de materiais de proteção térmica para estruturas de concreto. Da mesma forma, neste incêndio constatou-se que os pilares de seção circular também tiveram melhor comportamento frente ao fogo, sofreram menor degradação, corroborando com o descrito na literatura: cantos de pilares, em situação de incêndio, são mais susceptíveis ao acúmulo de tensões e conseqüentemente ao lascamento explosivo.

Do experimento realizado concluiu-se que o aumento da relação a/c acentua a perda de resistência mecânica dos concretos comuns em relação a elevação da temperatura. Obviamente, o experimento aponta para uma tendência de comportamento dos concretos analisados, sendo ainda necessário mais pesquisa e mais ensaios realizados para se afirmar categoricamente que a relação a/c é inversamente proporcional a resistência do concreto ao fogo. Para afirmar que o aumento da relação a/c diminui a resistência a compressão dos concretos, ABRAMS realizou uma série experimentos, o que deveria ser executado para o caso em questão. Deste mesmo experimento, ainda concluiu-se que após análise visual dos corpos de prova submetidos à elevação de temperatura (700 °C), os mesmos apresentaram a coloração cinza claro, conforme descrito na literatura (MALHOTRA, 1982). No meio técnico, não seria comum que um engenheiro especificasse um concreto estrutural com maior relação a/c, o que prejudicaria a qualidade deste concreto no que tange a resistência a compressão. Desta forma, o experimento serve menos para agregar mais uma desvantagem de uma elevada relação a/c nos concretos (além da diminuição da resistência mecânica e durabilidade, maior susceptibilidade ao fogo) e mais para apresentar um estudo do comportamento do concreto frente a elevação da temperatura a partir de seus componentes, ou seja, através de um estudo de dosagem.

Este trabalho abordou alguns aspectos de segurança contra incêndio em edifícios sob o ponto de vista da engenharia e do seguro. Restou evidente, portanto, que os dois meios abordam este tema de maneiras diferentes: o meio técnico de engenharia aborda o tema relevando aspectos de segurança a vida uma vez que o meio está norteado pelas legislações de segurança contra incêndio; já o seguro releva aspectos de segurança patrimonial, objeto de suas indenizações. Torna-se clara a necessidade de uma convergência de visões, uma vez que a segurança contra incêndio é única, sendo a sua abordagem multidisciplinar. Para a propagação dos tópicos aqui abordados no meio técnico seria interessante a divulgação deste trabalho, através de palestras, no ambiente das seguradoras e resseguradoras, construtoras, projetistas e arquitetos além do meio acadêmico e corpo de bombeiros.

9. ESTUDOS FUTUROS

Seria importante que mais pesquisas se desenvolvessem no sentido de sistematizar, categorizar e ampliar o leque de materiais de proteção de estruturas de concreto contra o fogo (por exemplo: vermiculita, cerâmicas, argamassas de proteção térmica, etc), para que no futuro, a aplicação destes materiais em edifícios também possa gerar um benefício financeiro para seus administradores, através, por exemplo, de um desconto sobre o prêmio de seguro incêndio. Isto talvez servisse de estímulo para que a indústria da construção civil olhasse com mais interesse o desenvolvimento destes revestimentos de proteção térmica dos concretos.

Além do exposto anteriormente, dentro do contexto de segurança contra incêndio dos edifícios, seria importante o desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- **Metodologias de medição do risco de incêndio em edifícios:** é importante o desenvolvimento de *softwares* que simulem o início e a propagação de um incêndio. Este *software* seria uma ferramenta importante para o projetista na medida em que ele poderia avaliar se determinada solução arquitetônica apresentaria um nível de segurança contra incêndio satisfatória ou não;
- **Nível mínimo de proteção à vida e nível mínimo de proteção patrimonial:** atualmente existe a legislação de segurança contra incêndio que visa a segurança à vida e as normas do seguro (dadas pelas Seguradoras, pelo IRB (Instituto de Resseguros do Brasil S/A) e pela SUSEP – Superintendência de Seguros Privados, autarquia do governo federal, responsável pela regulamentação do seguro no Brasil) que visam a segurança patrimonial. Ocorre que estes dois níveis de exigência são divergentes em muitos aspectos, ou seja, de uma forma genérica, a legislação é mais exigente nos conceitos de segurança à vida e as normas de seguro exigem mais com relação à segurança patrimonial. Muitas vezes, na prática, as empresas/pessoas compradoras de seguro recaem em dúvida sobre qual norma atender, uma vez que é obrigatório atender à legislação de segurança contra incêndio, porém, para se conseguir descontos sobre o prêmio de seguro incêndio é necessário que se obedeça às normas securitárias. Seria importante desenvolver um estudo para se compreender as diferenças de exigência de cada norma, no sentido de procurar uniformizá-las

ao máximo, compatibilizando as diferenças, para que, no futuro, a sociedade não tenha que seguir duas normas, como ocorre atualmente.

- **Metodologias de gerenciamento de risco de incêndio em edifícios:** desenvolvimento de *softwares* e metodologias que facilitem a administração de edifícios com relação ao risco de incêndio, considerando as atividades desenvolvidas dentro dos edifícios, a manutenção aplicada, os meios de proteção contra incêndio e a resistência ao fogo das estruturas. Esta ferramenta seria importante na avaliação de risco de incêndio para os administradores dos edifícios, o Corpo de Bombeiros e as Seguradoras.
- **Desenvolvimento de testes em escala real:** no texto em questão observa-se o caso dos experimentos de Cardington, onde um edifício de 8 pavimentos, tipo escritório, foi construído e testes de incêndio foram realizados. É importante a realização de testes, em escala real, em estruturas solicitadas, uma vez que o comportamento do material isolado pode ser diferente do comportamento do material aplicado à estrutura. Os testes de Cardington mostraram que não é necessária a aplicação de material de proteção térmica em vigas secundárias, uma vez que o material (aço) quando testado dentro da estrutura do edifício apresentou um resultado de deflexão mínima satisfatório. A não utilização de material de proteção térmica em vigas secundárias em um edifício de 8 ou mais pavimentos representa uma economia considerável, sem prejuízo à segurança estrutural.
- **Softwares de simulação do comportamento das estruturas em situação de incêndio:** baseado em testes em escala real e no conhecimento do comportamento do material concreto em relação ao fogo, *softwares* poderiam ser desenvolvidos e seriam uma importante ferramenta para o projetista na medida em que ele poderia adequar com maior precisão os sistemas de proteção contra o fogo para todo o edifício. Até mesmo a aplicação de revestimento de proteção térmica das estruturas, por exemplo, poderia ser direcionada apenas para as regiões do edifício com maior exposição aos danos decorrentes do incêndio.
- **Metodologias de recuperação de estruturas submetidas ao incêndio:** a criação de metodologias de avaliação e recuperação de estruturas submetidas ao incêndio é importante porque acarreta uma economia de recursos para a sociedade. Atualmente, muitos edifícios que sofrem grandes incêndios são

demolidos e reconstruídos. Para que se recupere bem uma estrutura submetida ao fogo é necessário que se conheça o comportamento do concreto em função da elevação de temperatura. Muitos sinistros pagos pelas Companhias Seguradoras poderiam ser minimizados em função de uma boa e eficaz recuperação estrutural. Cita-se o exemplo das torres da CESP (Av. Paulista x Rua Augusta – vizinha ao edifício do banco Safra, em São Paulo) em que uma delas colapsou totalmente devido ao incêndio e a outra restou seriamente danificada. Neste caso, caberia uma recuperação estrutural do edifício sinistrado, porém optou-se por uma demolição do edifício e construção de um novo edifício. Demolir, retirar o entulho e reconstruir um edifício, em princípio, custa mais caro que realizar uma recuperação estrutural.

- **Impacto social e ambiental do incêndio:** apresentar uma visão da dimensão dos reais prejuízos para o meio ambiente, para a economia e para a sociedade dos danos decorrentes dos incêndios nas suas mais variadas formas, desde plataformas de petróleo até incêndios florestais, passando por incêndios ilegais e criminosos na Amazônia até incêndios decorrentes de explosões em indústrias petroquímicas. Uma abordagem estatística de frequência de casos de incêndios e sua severidade segmentada por tipo de incêndio, ou seja, incêndios irrompidos em cada setor da economia decorrentes de diferentes causas. É necessário inserir o incêndio dentro do contexto de sustentabilidade do edifício, uma vez que ocorrido o incêndio durante a vida útil do edifício, a sua sustentabilidade torna-se comprometida.
- **Análise do comportamento das estruturas a partir de sinistros de incêndio:** assim como o caso do Aeroporto Santos Dumont, mais sinistros de incêndio deveriam ser objeto de análise sob o enfoque do comportamento das estruturas em situação de incêndio, uma vez que eles representam casos reais de incêndio com comportamentos reais das estruturas de concreto, que podem dar confiabilidade aos resultados de testes e experimentos de pequena escala em laboratório. Devido também a grande dificuldade, no Brasil, do desenvolvimento de testes de incêndio em grande escala, o estudo de casos reais de incêndio passa a ser uma fonte muito importante de informações sobre o comportamento de estruturas de concreto em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSIS, Valério Tadeu de. *Carga de incêndio em edifícios de escritório – estudo de caso*. [Dissertação de Mestrado, Ouro Preto – UFOP, 2001].
- [2] BATTISTA, R.C., BATISTA, E.M., CARVALHO, E.M.L. *Reabilitação estrutural do prédio do Aeroporto Santos Sumont após danos causados por incêndio*. [Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestrutura Civil, 1998].
- [3] BRANCO, F.A., SANTOS, J.R.dos. *Avaliação da espessura degradada em estruturas de betão sujeitas à acção do fogo* (FBTEST), 2000 [IST / ICIST]
- [4] BUKOWSKI, Richard W. *Fire as an building design load*. [Building and Fire Research Laboratory (2001), National Institute of Standards and Technology - NIST, Gaithersburg, MD 20899, USA].
- [5] CALLISTER Jr., William D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ª Ed. Trad. SOARES, Sérgio Murilo Stamile. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [6] CERNÝ, R., TOTOVÁ, M., PODEBRADSKÁ, J., TOMAN, J., DRCHALOVÁ, J., ROVNANÍKOVÁ, P. *Thermal and hygric properties of Portland cement mortar after high-temperature exposure combined with compressive stress*. [Cement Concrete Research 33 (2003) 1347 – 1355]
- [7] CHAN, S. Y. N., LUO, X., SUN, W. *Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete*. Construction and Buildings Materials 14 (2000) 261 – 266 [Southeast University, Nanjing 210096, PR China]
- [8] CHAN, Y. N., PENG, G. F., ANSON, M. *Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Composites (1999) – 23 – 27 [Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong].
- [9] CORPO DE BOMBEIROS – POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CB-PMESP). *Segurança estrutural nas edificações – resistência ao fogo dos elementos de construção*. Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros IT 08/01. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2001a. [Decreto Lei nº 46.076 do Estado de São Paulo, 31 de agosto de 2001]

- [10] COSTA, Carla Neves, FIGUEIREDO, Antônio Domingues de, SILVA, Valdir Pignatta e. *O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica*. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Belo Horizonte: IBRACON, 2002a.
- [11] COSTA, Carla Neves. *Estruturas de concreto em situação de incêndio*. São Paulo: PEF-EPUSP, 2002. [Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo]
- [12] COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta e. *Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas*. In: NUTAU'2002 – Seminário Internacional – Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. **Anais**. São Paulo: NUTAU/FAU/USP, 2002b.
- [13] CÜLFIK, Mehmet Sait, ÖZTURAN, Turan. *Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar*. Cement and Concrete Research 32 (2002) 809 – 816 [Department of Civil Engineering, Bogaziçi University, Bebek 80815, Istanbul, Turkey].
- [14] CUOGHI, Ricardo de Scarabello, FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. *Considerações sobre argamassa projetada como revestimento protetor de estruturas de concreto contra incêndio* [NUTAU, 2004 – página 275].
- [15] DRYSDALE, Dougal. *An introduction to fire dynamics*. [London: John Wiley & Sons Ltd., 1998].
- [16] FERNANDES, Danilo de Hollanda. *Análise não-linear elástica de pórticos planos em aço sob a ação de incêndio*. [Tese de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Maio/2004].
- [17] FERNÁNDEZ, Carlos Leiva, ARENAS, Luis F. Vilches, PEREIRA, Constantino Fernández, PARAPAR, José Vale. *Influence of type of fly ash on the insulating capacity of fly ash mortars used for passive protection against fire*. International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper 58, 2003.
- [18] FIRE SAFETY DESIGN (FSD). *Summary design guide. Passive fire protection of concrete with FIRESHIELD 1350*. FSD project no. 02-009. Version “D”. Suffolk (U.K.): FSD, 2003. [Passive Fire Protection of Concrete with FIRESHIELD 1350]
- [19] HAMMER, Tor Arne, LINGARD, Jan. *Fire resistance of structural lightweight aggregate concrete: a literature survey with focus on spalling*. [SINTEF Civil and

- Environmental Engineering Cement and Concrete, 7034 TRONDHEIM, Norway, 1995];
- [20] HARMATHY, T.Z. *Fire Safety Design & Concrete* [Longman Group, UK, Limited, 1993];
- [21] INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P. *Fundamentos da transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1992.
- [22] JOHN, Vanderley M., SILVA, Vanessa Gomes da, AGOPYAN, Vahan. *Agenda 21: Uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro*. [ANTAC – Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunicações Sustentáveis. Canela, 24 a 27 de abril de 2001].
- [23] LANDI, F.R.A., *A ação do fogo sobre as estruturas metálicas*. [EPUSP - Os edifícios de estruturas metálicas; Anais do Seminário, São Paulo, 1986].
- [24] LAWSON, R. M., *Fire engineering design of steel and composite buildings*. [The Steel Construction Institute, Silwood Park, Ascot, SL5 7QN, UK, 2001].
- [25] LIE, T.T., *Fire and buildings*. [London, applied Science, 1972].
- [26] MAI, Dieter. *Cement-Based Mineral-Containing Passive Fire Protection for Underground Structures* [Fourth International Symposium on Sprayed Concrete, 2002 – MBT (Schweiz) AG, R&D Underground Construction, Zurich, Switzerland].
- [27] MALHOTRA, H.L. *Design of Fire-Resisting Structures* [Head of Buildings and Structures Division, Fire Research Station, Borehamwood, Herts, U.K., 1982].
- [28] MELHADO, Silvio Burrattino. *Edifícios de estrutura de aço: segurança contra incêndio e sistemas de proteção da estrutura*. [Dissertação apresentada à EPUSP, 1990].
- [29] MIN, L., CHUNXIANG, Q., WEI, S. *Mechanical properties of high-strength concrete after fire..* Cement and Concrete research, 2003. [Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, 210096, PR China]
- [30] MONTE, Renata, UEMOTO, Kai L., SELMO, Silvia M.S. *Efeitos de aditivos incorporadores de ar nas propriedades de argamassas e revestimentos*. [V SBTA – Simpósio Brasileiro de Argamassas – junho/2003].
- [31] MONTE, Renata, UEMOTO, Kai L., SELMO, Silvia M.S. *Qualificação de aditivos incorporadores de ar para argamassas de assentamento e revestimento*. [V SBTA – Simpósio Brasileiro de Argamassas – junho/2003].

- [32] NAKAKURA, Elza Hissae. *Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a Meruc*. [Dissertação apresentada à EPUSP. Área de concentração: Engenharia Civil e Urbana, 2003].
- [33] NEVILLE, Adam Matthew, *Propriedades do Concreto*. Trad. Salvador E. Giamusso. São Paulo: PINI, 1997.
- [34] NISTIR 6890 - *Fire Resistance Determination and Performance Prediction Research, Needs Workshop: Proceedings*. [William Grosshandler - NIST – National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2002].
- [35] PEREIRA, Constantino Fernández, ARENAS, Luis F. Vilches, PARAPAR, José Vale, PIÑERO, Miguel Rodríguez, DEL VALLE, Joaquín Olivares. *Production of plates based on coal fly ash for their use as insulating materials in doors and fire break walls*. International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy, University of Kentucky, Paper 55, 2001.
- [36] ROSSO, Teodoro. *Incêndios e arquitetura*. [São Paulo, FAU-USP, 1975].
- [37] SANTANA, Maira Andrade Leal, SILVA, Valdir Pignatta e. *Determinação do TRRF das estruturas tendo por base métodos simplificados de análise de risco de incêndio*. Produção em Iniciação Científica da EPUSP – 2002.
- [38] SEITO, Alexandre Itiu. *Arquitetura e segurança contra incêndio - Ênfase na detecção de incêndio*. [Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, 2001].
- [39] SEITO, Alexandre Itiu. *Metodologia de análise de risco de incêndio*. [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, 1995].
- [40] SHIELDS, T.J., SILCOCK, G.W. *Buildings and fire*. [Longman Scientific & Technical, 1987].
- [41] SILVA, V.G., SILVA, M.G., AGOPYAN, V. *Avaliação do desempenho ambiental de edifícios: estágio atual e perspectivas para desenvolvimento no Brasil*. [Artigo extraído do site da disciplina Sustentabilidade no Ambiente Construído: <http://pcc5100.pcc.usp.br> São Paulo, 10 maio de 2003].
- [42] Site da SUSEP - acessado em 02 de novembro de 2005
(<http://www.fiesp.org.br/bancoded.nsf/0/b195421d6a44a829032564dc006f7f68?OpenDocument>).
- [43] TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. Thomas Telford Services Ltd, 1 Heron Quay, London E144JD, 1990.

- [44] VARGAS, Mauri Rezende; SILVA, Valdir Pignatta e. ***Manual de construção em aço. Resistência ao fogo das estruturas de aço***. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2003.
- [45] VENEZIA, Adriana P.P.Galhano. ***Parâmetros para o projeto arquitetônico sob o aspecto da segurança contra incêndio***. [Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – para obtenção do título de mestre em habitação: Planejamento e Tecnologia; Área de Concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios (TCE), São Paulo, 2004].
- [46] WICKSTRÖM, Ulf; HADZISELIMOVIC, Edina. ***Equivalent concrete layer of a fire protection insulation layer***. Fire Safety Journal . N° 26. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1996.
- [47] ZHENG, Qijun, CHUNG, D.D.L. ***Microporous calcium silicate thermal insulator***. [The Institute of Metals – Composite Materials Research Laboratory, State University of New York at Buffalo, 1990].

ANEXO I – DEFINIÇÕES UTILIZADAS NO TEXTO

Ação térmica: é a ação na estrutura descrita por meio do fluxo de calor, provocado pela diferença de temperatura entre os gases quentes do ambiente em chamas e os componentes da estrutura.

Carga de incêndio: é a soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos dos elementos de vedação;

Compartimento: é o volume no interior de uma edificação limitado por elementos de vedação, que impedem a propagação do incêndio para o exterior do compartimento.

Dano Máximo Provável (DMP): É definido como o dano causado por um evento desfavorável, onde todos os métodos de prevenção e combate funcionam adequadamente, de modo a diminuir a severidade do evento.

Duração do incêndio: é o intervalo de tempo entre o instante em que ocorre a inflamação generalizada (“flashover”) e a máxima temperatura do incêndio.

Elementos de vedação: são os elementos estruturais e não-estruturais (paredes, pisos, tetos, portas corta-fogo, etc), estanques, isolantes e resistentes à ação do fogo que compõem o compartimento.

Estanqueidade: é a capacidade dos elementos de vedação de impedir que ocorra rachaduras ou outras aberturas durante o incêndio, através das quais as chamas e os gases quentes possam passar e ignizar outros ambientes.

Franquia: dentro do contexto do seguro é a participação do segurado quando da ocorrência de um sinistro, ou seja, quando da existência de um sinistro indenizável o segurado contribui com o pagamento de uma parte da indenização.

Função indenitária do seguro: o seguro possui a função indenitária, ou seja, oferece proteção às pessoas com relação a perdas e danos que venham a sofrer, no futuro, atingindo-as a si próprias ou as suas propriedades ou bens.

Incêndio natural (compartimentado): é o incêndio para o qual se admite que a temperatura dos gases do compartimento em chamas acompanhe as curvas temperatura-tempo naturais, construídas a partir de ensaios ou modelos matemáticos de incêndio, que procuram representar a real situação do incêndio no compartimento.

Incêndio-padrão: é o incêndio para o qual se admite que a temperatura dos gases do compartimento em chamas, na situação real, respeite as curvas padronizadas para ensaios.

Isolamento térmico: é a capacidade do elemento de vedação não permitir, na face oposta, acréscimos de temperatura superiores a 140 °C (temperatura média) e 180 °C (temperatura máxima).

Perda Máxima Possível (PMP): É definida como a máxima perda possível de ocorrer no risco (edifício), supondo-se que todas as formas de prevenção e combate estão inoperantes e o evento causador do sinistro torna-se o mais severo possível.

Prêmio de seguro: é o pagamento efetuado pelo segurado ao segurador, ou seja, é o preço do seguro para o segurado.

Proteção térmica: é a capacidade de um material de revestimento impedir que o elemento estrutural revestido atinja a temperatura crítica.

Resistência ao fogo: é a capacidade de uma estrutura, de parte de uma estrutura ou de um elemento de vedação em manter as suas funções em uma situação de incêndio por um tempo determinado.

Ressegurador: é aquele que vende resseguro.

Resseguro: é um tipo de pulverização de responsabilidades onde o(s) segurador(es) transferem a outrem, parcialmente, o risco assumido, ou seja, é a operação de que se vale um ou mais seguradores para transferir à resseguradora o excesso de responsabilidade que ultrapassa o limite de sua capacidade econômica de indenizar.

Risco aceitável: são os edifícios para os quais as seguradoras aceitam realizar seguro.

Risco segurável: são os eventos passíveis de se realizar seguro porque são possíveis, futuros e incertos.

Segurado: é aquele que compra o seguro.

Segurador: é aquele que vende seguro.

Seguro: Aurélio Buarque de Holanda Ferreira define seguro como um “contrato aleatório, pelo qual uma das partes se obriga, mediante cobrança de prêmio, a indenizar outra de um perigo ou prejuízo eventual”.

Temperatura crítica: é uma temperatura tal na qual se admite que o elemento estrutural perdeu tenha perdido a maior parte de sua resistência mecânica, ou seja, é a temperatura que causa colapso do elemento estrutural.

Valor em Risco: é o valor segurável, ou seja, os bens passíveis de serem objeto de seguro, prédio ou conteúdo.