

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ
CENTRO TECNOLÓGICO DA TERRA E DO MAR
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE EMERGÊNCIAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**EFEITOS DA TEMPERATURA NOS RISCOS DE COLAPSO ESTRUTURAL
EM CONCRETO**

MARCO ANTÔNIO EIDT

São José

2008

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ
CENTRO TECNOLÓGICO DA TERRA E DO MAR
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE EMERGÊNCIAS

MARCO ANTÔNIO EIDT

**EFEITOS DA TEMPERATURA NOS RISCOS DE COLAPSO ESTRUTURAL
EM CONCRETO**

Monografia apresentada como requisito parcial para obter o título de Tecnólogo em Gestão de Emergências pelo Centro Tecnológico da Terra e do Mar da Universidade do Vale do Itajaí.

Orientador: Professor Luciano da Silva

São José

2008

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ

CENTRO TECNOLÓGICO DA TERRA E DO MAR

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE EMERGÊNCIAS

MARCO ANTÔNIO EIDT

**EFEITOS DA TEMPERATURA NOS RISCOS DE COLAPSO ESTRUTURAL
EM CONCRETO**

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Emergências e aprovada pelo Curso Superior de Tecnologia em Gestão de Emergências da Universidade do Vale do Itajaí, Centro Tecnológico da Terra e do Mar.

Área de Concentração: Tecnologia e Gestão

São José, dede 2008.

Professor Luciano da Silva

UNIVALI – CE de São José

Orientador

Maj BM Alexandre Corrêa Dutra

UNIVALI – CE de São José

Membro

Cap BM Guideverson de Lourenço Heisler

UNIVALI – CE de São José

Membro

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus queridos pais, Amando e Rosane, que souberam me ensinar as virtudes necessárias para vencer na vida.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos aos professores da Universidade do Vale do Itajaí, do Curso Superior de Tecnologia em Gestão de Emergências, principalmente ao meu professor orientador Dr. Luciano da Silva que se mostrou muito prestativo e não mediu esforços para que esse trabalho fosse possível.

Agradecimentos aos meus amigos de turma: Alcântara, Ana Paula, Cléber, Coste, Daniel, Davi, Diego, Dos Anjos, Grigulo, Isabel, Ivanka, Lemos, Márcio, Sarte, Sommer, Pratts e Túlio; pelo companheirismo e alegria proporcionados ao longo desses três anos, facilitando o convívio nessa fase tão conturbada.

Agradecimentos ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, em especial aos militares instrutores e integrantes do Centro de Ensino Bombeiro Militar, que souberam orientar meus passos nessa jornada e que contribuíram de alguma forma na minha formação e na confecção desse trabalho.

Agradecimento especial aos meus pais, Amando e Rosane, meus irmãos Mário, Graciela e Daniela, minha namorada Arianna e seus pais Juarez e Silvana, que sempre me incentivaram e confiaram na seriedade do meu trabalho.

Agradecimentos à banca examinadora, composta por meu orientador, Professor Luciano da Silva, e pelos membros Maj BM Corrêa e Cap BM Heisler.

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio”.

Martin Luther King

RESUMO

Os atendimentos a chamadas de incêndio nos anos de 2005 a 2007 somaram mais de 1000 chamadas na área da Grande Florianópolis. Deste total, aproximadamente 35% correspondem a incêndios em edificações (o número total inclui incêndios em vegetações, automóveis, lixões, terrenos baldios e embarcações). Em função do atendimento rápido pelo CMBSC às ocorrências, a maioria dos incêndios não chega a atingir o desenvolvimento completo. Entretanto, alguns contratempos como localização, dificuldades de acesso e até mesmo demora na solicitação da comunidade ao serviço de emergência pelo número 193, fazem com que alguns incêndios atinjam grandes proporções. Como exemplo pode ser citado o incêndio no Mercado Público de Florianópolis em agosto de 2005.

O estudo tem como foco avaliar experimentalmente o grau de comprometimento da resistência das estruturas de concreto em função da temperatura em incêndios, bem como apurar o percentual de resistência perdida em função da aplicação direta de água pelos bombeiros sobre a estrutura aquecida.

Vários estudos sobre o dimensionamento de concreto para situações de incêndio já foram e continuam sendo realizados, assim como constantemente a problemática de avaliação do comprometimento da estrutura sinistrada por incêndios tem conquistado espaço entre os especialistas. O problema é complexo, e avaliar se a técnica de aplicação de água preconizada no Corpo de Bombeiros contribui para o agravamento da situação ou não, é o principal objetivo desse trabalho. O estudo tem sua relevância tanto pelo fator corporativista (em busca do aperfeiçoamento de técnicas e segurança no trabalho) quanto pelos fatores sociais e econômicos, uma vez que estruturas de concreto comprometidas por incêndios necessitam de avaliação especializada para serem reestruturadas a fim de garantir a segurança dos usuários.

Palavras-chave: Concreto, temperatura, água, Corpo de Bombeiros.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2. A ATIVIDADE DE COMBATE A INCÊNDIOS NO CBMSC	19
3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	22
3.2 RELEVÂNCIA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	22
3.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	23
3.3.1 Condução.....	23
3.3.2 Convecção	23
3.3.3 Radiação	23
3.3.4 Mecanismos Combinados	24
3.4 LEI DE FOURIER.....	25
3.5 LEI BÁSICA PARA CONVECÇÃO	28
3.6 CAMADA LIMITE	29
3.7 RESISTÊNCIA TÉRMICA NA CONVECÇÃO	31
3.8 MECANISMOS COMBINADOS - CONDUÇÃO E CONVECÇÃO.....	31
3.9 PRINCÍPIOS DA RADIAÇÃO TÉRMICA.....	32
3.10 EFEITO COMBINADO CONDUÇÃO - CONVECÇÃO – RADIAÇÃO	32
4. INCÊNDIOS	34
4.1 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS	34
4.2 DESENVOLVIMENTO DOS INCÊNDIOS	35
4.3 EFEITOS DOS INCÊNDIOS NAS EDIFICAÇÕES	36

5. CONCRETO	40
5.1 HISTÓRICO DO EMPREGO DO CONCRETO	40
5.2 DEFINIÇÕES	42
5.2.1 Agregados.....	44
5.2.2 Cimento	45
5.2.3 Água de amassamento.....	45
5.2.4 Aditivos	46
5.2.5 Cura do concreto	47
5.3 TIPOS DE CONCRETO	47
5.4 AÇÃO DO CALOR NO CONCRETO	50
5.5 EFEITO DA ÁGUA E O <i>SPALLING</i>	53
5.6 EFEITOS DA TEMPERATURA NOS AGREGADOS	54
5.7 NORMAS PARA ENSAIOS E CONFEÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.....	55
5.7.1 Moldagem e cura do corpo de prova.....	55
5.7.2 Procedimentos para ensaio à compressão	56
6. EXPERIÊNCIA EM LABORATÓRIO	58
6.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	58
6.1.1 Moldes para confecção do corpo de prova.....	58
6.1.2 Corpo de prova de concreto	59
6.2 PROCEDIMENTO	60
6.2.1 Confecção dos corpos de prova.....	60
6.2.2 Aquecimento na mufla	62
6.2.3 Ensaio à compressão	63
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
7. CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BM – Bombeiro Militar

CBMSC – Corpo de Bombeiro Militar de Santa Catarina

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Mecanismos de transferência de calor através da garrafa térmica.....	25
Figura 02 – Condução em regime permanente.....	26
Figura 03 – Transferência de calor por condução unidimensional.....	27
Figura 04 – Camada limite hidrodinâmica sobre uma chapa plana.....	30
Figura 05 – Camada limite na transferência convectiva de calor.....	30
Figura 06 – Transferência de calor através de uma parede plana.....	31
Figura 07 – Balanço de energia para se ter conservação de energia	33
Figura 08 – Alteração na resistência e coloração do concreto	52
Figura 09 – Tipos de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão.	57
Figura 10 – Moldes para corpo de prova.	58
Figura 11 – Corpo de prova de concreto.	59
Figura 12 – Orifício para introdução do termostato.	61
Figura 13 – Corpos de prova na estufa a 60°C.	61
Figura 14 – Mufla, corpo de prova, termostato e termômetro instalados.....	62
Figura 15 – Prensa com corpo de prova posicionado para início da compressão.	63
Figura 16 – Tipos de ruptura observadas.....	66
Figura 17 – Rachaduras e pigmentação rosácea dos corpos de prova a 700°C.....	66
Figura 18 – Corpo de prova desintegrado pela ação do choque térmico com água.	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Percentual de resistência X temperatura X tipo de ensaio. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Transformações sofridas por pastas de cimento durante aquecimento.....	17
Tabela 02 – Ordens de grandeza do coeficiente de película (h).....	29
Tabela 03 – Resultados obtidos:.....	65
Tabela 04 – Resultados médios obtidos em toneladas:	67
Tabela 05 – Resultados médios obtidos em MPa.....	68
Tabela 06 – Comparativos percentuais das resistências:.....	69

1.INTRODUÇÃO

Os atendimentos a chamadas de incêndio nos anos de 2005 a 2007 somaram mais de 1000 chamadas na área da Grande Florianópolis. Deste total, aproximadamente 35% correspondem a incêndios em edificações (o número total inclui incêndios em vegetações, automóveis, lixões, terrenos baldios e embarcações). Em função do atendimento rápido pelo CMBSC às ocorrências, a maioria dos incêndios não chega a atingir o desenvolvimento completo. Entretanto, alguns contratempos como localização, dificuldades de acesso e até mesmo demora na solicitação da comunidade ao serviço de emergência pelo número 193, fazem com que alguns incêndios atinjam grandes proporções. Como exemplo pode ser citado o incêndio no Mercado Público de Florianópolis em agosto de 2005.

Os projetos estruturais que tratam da resistência ao fogo são baseados no fato de que as altas temperaturas decorrentes de um incêndio reduzem a resistência mecânica e a rigidez dos elementos estruturais da edificação, e, adicionalmente, promovem expansões térmicas diferenciais, podendo levar a estrutura ao colapso.

Neste sentido, pode-se considerar que as preocupações de segurança contra incêndio em uma edificação se referem a três objetivos fundamentais, que são, por ordem decrescente de importância (NEVES, 1994):

1. A proteção das vidas dos ocupantes do edifício, bem como dos bombeiros que nele tenham de atuar em caso de sinistro;
2. A proteção dos bens existentes no edifício e das atividades que se desenvolvem no mesmo;
3. A proteção do próprio edifício contra danos de incêndios que possam se deflagrar nele ou em edifícios vizinhos.

A segurança em caso de incêndio depende, principalmente, das condições de evacuação das pessoas e das condições para se evitar a propagação de fumos e gases provenientes da combustão, que são as causas principais das perdas de vidas humanas. As falhas estruturais têm importância muito menor neste aspecto, e somente tem caráter relevante quando podem ocasionar problemas para a evacuação das pessoas.

Quando um incêndio é deflagrado num edifício, segundo Neves (1994), a sua ação se faz sentir diretamente nos elementos estruturais que constituem o

compartimento de incêndio e, indiretamente, em zonas mais ou menos afastadas deste. Toda a estrutura do edifício encontra-se sob a ação do próprio peso e sobrecargas de forma que, no início do incêndio, a mesma está submetida a certo estado inicial de tensão e, portanto, a um determinado estado de deformação. A este estado inicial de tensão vem sobrepor-se um novo estado de tensão, resultante do aquecimento diferencial a que os elementos estruturais ficam submetidos.

De fato, os vários elementos constituintes da estrutura de um edifício encontram-se mais ou menos rigidamente interligados e, quando alguns deles são mais aquecidos do que outros, as respectivas dilatações térmicas são restringidas, dando origem a um novo estado de tensão, variável no tempo, à medida que o incêndio se desenvolve. A sobreposição, deste estado de tensão com o estado de tensão inicial, dá origem a um estado de deformação, que é também variável no tempo.

Por outro lado, as propriedades mecânicas dos materiais que constituem os elementos estruturais degradam-se com o aumento da temperatura. Isto significa, por exemplo, que um elemento sujeito a um estado de tensão que permaneça constante, poderá ter sua capacidade resistiva esgotada ao fim de certo período de tempo.

A ação do incêndio não se faz sentir unicamente nos elementos diretamente sob a ação do fogo. Em certas situações, elementos relativamente afastados do compartimento de incêndio poderão ser os primeiros a entrar em colapso, em virtude do estado de tensão que as deformações de origem térmica da zona diretamente aquecida impõem ao resto da estrutura. As medidas de segurança e proteção contra incêndio podem se classificar em ativas e passivas.

As medidas ativas prevêm a existência de meios adequados ao salvamento das pessoas, começando pelo próprio projeto arquitetônico (corredores e escadas amplas, zonas limpas de fumos, etc.). Estas medidas também visam reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios severos, através da atuação em suas causas acidentais e da detecção de focos e limitações das possibilidades de propagação.

As medidas de proteção passiva visam reduzir a probabilidade de colapso das estruturas sempre que ocorra um incêndio severo. Esta probabilidade depende da resistência ao fogo, a qual compreende três aspectos, ou seja, a capacidade resistente da estrutura, a sua integridade perante o fogo e a sua capacidade de isolamento térmico; que devem ser observados para os vários elementos da construção. A capacidade resistente da estrutura vai depender fortemente do comportamento do material estrutural

utilizado, ou seja, do grau de variação de suas propriedades físicas e mecânicas com a temperatura.

As estruturas de concreto são reconhecidas pela boa resistência ao incêndio em virtude das características térmicas do material, tais como: incombustibilidade e baixa condutividade térmica; a não emissão de gases tóxicos ao ser aquecido, e as peças de concreto possuir maior massa e volume se comparados aos elementos metálicos.

No entanto, o aumento da temperatura nos elementos de concreto causa redução na resistência característica e no módulo de elasticidade dos materiais; há perda de rigidez da estrutura e a heterogeneidade dos materiais constituintes do concreto (pasta de cimento, agregados) conduz à degradação do mesmo, podendo levar as peças estruturais à ruína. A desagregação do concreto pode ser antecipada dependendo das características da própria pasta, como o teor de umidade e as adições para melhorar a resistência.

Vários danos progressivos e colapso estrutural de peças de concreto já ocorreram colocando em risco as ações de salvamento e combate ao fogo em alguns edifícios de concreto, por exemplo.

Já o resfriamento rápido por água, na ação de combate a incêndios, produz uma re-hidratação destrutiva da cal, porque o óxido de cálcio, entrando em contato com a água, sofre uma expansão abrupta e pode causar danos adicionais ao concreto endurecido, levando à desagregação após o incêndio.

A tabela 01 apresenta as principais alterações sofridas quimicamente pela pasta de cimento.

Tabela 01: Transformações sofridas por pastas de cimento durante aquecimento.

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

Fonte: LIMA, 2005.

Pela tabela 01 podemos observar que até 80°C não ocorrem alterações significativas na estrutura. Entre 80°C e 105°C, ocorre a decomposição da etringita, paralelamente à perda de água. A decomposição do gel de C-S-H origina diferentes tipos de silicatos de cálcio, dependendo da composição mineralógica e da proporção Ca/Si. A pressão gerada pela formação de vapor de água, associada a estas transformações, provoca a desidratação da portlandita, a qual inicia em 400°C e termina em 600°C. A cal livre formada pode se re-hidratar após o resfriamento, ocasionando uma ligeira expansão e o aparecimento de microfissuras. Acima de 800°C a pasta sofre reações cerâmicas e, em 1100°C, ocorre o derretimento total dos cristais. Após o resfriamento, todas as fases cimentícias podem se re-hidratar, formando assim diferentes géis ou componentes cristalinos. As partículas anidras permanecem inalteradas no decorrer de todo processo (LIMA, 2005).

1.1 PROBLEMA

Até que ponto a aplicação direta de água em estruturas de concreto sinistradas por incêndio pode favorecer o comprometimento da resistência das mesmas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente a extensão do comprometimento da resistência por aplicação direta de água em estruturas de concreto expostas a altas temperaturas em casos de sinistro de incêndio.

1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar o grau de comprometimento da resistência de estruturas de concreto após serem submetidas a altas temperaturas.

Avaliar o grau de comprometimento da resistência de estruturas de concreto após serem submetidas a altas temperaturas e um resfriamento rápido por aplicação de água.

Propor sugestões para aplicação de água por parte do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina em estruturas de concreto sinistradas por incêndio.

2. A ATIVIDADE DE COMBATE A INCÊNDIOS NO CBMSC

Historicamente o fogo sempre foi considerado uma força tanto benéfica como destruidora. A sua utilização seguiu basicamente quatro etapas, a saber: a descoberta do fogo, a obtenção do fogo por fontes naturais, o domínio de técnicas de criação do fogo e o controle do fogo propriamente dito.

A preocupação com incêndios é tão antiga quanto a própria vida social nas mais diversas culturas do mundo. A evolução dos serviços de combate a incêndios certamente está diretamente ligada a grandes catástrofes vividas pela humanidade ao longo dos séculos. Foi a partir de grandes tragédias que surgiu a necessidade de se criar um serviço para fazer frente a esse tipo de sinistro, surgindo assim, as primeiras corporações de bombeiros.

Os passos lógicos que devem preceder a atuação dos serviços públicos de proteção contra incêndios são, por ordem, a prevenção dos incêndios baseada na adoção de códigos e leis de proteção contra sinistros, a educação preventiva das comunidades, a detecção e a extinção automática dos incêndios e a instalação de barreiras contra a propagação do fogo (Cote e Bugbee, 1988).

E é nesse contexto que surgem os amparos e obrigações legais do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, a seguir explicado.

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 reconheceu os direitos à vida, à saúde, à segurança, à propriedade e à incolumidade das pessoas e do patrimônio como direitos constitucionais.

Aos Corpos de Bombeiros Militares, entidades públicas, organizadas com base na hierarquia e na disciplina, incumbidas da realização dos serviços de prevenção de sinistros, de combate a incêndios e de busca e salvamento de pessoas e bens, nos respectivos Estados e no Distrito Federal, coube a garantia desses direitos, pois, a segurança da população é dever do Estado, direito e responsabilidade da cidadania.

Os Corpos de Bombeiros Militares são órgãos da Administração Pública dos Estados e do Distrito Federal. Integram, assim, o Poder Executivo, estando sujeitos às normas e princípios jurídicos que regem suas atividades, em especial aos princípios da

legalidade, impessoalidade, moralidade e publicidade (Art. 37, caput, da Constituição Federal).

Assim, mesmo indiretamente, a Constituição da República Federativa do Brasil prevê em seu artigo 144 as atribuições dos Corpos de Bombeiros:

Art. 144 - A segurança pública, dever do Estado, direito e responsabilidade de todos, é exercida para a preservação da ordem pública e da incolumidade das pessoas e do patrimônio, através dos seguintes órgãos:

[...]

V - Polícias Militares e **Corpos de Bombeiros Militares** (grifo do autor).

[...]

Parágrafo 5º - Às Polícias Militares cabem a polícia ostensiva e a preservação da ordem pública: **aos Corpos de Bombeiros Militares além das atribuições definidas em lei, incumbe a execução de atividades de defesa civil** (grifo do autor).

Também da Constituição Estadual Catarinense de 1989 (alterada pela Emenda Constitucional 033, de 17 de junho de 2003, publicada no Diário Oficial do Estado nº 17176), podemos obter amparo legal da atividade de combate a incêndios pelo CBMSC:

Art. 108. O Corpo de Bombeiros Militar, órgão permanente, força auxiliar, reserva do Exército, organizado com base na hierarquia e disciplina, subordinado ao Governador do Estado, cabe, nos limites de sua competência, além de outras atribuições estabelecidas em Lei:

I – realizar os serviços de prevenção de sinistros ou catástrofes, **de combate a incêndio** (grifo do autor) e de busca e salvamento de pessoas e bens e o atendimento pré-hospitalar;

II – estabelecer normas relativas à segurança das pessoas e de seus bens contra incêndio, catástrofe ou produtos perigosos;

III – analisar, previamente, os projetos de segurança contra incêndio em edificações, contra sinistros em áreas de risco e de armazenagem, manipulação e transporte de produtos perigosos, acompanhar e fiscalizar sua execução, e impor sanções administrativas estabelecidas em Lei;

IV – realizar perícias de incêndio e de áreas sinistradas no limite de sua competência;

V – colaborar com os órgãos da defesa civil;

VI – exercer a polícia judiciária militar, nos termos de lei federal;

VII – estabelecer a prevenção balneária por salva-vidas; e

VIII – prevenir acidentes e incêndios na orla marítima e fluvial.

No Estado de Santa Catarina essas atribuições estão previstas para o Corpo de Bombeiros Militar na Lei nº 6217, de 10 de fevereiro de 1983. Essa lei estabelece a

Organização Básica do Corpo de Bombeiros Militar (regulamentada pelo Dec. n° 19237 de 14 de março de 1983), competindo-lhe realizar os serviços de prevenção e de extinção de incêndios simultaneamente com os de proteção e salvamento de vidas e materiais no local do sinistro. Também as atividades de busca e salvamento, prestando socorro em casos de afogamento, inundações, desabamentos, acidentes em geral, catástrofes e calamidades públicas, como consta no Art. 2º, capítulo II da lei supracitada e que com certeza está recepcionada pelo Art. 144, parágrafo 5º, da Carta Magna.

3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Calor é energia em trânsito, sem a presença de trabalho, devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes ocorrerá transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Quando dois corpos de diferentes temperaturas são colocados em contato direto um com o outro acontecerá uma transferência de energia do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura, até que haja um equilíbrio térmico (igualdade de temperatura entre os dois corpos). Quando não há mais diferença de temperatura a transferência de energia cessa. Há três mecanismos (processos) de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Quando a transferência de energia ocorrer em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido (gás ou líquido), em virtude de um gradiente de temperatura, usa-se o termo transferência de calor por condução (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Quando a transferência de energia ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles, usa-se o termo transferência de calor por convecção (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Quando, na ausência de um meio interveniente, existe uma troca líquida de energia (emitida na forma de ondas eletromagnéticas) entre duas superfícies a diferentes temperaturas, usa-se o termo radiação (INCROPERA; DEWITT, 1998).

3.2 RELEVÂNCIA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é fundamental na atividade dos bombeiros combatentes. O bombeiro não pode subjuar a transferência de calor nos pequenos e grandes incêndios, principalmente aqueles em ambientes confinados, onde as temperaturas dos gases e do ambiente chegam aos surpreendentes 700°C, colocando em risco a vida dos mesmos (WEINGARTNER, 2007).

Além dos riscos da exposição direta ao calor proveniente dos incêndios, aos bombeiros também cabe saber avaliar o grau de comprometimento de uma estrutura num sinistro. Pelo conhecimento dos processos de transferência de calor, associado à

percepção da iminência de colapso, exposições desnecessárias a riscos previsíveis podem ser evitadas.

3.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor pode ser definida como a transferência de energia de uma região para outra como resultado de uma diferença de temperatura entre elas (INCROPERA; DEWITT, 1998). É necessário entender os mecanismos físicos que permitem a transferência de calor para poder quantificar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo. Os mecanismos são a condução, que depende somente de uma diferença de temperatura; a convecção, que depende de uma diferença de temperatura e transporte de massa; e a radiação.

3.3.1 Condução

A condução pode ser definida como o processo no qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser visualizado como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas (KREITH, 1998).

3.3.2 Convecção

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento da massa fluida (KREITH, 1998).

3.3.3 Radiação

A radiação pode se definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas (KREITH, 1998).

O exemplo mais evidente que se pode dar é o próprio calor que se recebe do sol. Neste caso, mesmo havendo vácuo entre a superfície do sol (cujas temperatura é aproximadamente 5500° C) e a superfície da terra, a vida na terra depende desta energia recebida. Esta energia chega até nós na forma de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raios-X, ondas de rádio e TV, microondas e outros tipos de radiações. Outra forma de transferência de calor por radiação é aquela na qual as chamas do fogo de um incêndio trocam calor com o combatente que está no ambiente em chamas, denominado de calor por radiação do tipo gás para superfície (KREITH, 1998).

3.3.4 Mecanismos Combinados

Na maioria das situações práticas ocorrem ao mesmo tempo dois ou mais mecanismos de transferência de calor. Quando um dos mecanismos domina quantitativamente, soluções aproximadas podem ser obtidas desprezando-se os outros mecanismos, mantendo apenas o dominante. Entretanto, deve ficar entendido que variações nas condições do problema podem fazer com que um mecanismo desprezado se torne importante. Como exemplo pode-se citar uma garrafa térmica, onde ocorrem ao mesmo tempo vários mecanismos de transferência de calor. Neste caso, pode-se ter a atuação conjunta dos seguintes mecanismos esquematizados na figura 01:

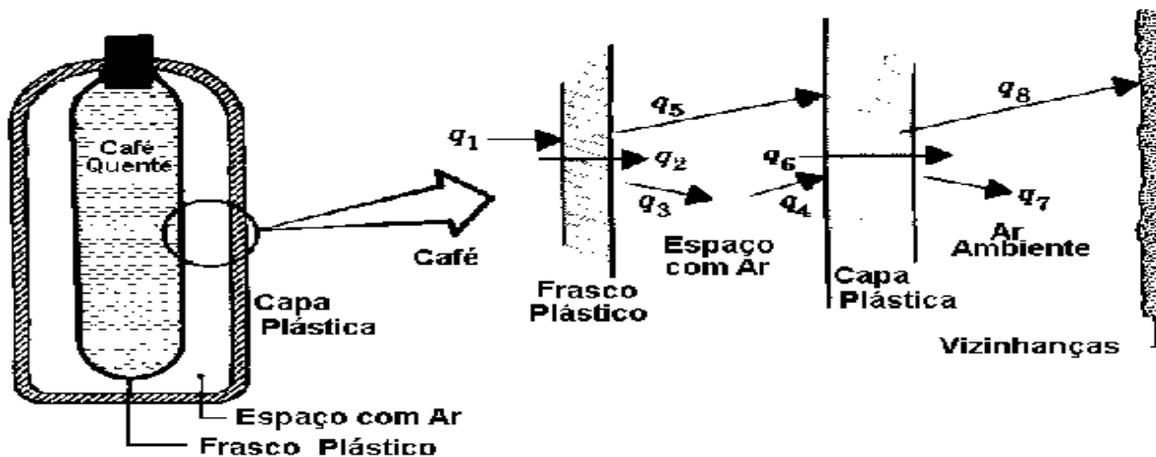


Figura 01 – Mecanismos de transferência de calor através da garrafa térmica

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 13)

q_1 : convecção natural entre o café e a parede do frasco plástico

q_2 : condução através da parede do frasco plástico

q_3 : convecção natural do frasco para o ar

q_4 : convecção natural do ar para a capa plástica

q_5 : radiação entre as superfícies externa do frasco e interna da capa plástica

q_6 : condução através da capa plástica

q_7 : convecção natural da capa plástica para o ar ambiente

q_8 : radiação entre a superfície externa da capa e as vizinhanças

O aumento da capacidade de retenção do calor nestes sistemas é conseguido com o uso de superfícies aluminizadas para o frasco e a capa de modo a reduzir a radiação e a evacuação do espaço com ar para reduzir a convecção natural (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Porém, apesar da existência do vácuo e das paredes espelhadas para reduzir ou limitar a condução, a convecção e a radiação; mesmo assim há perdas de energia e com o tempo os líquidos no interior da garrafa térmica tendem a retornar à temperatura ambiente, mesmo lentamente.

3.4 LEI DE FOURIER

A lei de Fourier foi proposta por volta de 1811 para prever a taxa de transferência de calor por condução. Ela é fenomenológica, ou seja, foi desenvolvida a partir da observação dos fenômenos da natureza em experimentos. Imagina-se um experimento onde o fluxo de calor resultante é medido após a variação das condições experimentais. Considera-se, por exemplo, a transferência de calor através de uma barra de ferro com uma das extremidades aquecidas e com a área lateral isolada termicamente, como mostra a figura 02 (INCROPERA; DEWITT, 1998):

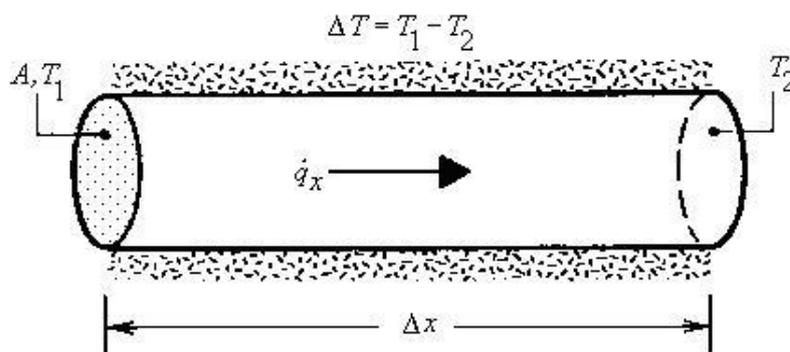


Figura 02 – Condução em regime permanente.

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 22)

Com base em experiências, variando a área da seção da barra, a diferença de temperatura e a distância entre as extremidades, chega-se a seguinte relação de proporcionalidade:

$$\boxed{\dot{q} \propto A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}} \quad (\text{eq. 01})$$

A proporcionalidade pode ser convertida para igualdade através de um coeficiente de proporcionalidade e a Lei de Fourier pode ser enunciada assim: A quantidade de calor transferida por condução, na unidade de tempo, em um material, é igual ao produto das seguintes quantidades:

$$\boxed{\dot{q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}} \quad (\text{eq. 02})$$

Onde:

- \dot{q} é fluxo de calor por condução (Kcal/h no sistema métrico);
- k é a condutividade térmica do material;
- A é a área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo (m^2);
- dT/dx o gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão de variação da temperatura T , na direção do fluxo de calor ($^{\circ}C/h$) (INCROPERA; DEWITT, 1998).

A razão do sinal menos na equação de Fourier é que a direção do aumento da distância “ x ” deve ser a direção do fluxo de calor positivo (figura 03). Como o calor flui do ponto de temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa (gradiente negativo), o fluxo só será positivo quando o gradiente for positivo (multiplicado por -1) (SCHIMIDT et al, 2001).

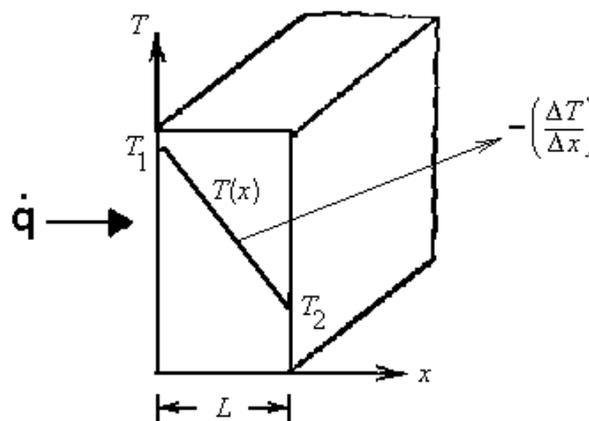


Figura 03 – Transferência de calor por condução unidimensional.

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 03)

O fator de proporcionalidade k que surge da equação de Fourier é a chamada condutividade térmica. Ela é uma propriedade de cada material e vem exprimir a maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor. Sua unidade é obtida da própria equação de Fourier, como mostra a equação 03:

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx} \Rightarrow k = -\frac{\dot{q}}{A.\frac{dT}{dx}} \left(\frac{Kcal/h}{m^2 \frac{^{\circ}C}{m}} = \frac{Kcal}{h.m.^{\circ}C} \right) \quad (\text{eq. 03})$$

Sendo que a unidade no sistema internacional é definida como [W/m.K].

Os valores da condutividade térmica variam em extensa faixa dependendo da constituição química, estado físico e temperatura dos materiais. Quando o valor de k é elevado o material é considerado bom condutor térmico e, caso contrário, isolante térmico. Com relação à temperatura, em alguns materiais como o alumínio e o cobre, o k varia muito pouco com a temperatura, porém em outros, como alguns aços, o k varia significativamente com a temperatura. Nestes casos, adota-se como solução um valor médio de k em um intervalo de temperatura (INCROPERA; DEWITT, 1998).

3.5 LEI BÁSICA PARA CONVECÇÃO

O calor transferido por convecção, na unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido, pode ser calculado através da relação proposta por Isaac Newton, conforme equação 04 (KREITH, 1998):

$$\dot{q} = h.A.\Delta T \quad (\text{eq. 04})$$

Onde:

q = fluxo de calor transferido por convecção (kcal/h);

A = área de transferência de calor (m^2);

T = diferença de temperatura entre a superfície (T_s) e a do fluido em um local bastante afastado da superfície (T_T);

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película.

Vale ressaltar que esta equação é inadequada para explicar o mecanismo físico de transmissão de calor por convecção. A simplicidade da equação de Newton é ilusória, pois ela não explicita as dificuldades envolvidas no estudo da convecção, servindo apenas como uma definição do coeficiente de película (h). O coeficiente de película é, na realidade, uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio fluido e da geometria do sistema. Seu valor numérico não é, em geral, uniforme sobre a superfície. Por isto utiliza-se um valor médio para a superfície (KREITH, 1998). A partir da equação 05, podem ser obtidas as unidades do coeficiente de película. No sistema prático métrico, tem-se:

$$h = \frac{\dot{q}}{A \cdot \Delta T} \quad \frac{Kcal / h}{m^2 \cdot ^\circ C} = \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \quad (\text{eq. 05})$$

Sendo a unidade no sistema internacional igual a: $[W/m^2 \cdot K]$.

A tabela 01 mostra, para diversos meios, ordens de grandeza do coeficiente de película em unidade do sistema prático métrico:

Tabela 02 – Ordens de grandeza do coeficiente de película (h).

Meio	W/m ² .K
Ar, convecção natural	5-25
Vapor, convecção forçada	25-250
Óleo, convecção forçada	50-1500
Água, convecção forçada	250-10000
Água convecção em ebulição	2500-50000
Vapor, em condensação	5000-100000

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 05)

3.6 CAMADA LIMITE

Quando um fluido escoar ao longo de uma superfície, seja o escoamento em regime laminar ou turbulento, as partículas na vizinhança da superfície são desaceleradas em virtude das forças viscosas (KREITH, 1998). A porção de fluido contida na região de variação substancial de velocidade, ilustrada na Figura 04, é denominada de camada limite hidrodinâmica.

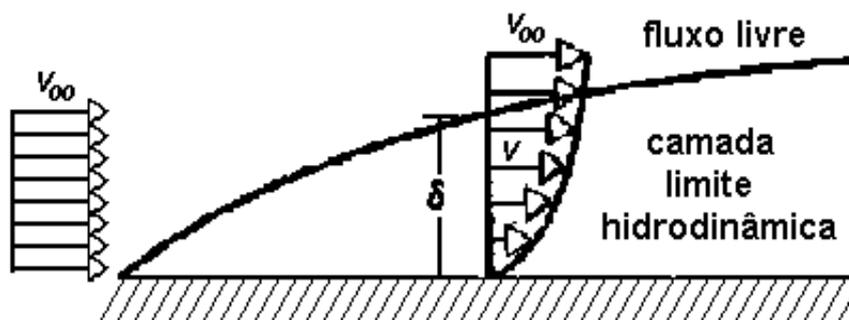


Figura 04 – Camada limite hidrodinâmica sobre uma chapa plana

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 144)

Considere-se agora o escoamento de um fluido ao longo de uma superfície quando existe uma diferença de temperatura entre o fluido e a superfície. Neste caso, O fluido contido na região de variação substancial de temperatura é chamado de camada limite térmica (INCROPERA; DEWITT, 1998). Por exemplo, analisa-se a transferência de calor para o caso de um fluido escoando sobre uma superfície aquecida, como mostra a figura 05.

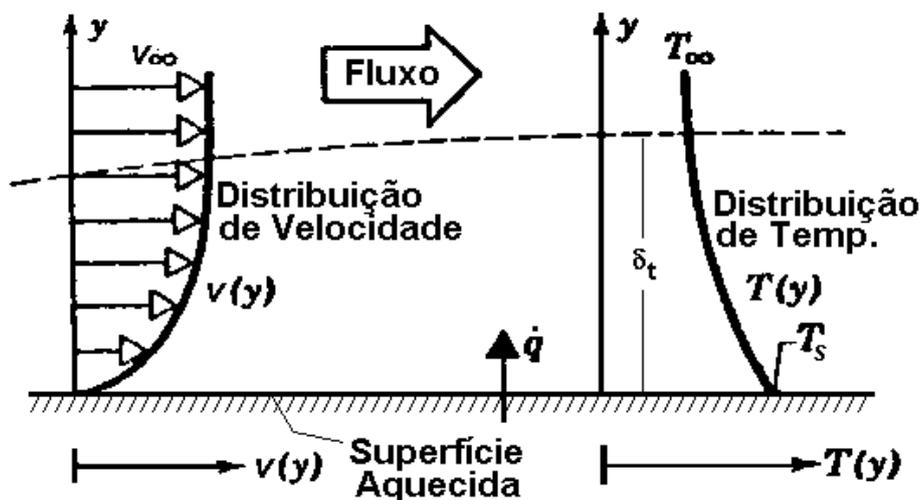


Figura 05 – Camada limite na transferência convectiva de calor.

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 04)

O mecanismo da convecção pode então ser entendido como a ação combinada de condução de calor na região de baixa velocidade onde existe um gradiente de temperatura e movimento de mistura na região de alta velocidade. Portanto:

- Região de baixa velocidade => a condução é mais importante;
- Região de alta velocidade => a mistura entre o fluido mais quente e o mais frio contribui substancialmente para a transferência de calor (WEINGARTNER, 2007).

3.7 RESISTÊNCIA TÉRMICA NA CONVECÇÃO

Como observado anteriormente, a expressão para o fluxo de transferência de calor por convecção é definida pela equação 04.

O fluxo de calor também é uma relação entre um potencial térmico e uma resistência:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (\text{eq. 06})$$

Igualando-se as duas equações 04 e 06 obtém-se a expressão para a resistência térmica na convecção:

$$R = \frac{1}{h \cdot A} \quad (\text{eq. 07})$$

3.8 MECANISMOS COMBINADOS - CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

Considere-se uma parede plana situada entre dois fluidos a diferentes temperaturas. Se as temperaturas T_1 e T_4 dos fluidos são constantes será estabelecido um fluxo de calor único e constante através da parede (regime permanente) conforme figura 06. Um exemplo desta situação é o fluxo de calor gerado pela combustão dentro de um forno, que transpassa a parede por condução e se dissipa no ar atmosférico.

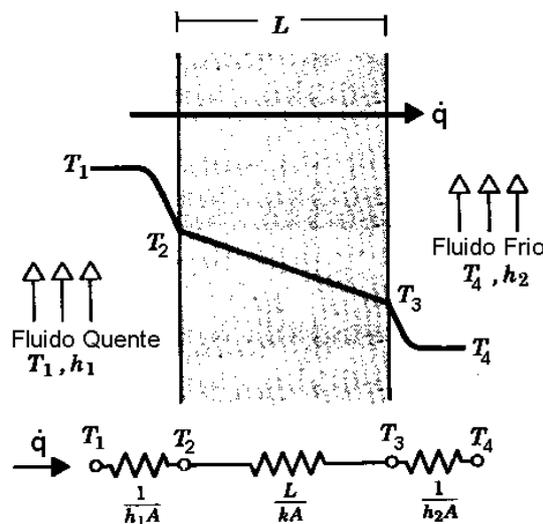


Figura 06 – Transferência de calor através de uma parede plana.

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 38)

O fluxo de calor transmitido pelo forno pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A}} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} \Rightarrow \dot{q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_t} \quad (\text{eq. 08})$$

Logo, quando ocorre a ação combinada dos mecanismos de condução e convecção, é válida uma analogia com a eletricidade, sendo que a resistência total é igual à soma das resistências que estão em série, não importando se por convecção ou condução.

3.9 PRINCÍPIOS DA RADIAÇÃO TÉRMICA

Radiação térmica é o processo pelo qual a energia é transferida de um corpo, sem o auxílio de um meio material, em virtude das oscilações dos elétrons que constituem a matéria, oscilações essas sustentadas pela energia interna, portanto pela temperatura da matéria. Associa-se a emissão de radiação térmica a excitação térmica no interior da matéria. Ao contrário dos outros dois mecanismos (condução e convecção) a radiação não necessita da existência de um meio interveniente (INCROPERA; DEWITT, 1998).

A radiação térmica ocorre perfeitamente no vácuo, não havendo, portanto, necessidade de um meio material para a colisão de partículas ou transferência de massa. Isto acontece porque a radiação térmica se propaga na forma de ondas eletromagnéticas. A radiação térmica é, portanto, um fenômeno ondulatório semelhante às ondas de rádio, radiações luminosas, raios-X, raios-g, etc., sendo diferente apenas no comprimento de onda (INCROPERA; DEWITT, 1998).

3.10 EFEITO COMBINADO CONDUÇÃO - CONVECÇÃO – RADIAÇÃO

Suponha-se uma parede plana qualquer submetida a uma diferença de temperatura. Na face interna a temperatura é T1 e na face externa tem-se uma temperatura T2 maior que a temperatura do ar ambiente T3, como mostra a figura 07.

Neste caso, através da parede ocorre uma transferência de energia por condução até a superfície externa. A superfície transfere energia por convecção para o ambiente. Porém, existe também uma parcela de transferência de energia por radiação da superfície para as vizinhanças. Portanto, a transferência global é a soma das parcelas:

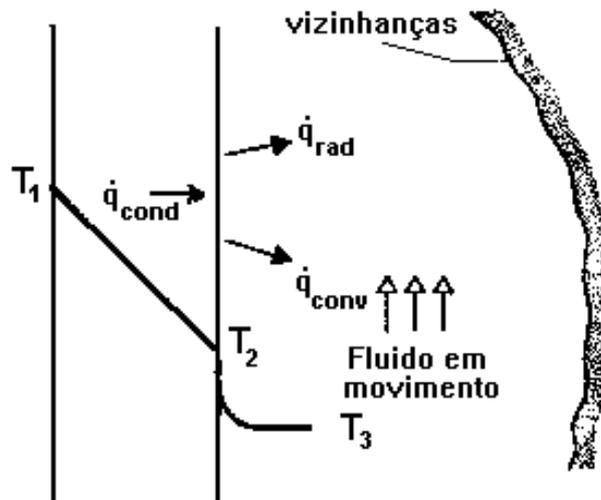


Figura 07 – Balanço de energia para se ter conservação de energia.

Fonte: (INCROPERA; DEWITT, 1992, p. 38)

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (\text{eq. 09})$$

4. INCÊNDIOS

4.1 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS

Prever o momento em que um incêndio irá ocorrer, bem como seu alcance após iniciado é difícil. Porém, através do conhecimento científico do comportamento do fogo, dos princípios da ignição e da combustibilidade dos materiais pode-se determinar métodos de controle e extinção dos mesmos da forma mais adequada (OLIVEIRA, 2005).

O fogo é o resultado de um processo químico de transformação, denominado reação de combustão, onde uma reação em cadeia transforma os materiais combustíveis e inflamáveis, na forma sólida ou líquida, em gases. A reação é normalmente ativada por uma fonte de calor. Desta forma, pode-se dizer que os elementos necessários para gerar um fogo são: o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. Os três primeiros elementos constituem o denominado triângulo do fogo. Quando adicionados ao quarto elemento formam o tetraedro do fogo. (LIMA, 2005).

Para que o fogo tenha início, é necessária a existência de um combustível que, ao atingir seu ponto de fulgor e combustão, gere gases inflamáveis, os quais, misturados com um comburente (oxigênio contido no ar) precisam apenas de uma fonte de calor (uma faísca elétrica, uma chama ou um super aquecimento) para inflamar e começar uma reação em cadeia. Os resultados da transformação química são a geração de luz e calor (KLEIN, 2001).

Para que o fogo seja extinto, é preciso retirar um dos três elementos que compõem o triângulo do fogo (material combustível, comburente e fonte de calor) ou extinguir a reação química. A retirada do material combustível consiste em evitar que o fogo seja alimentado e tenha um campo de propagação. A retirada do comburente pode ser atingida através do abafamento do material combustível, a fim de evitar que o oxigênio do ar, principal material comburente, atinja o combustível. A retirada da fonte de calor consiste na aplicação de um agente extintor, que irá resfriar o calor e

interromper a reação em cadeia. Já a extinção da reação química interrompe a reação em cadeia presente no fogo.

Conforme Oliveira (2005), na falta de qualquer um dos quatro elementos, a combustão não se produz.

4.2 DESENVOLVIMENTO DOS INCÊNDIOS

No princípio de um incêndio, os materiais combustíveis se aquecem e o calor ocasiona a sua ignição, dando início ao processo de combustão, com formação de chamas e início do período de alastramento do incêndio. Neste período, as chamas estão concentradas na superfície dos materiais combustíveis onde se iniciou a combustão. Em seguida, a intensidade das chamas aumenta e o calor se propaga para os demais materiais combustíveis presentes. Gases quentes da combustão e o contato com as chamas também proporcionam o alastramento do sinistro (LIMA, 2005).

Após as etapas iniciais de ignição e crescimento do fogo, dá-se a fase do desenvolvimento. Nessa fase ocorre um arrastamento (por convecção) de oxigênio para o interior do ambiente sinistrado. A taxa de combustão aumenta rapidamente e a temperatura se eleva significativamente, podendo chegar a 700°C. Nessas condições ocorre a inflamação generalizada, ou *flashover*, onde as chamas passam a envolver todo o ambiente.

O incêndio passa a ter um desenvolvimento completo quando todos os materiais presentes no ambiente são envolvidos pelo fogo. É nesse momento que ocorre a liberação máxima de calor pelos combustíveis que queimam no ambiente. Ocorrendo falta de ventilação as chamas normalmente deixam de existir por falta de ar para mantê-las (concentrações na faixa de 8% ou menos de oxigênio). O incêndio é então reduzido a brasas e o ambiente é tomado pela fumaça densa (OLIVEIRA, 2005).

Em ambientes típicos, a taxa de combustão é controlada pela natureza da superfície dos materiais combustíveis no período de alastramento do incêndio. Já no período de desenvolvimento, a taxa de combustão se torna dependente do nível de ventilação do ambiente, sendo o tamanho e a forma das aberturas fatores de grande importância (LIMA, 2005).

Consumidos os combustíveis existentes no ambiente, a liberação de calor diminui. Por falta de material combustível o incêndio converte-se num incêndio controlado, porém o calor irradiado pelos materiais outrora incendiados ainda pode ser considerável. Esta fase é denominada fase da diminuição e representa a decadência do fogo, seja por exaustão dos materiais combustíveis, pela carência de oxigênio ou ainda pela supressão do fogo pela atuação eficiente de uma equipe de bombeiros (OLIVEIRA, 2005).

4.3 EFEITOS DOS INCÊNDIOS NAS EDIFICAÇÕES

O risco de ocorrência de um incêndio numa edificação, assim como a sua intensidade e duração, está associado às atividades desenvolvidas no local, ao tipo e à quantidade de material combustível (denominado tecnicamente como carga de incêndio e que compreende mobiliários, equipamentos e acabamentos), à forma da edificação, às condições de ventilação do ambiente (que são influenciadas pela dimensão e posição das aberturas), às propriedades térmicas dos materiais constituintes das paredes e do teto e, finalmente, aos sistemas de segurança contra incêndio (VARGAS & SILVA, 2003).

Exemplificando, um edifício térreo com grande área de piso, sem compartimentação, apresenta uma maior probabilidade de ocorrência de incêndios de grandes proporções, do que um edifício com diversos andares, empregados para a mesma atividade. Isto acontece porque, no segundo caso, a área está subdividida em vários compartimentos que confinarão o incêndio e reduzirão a probabilidade de alastramento (LIMA, 2005).

A grande maioria dos incêndios relacionados à construção civil ocorre em edificações, e o risco de morte ou ferimentos graves pode ser associado ao tempo necessário para que níveis perigosos de fumaça ou gases tóxicos e temperatura sejam atingidos, comparados ao tempo de fuga dos ocupantes da área ameaçada. Ou seja, torna-se necessário limitar a propagação de fumaça e do fogo, pois os mesmos podem afetar a segurança das pessoas em áreas distantes do foco de incêndio, ou mesmo em edificações vizinhas (LIMA, 2005).

O emprego de materiais isolantes térmicos colabora para evitar a propagação do fogo para outros ambientes, mas pode tornar o incêndio mais severo no ambiente em chamas, ao concentrar o calor. A probabilidade de início e propagação de um incêndio é consideravelmente reduzida em locais com detectores de fumaça, chuveiros automáticos, brigada contra incêndio e compartimentação adequada. Em geral, admite-se que o risco de morte, em decorrência de um colapso estrutural ocasionado por um incêndio, é muito pequeno, se a edificação estiver bem dimensionada e for dotada de dispositivos apropriados de segurança e combate ao fogo, exigidos pelas normas e códigos (VARGAS & SILVA, 2003).

Os objetivos primordiais da segurança contra incêndio são minimizar o risco à vida humana e reduzir as perdas patrimoniais. O risco à vida compreende tanto a exposição dos usuários à fumaça ou aos gases quentes presentes no ambiente, como o desabamento de elementos construtivos sobre os usuários ou sobre a equipe de combate. Já a perda patrimonial simboliza a destruição parcial ou total da edificação, dos materiais armazenados, dos documentos, dos equipamentos e dos acabamentos do edifício sinistrado ou das edificações vizinhas (ABNT, 2000).

Em princípio deve-se, sempre que possível, garantir a segurança estrutural da estrutura sinistrada, visando tanto salvaguardar as vidas dos usuários quanto auxiliar na preservação patrimonial. Justifica-se, portanto, a adoção de todas as medidas cabíveis que evitem o colapso da edificação, permitindo assim a desocupação do ambiente em chamas e a execução de trabalhos de reforços para a sua reutilização. Cabe lembrar, entretanto, que segurança absoluta é um requisito impossível de ser atingido e que, em muitos casos, o nível de segurança é proporcional ao custo para obtê-la (SILVA, 2001).

Ao ser deflagrado um incêndio numa edificação, sua ação se faz sentir nos elementos constituintes do compartimento em chamas e nas zonas mais ou menos afastadas deste. Visto que no início de um incêndio a estrutura está sob ação do peso próprio e de cargas acidentais, um certo estado inicial de tensão e, portanto, um determinado estado de deformação encontra-se em equilíbrio. Em virtude do aquecimento diferenciado entre os elementos estruturais, um novo estado de tensão sobrepõe-se a este estado inicial, variável no tempo com o desenvolver das chamas, pois os elementos constituintes da edificação estão, de certa forma, interligados rigidamente. Quando alguns deles são mais aquecidos do que outros, as respectivas dilatações

térmicas acabam sendo restringidas e originam um novo estado de tensão (LIMA, 2005).

Além disso, a ação do fogo não se limita aos elementos diretamente expostos à chama, pois em determinadas situações, elementos relativamente afastados do compartimento em chamas poderão colapsar primeiro, em virtude do estado de tensão que as deformações de origem térmica da zona diretamente aquecida impuserem ao restante da estrutura (LIMA, 2005).

Nos edifícios de múltiplos andares, o colapso progressivo induzido por incêndio tem sido relacionado, principalmente:

- às falhas nos sistemas de segurança e materiais de proteção passiva;
- à severidade do incêndio, em itens tais como a taxa de aquecimento, extensão e duração;
- aos materiais estruturais em resistência, rigidez e ductilidade;
- ao carregamento aplicado à estrutura e
- às características estruturais tais como o arranjo do sistema estrutural e sua capacidade de redistribuição de esforços (ILIESCU, 2007).

A segurança contra incêndios é obtida pela integração dos sistemas de proteção ativa e passiva.

A proteção ativa contra incêndio é constituída por meios, equipamentos e sistemas, que precisam ser acionados, quer manual ou automaticamente, para funcionar em situação de incêndio. Ela visa a rápida detecção do incêndio, o alerta dos usuários do edifício para desocupação e às ações de combate com segurança.

Como exemplos de proteção ativa podemos citar os sistemas de alarme manual de incêndio, meios de detecção e alarme automáticos de incêndio (detectores de fumaça e temperatura, raios infravermelhos ligados a alarmes automáticos); extintores, hidrantes, chuveiros automáticos (sprinklers), sistema de iluminação de emergência e sistema de controle e exaustão da fumaça (ILIESCU, 2007).

A proteção passiva contra incêndio é constituída por meios de proteção incorporados à construção da edificação, os quais não requerem nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em situação de incêndio.

Como exemplos podemos citar a acessibilidade ao lote (afastamentos) e ao edifício (janelas e outras aberturas), rotas de fuga (corredores, passagens e escadas),

adequado dimensionamento dos elementos estruturais para a situação de incêndio, compartimentação, definição de materiais de acabamento e revestimento adequados.

O papel da compartimentação como medida passiva pode ser definido sob diversas óticas por estar relacionado a diversos fatores, tais como: medidas urbanísticas (distância mínima de separação entre edificações), medidas arquitetônicas (dimensões e formas de espaços fechados, terraços e sacadas), função dos espaços compartimentados (áreas permanentes ou transitórias) e projeto estrutural em situação de incêndio (ILIESCU, 2007).

A seleção de um sistema adequado de segurança contra incêndio deve considerar os riscos de início do incêndio, de sua propagação e de suas conseqüências. Por razões econômicas, não basta identificar o possível dano à propriedade, mas também a extensão do dano que pode ser considerada tolerável. Dificilmente a segurança absoluta será alcançada, mas deve-se buscar um nível de segurança satisfatório (VARGAS & SILVA, 2003).

5. CONCRETO

5.1 HISTÓRICO DO EMPREGO DO CONCRETO

A arquitetura monumental de civilizações antigas do Egito e Roma já usavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado, que, de certa forma, constituem as primeiras utilizações de cimento. Grandes obras como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de terras de origem vulcânica, com propriedades de endurecimento sob a ação da água. No entanto, neste trabalho trataremos apenas de alguns fatos históricos mais recentes, cuja autoria pode ser especificada e onde o processo de obtenção do produto do estudo desses estudiosos pode ser apresentado.

Em 1755 John Smeaton foi escolhido para dirigir a reconstrução de um farol sobre uma rocha imersa no mar, num ambiente bastante agressivo. Ciente deste fato, Smeaton sabia que a escolha da argamassa a ser utilizada seria decisiva para o sucesso da construção e para a durabilidade do farol. Por isso, ele empreendeu uma série de experimentos de modo a obter uma cal que possuísse propriedades hidráulicas (endurecesse e resistisse sob a água) e que também fosse econômica (KAEFER, 1998).

Smeaton iniciou uma série de experimentos para determinar o cimento que poderia ser utilizado, chegando a várias conclusões. Primeiro ele descobriu que o uso de cal produzida a partir de "uma queima imperfeita" do calcário era inútil, ou seja, de que a cal comum não resistia sob a água. Segundo, ele descobriu que a dureza da rocha a partir da qual a cal era produzida não influía na dureza da argamassa produzida a partir de testes com uma grande variedade de rochas calcárias que poderiam fornecer matéria-prima para a produção de cal. Dentre as substâncias que provaram ser mais eficientes cita-se a pozolana.

Uma grande quantidade de pozolana havia sido importada da Itália por um mercador que a comercializou para a construção do farol. Em suas experiências Smeaton descobriu que o cimento hidráulico dependia de uma considerável quantidade

de argila existente na rocha calcária (e que, portanto, era queimada junto com a cal), embora argila adicionada posteriormente à cal não resultasse em qualidades hidráulicas. Sem conhecimento algum da complexa química dos cimentos, Smeaton havia determinado as características fundamentais do cimento hidráulico natural a partir de um dos primeiros estudos exaustivos de um material de construção.

O tempo mostrou que as investigações de Smeaton resultaram em um aglomerante de excelente qualidade, pois sua versão do farol durou mais de um século.

Desde os experimentos de Smeaton pouco havia sido feito para o desenvolvimento de uma teoria que explicasse o comportamento e as propriedades físicas do cimento até que o francês Louis Joseph Vicat (em 1818) publica seus estudos e conclusões sobre seus ensaios realizados sobre cimentos. Nesta época ele estava dirigindo a construção de uma ponte sobre o Rio *Dordogne*, o primeiro grande projeto em que as fundações de concreto foram feitas sem o uso de pozolana, o que o levou a investigar as propriedades do cimento (KAEFER, 1998).

Vicat investigou os fatores que poderiam resultar em uma argamassa capaz de endurecer abaixo da água. Misturando cal, gesso e argilas de diferentes tipos e em diferentes proporções, Vicat preparou pequenos blocos dos materiais testados. De maneira bastante simples, ele concluiu que "não há argamassa hidráulica perfeita sem sílica e que toda cal que pode ser denominada hidráulica contém certa quantidade de argila. Onde Smeaton procurou pelo mais vantajoso material natural para a produção de cimento hidráulico, a conclusão de Vicat implicava que a chave estava no planejamento das misturas, que poderiam resultar em tipos de cimento muito mais resistentes que os naturalmente encontrados (KAEFER, 1998).

Vicat desenvolveu um método que é utilizado até hoje para determinar o tempo de pega e de endurecimento do cimento, baseado na penetração de uma agulha numa amostra de pasta de cimento fresco.

Já em 1824, na Inglaterra, Joseph Aspdin inventa o cimento Portland, queimando calcário e argila finamente moídos e misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico (CO₂) fosse retirado. O material obtido era então moído. Aspdin denominou este cimento como cimento Portland em menção às jazidas de excelente pedra para construção existentes em Portland, Inglaterra.

A definição moderna de cimento Portland não poderia ser aplicável ao produto que Aspdin patenteou. O cimento Portland hoje em dia é "feito a partir da queima a altas

temperaturas, até a fusão incipiente do material, de uma mistura definida de rocha calcária e argila, finamente moídas, resultando no clínquer”. É duvidoso que o cimento produzido sob a patente de Aspdin de 1824 tenha sido queimado a uma temperatura suficiente para produzir clínquer, e, além disso, sua patente não define as proporções dos ingredientes empregados. Desta forma, Aspdin não produziu cimento Portland como conhecemos atualmente (KAEFER, 1998).

Na década de 1830, com um desenvolvimento incipiente do uso do concreto, principalmente em fundações, estabeleceu-se o termo “concreto” para uma massa sólida em que cimento, areia, água e pedras são combinadas.

O concreto evoluiu muito desde o tempo de Roma. A engenharia usa o concreto atualmente em campos muito diversos, em muitos casos sob ambientes extremamente agressivos. Para se adaptar aos novos e desafiadores usos o homem criou uma infinidade de tipos de concretos, utilizando uma enorme gama de cimentos, agregados, adições, aditivos e formas de aplicação. Encontramos o concreto na fundação de plataformas petrolíferas dos oceanos ou enterrado a centenas de metros abaixo da terra em fundações, túneis e minas, e a 452m acima do solo em arranha-céus (KAEFER, 1998).

O grande desafio da tecnologia de concreto atualmente parece ser aumentar a durabilidade das estruturas, recuperar estruturas danificadas e entender o complexo mecanismo químico e mecânico dos cimentos e concretos. Para isto, uma nova geração de concretos está sendo desenvolvida, métodos tradicionais de execução e cálculo do concreto estão sendo revistos.

5.2 DEFINIÇÕES

Concreto é, basicamente, o resultado da mistura de cimento, água, pedra e areia, sendo que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente aos fragmentos de agregados (pedra e areia), formando um bloco monolítico.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto é um material de estrutura heterogênea e complexa, o que dificulta o estabelecimento de modelos exatos que permitam estimar com segurança seu comportamento em diferentes situações. No entanto, segundo os mesmos autores, pode-se ter uma boa noção do comportamento

esperado através da análise das características da estrutura de um concreto em particular e das propriedades dos seus materiais constituintes.

Ou ainda segundo Almeida (2002), o concreto é um material de construção resultante da mistura, em quantidades racionais, de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água.

Logo após a mistura o concreto deve possuir plasticidade suficiente para as operações de manuseio, transporte e lançamento em formas, adquirindo coesão e resistência com o passar do tempo, devido às reações que se processam entre aglomerante e água. Em alguns casos são adicionados aditivos que modificam suas características físicas e químicas (ALMEIDA, 2002).

Denomina-se de pasta a mistura do cimento com a água, e de argamassa a mistura da pasta com agregado miúdo. Considera-se concreto a argamassa à qual foi adicionado agregado graúdo.

A proporção entre todos os materiais que fazem parte do concreto é também conhecida por dosagem ou traço, sendo que podemos obter concretos com características especiais ao acrescentarmos aditivos, isopor, pigmentos, fibras ou outros tipos de adições à mistura.

Outro ponto de destaque no preparo do concreto é o cuidado que se deve ter com a qualidade e a quantidade da água utilizada, pois ela é a responsável por ativar a reação química que transforma o cimento em uma pasta aglomerante. Se sua quantidade for muito pequena, a reação não ocorrerá por completo e se for superior a ideal, a resistência diminuirá em função dos poros que ocorrerão quando este excesso evaporar.

A relação entre o peso da água e do cimento utilizados na dosagem é chamada de fator água/cimento (a/c).

O concreto deve ter uma boa distribuição granulométrica a fim de preencher todos os vazios, pois a porosidade por sua vez tem influência na permeabilidade e na resistência das estruturas de concreto.

Para obter as características essenciais do concreto, como a facilidade de manuseio quando fresco, boa resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade quando endurecido, é preciso conhecer os fatores que influenciam sua qualidade:

- Qualidade dos materiais (materiais de boa qualidade produzem concreto de boa qualidade);

- Proporções adequadas (deve-se considerar a relação entre as quantidades: de cimento e de agregados, de agregados graúdo e miúdo e água);
- Manipulação adequada (após a mistura, o concreto deve ser transportado, lançado nas formas e adensado corretamente).
- Cura cuidadosa (a hidratação do cimento continua por um tempo bastante longo e é preciso que as condições ambientes favoreçam as reações que se processam). Desse modo, deve-se evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento. É o que se denomina cura do concreto (ALMEIDA, 2002).

5.2.1 Agregados

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rocha (PETRUCCI, 1987).

Os agregados desempenham importante papel nas argamassas e concretos e exercem influência benéfica sobre a retração e o aumento da resistência ao desgaste, sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois os agregados de boa qualidade têm resistência mecânica superior à da pasta de aglomerante (PETRUCCI, 1987).

Como agregados podem ser utilizados materiais naturais (encontrados na natureza já sob a forma de agregados – areias, pedregulhos, seixos) e artificiais (necessitam de um trabalho de aperfeiçoamento pela ação humana para chegar à situação de uso como agregado), que apresentem resistência suficiente e que não afetem o endurecimento do concreto. Os agregados devem por isso ser isentos de impurezas (terra, argila, húmus) e de componentes prejudiciais (no máximo 0,02% de cloretos e 1% de sulfatos). O açúcar é especialmente perigoso, porque impede a pega do cimento (ALMEIDA, 2002).

A forma dos grãos e a conformação superficial influenciam muito a trabalhabilidade e as propriedades de aderência do concreto: agregados redondos e lisos facilitam a mistura e o adensamento do concreto; agregados com superfícies ásperas aumentam a resistência à tração (ALMEIDA, 2002)

Utilizam-se predominantemente agregados naturais: areia e cascalho de rio, pedra ou cascalho britado e areia de britagem, obtidos de pedreiras. Estes agregados dão origem ao concreto normal. Como agregados artificiais citam-se a escória de alto-forno para concreto leve e normal; argila expandida ou sintetizada para concreto leve.

A classificação mais importante dos agregados em virtude do comportamento bastante diferenciado de ambos os tipos quando aplicados nos concretos, é a sua divisão, segundo seu tamanho, em agregados graúdos e agregados miúdos (PETRUCCI, 1987).

Os agregados graúdos podem ser entendidos como pedregulho (cascalho ou seixo rolado) ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT n°4 (4,8 mm), conforme NBR 7211.

Agregado miúdo é a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT n°4 (4,8 mm) e ficam retidos na peneira ABNT n°200 (0,075 mm) (NBR 7211).

5.2.2 Cimento

O cimento é obtido aquecendo-se calcário e argila até a sintetização (clinker de cimento). Depois se mói a mistura até obter-se um produto de textura fina. Os cimentos como aglomerantes hidráulicos determinam as características do concreto (ALMEIDA, 2002).

Pode ser definido, segundo Petrucci (1987), como um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica.

5.2.3 Água de amassamento

Quase todas as águas naturais são apropriadas para amassamento. É necessário precaução quanto às águas de pântano e as de rejeito industrial. A água do mar é inadequada para estruturas de concreto armado e protendido devido à corrosão provocada pelo teor de sal. A água usada no amassamento de concreto não deve conter impurezas que possam vir a prejudicar as reações entre ela e os compostos do cimento (PETRUCCI, 1987).

Normalmente admite-se como sendo possível utilizar águas com as quais os concretos com elas executados atinjam nos ensaios uma resistência igual ou superior a 90% da resistência obtida com uma água de reconhecida boa qualidade e sem impurezas, na idade de 28 dias (PETRUCCI, 1987).

Em geral, águas que contêm menos de 2000 partes por milhão de sólidos dissolvidos podem ser usadas sem precauções na confecção de concretos. Concentrações maiores nem sempre são perigosas, afetando de maneira diversa cimentos diferentes (PETRUCCI, 1987).

5.2.4 Aditivos

Entende-se por aditivos as substâncias adicionadas intencionalmente ao concreto visando reforçar ou melhorar suas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização (PETRUCCI, 1987).

Podem-se considerar como aditivos a incorporação de menos de 5% do peso de cimento, denominando-se adições àqueles produtos acrescentados ao concreto em quantidades maiores que 5%.

Os principais tipos de aditivos são: plastificantes, incorporadores de ar, retardadores de pega, aceleradores de pega, aceleradores de endurecimento, colorantes e impermeabilizantes.

Muito utilizados atualmente, principalmente na composição de concreto estrutural, os aditivos plastificantes já são considerados por muitos autores como um de seus ingredientes básicos além do cimento, dos agregados e da água. Esses aditivos são indicados em todas as situações em que se deseja obter um concreto de melhor qualidade, maior durabilidade, e onde atmosferas agressivas, tais como a presença de cloretos, exijam um concreto de menor porosidade. Por isso são muito utilizados

também nos serviços de recuperação e reforço estrutural, sobretudo por conferir maior plasticidade, resistência e impermeabilidade aos grautes e micro-concretos.

5.2.5 Cura do concreto

Segundo Petrucci (1987), cura pode ser definida como o conjunto de medidas com a finalidade de evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento, que rege a pega e seu endurecimento. E continua, dizendo que as condições de umidade e temperatura, principalmente nas primeiras idades, têm importância muito grande nas propriedades do concreto endurecido.

A evaporação prematura da água pode provocar fissuras na superfície do concreto e, ainda, reduzir em até 30% sua resistência.

Pode-se então afirmar que quanto mais perfeita e demorada for a cura do concreto tanto melhores serão suas características finais. Seguem abaixo os métodos mais recomendados para a cura do concreto:

- molhar continuamente a superfície do concreto, logo após o endurecimento, durante os sete primeiros dias;
- manter uma lâmina d'água sobre a peça concretada, sendo este método limitado a lajes, pisos ou pavimentos;
- manter a peça umedecida por meio de uma camada de areia úmida, serragem, sacos de aniagem ou tecido de algodão;
- utilizar membranas de cura, que são produtos químicos aplicados na superfície do concreto que evitam a evaporação precoce da água;
- deixar o concreto nas fôrmas, mantendo-as molhadas.

5.3 TIPOS DE CONCRETO

Há um número considerável de tipos de concreto, cada qual produzido segundo finalidades e condições específicas (condições financeiras, exigência e finalidade da obra, disponibilidade de materiais, características regionais, etc.). Assim, podem-se listar os concretos mais fornecidos pelas centrais de concreto atualmente:

a) Concreto convencional - Utilizado na maioria das obras civis. Deve ser lançado nas fôrmas por método convencional (carrinhos de mão, gericas, guas, etc.). O concreto convencional é de consistência seca e varia de 5,0 em 5,0 MPa, partindo do 10,0 até 40,0MPa. É aplicado em obras civis, industriais e em peças pré-moldadas. As vantagens são o aumento da durabilidade e qualidade final da obra, redução dos custos e redução no tempo de execução.

b) Concreto de alto desempenho (CAD) - Normalmente elaborado com adições minerais como sílica ativa e metacaulim e aditivos superplastificantes. O concreto assim obtido possui excelentes propriedades. É aplicado em obras civis especiais, hidráulicas em geral e em recuperações. Tem como vantagens o aumento da durabilidade e vida útil das obras, redução dos custos e melhor aproveitamento das áreas disponíveis para construção.

c) Concreto bombeável - Utilizado na maioria das obras civis, sua dosagem é apropriada para utilização em bombas de concreto, evitando segregação e perdas de material. Sua resistência varia de 5,0 em 5,0MPa, partindo do 10,0 até 40,0MPa. É aplicado em obras civis em geral, obras industriais e peças pré-moldadas. As vantagens são: aumento da durabilidade e qualidade final da obra, redução dos custos da obra e redução no tempo de execução.

d) Concreto de alta resistência inicial - aquele que tem a característica de atingir grande resistência, com pouca idade, podendo dar mais velocidade à obra ou ser utilizado para atender situações emergenciais. Sua aplicação pode ser necessária em indústrias de pré-moldados, em estruturas convencionais ou protendidas, na fabricação de tubos e artefatos de concreto, entre outras. Tem como principais vantagens o aumento na velocidade das obras, redução dos custos com funcionários e equipamentos e diversos outros ganhos de produtividade.

e) Concreto de pavimento rígido - O principal requisito exigido para esse concreto é a resistência à tração na flexão e ao desgaste superficial. Trata-se de um concreto de fácil lançamento e execução. É aplicado em estradas e vias urbanas. As vantagens de seu emprego são: maior durabilidade, redução dos custos de manutenção e maior luminosidade.

f) Concreto pesado - A característica principal desse tipo de concreto é a sua alta densidade que varia entre 2800 e 4500 kg/m³, obtida com a utilização de agregados especiais, normalmente a hematita. É aplicado como contra peso em gasodutos, hospitais e usinas nucleares. Pode ser citada a vantagem de ser isolante radioativo.

g) Concreto projetado - Concreto que é lançado por equipamentos especiais e em alta velocidade sobre uma superfície, proporcionando a compactação e a aderência do mesmo a esta superfície. São utilizados para revestimentos de túneis, paredes, pilares, contenção de encostas, etc. Uma de suas vantagens é a sua grande versatilidade.

h) Concreto leve - A densidade desse concreto varia de 400 a 1800 kg/m³. Os tipos mais comuns são o concreto celular espumoso, concreto com isopor e concreto com argila expandida. É aplicado em enchimento e regularização de lajes, pisos e elementos de vedação. As vantagens são a redução de peso próprio e isolante termo-acústico.

i) Concreto rolado - É utilizado em pavimentações urbanas, como sub-base de pavimentos e barragens de grande porte. Seu acabamento não é tão bom quanto os concretos utilizados em pisos industriais ou na pavimentação de pistas de aeroportos e rodovias, por isso ele é mais utilizado como sub-base. Seu baixo consumo de cimento e sua baixa trabalhabilidade permitem a compactação através de rolos compressores e tem grande durabilidade.

j) Concreto colorido – Trata-se de um concreto normal adicionado de pigmentos especiais, os quais conferem ao concreto várias cores com diferentes tonalidades, a saber: amarela, azul, vermelha, verde, marrom e preta. É aplicado em pisos, calçadas e fachadas. Tem como vantagens a dispensa de pintura específica e o fato de poder ser usado como marcador de áreas específicas.

k) Concreto resfriado com gelo – Constitui-se de um concreto cuja quantidade de água é parcialmente substituída por gelo para atender a condições específicas de projeto, por exemplo, a retração térmica. É aplicado em paredes espessas e grandes blocos de fundação. A vantagem é a redução da fissuração de origem térmica.

l) Concreto auto-adensável - É o concreto do futuro. Trata-se de um concreto de elevada plasticidade. Em alguns casos, pode ter a sua reologia controlada com a utilização de aditivos de última geração. É aplicado em fundações especiais tipo hélice contínua e paredes diafragma; peças delgadas e peças densamente armadas. As

vantagens são: maior durabilidade e fácil aplicação, dispensa do uso total ou parcial de vibradores, redução dos custos com mão de obra e energia e maior produtividade no lançamento.

m) Concreto com adição de fibras - Normalmente elaborado com fibras de nylon, polipropileno e aço, dependendo das condições de projeto. Os concretos assim obtidos inibem os efeitos da fissuração por retração. Muito utilizado em obras civis especiais e pisos industriais. Tem como vantagens o aumento da durabilidade das obras quanto à abrasão e desgaste superficial; melhora a resistência à tração do concreto e pode ser utilizado em pistas de aeroportos.

n) Concreto impermeável - Trata-se de um concreto com a relação água-cimento limitada, normalmente menor ou igual a 0,55; e dosado com um cimento apropriado, tipo Portland, de alto-forno ou pozolânico. É aplicado em obras hidráulicas em geral, estações de tratamento d'água e esgoto e barragens. As vantagens são o aumento da durabilidade da obra e redução dos custos de manutenção.

o) Concreto sem finos - A característica principal desse tipo de concreto é a sua elevada porosidade. A densidade desse concreto varia de acordo com o agregado utilizado (brita, seixo ou argila expandida). É aplicado em drenagens e enchimentos. Possui a vantagem de ter baixa densidade (PORTAL DO CONCRETO, 2006).

5.4 AÇÃO DO CALOR NO CONCRETO

Quando um elemento de concreto é submetido a altas temperaturas sofre modificações importantes e esses efeitos podem levar ao colapso estrutural. As alterações físico-químicas no concreto superaquecido promovem a degeneração progressiva do material das peças estruturais e os carregamentos aplicados aceleram a desagregação. A ação térmica devida ao incêndio aumenta a temperatura dos elementos estruturais, causando alterações na estrutura do concreto. Conseqüentemente, há redução de resistência e rigidez e o aparecimento de esforços adicionais devido às deformações térmicas.

A água livre ou capilar do concreto começa a evaporar a partir dos 100°C. Entre 200°C e 300°C, a perda de água capilar é completa, sem que se observem alterações na estrutura do cimento hidratado e sem redução considerável na resistência. De 300°C a 400°C produz-se a perda de água de gel do cimento, ocorrendo uma sensível diminuição das resistências e aparecendo as primeiras fissuras superficiais no concreto. Aos 400°C, uma parte do hidróxido de cálcio procedente da hidratação dos silicatos se transforma em cal viva. Até os 600°C, os agregados (que não têm todos os mesmos coeficientes de dilatação térmica) se expandem com diferentes intensidades, provocando tensões internas que começam a desagregar o concreto (CÂNOVAS, 1988).

O concreto no processo de elevação de temperatura vai perdendo resistência e mudando sua coloração. Assim, a 200°C o concreto é cinza e não há perda de resistência apreciável. A 300°C a perda de resistência varia em torno de 10%, decrescendo progressivamente a partir desta temperatura. De 300°C a 600°C a cor muda para rosa a vermelha, a resistência à compressão cai para aproximadamente 50% do valor original, o módulo de deformação reduz em até 20% e a resistência à tração chega a ter um valor praticamente desprezível (SOUZA, 2003). Entre 600°C e 950°C a cor passa para cinza com pontos vermelhos, com resistência à compressão muito pequena. De 950°C a 1000°C a cor muda para amarela alaranjada e o concreto começa a sinterizar-se e a partir de 1000°C o concreto sofre a sinterização, virando um material calcinado, mole e sem resistência (AGUIAR, 2006).

A figura 08 apresenta de forma sistematizada as alterações colorimétricas e variação de resistência a compressão sofridas pelo concreto à medida que o mesmo é submetido a diferentes patamares de temperatura e correlaciona as mesmas com a resistência mecânica do material.

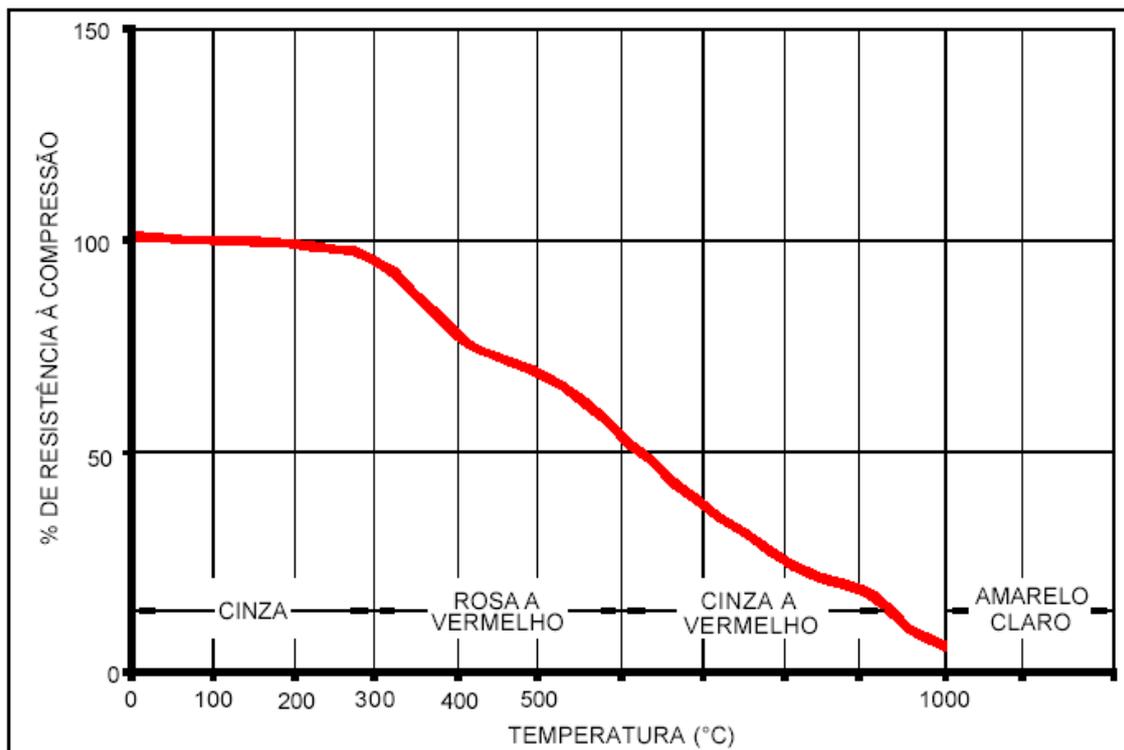


Figura 08 – Alteração na resistência e coloração do concreto

Fonte: Cânovas, 1988.

A porosidade e a mineralogia dos agregados influenciam o comportamento do concreto exposto às altas temperaturas, assim como concretos com boa granulometria comportam-se melhor frente ao calor (LIMA, 2003).

A alteração na cor ocorre devido à presença de componentes ferrosos e pode ser utilizada como um parâmetro que indica a máxima temperatura atingida e a duração do fogo. Deve-se, todavia, adotar alguma cautela nesta análise, pois a extensão das alterações colorimétricas dependerá também do tipo de agregado utilizado. Os efeitos descritos tenderão a ser mais acentuados para agregados ricos em sílica, e menos acentuados para agregados calcários. Portanto, concretos sujeitos a incêndio, que não apresentem coloração rosácea, não podem ser considerados como intactos. A aparência dos mesmos indica apenas, com certeza, que a quantidade de materiais ferrosos no concreto é reduzida (LIMA, 2005).

Enfim, ainda segundo Lima (2005), o concreto terá seu comportamento melhorado frente ao calor quando os agregados possuírem baixo coeficiente de dilatação térmica e boa granulometria; e o concreto for bem compactado, possuir baixa condutividade térmica, baixa umidade e alta resistência à tração. A utilização de

agregados leves ou calcários também favorece o bom desempenho frente a altas temperaturas.

5.5 EFEITO DA ÁGUA E O *SPALLING*

A água afeta as propriedades térmicas e mecânicas do concreto durante o aquecimento, tanto em condições de superfície impermeáveis quanto permeáveis. Em condições impermeáveis, a água atua favorecendo as reações de hidratação, abaixo de 100°C, e as reações higrotérmicas, em elevadas temperaturas. Em condições permeáveis, a perda da água evaporável influencia a retração, a perda de resistência, a condutividade e as expansões térmicas. A perda da água quimicamente combinada, que ocorre acima de 100°C, influencia praticamente todas as propriedades do concreto (LIMA, 2005).

Partindo-se da hipótese que ocorre um acréscimo de pressão no interior dos poros, parte da água poderá condensar em altas temperaturas, devido à influência da pressão na tensão de superfície dos líquidos. Uma vez que a temperatura atinja 100°C, a pressão de vapor no interior dos poros aumentará, fazendo com que a água no estado líquido ou gasoso se movimente de regiões com alta concentração para regiões com baixa concentração (LIMA, 2005).

Sob o prisma de proteção ao fogo, a presença da água é positiva, pois a temperatura do concreto não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido removida, fenômeno este que necessita de um considerável calor de vaporização para a conversão de água em vapor (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O problema, porém, é que, quando há um acréscimo na temperatura, a água presente nos poros tende a evaporar e gera um aumento na pressão de vapor dentro dos poros. A pressão nos poros que se desenvolve com a expansão da água, devido à mudança da fase líquida para gasosa, contribui para a ocorrência de deslocamentos explosivos, fenômeno conhecido como *spalling*.

Um aspecto interessante diz respeito ao fato de que, em temperaturas próximas a 100°C, pode ocorrer um decréscimo na permeabilidade, fenômeno ainda não muito bem entendido e que está sendo associado a uma queda leve na resistência à compressão. Uma possível causa para este comportamento seria a condensação de água, devido ao

acrécimo de pressão, pois concretos úmidos apresentam resistências mais baixas. (LIMA, 2005).

As tensões de deslocamento geradas vão depender da quantidade total de água presente na pasta. A água liberada pela desidratação da fase cimentícia e dos agregados incrementa a umidade inicialmente contida nos poros. Até a água quimicamente combinada pode vir a contribuir para o fenômeno. Deve ser considerada também, na quantidade total de água capaz de se transformar em vapor e gerar poro-pressão, a água contida nos agregados e os gases liberados pela decomposição de fibras presentes no concreto (LIMA, 2005).

5.6 EFEITOS DA TEMPERATURA NOS AGREGADOS

Os agregados não são normalmente considerados elementos chaves para garantir a estabilidade térmica do concreto. No entanto, eles ocupam de 60 a 80% do volume do material, e a variação de suas propriedades durante o aquecimento pode influenciar significativamente o coeficiente de dilatação térmica, a condutividade térmica e as demais propriedades do concreto (LIMA, 2005).

Os agregados contêm poros em vários tamanhos. Estes são geralmente grandes, inertes e descontínuos, e a água presente nos mesmos pode contribuir para o calor latente e para os deslocamentos explosivos, além de influenciar as propriedades térmicas, como já foi discutido. Durante o aquecimento, as partículas de agregado começam a expandir e gerar tensões diferenciais no interior do concreto, que podem levar ao aparecimento de microfissuras na pasta e, eventualmente, à desintegração do material (CHANA & PRICE, 2003).

Ademais, os diferentes agregados presentes no concreto não apresentam o mesmo coeficiente de dilatação térmica, levando ao aparecimento de expansões internas de diferentes intensidades. Muitas vezes o efeito destas expansões é incrementado por transformações estruturais ocorridas na estrutura interna de certos agregados (LIMA, 2005)

Desta forma, a escolha do agregado pode ser considerada como um fator crítico para o bom desempenho frente a altas temperaturas.

Entretanto não existe na literatura pesquisada estudo realizado focando o efeito da técnica de combate a incêndios sobre as propriedades da estrutura de concreto. É consenso porém, que há uma redução da resistência em função da temperatura.

5.7 NORMAS PARA ENSAIOS E CONFECÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para este trabalho foram usadas como referência duas principais normas: NBR 5738 da ABNT – 1993 (Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto) e NBR 5739 da ABNT – 1994 (Concreto: ensaio de compressão de corpos cilíndricos).

5.7.1 Moldagem e cura do corpo de prova

Segundo a norma que abrange a moldagem e cura dos corpos de prova (NBR 5738, acima citada), os moldes devem ser confeccionados em aço ou outro material não absorvente e quimicamente inerte com os componentes constituintes do concreto. O molde não deve sofrer deformações durante a moldagem dos corpos-de-prova e necessita ter as superfícies internas lisas e sem defeitos.

Os corpos-de-prova devem ser moldados em local próximo àquele em que serão armazenados nas primeiras 24 h e devem ter diâmetro igual a d e altura igual a $2d$.

Após a moldagem, os corpos-de-prova devem ser imediatamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto e protegê-lo da ação das intempéries.

O transporte dos corpos de prova deve ser feito com o máximo de cuidado, a fim de evitar choques mecânicos que possam vir a causar influências nos testes.

A cura final deve ocorrer em ambientes preferencialmente úmidos com no mínimo 95% da umidade relativa do ar, atingindo toda a superfície livre do corpo de prova.

5.7.2 Procedimentos para ensaio à compressão

Na NBR 5739 citada acima se encontram (dentre outras) as especificações que seguem acerca do processo de ensaio de corpos de prova de concreto.

A máquina de ensaio a compressão deve possuir estrutura de aplicação da carga com capacidade compatível com os ensaios a serem realizados, permitindo a aplicação controlada de carga sobre o corpo de prova colocado entre os pratos de compressão. O prato que se desloca deve ter movimento na direção vertical, mantendo paralelismo com o eixo vertical da máquina. O corpo-de-prova cilíndrico deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro.

O acionamento deve ser através de qualquer fonte estável de energia, de modo a propiciar uma aplicação de carga contínua e isenta de choques; ou manual, com leve intermitência na aplicação da carga. A máquina deve permitir ainda o ajuste da distância entre os pratos de compressão antes do ensaio com deslocamentos que superem a altura do corpo-de-prova em, no mínimo, 5mm.

Até o dia do ensaio os corpos de prova deverão seguir o processo de cura estabelecido pela NBR 5738.

A carga de ensaio deve ser aplicada continuamente e sem choques. Nenhum ajuste deve ser efetuado nos controles da máquina quando o corpo-de-prova estiver se deformando rapidamente ao se aproximar de sua ruptura.

Em se tratando de máquinas providas de indicação de carga analógica, o carregamento só deve cessar quando o recuo do ponteiro de carga estiver em torno de 10% do valor da carga máxima alcançada, que deve ser anotada como carga de ruptura do corpo-de-prova.

A resistência à compressão deve ser obtida dividindo-se a carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, devendo o resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa.

Os resultados do ensaio de corpos de prova moldados segundo a NBR 5738 devem conter as seguintes informações: número de identificação do corpo de prova, idade (definida pelo tempo compreendido entre a moldagem e o ensaio), resistência à compressão e tipo de ruptura do corpo-de-prova (figura 09).

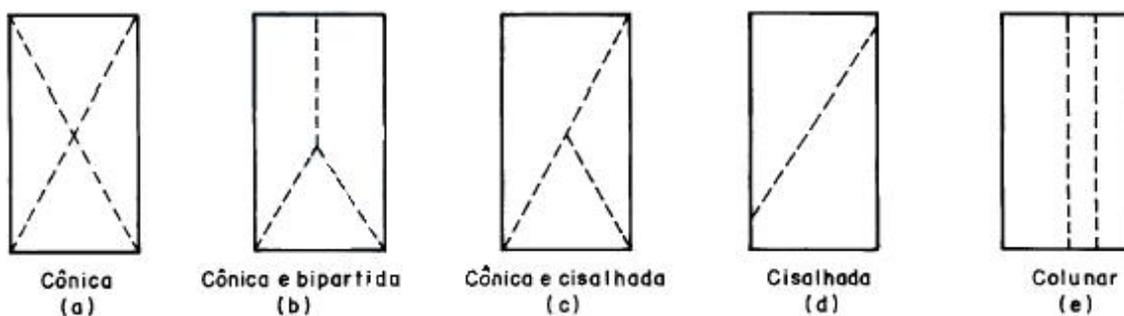


Figura 09 – Tipos de ruptura dos corpos de prova submetidos à compressão.

Fonte: NBR 5739 – ABNT.

6. EXPERIÊNCIA EM LABORATÓRIO

6.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para realização dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos: mufla (tipo forno) da marca BP Engenharia; prensa hidráulica manual da marca SKY com capacidade de compressão até 15 toneladas; furadeira elétrica manual da marca Bosch, modelo Super Hobby 3/8"; termômetro da marca Icel Manaus, modelo TD-180, com seu respectivo par de termopares; par de luvas térmicas do CBMSC; cronômetro da marca Oregon, modelo 3800 e tanque d'água contendo 10 litros.

Foram ainda utilizados outros materiais para fins de registro do experimento e do resultado: papel, caneta, máquina fotográfica e *notebook*.

6.1.1 Moldes para confecção do corpo de prova

Um molde é uma ferramenta que permite dar forma ao concreto ainda maleável. O tipo, dimensão e complexidade dos moldes podem variar. Na figura 10 é possível visualizar moldes recortados de tubos de PVC (poli cloreto de vinila). Esse material atende à necessidade de não reagir com o concreto em sua fase inicial de cura e por isso foi utilizado para confeccionar os corpos de prova de concreto utilizados nesse trabalho.



Figura 10 - Moldes para corpo de prova.

Fonte: Do autor.

6.1.2 Corpo de prova de concreto

O corpo de prova de concreto (figura 11) consiste em amostra de concreto endurecido, especialmente preparada para testar suas propriedades, neste caso sua resistência à compressão.



Figura 11 – Corpo de prova de concreto.

Fonte: Do autor.

Com o presente experimento procurou-se simular temperaturas (300, 500 e 700°C) a que ficam expostas as estruturas de concreto em situações de incêndio, bem como verificar a perda de resistência à compressão (assim que cessado o fornecimento de calor) de três formas distintas:

- Por resfriamento lento até a temperatura ambiente, visando simular o comportamento da estrutura sem intervenção humana;
- Por resfriamento rápido com imersão do corpo de prova de concreto em tanque d'água por 5 minutos, visando simular a aplicação de água diretamente sobre a estrutura aquecida; e
- Quente, submetendo o corpo de prova a ensaio de compressão logo após ser retirado da mufla.

6.2 PROCEDIMENTO

6.2.1 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados tendo como base a NBR 5738 (Modelagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos).

Como moldes, foram cortados pedaços de tubos de PVC com diâmetro de 7,5cm e comprimento de 15cm.

O concreto utilizado foi obtido junto à empresa Polimix, situada na Área Industrial do município de São José – SC. Os dados fornecidos pela empresa acerca da composição do produto fornecido são os seguintes (as quantias aqui especificadas referem-se à produção de 5m³ de material):

- Cimento: 400Kg/m³;
- Aditivo: 1,6 litros/m³;
- Água: 205 litros/m³;
- Brita: 0,70 m³;
- Areia média: 0,40 m³, e
- Areia fina: 0,20 m³.

Os moldes preenchidos ficaram acomodados por 24h no local do preenchimento, a fim de obter uma rigidez inicial para possibilitar o transporte até o local definitivo de cura. Após esse período inicial, os corpos de prova foram extraídos de seus moldes e em todos foi feito um furo de aproximadamente 3cm de profundidade (no sentido do comprimento, no centro da base), a fim de possibilitar a inserção do termostato no concreto para controlar a temperatura durante o processo de aquecimento. O orifício pode ser visualizado na foto 12:



Figura 12: Orifício para introdução do termostato.

Fonte: Do autor.

O processo de cura adotado foi o da cura úmida, onde os corpos de prova já extraídos de seus moldes foram imersos em água, assim permanecendo até o quinto dia. A partir do quinto dia os corpos de prova foram submetidos à temperatura de 60°C em estufa, onde permaneceram até o dia dos ensaios (sétimo dia). No sétimo dia foram realizados os ensaios à compressão.



Figura 13: Corpos de prova na estufa a 60°C.

Fonte: Do autor.

6.2.2 Aquecimento na mufla

Para o tratamento térmico, foram colocados na mufla dois corpos de prova por vez. Para cada temperatura (300, 500 e 700°C) foram utilizados seis corpos de prova, (duas amostras para ensaio a quente, duas amostras para ensaio após resfriamento rápido com água e duas amostras para ensaio após resfriamento lento). As operações de inserção e retirada dos corpos de prova da mufla foram efetuadas com a proteção das luvas térmicas. O termopar foi utilizado para controlar a temperatura dos corpos de prova. Os corpos de prova foram aquecidos a 300°C, 500°C e 700°C. A visualização deste procedimento pode ser feita através da figura 14.

O resfriamento rápido consistiu na utilização de um tanque d'água de 10litros para mergulhar os corpos de prova aquecidos por 5 minutos imediatamente após sua retirada da mufla.

O procedimento para o resfriamento lento consistiu em manter os corpos de prova (após a retirada da mufla) em superfície rígida e plana até alcançarem a temperatura ambiente.

Os corpos de prova destinados ao ensaio a quente foram removidos da mufla ao alcançarem o ponto desejado de temperatura e imediatamente submetidos ao ensaio à compressão.



Figura 14: Mufla, corpo de prova, termostato e termômetro instalados.

Fonte: Do autor.

6.2.3 Ensaio à compressão

Em observância à normatização que regulamenta esse tipo de ensaio, foi mantido um aumento constante de pressão através de seguidos movimentos na alavanca de manobra, até o rompimento do corpo de prova, momento em que foi coletado o valor da resistência obtida, conforme figura 15:



Figura 15: Prensa com corpo de prova posicionado para início da compressão.

Fonte: Do autor.

Assim, um a um, todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão e as devidas resistências e tipos de rompimento anotados.

A prensa hidráulica utilizada neste trabalho é manual e possui indicação analógica de carga, em toneladas. Por isso, foi necessário realizar uma conversão de unidades conforme segue:

$$01 \text{ ton} = 1000 \text{ kg}$$

$$01 \text{ kg} = 01 \text{ kgf}$$

01 kgf = 9,8 N, logo; 1000 kg = 9800 N

Como $P=F/A$, onde pressão (P) é dada em Pascal (Pa), força (F) em Newton (N) e área (A) em metros quadrados (m^2), temos que para uma área de $0,00442m^2$ (área da superfície de contato do corpo de prova com a prensa):

$P=F/A$, logo, $P= 9800/0,00442$

$P= 2217194,57Pa$, ou seja, **$P= 2,2MPa$**

Assim, é possível afirmar que cada tonelada obtida no indicador analógico de carga da prensa hidráulica corresponde a 2,2MPa. Esse foi o valor utilizado para a conversão das unidades em questão (toneladas em MPa).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 03 apresenta os resultados obtidos através dos experimentos realizados. Nela é possível observar o número do corpo de prova, a temperatura a que o corpo de prova foi submetido, o tipo de tratamento térmico após o aquecimento, o tipo de ruptura que apresentou, sua resistência à compressão em toneladas , sua resistência à compressão com os valores já convertidos em MPa e a média dos valores encontrados para cada par de corpos de prova.

Tabela 03 - Resultados obtidos:

Número do corpo de prova	Tipo de ensaio realizado	Tipo de Ruptura	Resistência em toneladas	Resistência equivalente em MPa	Média das resistências em MPa
01	Temperatura ambiente	C	12	26,4	26,95
02		C	12,5	27,5	
03	300°C, resfriamento lento	C	10,5	23,1	20,35
04		A	8	17,6	
05	300°C, ensaio a quente	C	9	19,8	19,8
06		C	9	19,8	
07	300°C, resfriamento rápido com água	A	5	11	12,1
08		A	6	13,2	
09	500°C, resfriamento lento	C	5,5	12,1	10,45
10		C	4	8,8	
11	500°C, ensaio a quente	B	3,5	7,7	9,9
12		C	5,5	12,1	
13	500°C, resfriamento rápido com água	A	3	6,6	6,05
14		A	2,5	5,5	
15	700°C, resfriamento lento	A	1	2,2	2,2
16		A	1	2,2	
17	700°C, ensaio a quente	C	1	2,2	1,9
18		A	0,75	1,7	
19	700°C, resfriamento rápido com água	Desintegrou-se			0
20					

Fonte: Do autor.

Nos procedimentos de compressão foram obtidos três tipos distintos de ruptura dos corpos de prova: tipo cisalhada - A (08 rupturas), tipo cônica e cisalhada - B (01 ruptura) e tipo cônica - C (09 rupturas), conforme ilustrado pela figura 16.



Figura 16: Tipos de rupturas observadas.

Fonte: Do autor.

Os corpos de prova submetidos a 700°C apresentaram inúmeras rachaduras em sua superfície e também uma coloração levemente rosácea conforme descrito pela literatura (ver figura 17). As mesmas fissuras foram observadas nos corpos de prova submetidos a 500°C, porém em menor quantidade.



Figura 17 – Rachaduras e pigmentação rosácea (esq.) dos corpos de prova a 700°C.

Fonte: Do autor

No caso dos corpos de prova número 19 e 20 da tabela 03, ao serem submetidos a resfriamento rápido no tanque d'água, o concreto desintegrou-se, não sendo possível submeter o material a ensaio de compressão (ver figura 18).



Figura 18 – Corpo de prova desintegrado pela ação do choque térmico com água.

Fonte: Do autor.

A tabela 04 mostra os resultados obtidos em valores médios em toneladas por processo do tratamento térmico realizado.

Tabela 04 – Resultados médios obtidos em toneladas:

	Temperatura Ambiente	300°C	500°C	700°C
Sem aquecimento	12,25	-	-	-
Resfriamento lento	12,25	9,25	4,75	1
Ensaio a quente	12,25	9	4,5	0,88
Resfriamento com água	12,25	5,5	2,75	0

Fonte: Do autor.

Já a tabela 05 apresenta os resultados obtidos em valores médios em MPa por tratamento térmico realizado. Os valores em MPa são os comumente utilizados para fins comparativos de resistência e estudo do concreto.

Tabela 05: Resultados médios obtidos em MPa.

	Temperatura Ambiente	300°C	500°C	700°C
Sem aquecimento	26,95	-	-	-
Resfriamento lento	26,95	20,35	10,45	2,2
Ensaio a quente	26,95	19,8	9,9	1,9
Resfriamento com água	26,95	12,1	6,05	0

Fonte: Do autor.

Pelos resultados apresentados nas tabelas 04 e 05 já é possível notar que há diferença de resistência do concreto tanto em função da temperatura a que foi exposto quanto do processo de resfriamento a que foi submetido. Fica claro, por exemplo, que entre o concreto ensaiado quente e o ensaiado após resfriamento lento, não há uma diferença de resistência tão expressiva. Já comparando a resistência final após resfriamento rápido com água e o resfriamento lento, podemos observar uma significativa redução da resistência no primeiro processo.

A tabela 06 traz um comparativo percentual de perda de resistência pelo concreto em função da temperatura e do tratamento térmico aplicado. Observa-se que para a temperatura de 700 °C houve maior redução da resistência do que para as temperaturas inferiores (300°C e 500°C). É possível observar ainda que há maior perda de resistência pelo processo de resfriamento rápido do que pelo processo de resfriamento lento e a quente.

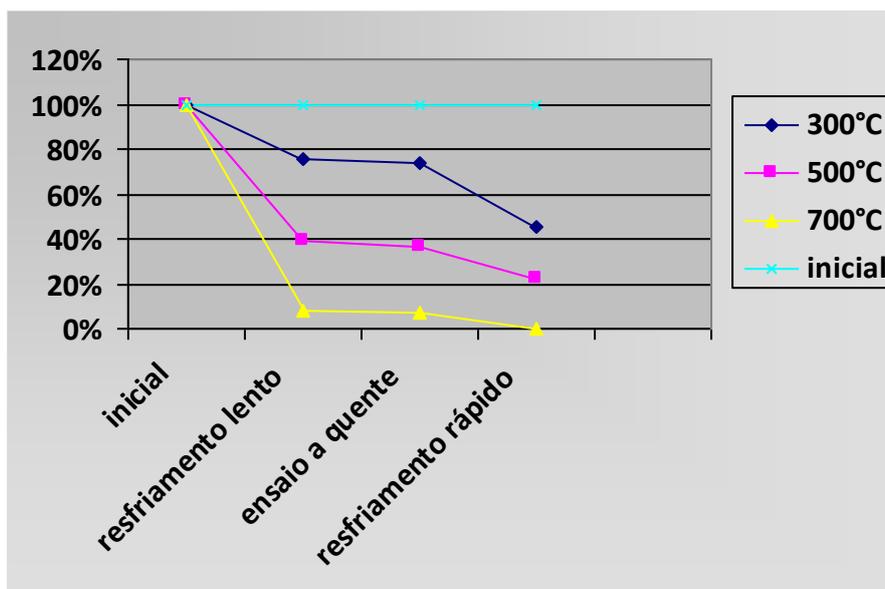
Tabela 06: Comparativos percentuais das resistências:

	Temperatura Ambiente	300°C	500°C	700°C
Sem aquecimento	100%	-	-	-
Resfriamento lento	100%	75,5%	38,8%	8,2%
Ensaio a quente	100%	73,5%	36,7%	7,1%
Resfriamento com água	100%	44,9%	22,4%	0%

Fonte: Do autor.

Na tabela 06 podemos observar com mais clareza que há uma redução gradativa da resistência do concreto conforme o aumento da temperatura. A influência do tipo de ensaio demonstra que o resfriamento com água causa significativas perdas na resistência à compressão em todos os processos realizados.

No gráfico 01 estão representadas as três curvas de temperatura formadas pela diminuição percentual de resistência em função do processo térmico e da temperatura a que foram submetidos.

Gráfico 01 - Percentual de resistência X temperatura X tipo de ensaio.

Fonte: Do autor.

No gráfico 01 podemos comprovar a queda do percentual de resistência em função do aumento da temperatura e que há um comportamento similar entre as curvas das três temperaturas de exposição. Também é possível notar a influência causada na resistência em função do tipo de teste realizado.

7. CONCLUSÃO

A resistência à compressão normalmente é considerada como a propriedade mais importante do concreto, embora, em muitos casos práticos, outras características como a durabilidade e a permeabilidade sejam, de fato, mais importantes. Não obstante, a resistência dá uma idéia geral da qualidade do concreto, pois ela está diretamente relacionada com sua estrutura interna. Além disso, a resistência é a propriedade especificada pelos engenheiros projetistas para fins de dimensionamento e aceitação da estrutura. Isto porque, diferentemente de outras propriedades, a resistência à compressão é relativamente fácil de ser determinada.

É importante salientar que as temperaturas e ensaios simulados em laboratório neste experimento não são exatamente iguais à realidade de um incêndio ou do combate a um incêndio propriamente dito. As dimensões do ambiente aquecido (mufla), as dimensões do corpo de prova e sua composição (sem estrutura metálica) diferem da situação real. Também a ausência de chamas em contato com o material e o fato do corpo de prova não estar submetido a nenhuma carga (força de sustentação) durante o aquecimento, é diferente do que ocorre na realidade.

Os experimentos realizados em laboratório compreendem os objetivos propostos pelo trabalho e mostram que o concreto submetido a temperaturas elevadas perde sua resistência de forma gradual, conforme a temperatura a que for exposto. Podemos afirmar ainda, que o fato de aplicar água sobre uma estrutura de concreto superaquecida reduz sua resistência para até 60% do valor que manteria pelo resfriamento natural.

Analisando a perda de resistência pela temperatura (conforme gráfico 01), podemos notar que há uma redução gradativa da resistência conforme o aumento da mesma. Assim, temos que a 700°C a resistência do concreto corresponde somente a 8,2% da resistência inicial. Esse valor corresponde a 10,9% da resistência obtida a 300°C e à 21,13% da resistência obtida do concreto a 500°C nos ensaios após resfriamento lento. Nos ensaios a quente a 700°C temos apenas 7,1% da resistência inicial, o que corresponde a 9,7% da resistência obtida a 300°C e a 19,3% da resistência a 500°C; resultados bastante próximos aos obtidos no ensaio após resfriamento lento.

No tratamento térmico a 700°C, após resfriamento rápido com água o concreto desintegrou-se, conforme figura 18. Já a 500°C manteve 22,4% da resistência inicial, o que representa 49,9% da resistência do valor obtido a 300°C (conforme tabela 06).

Importante observar ainda na tabela 06, que o resfriamento rápido com água traz como consequência uma diminuição de resistência na ordem de 60% do valor que o concreto manteve por resfriamento lento sem influência externa, o que constitui um resultado bastante expressivo. Já o concreto submetido ao resfriamento lento apresentou em média uma resistência 5% superior ao concreto submetido a ensaio ainda quente. Esse valor não representa uma alteração significativa.

No gráfico 01 podemos visualizar de forma clara que entre o ensaio a quente e o resfriamento lento praticamente não há queda de resistência, porém quando se fala na submissão do corpo de prova ao resfriamento rápido com água, nota-se um declínio acentuado da reta que o representa nos três casos, apontando resultados bastante expressivos, conforme já citado anteriormente.

Pela importância tanto histórica (pelo fato normalmente associado a bombeiros ser o combate ao fogo) quanto de segurança dos próprios combatentes, dos usuários e da propriedade alheia, sempre à procura da excelência no exercício da atividade, e pelos resultados obtidos; fica evidente que o combate de um sinistro com aplicação direta de água leva à redução da capacidade resistiva de estruturas de concreto submetidas a altas temperaturas. Portanto, deve-se evitar (na medida do possível) a aplicação de água em estruturas de concreto superaquecido, a fim de evitar o favorecimento da perda de sua resistência (e consequentemente da capacidade de carga estrutural) garantindo assim a segurança dos usuários e dos próprios bombeiros combatentes no local de trabalho.

Ressalte-se ainda que antes de adentrar um recinto para atuar efetivamente nas ações que a atividade de combate a incêndio exige, seja feita uma averiguação para detectar sinais de fadiga ou alteração das estruturas de concreto: rachaduras, coloração, lascamentos, etc. Essa análise favorece a tomada de decisões quanto a adentrar ou não um local sinistrado, uma vez que fornece elementos importantes para confirmação de possíveis riscos iminentes.

REFERÊNCIAS

WEINGARTNER, Roberto. **A Transferência de Calor Através da Roup de Combate a Incêndios**. 2007. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnológico) – Centro Tecnológico da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, São José, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: Moldagem e Cura de Corpos-de-prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos – Método de Ensaio**, Brasil, 1993.

_____. **NBR 5739 Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos**, Brasil, 1994.

_____. **NBR 14432 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimentos**. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 7211 Agregados para concreto – Especificação**. Brasil, 1987.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

RAMALHO JUNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os fundamentos da física**. 7 ed. Revista e ampliada. São Paulo: Moderna, 1999.

KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

SCHMIDT, F.W.; HENDERSON, R.E.; WOLGEMUTH, C.H. **Introdução às ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

OLIVEIRA, Marcos de. **Manual de Estratégias, táticas e técnicas de combate a incêndio estrutural**. Florianópolis – SC: Editora Editograf, 2005. 136 p.

COTE, Arthur. e BUGBEE, Percy. **Principios de protección contra incêndios**. Madrid: NFPA e CEPREVEN, 1993.

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

KLEIN, D.L. **Plano de prevenção e proteção contra incêndio: CURSO SOBRE PLANO DE PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO (PPCI)**, Porto Alegre: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, 2001. 164p. Apostila.

SOUZA, A. A. A & MORENO Jr., A. L. **Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto**. In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5, 2003, São Paulo-SP. Anais. São Paulo, 2003. CD ROM.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. et al. **O concreto de alto desempenho em temperaturas elevadas**. In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo-SP. Anais. São Paulo, 2003. CD ROM.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. 11 ed. Rio de Janeiro: Globo Pini, 1987. Revisão de Vladimir A. Paulon.

ALMEIDA, Luiz Carlos. Estruturas IV - **Concreto Armado**. Notas de Aula. Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002.

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

NEVES, I.C. **Segurança contra incêndio em edifícios – Fundamentos**. Instituto Superior Técnico, Depto. De Engenharia Civil (Lisboa), 1994, p. 557. Disponível em: <http://www.gerdau.com.br/GerdauAcominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/Protecao_de_estruturas_metalicas_frente_ao_fogo.pdf> Acesso em 15 de fevereiro de 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. Disponível em: <http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20071221_090711_CIVI-013.pdf> Acesso em 08 de março de 2008.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Escola de Engenharia (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://dominiopublico.mec.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&coobra=29014> Acesso em 05 Março 2008.

VARGAS, M.R.; SILVA, V.P. **Resistência ao fogo de estruturas de aço: bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção em aço**. (Manual da Construção em Aço). Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cbca-ibs.com.br/downloads/mte_techne.pdf> Acesso em 12 de março de 2008.

ILIESCU, Marcelo.. Julho de 2007. **Patologia e reconstrução de estruturas incendiadas** Disponível em: <http://www.google.com.br/search?sourceid=navclient&aq=t&hl=pt-BR&ie=UTF-8&rlz=1T4GGLJ_pt-BRBR251BR251&q=Marcelo+Iliescu%2c+Patologia+e+reconstru%2c+a7%2c+a3o+dases+estruturas+incendiadas> Acesso em 20 de fevereiro de 2008.

AGUIAR, José Eduardo de. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia (UFMG). Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<http://www.pos.demc.ufmg.br/Defesas/Aguiar/Disserta%E7%E3o%20Mestrado%20Jos%E9%20Eduardo%20de%20Aguiar.pdf>> Acesso em 25 de fevereiro de 2008.

KAEFER, Luís Fernando. **A Evolução do Concreto Armado**, São Paulo. Dezembro 1998. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef605/HistoriadoConcreto.pdf>> Acesso em 09 de fevereiro de 2008.

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

<http://www.google.com.br/search?sourceid=navclient&hl=pt-BR&ie=UTF-8&rlz=1T4GGLJ_pt-BRBR251BR251&q=CHANA%2c+P%3b+PRICE%2c+B%2e+The+Cardington+fire+test%2e+Concrete%2e+London> Acesso em 21 de abril de 2008.

SANTA CATARINA (Estado). **Constituição do Estado de Santa Catarina.** (1989) Florianópolis: IOESC, 1989.

SANTA CATARINA (Estado). **Decreto n 19.237 de 14 de março de 1983.** Aprova o regulamento da Lei de Organização Básica da Polícia Militar do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. Disponível em: <http://www.cb.sc.gov.br/ccb/ccb/biblioteca_virtual_interna.htm> Acesso em 20 de fevereiro de 2008.

_____ **Lei n° 6.217 de 10 de fevereiro de 1983.** Dispõe sobre a Organização básica da Polícia Militar do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. Disponível em: <http://www.cb.sc.gov.br/ccb/ccb/biblioteca_virtual_interna.htm> Acesso em 20 de fevereiro de 2008.

BRASIL. Constituição (1988). **Capítulo III.** Dispõe sobre a segurança pública. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constitui%C3%A7ao.htm> Acesso em 30 de março de 2008.

_____ **Capítulo VII.** Disposições gerais sobre administração pública. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constitui%C3%A7ao.htm> Acesso em 30 de março de 2008.

PORTAL DO CONCRETO. **Tipos de Concreto.** Dinamicsite, 2006. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/?pagina=caementu>> Acesso em 10 de março de 2008.