

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

Marcelo Bortolin Argenton

**EFEITO DAS VARIAÇÕES DO TEOR DE UMIDADE E
CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO NO COMPORTAMENTO
DO *SPALLING* DE CONCRETOS DE ALTA COMPACIDADE**

Porto Alegre
julho 2011

MARCELO BORTOLIN ARGENTON

**EFEITO DAS VARIAÇÕES DO TEOR DE UMIDADE E
CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO NO COMPORTAMENTO
DO *SPALLING* DE CONCRETOS DE ALTA COMPACIDADE**

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

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre
julho 2011

MARCELO BORTOLIN ARGENTON

**EFEITO DAS VARIAÇÕES DO TEOR DE UMIDADE E
CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO NO COMPORTAMENTO
DO *SPALLING* DE CONCRETOS DE ALTA COMPACIDADE**

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

Porto Alegre, 14 de julho de 2011

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD pela University of Leeds, Grã Bretanha
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Larissa Degliomini Kirchhof (UNIPAMPA)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Alexandra Passuello (UFRGS)
Dra. pela Università Politecnica delle Marche

Profa. Luciane Fonseca Caetano (UFRGS)
Ma. pela Universidade Federal do rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Elias e Anair, e aos meus irmãos, Alexandre e Eduardo, que sempre me apoiaram e sempre foram fontes de inspiração, moral, conduta e alegria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me ter permitido nascer em uma ótima família, acompanhado de bons amigos, e pelas ótimas oportunidades que Ele me disponibilizou.

Agradeço aos meus pais, Elias Alexandre Argenton e Anair Bortolin Argenton, e meus irmãos, Alexandre Bortolin Argenton e Eduardo Bortolin Argenton, por todos esses anos de dedicação e apoio imensurável aos meus planos e sonhos. Agradeço por terem sido sempre, exemplos de moral, dedicação e conduta. Agradeço por todas as alegrias que me proporcionaram e por todas aquelas que eu ainda sei que irão proporcionar.

Agradeço ao meu orientador, prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, não só por todo o apoio que deu na realização desse trabalho, mas também pelo exemplo que sempre foi no laboratório LEME e pelos incontáveis incentivos morais que sempre fez.

Agradeço aos funcionários técnicos do LEME, Edgar Wallace Pereira Lucas e Eurípedes Martins Fontes, por todo o apoio e ajuda na realização desse trabalho

Agradeço a doutoranda Luciane Fonseca Caetano por toda ajuda no trato com a burocracia financeira e por todo o incentivo moral dispensado a mim.

Agradeço aos bolsistas Josué Argenta Chies, Roger de Andrade, Mateus Guimarães Tonin e Isaltino Avelino de Oliveira Júnior pela ajuda dispensada em algumas atividades desse trabalho.

Agradeço a Larissa Degliuomini Kirchhof à experiência adquirida no auxílio das atividades de sua pesquisa bem como as dúvidas sanadas por ela.

Agradeço ao laboratório LEME e à Escola de Engenharia da UFRGS pelo apoio financeiro no meu ressarcimento dos gastos com os equipamentos necessários a realização dessa pesquisa.

Agradeço ao laboratório LEME por ter me concedido total acesso às salas e equipamentos.

Agradeço aos demais técnicos, pesquisadores, mestrandos, doutorandos, pós-doutorandos e bolsistas dos laboratórios LEME, NORIE e LACER, que de alguma forma ou de outra, colaboraram para a execução desse trabalho.

Agradeço a todos os demais amigos e familiares, que de alguma forma colaboraram na formação de quem eu me tornei.

Nós temos que ser a mudança que queremos ver no mundo.

Mohandas Karamchand Gandhi

RESUMO

ARGENTON, M. B. **Efeito das variações do teor de umidade e condições de aquecimento no comportamento do *spalling* de concretos de alta compacidade.** 2011. 86 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Esse trabalho versa sobre um fenômeno internacionalmente conhecido por *spalling*, ou seja, o lascamento ou deslocamento de superfícies de concreto quando o mesmo é submetido a temperaturas elevadas, tais como em situações de incêndio. Pretende-se, nesse trabalho, determinar como algumas das variáveis influentes nesse fenômeno intervêm na ocorrência do mesmo. A partir da revisão da literatura existente sobre o fenômeno, procurou-se um aprofundamento do conhecimento sobre o assunto. Os conhecimentos adquiridos com a revisão bibliográfica não só permitiram a execução dos ensaios mais relacionados ao assunto como também permitiram explicar os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais com embasamento científico. Nesse trabalho, foram analisadas a influência de diferentes teores de umidade do concreto, o efeito da utilização de diferentes curvas de aquecimento e da adição de fibras de polipropileno em concretos de alta compacidade. A análise da influência desses parâmetros se deu de forma experimental, através da moldagem de corpos-de-prova e da execução de ensaios em laboratório. A moldagem dos corpos-de-prova foi baseada nos traços dos concretos produzidos na tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchof, e nas características que se pretende analisar nesse trabalho. Em relação aos ensaios, conduziram-se ensaios de caracterização dos materiais utilizados, de exposição dos corpos-de-prova a temperaturas elevadas e de determinação da resistência à compressão. Dos resultados pode-se concluir que há maior ocorrência de deslocamentos para maiores temperaturas de exposição. Para os ensaios realizados, concluiu-se que o teor de umidade de 90% é o que acarreta em mais danos quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas. A adição de fibras de polipropileno nos teores de 1,5 e 2,0 kg/m³ se mostrou eficaz para impedir a ocorrência de lascamentos, não tendo sido registrada nenhuma ocorrência do fenômeno. A taxa de aquecimento de 27,4°C/min acarreta em mais danos do que a taxa de 45°C/min. No entanto, a taxa de aquecimento mais elevada resultou em deslocamentos em um menor intervalo de tempo.

Palavras-chave: *spalling*; concretos de alta compacidade; fibras de polipropileno.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: relacionamento entre etapas da pesquisa	18
Figura 2: descrição do <i>spalling</i>	21
Figura 3: danos por fogo no revestimento de concreto do <i>Channel Tunnel</i>	22
Figura 4: efeito do incêndio em uma estrutura de concreto	22
Figura 5: mecanismo termo-hidráulico	24
Figura 6: propagação das tensões térmicas em superfícies contendo cantos vivos e superfícies convexas	25
Figura 7: curvas temperatura-tempo para incêndio padrão	29
Figura 8: curvas de aquecimento	29
Figura 9: curva de hidrocarbonetos	31
Figura 10: análise termodiferencial em pastas de cimento	34
Figura 11: análise termogravimétrica de fibras de polipropileno	35
Figura 12: resistência à compressão residual para concretos de alta resistência	37
Figura 13: caixa d'água	41
Figura 14: serra circular	41
Figura 15: caixa metálica	41
Figura 16: remoção dos arenitos	44
Figura 17: feixes de fibras de polipropileno ao lado de uma caneta da marca BIC	46
Figura 18: mesa vibratória	50
Figura 19: cura dos CP no reservatório	50
Figura 20: diagrama das etapas de preparação dos CP	51
Figura 21: pesagem dos CP	52
Figura 22: secagem em estufa	52
Figura 23: CP ensacado em embalagem metálica	54
Figura 24: CP armazenados na câmara climatizada	55
Figura 25: registro da posição dos CP no forno	56
Figura 26: CP dentro do forno sobre pequenos pedaços de tijolo	56
Figura 27: forno elétrico utilizado nessa pesquisa	57
Figura 28: CP com ocorrência de <i>spalling</i>	59
Figura 29: registro dos fragmentos	59
Figura 30: diagrama dos ensaios realizados no forno	60
Figura 31: caldeirão e gabaritos para realização do capeamento	61
Figura 32: verificação da horizontalidade do capeamento	62

Figura 33: ensaio de resistência à compressão	62
Figura 34: curva de resistência – concreto sem fibras	64
Figura 35: curva de resistência – concreto com adição de 1,5 kg/m ³ de fibras de polipropileno	64
Figura 36: curva de resistência – concreto com adição de 2,0 kg/m ³ de fibras de polipropileno	65
Figura 37: volumes de concreto deslocados avaliados como grande [A], médio [B] e pequeno [C]	66
Figura 38: percentual de CP ensaiados com ocorrência de <i>spalling</i>	67
Figura 39: total de deslocamentos	68
Figura 40: índice de deslocamentos	69
Figura 41: percentual de CP ensaiados com ocorrência de <i>spalling</i> – foco na variação do teor de umidade	69
Figura 42: total de deslocamentos – foco na variação do teor de umidade	70
Figura 43: índice de deslocamentos – foco na variação do teor de umidade	70
Figura 44: curvas reais de aquecimento do forno	71
Figura 45: percentual de CP com <i>spalling</i> – duas taxas de aquecimento	72
Figura 46: total de deslocamentos – duas taxas de aquecimento	73
Figura 47: índice de deslocamentos – duas taxas de aquecimento	73
Figura 48: tamanho dos deslocamentos	74
Figura 49: localização dos deslocamentos	75
Figura 50: regiões do forno segundo os esquemas 1 [fundo, centro e frente] e 2 [esquerda e direita]	77
Figura 51: número de CP com deslocamentos por região – esquema 1	77
Figura 52: número de deslocamentos por região – esquema 1	78
Figura 53: índice de deslocamentos por região – esquema 1	78
Figura 54: número de CP com deslocamentos por região – esquema 2	79
Figura 55: número de deslocamentos por região – esquema 2	79
Figura 56: índice de deslocamentos por região – esquema 2	80
Figura 57: foto de um CP com alteração da superfície decorrente do aquecimento	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: características dos diferentes tipos de <i>spalling</i>	26
Quadro 2: valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m ³ a 2800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos, segundo a NBR15200	27
Quadro 3: propriedades do cimento utilizado na pesquisa	42
Quadro 4: caracterização do agregado graúdo misto	43
Quadro 5: caracterização do agregado graúdo utilizado	43
Quadro 6: proporção de arenito e basalto no estado original do agregado graúdo	44
Quadro 7: caracterização do agregado miúdo	45
Quadro 8: caracterização da sílica ativa	45
Quadro 9: caracterização das fibras de polipropileno	46
Quadro 10: caracterização do aditivo superplastificante	47
Quadro 11: traços utilizados nessa pesquisa	48
Quadro 12: consistência dos concretos	49
Quadro 13: número de CP por concretagem	49
Quadro 14: características dos deslocamentos – temperatura do forno	76
Quadro 15: características dos deslocamentos – tempo	76

LISTA DE SIGLAS

CAD: concreto de alto desempenho

CAR: concreto de alta resistência

CP: corpo-de-prova

TRRF: tempo requerido de resistência ao fogo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{c,\theta}$ = resistência à compressão do concreto (MPa)

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa)

D_i = deslocamento avaliado para o elemento i

E_c = módulo de elasticidade do concreto (kN/m²)

P = percentual de massa de água presente na massa saturada de um CP (%)

P_s = massa seca (g)

P_u = massa saturada (g)

Q = índice de deslocamentos

T = temperatura dos gases oriundos do incêndio no instante t (°C)

T_0 = temperatura do ambiente, antes do aquecimento (°C)

t = tempo (min)

V_i = peso de ponderação atribuído ao deslocamento avaliado para o elemento i

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODO DE PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2.2.1 Objetivo Principal	16
2.2.2 Objetivo Secundário	16
2.3 HIPÓTESES	17
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 SPALLING	20
3.1 MECANISMOS	23
3.1.1 Mecanismo Termo-Hidráulico	23
3.1.2 Mecanismo Termo-Mecânico	24
3.2 TIPOS DE <i>SPALLING</i>	25
4. FATORES QUE INFLUEM NA OCORRÊNCIA DO <i>SPALLING</i>	27
4.1 TAXA DE AQUECIMENTO	27
4.2 TEOR DE UMIDADE	31
4.3 PERMEABILIDADE	33
4.4 PERDA DE MASSA	34
4.5 FIBRAS DE POLIPROPILENO	35
4.6 DIMENSÕES E FORMA DA SEÇÃO TRANSVERSAL	37
4.7 TIPO DE AGREGADO	38
5. EXPERIMENTOS: PREPARO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	40
5.1 AQUISIÇÕES, CONSERTOS E PROJETOS	40
5.2 MATERIAIS	42
5.2.1 Cimento	42
5.2.2 Agregado Graúdo	42
5.2.3 Agregado Miúdo	44
5.2.4 Sílica Ativa	45
5.2.5 Fibras de Polipropileno	46
5.2.6 Água	47
5.2.7 Aditivo Superplastificante	47

5.3 TRAÇO	47
5.4 EXECUÇÃO DAS CONCRETAGENS	48
5.5 CURA E IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	50
5.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA OS ENSAIOS	51
5.6.1 Determinação do Percentual de Água Presente nos CP	51
5.6.2 Obtenção dos Teores de Umidade Desejados	53
5.6.3 Período de Sazonamento	54
5.7 ENSAIOS	55
5.7.1 Aquecimento no Forno	55
5.7.2 Resistência à Compressão	61
6 RESULTADOS E ANÁLISES	63
6.1 Tratamento de Dados Espúrios	63
6.2 Resistência à Compressão	63
6.3 Spalling	65
6.3.1 Valoração dos Deslocamentos	65
6.3.2 Resultados dos Ensaios	66
6.3.2.1 Concreto sem Fibras	67
6.3.2.1.1 Concreto sem Fibras – Taxa de Aquecimento de 27,4°C/min	67
6.3.2.1.2 Concreto sem Fibras – Taxa de Aquecimento de 45°C/min	70
6.3.2.2 Concreto com Fibras de Polipropileno	74
6.3.3 Características dos Deslocamentos	74
6.3.4 Análise do Forno	76
6.4 VARIAÇÕES DA COR E TEXTURA	80
7 CONCLUSÕES	82
8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	83
9 ADICIONAIS	84
REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

O concreto, desde a sua invenção, tem sido muito estudado. As muitas pesquisas realizadas ao longo do tempo aumentaram significativamente o conhecimento sobre suas propriedades e comportamento frente a diversos tipos de solicitações. Graças a esses estudos, cada vez mais tem sido possível a realização de dimensionamentos de maior precisão, isto é, que representam mais fielmente o real comportamento das estruturas.

Com essas inovações tecnológicas e ganhos de conhecimento sobre o comportamento do concreto, desenvolveram-se os concretos de alta resistência (CAR). A criação e determinação dos efeitos do uso de certas adições e aditivos nas propriedades do concreto possibilitaram o desenvolvimento dos CAR.

Por apresentarem maior resistência, os CAR têm permitido a diminuição das seções dos elementos estruturais. Além disso, a sua alta compacidade proporciona ganhos em termos de durabilidade das estruturas. Por esses motivos, entre outros, que eles vêm sendo cada vez mais utilizados nas construções do dia a dia. Por isso, a exata determinação do seu comportamento é essencial.

Com o aumento do uso dos CAR, e frente a incidentes, como os ocorridos, em 1994, no *Great Belt Tunnel*, na Dinamarca, e, em 1996, no *Channel Tunnel*, que liga a França à Inglaterra, constatou-se que muitas são as dúvidas sobre o comportamento dos CAR frente a situações de incêndio. Verificou-se nesses incidentes e em outros que, após a ocorrência dos sinistros, algumas estruturas executadas com CAR encontravam-se muito danificadas, com perdas de seção do concreto e a conseqüente exposição e degradação das armaduras.

Isso levou a realização de vários estudos os quais visavam definir o comportamento desse material quando exposto a incêndios. Existem diversos modelos que visam identificar a perda de resistência e demais alterações das propriedades do concreto quando submetido a essas condições extremas, sendo que a consideração de tais perdas é fundamental para o dimensionamento adequado das estruturas. Além disso, estudos concluíram que havia a possibilidade de ocorrência de deslocamentos (*spalling*) em CAR quando expostos a esse tipo de sinistro. Isso resulta não só em maior perda de resistência, pela falta da seção

resistente, como também resulta em maior exposição, tanto de barras de aço, que podem estar no interior do concreto, quanto de outras seções de concreto que originalmente ficavam ao abrigo do fogo direto. Isso favorece ainda mais as dilatações diferenciais, transferências de calor, alterações mineralógicas e da estrutura cristalina, entre outros.

Devido à gravidade do *spalling*, muitas pesquisas têm sido realizadas para sua correta determinação. Atualmente, seu efeito não é previsto nas normas brasileiras e não se conhece nenhum programa de computador que o contemple adequadamente.

Tendo em vista a complexidade desse fenômeno, pois uma ampla gama de fatores pode influenciar seu desenvolvimento, sabe-se que muitos estudos serão necessários para a elaboração de um modelo simples de previsão de sua ocorrência. Algumas pesquisas realizadas ao redor do mundo têm analisado a influência de alguns desses muitos parâmetros.

Sabe-se, de ensaios e análises realizadas, que a umidade, em conjunto com a porosidade, é um dos principais fatores desencadeadores desse fenômeno. É por possuírem baixa porosidade que a sua ocorrência só foi detectada em concretos de alta resistência, inicialmente.

Assim, é visando contribuir para o desenvolvimento de um modelo de previsão desse fenômeno que o presente trabalho pretende avaliar o efeito de alguns parâmetros em sua ocorrência, assim como verificar a eficiência de uma medida preventiva. Pretende-se, nesse trabalho, avaliar os efeitos do teor de umidade, da velocidade de aquecimento e da adição ou não de fibras em concretos de elevada resistência submetidos a elevadas temperaturas.

O **capítulo 2** apresenta às diretrizes desse trabalho, informando a questão da pesquisa, os objetivos do trabalho, as hipóteses, as delimitações e, por fim, é apresentado o delineamento do trabalho. O **capítulo 3** apresenta uma breve revisão sobre o fenômeno em estudo e seus principais mecanismos causadores. O **capítulo 4** apresenta informações sobre algumas das variáveis influentes no *spalling*. O **capítulo 5**, por sua vez, apresenta a descrição dos materiais utilizados e a execução da parte experimental. O **capítulo 6** apresenta os resultados e análises das informações obtidas nos ensaios experimentais. O **capítulo 7** apresenta as principais conclusões obtidas nessa pesquisa. No **capítulo 8** são feitas sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos. Por fim, no **capítulo 9** são feitas algumas observações sobre ensaios adicionais.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram adotadas as diretrizes expostas a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: para quais conjuntos de características do concreto e condições de exposição a elevadas temperaturas há um maior número de ocorrências do *spalling*?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a definição das características e condições de exposição a elevadas temperaturas mais propícias para a ocorrência do *spalling*.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a verificação dos tipos de *spalling* ocorridos para diferentes características e condições de exposição a elevadas temperaturas dos concretos.

2.3 HIPÓTESES

O presente trabalho tem por hipóteses que há maior probabilidade de ocorrência do *spalling* para:

- a) maiores taxas de aquecimento;
- b) maior compactação do concreto;
- c) teores de umidade superiores a 75%;
- d) patamares máximos de temperatura superiores a 400°C.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realização de ensaios sob as seguintes condições:

- a) sem aquecimento prévio;
- b) sem carregamento;
- c) com teores de umidade do concreto acima de 75%;
- d) em patamares máximos de temperatura entre 400 e 600°C.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) somente a análise da influência das seguintes variáveis,
 - teor de umidade do concreto;
 - taxa de aquecimento e patamar máximo de temperatura;
 - adição de fibras de polipropileno nos teores de 1,5 kg/m³ e 2,0 kg/m³.
- b) a realização de ensaios somente em fornos, sem exposição ao fogo, simulando, aproximadamente, as temperaturas de incêndios.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) montagem do programa experimental;
- c) execução do programa experimental;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões.

Apresenta-se a seguir um diagrama (figura 1), mostrando o relacionamento entre as etapas, com posterior detalhamento das mesmas.

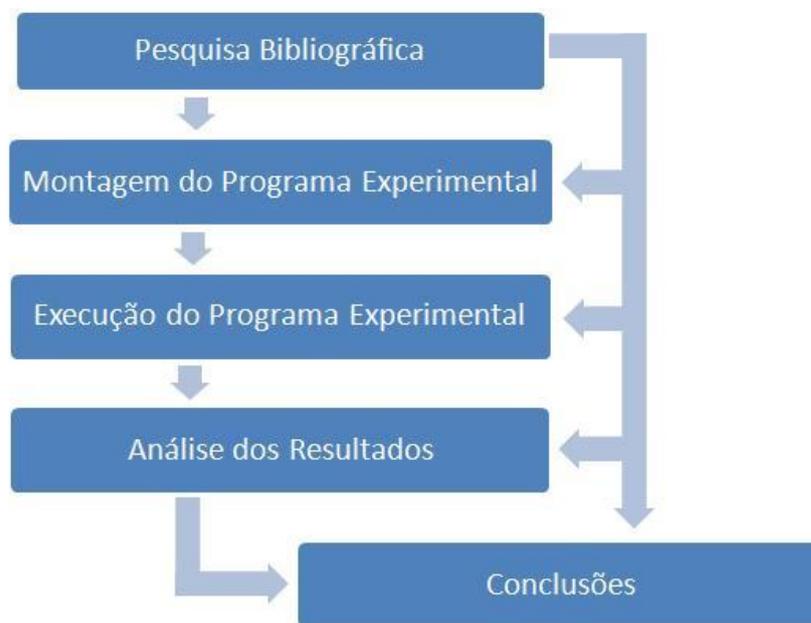


Figura 1: relacionamento entre etapas da pesquisa

A etapa de **pesquisa bibliográfica** visou aumentar os conhecimentos sobre o fenômeno em estudo, possibilitando um melhor entendimento do mesmo, necessário para a definição das variáveis de pesquisa e para a análise e interpretação dos resultados. Essa etapa não ficou restrita somente ao começo do trabalho, estando presente durante toda a execução do mesmo.

A segunda etapa (**montagem do programa experimental**) tratou da escolha dos teores de umidade, das curvas de aquecimento e dos teores de fibras utilizados, dentro das limitações do projeto. Em relação ao traço utilizado, o presente trabalho adotou um dos traços utilizados na tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchhof¹. Para cada concreto com um determinado

¹ Tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchhof defendida em 2010, mas ainda não disponibilizada.

conjunto de características, se estabeleceu o número de CP (corpos-de-prova) que seriam necessários aos ensaios.

A terceira etapa (**execução do programa experimental**) consistiu na busca e aquisição dos materiais necessários para a realização dos ensaios laboratoriais. Além disso, providenciou-se os equipamentos necessários. Alguns foram projetados e outros sofreram a manutenção necessária para o bom andamento dos trabalhos. Em paralelo, procedeu-se a execução das atividades laboratoriais, isto é, a moldagem e cura dos corpos de prova, a obtenção dos teores de umidade desejados e a realização dos ensaios. Verificou-se através dos ensaios, as seguintes características:

- a) variações da cor e textura dos CP;
- b) a temperatura, o tempo e a severidade dos deslocamentos ocorridos;
- c) região dos CP onde ocorreram os deslocamentos.

A quarta etapa consistiu na **análise dos resultados**, sendo realizado um tratamento estatístico e análises com ferramentas estatísticas. A quinta etapa consistiu na obtenção das **conclusões** sobre os resultados obtidos.

3 SPALLING

No grupo de palavras utilizadas na literatura para nomear esse fenômeno, pode-se encontrar deslocamentos, lascamentos ou *spalling*, que vem sendo muito utilizado mesmo na literatura nacional, devido ao seu amplo uso na literatura internacional. O *spalling* é um fenômeno muito complexo que depende de muitos fatores. Apresenta-se a seguir, uma definição básica e simplificada que permitirá um melhor entendimento das explicações posteriores.

Quando um elemento de concreto é submetido a um rápido aquecimento, como em uma situação de incêndio, por exemplo, há o aparecimento de tensões diferenciais, geradas por alterações em sua microestrutura e pelas dilatações diferenciais dos seus componentes e dos diversos elementos da estrutura. Além disso, a vaporização da água presente no interior do concreto gera excesso de poro-pressão na face aquecida do elemento, caso a sua permeabilidade não permita a dissipação instantânea da mesma. Quando esse conjunto de solicitações supera a resistência à tração do material, ocorrem deslocamentos na superfície do material (LIMA, 2005). Apresenta-se a figura 2, que resume o fenômeno.

A partir de uma análise de diversos trabalhos percebe-se que não há consenso entre os pesquisadores sobre a faixa de temperatura que causa maior incidência do *spalling*, encontrando-se intervalos situados entre 150°C e 400°C, com maiores concentrações em torno dos 300°C. Também não há consenso sobre o tempo de ocorrência, com intervalos entre 7 e 30 minutos após o início do aquecimento.

Facilmente são encontradas contradições entre os resultados de diferentes programas experimentais. Acredita-se que a maior parte seja devida às variações das condições experimentais, tais como taxas de aquecimento, teores de umidade e métodos de ensaio. No entanto, algumas das contradições parecem estar ligadas ao não entendimento do fenômeno e dos fatores intervenientes. Além disso, a própria aleatoriedade dos materiais utilizados gera

dúvidas sobre o seu comportamento, inclusive dentro de uma mesma pesquisa (trabalho não publicado)².

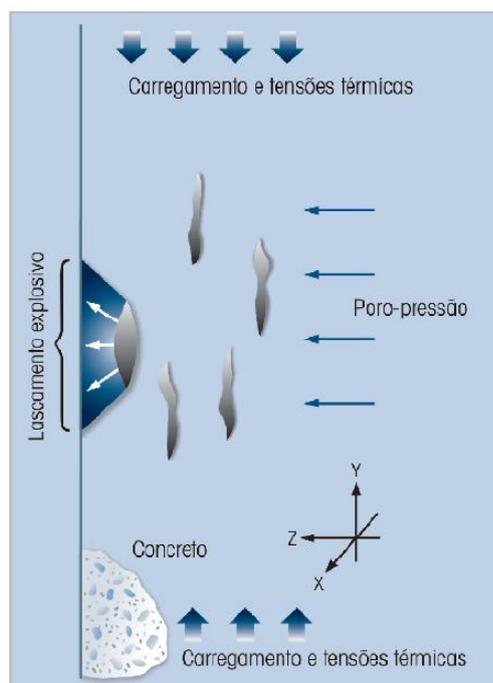


Figura 2: descrição do *spalling*
(KHOURY, 2002 apud FITESA FIBERWEB, 2004, p. 2)

Deve-se notar que, experimentalmente, o *spalling* explosivo normalmente tem se comportado de maneira estocástica. Por exemplo, quando oito CP **idênticos** foram aquecidos em **condições idênticas**, quatro CP explodiram e quatro não (KHOURY; ANDERBERG, 2000, p. 6). Apresenta-se a seguir as figuras 3 e 4, exemplos de estruturas em que se constatou a ocorrência do fenômeno.

² Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

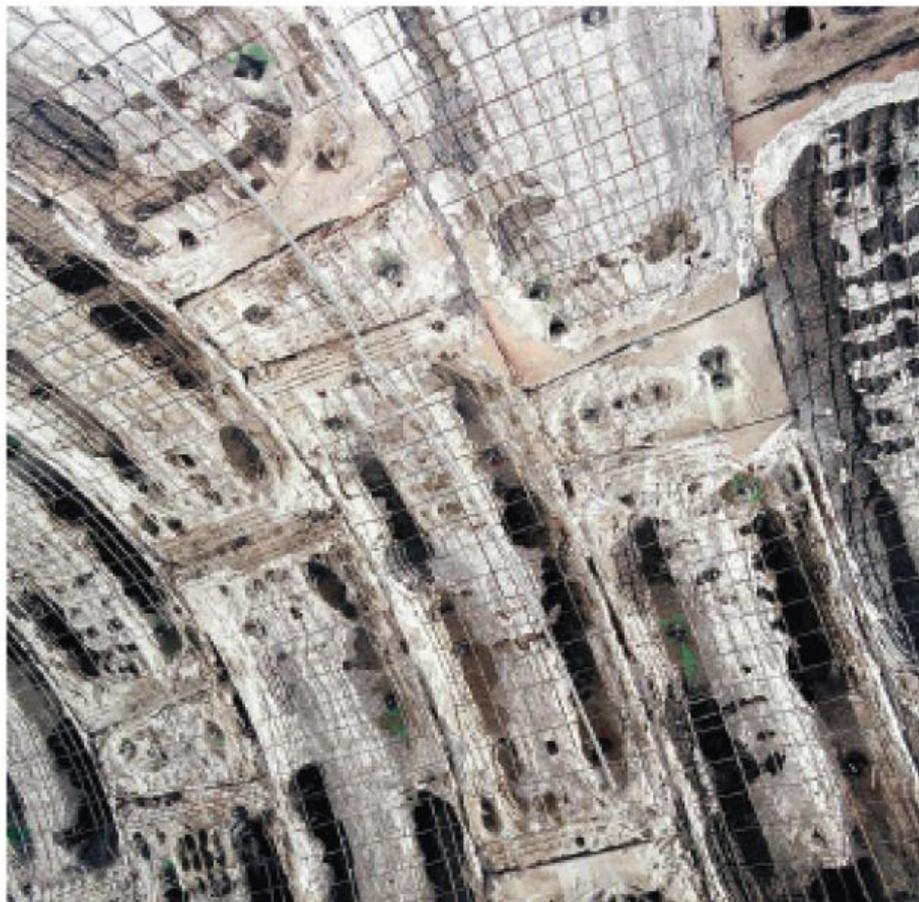


Figura 3: danos por fogo no revestimento de concreto do *Channel Tunnel* (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 154)³

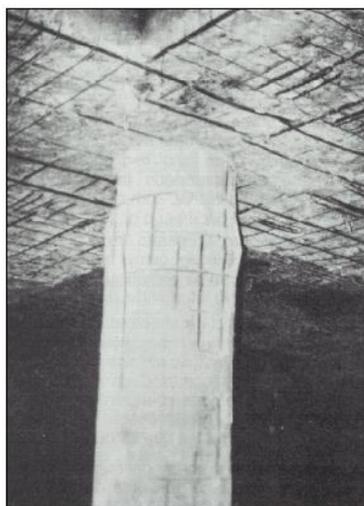


Figura 4: efeito do incêndio em uma estrutura de concreto (CÁNOVAS, 1988 apud CALDAS, 2008, p. 57)

³ Fotografia cortesia de Paul Acker.

3.1 MECANISMOS

A complexidade do *spalling* está no fato de ser influenciado por muitas variáveis, sendo muitas delas interdependentes. Apesar disso, pode-se, tecnicamente, dividi-lo em apenas dois mecanismos independentes: um termo-hidráulico e um termo-mecânico. Esses mecanismos são detalhados nos próximos itens.

3.1.1 Mecanismo Termo-Hidráulico

A exposição do concreto a temperaturas elevadas leva a desidratação das camadas mais externas. O aquecimento do concreto faz com que a água presente no seu interior passe do estado líquido para o estado de vapor, resultando numa expansão da mesma. Uma vez nesse estado, o vapor de água tende a migrar para regiões de menor umidade e pressão. Em concretos de baixa permeabilidade, somente parte dessa umidade conseguirá ser eliminada no meio exterior. A parcela restante migrará para o interior do elemento de concreto, que possui menores temperaturas, resultando na condensação do vapor. Com o passar do tempo, a quantidade de vapor condensado no interior do elemento de concreto acarretará na formação de uma camada saturada que impedirá a migração de vapor para o seu interior. A partir desse momento, todo o vapor gerado pelo aquecimento tenderá a sair para o meio externo e, na impossibilidade de total dissipação (devido à baixa permeabilidade), conduzirá a geração de poro-pressão. Quando a sollicitação devida a poro-pressão superar a resistência à tração do concreto, haverá o deslocamento repentino da camada externa (NICE et al., 2003 apud FITESA FIBERWEB, 2004, p. 2; SHUTTLEWORTH, 2001 apud FITESA FIBERWEB, 2004, p. 2; KITCHEN, 2001 apud FITESA FIBERWEB, 2004, p. 2). Pode-se visualizar o mecanismo descrito na figura 5.

Em relação às principais variáveis influentes no mecanismo termo-hidráulico, pode-se afirmar que são a permeabilidade, a taxa de aquecimento e o teor de umidade do concreto. Tais variáveis são, portanto, fundamentais nos estudos relacionados a esse fenômeno, visto a existência de estudos que comprovam que o mecanismo termo-hidráulico (também conhecido

por mecanismo de poro-pressão) é o processo dominante no acarretamento do *spalling* (trabalho não publicado)⁴.

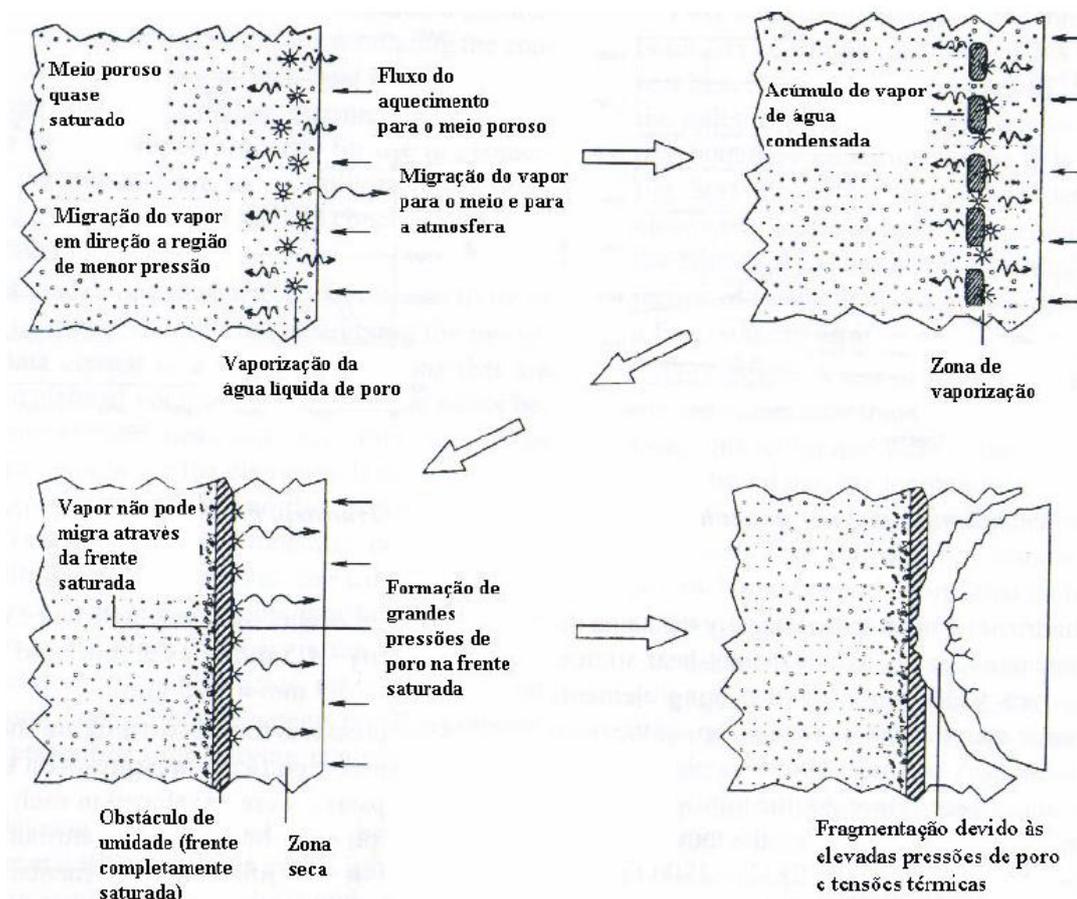


Figura 5: mecanismo termo-hidráulico
(CONSOLAZIO et al., 1998 apud VELASCO, 2002, p. 39)

3.1.2 Mecanismo Termo-Mecânico

O processo termo-mecânico (ou mecanismo de tensão térmica) é composto pelas tensões oriundas das diferentes dilatações térmicas dos constituintes do concreto e da própria dilatação térmica do elemento dentro da estrutura. Nos casos em que o elemento de concreto possui restrições aos deslocamentos impostos pela dilatação, há o surgimento de tensões de compressão paralelas à face aquecida. Isso resulta no aparecimento de tensões de tração

⁴ Exame de qualificação para a realização de doutorado na UFRGS, apresentado por Larissa Degliuomini Kirchhof em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

perpendiculares a esta face. Se as tensões de tração geradas forem superiores a resistência à tração do concreto, perceber-se-á a ocorrência de lascamentos superficiais (trabalho não publicado)⁵. Exemplos da ocorrência do mecanismo termo-mecânico podem ser visualizados na figura 6.

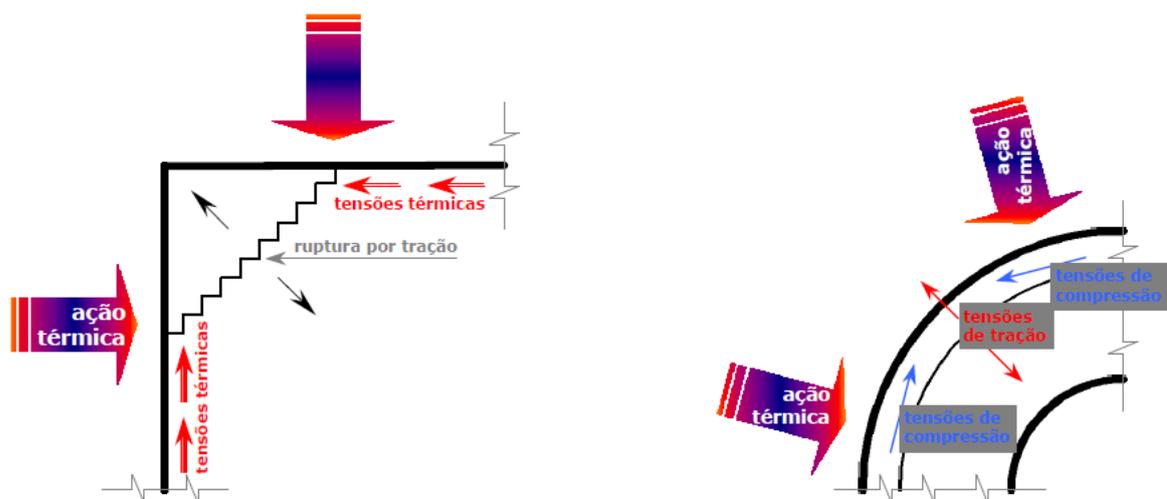


Figura 6: propagação das tensões térmicas em superfícies contendo cantos vivos e em superfícies convexas (ANDERBERG, 1997 apud COSTA et al., 2002a, p. 9).

Apesar de ser importante o conhecimento do modo como esse mecanismo influencia o fenômeno, sua parcela de contribuição na sua ocorrência não é a maior. Há estudos que comprovam que tanto em concretos de resistência convencional quanto em concretos de alta resistência, o mecanismo de poro-pressão é o processo dominante (trabalho não publicado)⁶.

3.2 TIPOS DE SPALLING

Segundo Lima (2005, p. 92-94):

Didaticamente, o *spalling* pode ser subdividido em categorias baseadas no local e na intensidade do fenômeno. Desta forma, o *spalling* pode acontecer de forma intensa nos agregados, de forma não-violenta nos cantos e quinas, de forma violenta na

⁵ Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

⁶ Idem.

superfície do concreto, de forma explosiva em todo elemento e de forma não-violenta durante o resfriamento. Nos agregados, na superfície de vigas, pilares e lajes e em todo elemento, o fenômeno ocorre entre 7 e 30 minutos após o início da exposição ao fogo, e vem acompanhado de estalos nos agregados e de explosões violentas na superfície e/ou em todo o elemento.

Apresenta-se no quadro 1 uma síntese dos diversos tipos de *spalling*.

Spalling	Tempo (min)	Natureza	Som	Dano	Influência
Agregado	7 a 30	Intenso	Estalo	Superficial	H A S D W
Cantos e quinas	30 a 90	Não-violento	Nenhum	Pode ser sério	T A Ft R
Superfície	7 a 30	Violento	Estampido	Pode ser sério	H W P Ft
Resfriamento	Durante	Não-violento	Nenhum	Pode ser sério	T X
Todo elemento	7 a 30	Violento	Estrondo	Sério	H A S Fs G L O P Q R S W Z

Legenda	
A	expansão térmica do agregado
D	difusão térmica do agregado
Fs	resistência cisalhamento do concreto
Ft	resistência a tração do concreto
G	idade do concreto
H	taxa de aquecimento
L	carregamento / restrições
O	perfil do aquecimento
P	permeabilidade
Q	seção transversal
R	armadura
S	tamanho do agregado
T	temperatura máxima
W	umidade
X	re-hidratação da cal
Z	tamanho da seção

Quadro 1: características dos diferentes tipos de *spalling* (KHOURY, 2003 apud LIMA, 2005, p. 97).

No quadro 1, pode-se observar as diferentes classificações do *spalling* na literatura. Além disso, verifica-se que possuem intervalos de ocorrência, características e intensidades diferentes uns dos outros. Também se percebe que os fatores influentes são diferentes, segundo o tipo de *spalling*. Por fim, destaca-se a vasta lista de fatores influentes nesse fenômeno, conforme já mencionado. Alguns desses fatores serão comentados no capítulo 4.

4 FATORES QUE INFLUEM NA OCORRÊNCIA DO *SPALLING*

Apresenta-se, nos próximos itens, informações sobre alguns dos fatores que influem na ocorrência do *spalling*.

4.1 TAXA DE AQUECIMENTO

Conforme a NBR 15200, são previstas reduções da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto em função da elevação da temperatura. Tais reduções podem ser vistas no quadro 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Temperatura do concreto, θ °C	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
1	2	3	4	5
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1 000	0,04	0,00	0,06	0,00
1 100	0,01	0,00	0,02	0,00
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro 2: valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos, segundo a NBR 15200 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. [3])

No entanto, as considerações relativas à sua exposição a elevadas temperaturas são limitadas. Não são previstas nas normas brasileiras considerações sobre os danos ocasionados por

eventuais deslocamentos na estrutura. Apesar disso, “Frequentemente, a resistência ao fogo das estruturas de concreto é superior aos tempos mínimos requeridos para a garantia da segurança.” (LIMA, 2005, p. 34).

Segundo a NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 3), o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é o tempo mínimo que um elemento deve resistir ao fogo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável, quando sujeito ao incêndio-padrão. Os TRRF são preconizados por essa Norma, levando em consideração certas características da edificação e sua ocupação.

No entanto, para que os projetos de verificação sobre o atendimento do TRRF simulem a realidade e de fato atendam às exigências, faz-se necessária a consideração sobre possíveis ocorrências de deslocamentos. A verificação da resistência ao fogo e o atendimento ao TRRF por modelos que não levem em conta o efeito dos deslocamentos não simulam a realidade, comprometendo a segurança estrutural e a vida de pessoas. Por isso, faz-se necessário um aprofundamento dos conhecimentos sobre o assunto e o desenvolvimento de um modelo de previsão de sua ocorrência. Somente a partir de então, será possível a realização de simulações mais condizentes com a realidade e um melhor atendimento das exigências normativas.

Segundo Anderberg (2003 apud LIMA, 2005, p. 36), os projetos tradicionais baseiam-se na curva de incêndio padrão. Na maioria dos casos, essa curva é mais severa do que a curva dos incêndios naturais, visto que a intensidade do fogo é dependente do tipo e da quantidade dos materiais combustíveis e da ventilação no ambiente. Silva (1999 apud COSTA; SILVA, 2004, p. [4]) ressalta que, apesar da curva de incêndio padrão, ISO 834⁷, não representar um incêndio real, ela é internacionalmente recomendada através de normas e procedimentos de ensaios por questões práticas.

Atenta-se para o fato de que “No Brasil, a curva de incêndio-padrão, apresentada na figura [...] [7], é a mesma da ISO 834⁸, sendo prescrita pela NBR 5628⁹: Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo.” (LIMA, 2005, p. 42). Ressalta-se que “Esta

⁷ Trata-se da norma ISO 834: *Fire Resistance Test – Elements of Building Construction*.

⁸ Idem.

⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

curva representa somente uma possível condição de exposição durante o período de crescimento e alastramento do incêndio, não contemplando o período de redução da temperatura.” (LIMA, 2005, p. 41). Uma comparação da curva de incêndio padrão com a curva de incêndios naturais pode ser visualizada na figura 8.

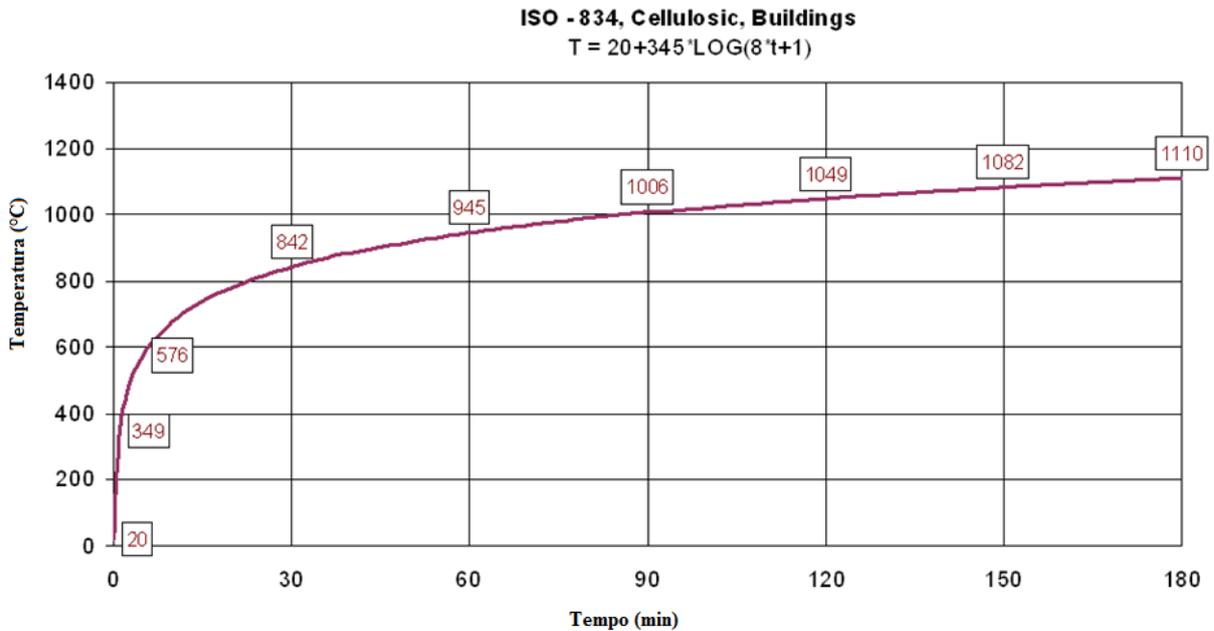


Figura 7: curvas temperatura-tempo para incêndio padrão (adaptado de PROMAT TUNNEL, 2010)

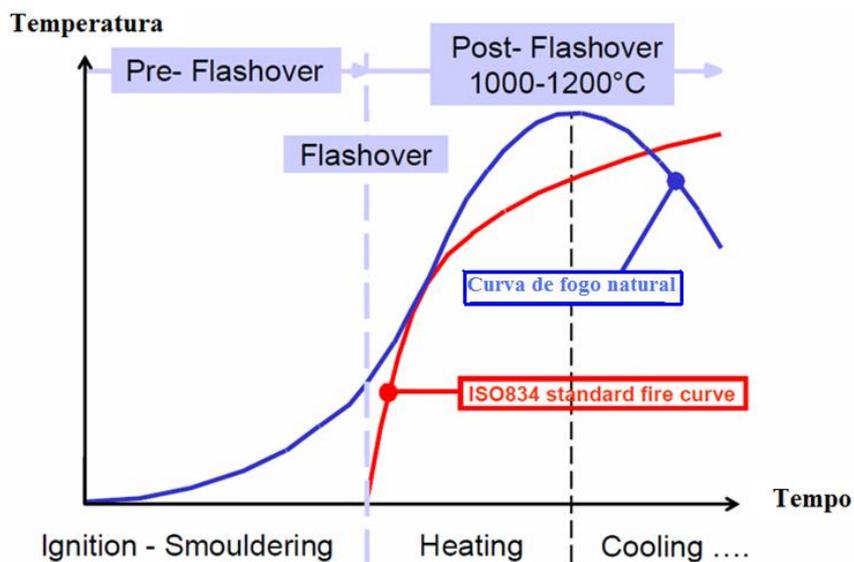


Figura 8: curvas de aquecimento (adaptado de CAJOT, 2008)

A curva de incêndio padrão é descrita pela fórmula 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, p. 3):

$$T - T_0 = 345 \times \log(8t + 1) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

T = temperatura dos gases oriundos do incêndio no instante t (°C)

T₀ = temperatura do ambiente, antes do aquecimento (°C)

t = tempo (min)

Incêndios em túneis tendem a gerar temperaturas mais elevadas que incêndios em edifícios, além de possuírem maiores durações, pela dificuldade de acesso. Outro fator agravante é a baixa ventilação que ocasiona uma redução na taxa a liberação da umidade presente nos concretos. Esse conjunto de fatores incrementa a probabilidade de ocorrência de deslocamentos. Tendo isso em vista, foram desenvolvidas diversas curvas para a simulação de incêndios. A curva de incêndio padrão, apresentada pela ISO 834 é aplicada a prédios celulósicos, isto é, às construções usuais do dia a dia. Para locais onde há possibilidade de ocorrência de incêndios com pelo menos um pouco de petróleo utiliza-se, internacionalmente, as curvas de hidrocarbonetos. Apresenta-se na figura 9 a curva de hidrocarbonetos padrão, não se abordando nesse trabalho as suas variantes.

A curva de hidrocarbonetos é descrita pela fórmula 2, considerando a temperatura ambiente igual a 20°C (PROMAT TUNNEL, 2010):

$$T = 20 + 1080 \times \left(1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t}\right) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

T = temperatura dos gases oriundos do incêndio no instante t (°C)

t = tempo (min)

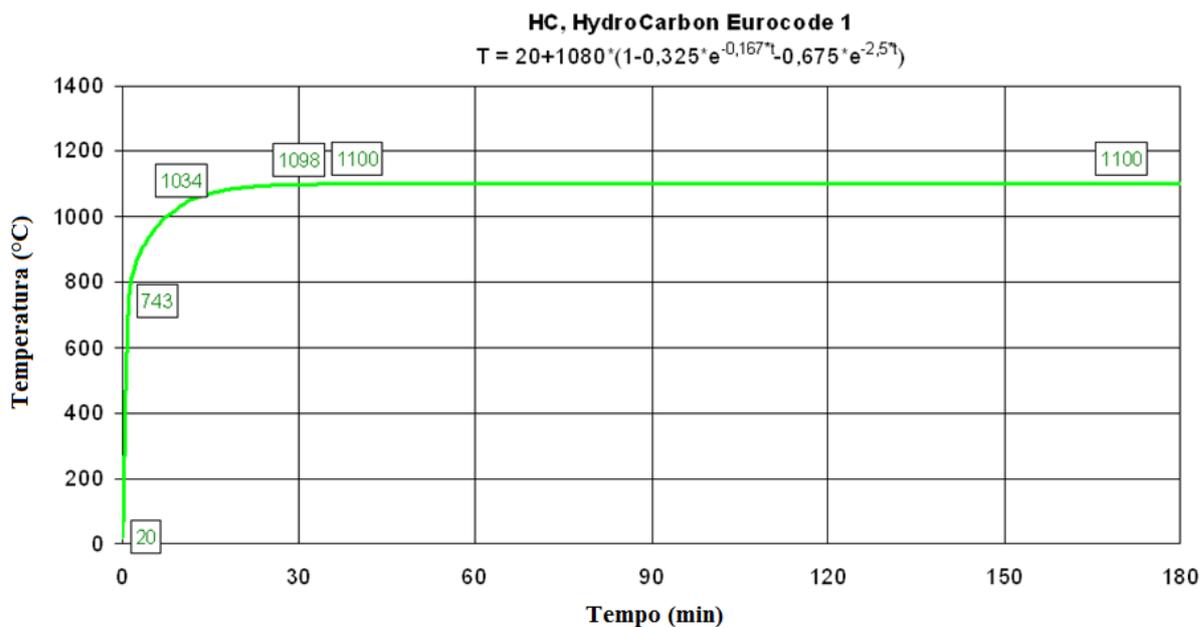


Figura 9: curva de hidrocarbonetos
(adaptado de PROMAT TUNNEL, 2010)

Segundo Velasco (2002, p. 40), apesar de normalmente se verificar um aumento na fragmentação relacionada à elevação da taxa de aquecimento, há exceções. Como exemplo, cita-se o fato de uma maior taxa de aquecimento poder gerar microfissuras em uma coluna de concreto, fato esse que não ocorre para menores taxas. As microfissuras constituem um aumento da área de evaporação, contribuindo no alívio das poro-pressões. A ausência das microfissuras para baixas taxas de aquecimento pode, então, favorecer a ocorrência de deslocamentos. Tal caso foi observado em cilindros, para uma taxa aquecimento de 1°C/min.

4.2 TEOR DE UMIDADE

Trata-se de um dos fatores influentes mais importantes, visto que afeta diretamente a intensidade do mecanismo termo-hidráulico.

O teor de umidade das estruturas é variável com o tempo. Vigas com dois anos de idade possuem aproximadamente 7,5% do volume de concreto em umidade livre, ao passo que, para vigas com sete anos de idade, esse percentual cai para um valor em torno de 3,5%. Esses são os percentuais para as estruturas exclusivamente internas dos edifícios usuais, isto é, áreas em que a umidade pode decrescer com o tempo (LINDGÅRD; HAMMER, 1999 apud COSTA et

al., 2002b, p. [8]). Deve-se atentar, no entanto, para as áreas úmidas dos edifícios (banheiros e cozinhas), onde esses percentuais tendem a ser mais altos. Do mesmo modo, áreas externas às edificações, expostas a chuva, costumam apresentar teores de umidade superiores aos apresentados acima. Segundo Lindgård e Hammer (1999 apud COSTA et al., 2002b, p. [8]), “[...] nas camadas externas, o teor de umidade será sempre maior do que o limite considerado crítico.”. No caso de túneis, Lima (2005, p. 120) salienta que é bastante razoável se encontrar concretos em condição de quase saturação, o que os torna potencialmente mais propensos a ocorrência de lascamentos.

Concretos de resistência convencional somente estarão sujeitos ao *spalling* completo do elemento se o teor de umidade for superior a 2% da massa ou 5% do volume (LIMA, 2005, p. 96). Além disso, para teores de umidade acima de 5% do volume ou acima de 3% do peso, quanto maior for o teor de umidade do concreto, maior será a probabilidade de ocorrência de lascamentos explosivos (trabalho não publicado)¹⁰.

A umidade presente no concreto decresce com o passar do tempo, contudo, com uma velocidade cada vez menor. O teor de umidade do concreto antes do mesmo ser aquecido é um fator muito importante, pois seu valor pouco varia no período de aquecimento de 20°C a 100°C. Mesmo aplicando baixas taxas de aquecimento (1°C/min), somente uma parcela de aproximadamente 3% da água evaporável consegue escapar durante o intervalo de 20 a 100°C (trabalho não publicado)¹¹.

Baseado em pesquisas como as mencionadas acima, segundo Costa et al. (2002b, p. [8]), o Eurocode 2, publicado em 2001, faz algumas exigências para assegurar as estruturas da não ocorrência do *spalling*, estando entre os requisitos, o limite máximo de 3% do teor de umidade livre em concretos normais. Percebe-se que esse valor é semelhante aos apresentados nas pesquisas dessa área.

Conclui-se este tópico informando que, apesar da umidade favorecer a ocorrência de deslocamentos, para baixas temperaturas, ela apresenta um caráter benéfico, retardando o aquecimento do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994 apud LIMA et al., 2004, p. [9]), “Quando exposta ao fogo, a temperatura do concreto não se elevará até que toda a água

¹⁰ Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchhof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

¹¹ Idem.

evaporável tenha sido removida, sendo necessário um considerável calor de vaporização para a conversão de água em vapor.”.

4.3 PERMEABILIDADE

Costa et al. (2002b, p. [9]) afirmam que a adição de partículas ativas ultra-finas tais como sílica-ativa, escória de alto-forno, pozolanas, etc. ao concreto proporciona a este ganhos em termos de resistência e módulo de elasticidade. Em contrapartida, há uma redução da porosidade e da permeabilidade, vista a elevação da compacidade do concreto. Salienta-se que quanto menor a permeabilidade de um concreto, menor a facilidade de liberação da poropressão desenvolvida quando do aquecimento do mesmo e, portanto, maior a probabilidade de ocorrência de fragmentações de origem térmica.

Quanto maior a resistência à compressão, menor o coeficiente de permeabilidade. Portanto, concretos que possuem elevada resistência à compressão, possuem baixos coeficientes de permeabilidade. Concretos com resistências entre 80 e 100 MPa possuem coeficientes da ordem de 10^{-15} a 10^{-16} m/s, enquanto que concretos com resistências entre 30 e 40 MPa, possuem coeficientes da ordem de 10^{-12} a 10^{-13} m/s (trabalho não publicado)¹².

Para permeabilidades superiores a 5×10^{-11} cm², há menores riscos de ocorrência de lascamentos explosivos do concreto. Ressalta-se que, apesar de se conhecerem faixas de valores associados à permeabilidade do concreto, a sua determinação exata é muito difícil. Isso se deve ao fato de ser uma característica complexa, que apresenta interdependência com parâmetros, tais como o teor de umidade e a temperatura (trabalho não publicado)¹³.

De acordo com Alonso et al. (2003 apud LIMA, 2005, p. 74):

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 acréscimo de pressão, pois concretos úmidos apresentam

¹² Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

¹³ Idem.

resistências mais baixas. Ainda, o mesmo poderia estar associado ao fato de que, nesta faixa de temperatura, há o desaparecimento da etringita e a liberação de grande quantidade de água, o que poderia levar a uma redução na capacidade portante.

4.4 PERDA DE MASSA

A figura 10 apresenta curvas do percentual de perda de massa em função da temperatura para pastas de cimento previamente submetidas a diferentes temperaturas (LIMA, 2005, p. 68).

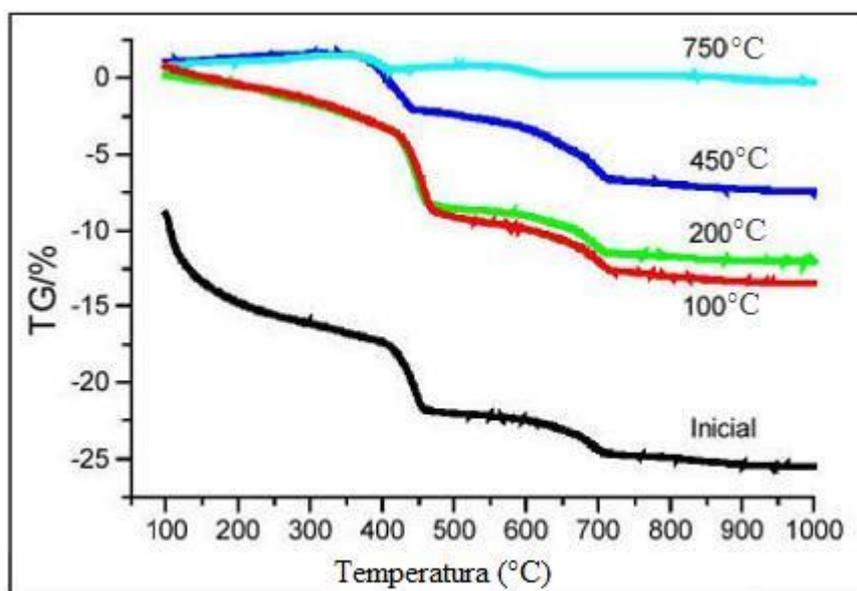


Figura 10: análise termogravimétrica em pastas de cimento (adaptado de CASTELLOTE et al., 2003 apud LIMA, 2005, p. 68)

Segundo Lima (2005, p. 68), relativamente à amostra inicial, que não foi previamente submetida a aquecimento, podem-se fazer os seguintes comentários:

- há uma perda gradual de massa até os 100°C: tal perda pode ser atribuída à evaporação da água presente nos poros;
- percebe-se uma brusca perda de massa aos 400°C, devido à desidratação da portlandita;
- a perda de massa entre 100°C e 400°C pode ser atribuída à progressiva desidratação do C-S-H e de outras fases hidratadas;
- há outra perda de massa acentuada, a 600°C, devido à descarbonatação da calcita.

Segundo Kalifa et al. (2000 apud VELASCO, 2002, p. 36), “[...] para amostras aquecidas a 600°C, a perda total de massa foi maior em concretos de resistência normal (atingindo a 4,5%), do que no CAD [concreto de alto desempenho], cuja perda de massa não atingiu 4%.”. Segundo Velasco (2002, p. 36), isso se deve a maior permeabilidade de concretos normais.

4.5 FIBRAS DE POLIPROPILENO

Inúmeras pesquisas, visando combater o *spalling* em concretos de alta compacidade, têm investigado o uso da adição de fibras de polipropileno. Em relação ao seu comportamento, Fitesa Fiberweb (2004, p. 3) indica que a fusão cristalina das fibras ocorre aos 165°C, com posteriores modificações físicas até os 220°C, quando, então, há acentuada perda de massa. A figura 11 apresenta a análise termogravimétrica das fibras.

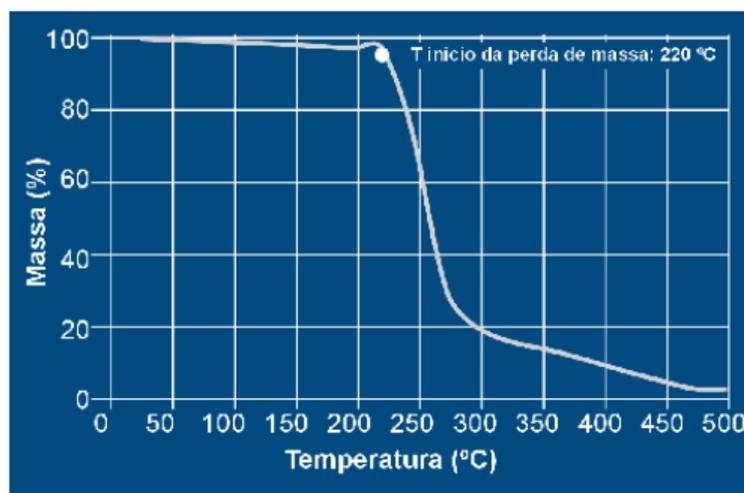


Figura 11: análise termogravimétrica de fibras de polipropileno (FITESA FIBERWEB, 2004, p. 3)

Segundo Kitchen (2001 apud LIMA et al., 2004, p. [7]), “O produto remanescente da combustão ocupa aproximadamente 5% do volume inicial.”. Os espaços deixados pelo derretimento das fibras incrementam os canais permeáveis já existentes além de agregar porosidades inicialmente não comunicáveis. De uma maneira geral, pode-se dizer que a adição de fibras resulta num ganho de permeabilidade caso elementos de concreto venham a ser expostos a elevadas temperaturas.

Um estudo publicado em 2006 constatou que, para as mesmas condições de aquecimento, a permeabilidade de concretos com adição de 1,5 kg/m³ de fibras de polipropileno é, aproximadamente, 3 a 4 vezes maior do que a permeabilidade do concreto sem a adição (trabalho não publicado)¹⁴. Sabe-se que os valores usuais de teores de fibras de polipropileno variam de 1 a 3 kg/m³ de concreto e, portanto, proporcionam ganhos significativos de permeabilidade aos concretos expostos à elevadas temperaturas (FITESA FIBERWEB, 2004, p. 3).

Segundo Caldas (2008, p. 55-56), o Eurocode 2 prescreve os casos em que é necessária a consideração dos efeitos do *spalling*. Para o caso de concretos de alta resistência com teores de sílica ativa superior a 6% em peso, expostos diretamente ao incêndio, dispõe-se de quatro alternativas, sendo uma delas, a utilização de pelo menos 2 kg/m³ de fibras de polipropileno no concreto.

Segundo Castellote et al. (2003 apud LIMA, 2005, p. 100):

[...] algumas evidências têm sugerido que o líquido orgânico formado pelo derretimento [das fibras de polipropileno] pode produzir uma densificação localizada entre 200°C e 300°C, induzindo um efeito contrário, de bloqueio dos poros e aparecimento de microfissuras nas regiões próximas as fibras. Estas microfissuras permitem a redução da poro-pressão e acabam contribuindo para eliminar o risco de *spalling* completo da estrutura, até mesmo, para os concretos de alta resistência. Ainda, nas regiões periféricas das fibras tem sido constatada a ocorrência de fissuras nucleadas, o que indica que a quantidade adicionada deve ser cuidadosamente dosada.

Em relação à influência das fibras de polipropileno na resistência do concreto, ensaios conduzidos por Lima (2004) revelaram ganhos de resistência em CAR. Esses aumentos na resistência à compressão se deram tanto à temperatura ambiente quanto a elevadas temperaturas, como pode ser verificado na figura 12. Para altas temperaturas, Lima (2005) comenta que o derretimento das fibras resulta em um aumento da porosidade do concreto, minimizando os danos causados pela poro-pressão.

Deve-se atentar para o fato de que, apesar de serem raros os deslocamentos ocasionados principalmente pelo mecanismo de tensão térmica, não são impossíveis de acontecer (trabalho

¹⁴ Zeiml et al., 2006, citado no trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

não publicado)¹⁵. Portanto, ressalta-se que a adição de fibras de polipropileno é uma solução que pode evitar a ocorrência do *spalling* caso o principal mecanismo causador do mesmo seja o mecanismo termo-hidráulico. Caso o principal mecanismo causador seja o mecanismo termo-mecânico, a adição de fibras de polipropileno contribuirá para a dissipação da poropressão existente, mas poderá não evitar a ocorrência do fenômeno.

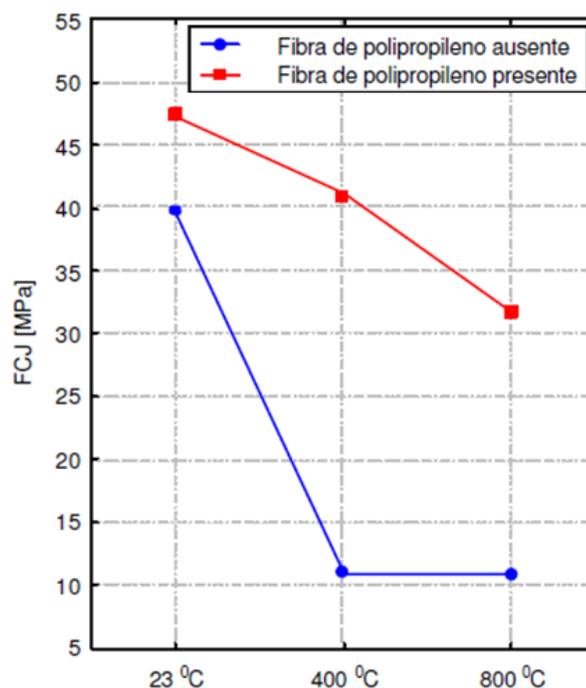


Figura 12: resistência à compressão residual para concretos de alta resistência (LIMA et al., 2004, p. 8).

4.6 DIMENSÕES E FORMA DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A presença de ângulos agudos em elementos estruturais favorece a concentração de tensões, portanto, favorecendo o mecanismo termo-mecânico, aumentando as chances de ocorrência do *spalling*. Sugere-se a utilização de superfícies com os cantos arredondados.

¹⁵ Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

A utilização de seções esbeltas permite que a umidade escape mais facilmente, reduzindo as chances de ocorrência de lascamentos explosivos. Ensaios experimentais sugerem que para elementos robustos (espessuras superiores a 200-300 mm), há menores chances de ocorrência do *spalling* explosivo. Com vistas a essas informações, se pode concluir que os maiores riscos de ocorrência do *spalling* estão para elementos com seções de tamanho **intermediário** (trabalho não publicado)¹⁶.

Segundo Lima (2005, p. 95), quanto maior o número de faces do elemento em contato com o fogo, maior é a probabilidade de ocorrência de deslocamentos. Tipicamente, vigas ficam com 3 faces expostas ao fogo, enquanto que lajes ficam com apenas 1. Portanto, segundo esse parâmetro, vigas são elementos mais propícios a ocorrência de deslocamentos do que lajes.

4.7 TIPO DE AGREGADO

O tipo de agregado presente no concreto também influencia o comportamento desse frente a elevadas temperaturas. Vários parâmetros influem o comportamento dos agregados em temperaturas elevadas, estando entre eles:

- a) o coeficiente de dilatação térmica;
- b) o coeficiente de condução térmica;
- c) a porosidade;
- d) as transformações mineralógicas que ocorrem em função da temperatura.

Em ordem crescente de condutividade térmica, estão: o basalto, o calcário e o quartzo (NEVILLE, 1997 apud COSTA et al., 2002b, p. [3-4]). Como a condutividade térmica é a propriedade térmica que representa a capacidade do material conduzir calor, torna-se uma característica importante, uma vez que ela influencia a distribuição da temperatura no interior do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 151), “Agregados silicosos contendo quartzo (granito e arenito, por exemplo) podem causar danos ao concreto a cerca de 573°C, porque, a essa

¹⁶ Trabalho apresentado para o exame de Qualificação de doutorado na UFRGS, de Larissa Degliuomini Kirchhof, em setembro de 2007, sob o título: Estudo teórico-experimental do comportamento de estruturas de concreto armado expostas a elevadas temperaturas e do uso de medidas protetoras.

temperatura, a transformação do quartzo da forma α em β está associada à expansão súbita da ordem de 0,85%.”. Segundo Bazant e Kaplan (1996 apud VELASCO, 2002, p. 28), “A maioria dos agregados são estáveis até temperaturas de cerca de 500°C. Os agregados de basalto não apresentam mudança de fase em até cerca de 800°C, enquanto que os agregados de calcário decompõem-se quimicamente a temperaturas na faixa de 600-900°C.”. Segundo Rodrigues (1994 apud SILVA, 2009, p. 29), “Entre temperaturas de 300°C e 900°C, os concretos produzidos com agregados calcários apresentam expansão, enquanto que os concretos produzidos com agregados silicosos apresentam uma ligeira contração.”.

Segundo Lima (2005, p. 95):

Embora diversos autores apresentem resultados bastante contraditórios no que se refere a influencia do tipo de agregado no *spalling* completo do elemento, genericamente pode-se concluir que o fenômeno seja menos pronunciado quando o concreto é composto por agregados com baixo coeficiente de dilatação térmica. O risco vai crescendo quando se empregam agregados leves, passando pelos agregados basálticos e calcários, até chegar nos agregados ricos em sílica. Salienta-se que esta ordem somente é válida se os agregados estiverem em condições de umidade semelhantes, uma vez que mesmo os agregados leves estão sujeitos ao *spalling* quando saturados de água.

5 EXPERIMENTOS: PREPARO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Pretende-se, nesse capítulo, apresentar uma ampla visão da parte experimental do trabalho. Esse capítulo contempla uma série de atividades realizadas anteriormente a execução dos ensaios propriamente ditos. As diversas atividades e caracterização dos materiais utilizados serão detalhadas nos itens a seguir.

5.1 AQUISIÇÕES, CONSERTOS E PROJETOS

Nesse item serão abordadas algumas das atividades que foram necessárias ao desenvolvimento do trabalho. A realização dessas atividades se deu anteriormente a realização das concretagens.

A realização da parte experimental começou muito antes da sua execução. Para a execução da parte experimental, primeiramente foram definidos os traços dos concretos, os ensaios a serem realizados e a quantidade de CP por ensaio. Após essa definição, passou-se a etapa seguinte, que consistiu na verificação da disponibilidade de materiais. Pesquisou-se fornecedores e fez-se o levantamento de orçamentos para a aquisição de cimento, sílica ativa, chapas de aço, cantoneiras, fechos, etc. Posteriormente a definição dos melhores orçamentos, foram realizadas as compras e buscas dos materiais.

Equipamentos necessários a essa pesquisa que se encontravam em estado deteriorado tiveram que ser consertados. Foram feitos remendos na caixa d'água. Também se optou pela substituição completa da base de suporte dos CP, necessária para a operação da serra circular. Apresenta-se a seguir as figuras 13 e 14, da caixa d'água e serra circular, respectivamente.

Além disso, projetou-se, em conjunto com o técnico Edgar Wallace Pereira Lucas, uma caixa metálica para proteger o forno de possíveis lascamentos dos CP que pudessem danificá-lo. Pode-se ver na figura 15 uma foto da caixa metálica.



Figura 13: caixa d'água



Figura 14: serra circular



Figura 15: caixa metálica

5.2 MATERIAIS

Nesse item serão apresentados os materiais utilizados nas concretagens necessárias à execução desse trabalho.

5.2.1 Cimento

O cimento utilizado na produção dos CP de concreto foi do tipo Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), da marca Cauê. As propriedades e características do cimento foram obtidas no site do fabricante e encontram-se dispostas no quadro 3.

	Análise do Cimento	Exigências de Norma	Norma
Resistência à Compressão [MPa]			
1 dia	28	≥ 14	NBR 5733/91
3 dias	39	≥ 24	NBR 5733/91
7 dias	44	≥ 34	NBR 5733/91
28 dias	51	-	NBR 5733/91
Tempo de Pega			
Início [min]	160	≥ 60	NBR 5733/91
Fim [min]	270	≤ 600	NBR 5733/91
Finura			
Blaine [cm ² /g]	5100	≥ 3000	NM 76/96

Quadro 3: propriedades do cimento utilizado na pesquisa (adaptado de CAUÊ CIMENTOS SA, 2011).

5.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo disponibilizado pela UFRGS para a realização desse trabalho é proveniente da região metropolitana de Porto Alegre/RS. O mesmo foi classificado como um misto entre basalto e arenito. Para a execução desse trabalho, foi feita a separação, retirando-se a quase totalidade dos agregados de arenito, manualmente, de modo que as concretagens fossem realizadas com agregados graúdos basálticos. A decisão de remover o agregado arenítico foi tomada com base na resistência pretendida nesse trabalho. Visto que o arenito apresentava baixa resistência e que se pretendia moldar concretos de alta resistência, o seu uso seria impróprio. As caracterizações do material misto e do utilizado encontram-se nos quadros

4 e 5, respectivamente, tendo sido realizadas conforme as prescrições das normas NBR NM 248¹⁷ e NBR NM 53¹⁸.

	Abertura da Malha [mm]	% Retido	% Retido Acumulado
Granulometria	19,1	2	2
	12,5	56	58
	9,52	26	84
	6,3	11	95
	4,76	2	97
	2,36	1	98
	< 2,36	1	100
Dimensão Máxima Característica [mm]			19,1
Módulo de Finura			6,74
Massa específica [g/cm ³]			2,74

Quadro 4: caracterização do agregado graúdo misto

	Abertura da Malha [mm]	% Retido	% Retido Acumulado
Granulometria	19,1	3	3
	12,5	56	59
	9,52	31	90
	6,3	10	99
	4,76	1	100
	2,36	0	100
	< 2,36	0	100
Dimensão Máxima Característica [mm]			19,1
Módulo de Finura			6,93
Massa específica [g/cm ³]			2,85

Quadro 5: caracterização do agregado graúdo utilizado

Apresenta-se no quadro 6 a proporção de arenito e basalto do agregado graúdo original, sem a remoção do arenito.

¹⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

¹⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

Rocha	Proporção
Arenito	10,97%
Basalto	89,03%

Quadro 6: proporção de arenito e basalto no estado original do agregado graúdo

Estima-se que tenham sido **retirados manualmente 17 mil** fragmentos de arenito para que as concretagens fossem realizadas com agregado basáltico. Apesar do esforço e do trabalho para retirar essa enorme quantidade de fragmentos, é provável que alguns tenham permanecido, dada a dificuldade de realização da seleção dessa quantidade de material. Estima-se que se tenha atingido uma pureza de 99% do material. A figura 16 ilustra o processo.



Figura 16: remoção dos arenitos

5.2.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média a fina, também proveniente da região metropolitana de Porto Alegre/RS. A caracterização desse material se deu segundo as prescrições das normas NBR NM 248¹⁹ e NBR NM 52²⁰ e encontra-se no quadro 7.

¹⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

²⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

	Abertura da Malha [mm]	% Retido	% Retido Acumulado
Granulometria	6,3	0	0
	4,76	0	0
	2,36	4	4
	1,18	10	14
	0,59	30	44
	0,297	45	89
	0,149	0	89
	< 0,149	11	100
Dimensão Máxima Característica [mm]			2,36
Módulo de Finura			2,40
Massa Específica [g/cm ³]			2,53

Quadro 7: caracterização do agregado miúdo

5.2.4 Sílica Ativa

Optou-se pela utilização da sílica ativa nas concretagens para obtenção de concretos de maior resistência. Segundo Mehta e Monteiro (2008), isso se deve ao fato de que as partículas desse material possuem dimensões inferiores as do cimento, preenchendo os vazios do concreto. Além disso, esse material possui caráter pozolânico, promovendo reações que aumentam a resistência e compacidade do concreto.

A sílica ativa utilizada nessa pesquisa foi da marca Silmix. Suas características foram obtidas no site do fornecedor e encontram-se dispostas no quadro 8.

Características Físicas e Químicas	
Massa Específica [kg/m ³]	2200
Superfície Específica [m ² /kg]	20000
Formato de Partícula	esférico
Diâmetro Médio [µm]	0,2
Teor de SiO ₂	mín. 85%
Umidade	Máx. 3%
Equivalente Alcalino	Máx. 0,5%

Quadro 8: caracterização da sílica ativa
(adaptado de IMPERCIA ATACADISTA LTDA, 2011).

5.2.5 Fibras de Polipropileno

As fibras utilizadas em alguns dos traços das concretagens foram adquiridas da empresa Fitesa Fibras e Filamentos Ltda. As características das fibras foram obtidas na embalagem do material, sendo apresentadas no quadro 9. Também é apresentado, na figura 17, uma foto de alguns feixes de fibras ao lado de uma caneta da marca BIC.

Características	
Tipo	100% polipropileno
Diâmetro	18 microns
Comprimento	12 mm
Área Superficial Específica	> 225 m ² /kg
Frequência das Fibras	300 milhões/kg

Quadro 9: caracterização das fibras de polipropileno²¹



Figura 17: feixes de fibras de polipropileno ao lado de uma caneta da marca BIC

²¹ As informações foram obtidas em uma embalagem antiga do material. Atualmente, a empresa não produz mais esse material. A empresa Fitesa Fibras e Filamentos Ltda situa-se em Gravataí/RS. Possivelmente essa empresa tenha mudado de nome, passando a se chamar Fitesa Fiberweb, cujo endereço eletrônico é www.fitesa.com.br

5.2.6 Água

A água utilizada nas concretagens foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Porto Alegre/RS.

5.2.7 Aditivo Superplastificante

Utilizou-se nessa pesquisa o aditivo da marca Glenium 54. Trata-se de um aditivo superplastificante de terceira geração. As características do produto foram obtidas no site do fabricante e encontram-se no quadro 10.

Características	
Base Química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo
pH	5 - 7
Densidade [g/cm ³]	1,067 - 1,107
Sólidos	38% - 42%
Viscosidade [cps]	< 150

Quadro 10: caracterização do aditivo superplastificante (adaptado de GOUVEIA, 2011).

5.3 TRAÇO

Por limitações de tempo, verba e materiais, optou-se pela adoção de um traço de referência. O traço de referência desse trabalho foi um dos traços utilizados na tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchof²². Apresenta-se no quadro 11 os traços utilizados nas concretagens desse trabalho.

²² Tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchof defendida em 2010, mas ainda não disponibilizada.

Traço	Proporção Cimento	Proporção Areia	Proporção Brita	Proporção Sílica Ativa	Relação Água/Agl	% Aditivo	Fibras [kg/m ³]
100	1	1,21	2,19	10%	0,25	0,8	-
200	1	1,21	2,19	10%	0,25	0,8	-
400	1	1,21	2,19	10%	0,25	0,8	-
500	1	1,21	2,19	10%	0,25	0,8	-
600	1	1,21	2,19	10%	0,25	1%	1,5
700	1	1,21	2,19	10%	0,25	1%	2

Quadro 11: traços utilizados nessa pesquisa

Percebe-se do quadro 10 que os traços das concretagens 100, 200, 400 e 500 são os mesmos. Isso se deve ao grande número de CP necessários aos ensaios. Devido as limitações de capacidade de produção de CP por betonada, foram feitas 4 concretagens. Nas concretagens de número 600 e 700 foram incorporados diferentes teores de fibras de polipropileno a fim de verificar a eficácia dessa medida preventiva na ocorrência do *spalling*. A concretagem de número 100 não foi considerada nesse trabalho, devido a problemas de adensamento e planicidade dos CP. Nenhuma concretagem foi denominada pelo número 300.

5.4 EXECUÇÃO DAS CONCRETAGENS

A mistura dos materiais se deu em uma betoneira de eixo inclinado, de acordo com a seguinte disposição:

- a) 100% do agregado graúdo;
- b) 60% da água;
- c) 100% do cimento;
- d) restante da água;
- e) 100% da sílica ativa;
- f) 100% do aditivo superplastificante;
- g) 100% do agregado miúdo;
- h) 100% das fibras de polipropileno (quando presente no traço).

Posteriormente a adição do superplastificante, a mistura era agitada por 2 minutos. Após a adição de todos os materiais, a mistura era agitada por mais 4 minutos. Em seguida, era feito o

slump test para determinação da consistência do concreto, conforme a norma NBR NM 67²³. Apresenta-se, no quadro 12, os valores obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone para as diferentes concretagens.

Concretagem	Abatimento [mm]
100	175
200	212
400	176
500	195
600	190
700	130

Quadro 12: consistência dos concretos

Após a mistura, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 95 x 190 mm. As quantidades de corpos-de-prova moldados em cada concretagem encontram-se no quadro 13. O adensamento dos CP foi realizado por meio de uma mesa vibratória, apresentada na figura 18.

Concretagem	Número de CP
100	42
200	42
400	27
500	24
600	21
700	23

Quadro 13: número de CP por concretagem

²³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.



Figura 18: mesa vibratória

5.5 CURA E IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Vinte e quatro horas após as concretagens, os CP eram desmoldados, identificados e guardados imersos num reservatório cheio de água saturada de cal. A figura 19 mostra os CP armazenados no reservatório.



Figura 19: cura dos CP no reservatório

A identificação dos corpos-de-prova foi feita com pincel atômico, registrando-se três números em sequência. O primeiro referia-se ao número da concretagem, registrando-se o número 2 para a concretagem 200, 4 para a concretagem 400 e assim sucessivamente. Os dois números

seguintes eram referentes à identificação do CP dentro da mesma concretagem, começando-se pelo 01 e continuando em ordem crescente. Deste modo, o 15º CP da concretagem 700 a ser registrado foi identificado como 715.

5.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA OS ENSAIOS

A preparação dos corpos-de-prova para os ensaios pode ser dividida em três etapas, conforme o diagrama da figura 20.

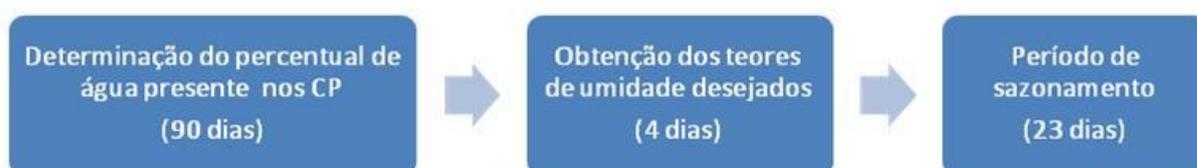


Figura 20: diagrama das etapas da preparação dos CP

5.6.1 Determinação do Percentual de Água Presente nos CP

Após os 28 dias de cura, iniciou-se o processo de determinação da massa total de água presente nos CP das diferentes concretagens. 3 CP da concretagem 200 foram retirados do reservatório, foi passado um pano em sua superfície para a retirada do excesso de água, e foram imediatamente pesados para registrar sua massa saturada, no estado saturado com superfície seca. Para tanto, utilizou-se uma balança com precisão de 0,1g, conforme a figura 21. Em seguida, foram levados a estufa a 90°C, onde ficaram armazenados para secagem. A figura 22 mostra os CP armazenados na estufa para secagem. A perda de massa dos CP foi monitorada ao longo do tempo, descrevendo uma curva de perda de massa em função do tempo. Essa etapa de secagem durou aproximadamente 3 meses, obtendo-se a quase constância de massa dos corpos-de-prova. O mesmo procedimento foi realizado para as concretagens 600 e 700, com 3 CP de cada. Das concretagens 400 e 500, retirou-se 1 CP de cada, apenas para confirmar a igualdade com a concretagem 200.



Figura 21: pesagem dos CP



Figura 22: secagem em estufa

Uma vez determinado o percentual de massa de água em relação à massa total do CP, conforme a fórmula 4, determinou-se tal percentual para concretagens afins como a média dos valores encontrados para os CP:

$$P = 100 \times \left(\frac{(P_u - P_s)}{P_u} \right) \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

P = percentual de massa de água presente na massa saturada de um CP (%)

P_u = massa saturada (g)

P_s = massa seca (g)

5.6.2 Obtenção dos Teores de Umidade Desejados

A etapa seguinte consistiu na pesagem dos demais corpos-de-prova na condição saturada com superfície seca. Em seguida iniciou-se o processo de secagem em estufa a 90°C até que os CP atingissem o teor de umidade desejado.

Uma vez atingido o teor de umidade especificado, os corpos-de-prova eram colocados para resfriar ao ar livre e, após isso, ensacados em embalagens metálicas, as quais podem ser vistas na figura 23. O fechamento dessas embalagens se deu através de um zíper originalmente constante nas mesmas. Essa etapa teve uma duração média de 4 dias.

Nesse trabalho, foram especificados três teores de umidade:

- a) 100%;
- b) 90%;
- c) 75%.

Os teores de 75% e 90% foram obtidos mediante o processo de secagem em estufa anteriormente descrito. Os CP cujo teor foi especificado em 100% permaneceram imersos no reservatório com água e cal até o dia do ensaio.

A escolha dos teores de umidade foi baseada nos resultados obtidos na tese de doutorado de Larissa Kirchhof²⁴.

²⁴ Tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchhof defendida em 2010, mas ainda não disponibilizada.



Figura 23: CP ensacado em embalagem metálica

5.6.3 Período de Sazonamento

A última etapa da preparação dos corpos-de-prova para os ensaios começou com o ensacamento dos CP nas embalagens metálicas. A função da embalagem metálica é isolar o CP do contato com o meio externo, evitando trocas de umidade.

Para o período de sazonalidade, os CP foram armazenados em uma câmara climatizada, programada para manter a temperatura a 23°C e a umidade relativa em 75%. Esse período tinha por objetivo homogeneizar a umidade do interior do CP. Para a obtenção do teor de umidade desejado, o mesmo foi seco em estufa, gerando uma desigualdade na distribuição da umidade no interior do CP. Visando amenizar essa disparidade entre o centro mais úmido e a superfície mais seca, estabeleceu-se um tempo médio de 23 dias. Apresenta-se na figura 24 uma foto da câmara climatizada.



Figura 24: CP armazenados na câmara climatizada

5.7 ENSAIOS

Esse item se destina a apresentar os tipos de ensaios realizados, os equipamentos utilizados e os tipos de dados coletados.

5.7.1 Aquecimento no Forno

O aquecimento dos CP no forno é o ensaio mais importante, visto que todas as etapas de preparação dos corpos-de-prova se destinavam a modificar o comportamento dos mesmos quando expostos a esse ensaio. Através desse ensaio se pretendeu fazer a verificação da ocorrência e da intensidade do *spalling*, além de ser uma etapa necessária aos demais ensaios.

No dia do ensaio, antes da exposição dos CP a elevadas temperaturas, os mesmos eram retirados da câmara climatizada e das embalagens metálicas. Em seguida, procedia-se a verificação dos seus pesos em uma balança com precisão de 0,1g, conforme já apresentado na figura 21. Após isso, os mesmos eram dispostos no interior do forno e sua posição era registrada. Esse registro da posição era necessário, pois as identificações dos CP desapareciam com a exposição a elevadas temperaturas. Pode-se ver, na figura 25, um exemplo do esquema de registro da posição.

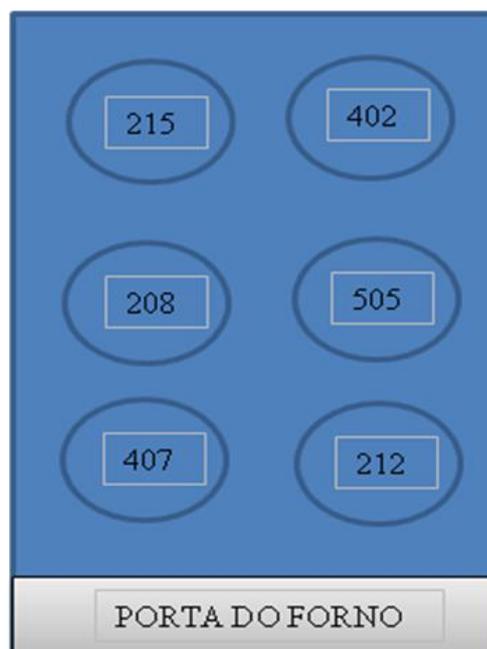


Figura 25: registro da posição dos CP no forno

Dentro do forno, os CP eram colocados sobre pedaços de tijolo para elevação dos mesmos. Esse procedimento foi adotado para também permitir o aquecimento da superfície inferior dos corpos-de-prova, visto que a base do forno era feito de material mal condutor de calor. Além disso, o fato do mesmo se encontrar em contato com a base do forno impediria o aquecimento dessa região por transferência direta de calor com o ar. A figura 26 mostra os CP dispostos no forno sobre pequenos pedaços de tijolo.



Figura 26: CP dentro do forno sobre pequenos pedaços de tijolo

Uma vez que todos os corpos-de-prova encontravam-se no interior do forno, dava-se início ao processo de aquecimento. Para tanto, utilizou-se um forno elétrico da marca Sanchis, com capacidade de aquecimento até 1050°C. O mesmo pode ser visualizado na figura 27.



Figura 27: forno elétrico utilizado nessa pesquisa

A temperatura no interior do forno foi monitorada por um termopar pertencente ao próprio forno. Com base na temperatura e, utilizando-se um cronômetro, registrou-se a curva de aquecimento real do forno, e o tempo e a temperatura de ocorrência dos deslocamentos. O registro da curva de aquecimento e possíveis deslocamentos foi feito durante 1 hora, para cada ensaio, mediante observações presenciais.

Foram feitos ensaios com três diferentes patamares máximos de temperatura, sendo eles:

- a) 400°C;
- b) 500°C;
- c) 600°C.

A escolha dos patamares máximos de temperatura foi baseada nos resultados obtidos nas teses de doutorado de Lima (2005) e Larissa Kirchof²⁵.

²⁵ Tese de doutorado de Larissa Degliuomini Kirchof defendida em 2010, mas ainda não disponibilizada.

Para esses três patamares, utilizou-se uma taxa de aquecimento de 27,4°C por minuto, que é a taxa média de aquecimento dos primeiros 30 minutos da curva ISO 834²⁶, e que vem sendo utilizada por alguns pesquisadores. Para a temperatura de 600°C, também foram ensaiados CP com a máxima taxa de aquecimento que o forno elétrico era capaz de produzir. Essa taxa de aquecimento encontrava-se em torno dos 45°C por minuto.

Uma vez atingido o patamar máximo de temperatura, mantinha-se os CP a essa temperatura por um período de 2 horas, para garantir que a região central dos CP também houvesse sido exposta a mesma temperatura que a superfície. Posteriormente, os mesmos eram resfriados naturalmente durante a madrugada, para que se pudesse fazer as demais análises e ensaios no decorrer do dia.

Na manhã do dia seguinte ao aquecimento dos CP, começava-se o conjunto de ensaios. A primeira tarefa a ser realizada era a identificação dos corpos-de-prova com um pincel atômico, baseado no registro da posição feito antes do aquecimento. Posteriormente, realizava-se o registro da cor e textura, e pesagem dos mesmos. Após isso, realizava-se a identificação dos deslocamentos. Marcava-se o contorno dos mesmos com um pincel atômico e obtinha-se fotos para registro.

A classificação dos deslocamentos era feita de maneira visual, bem como a análise da cor e textura. A figura 28 mostra um CP em que ocorreram alguns deslocamentos.

Posteriormente a retirada de todos os corpos-de-prova do forno era feita a catalogação dos fragmentos no interior do forno. O registro da massa e posição dos fragmentos visou permitir uma análise mais profunda da perda de massa em função do aquecimento. A figura 29 mostra um exemplo desse registro.

Apresenta-se na figura 30 um diagrama dos ensaios realizados no forno.

²⁶ Trata-se da norma ISO 834: *Fire Resistance Test – Elements of Building Construction*.



Figura 28: CP com ocorrência de *spalling*

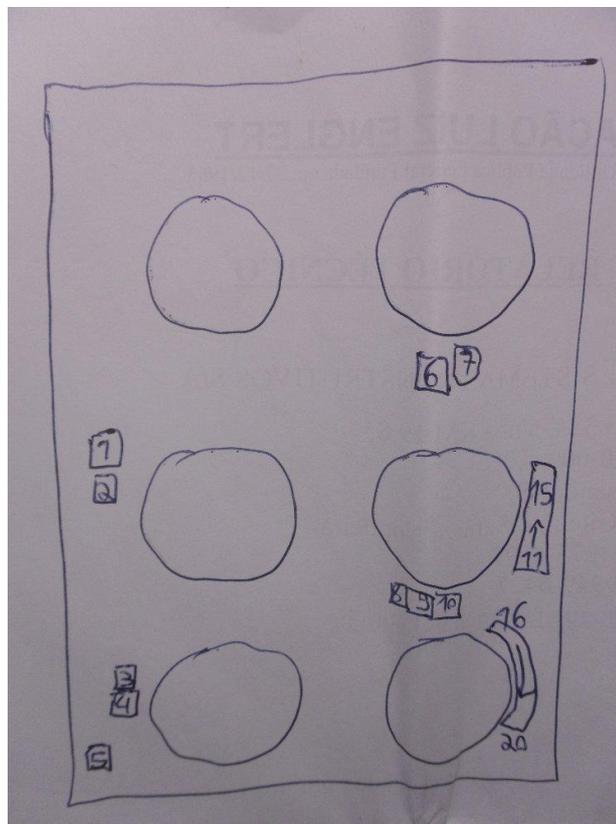


Figura 29: registro dos fragmentos

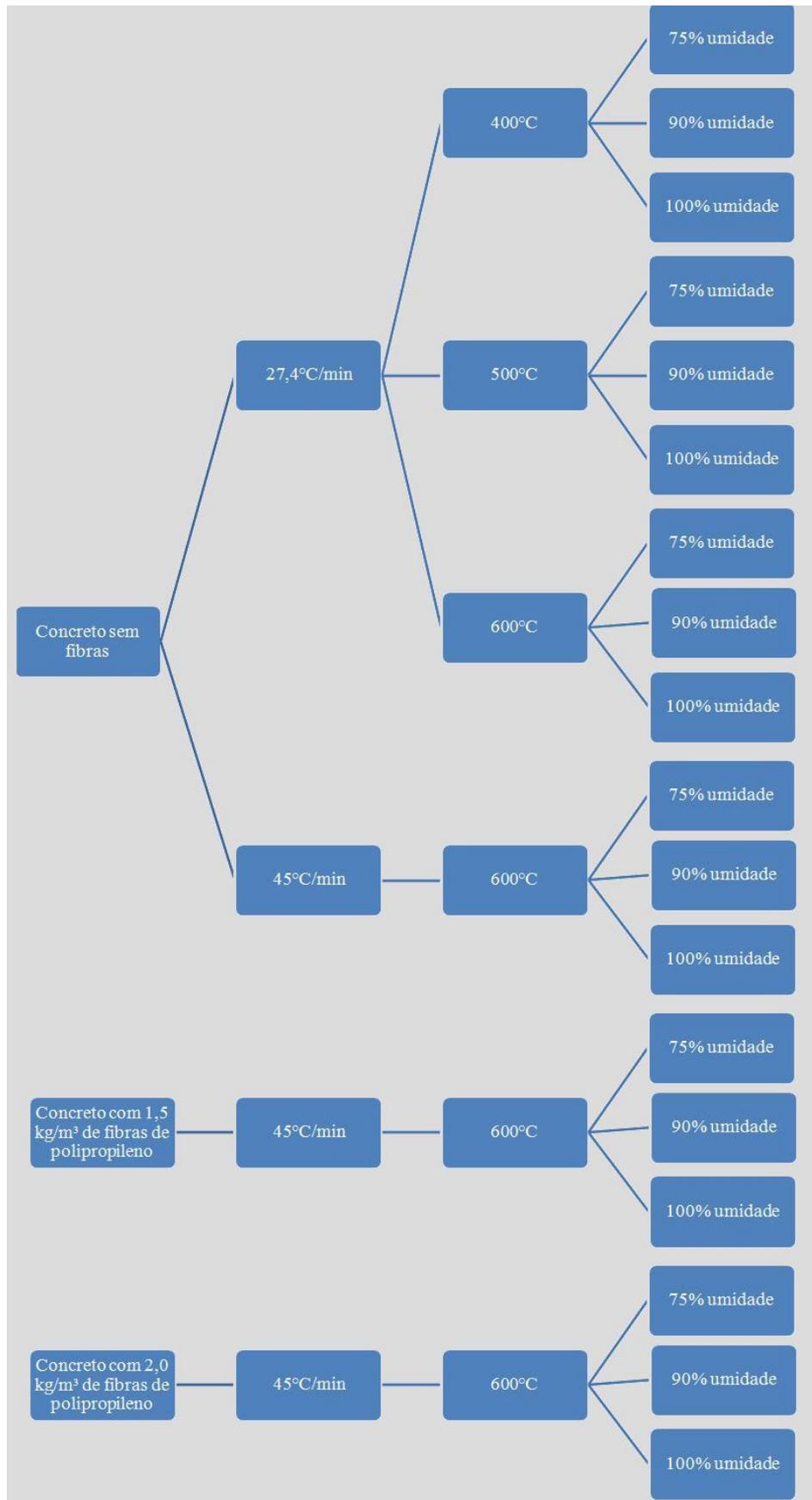


Figura 30: diagrama dos ensaios realizados no forno

5.7.2 Resistência à Compressão

Esse ensaio teve por objetivo determinar as curvas de resistência à compressão dos diferentes concretos em função da idade. Antes da realização do ensaio propriamente dito, era necessária a realização do capeamento dos mesmos, para regularização das superfícies. O capeamento foi feito com uma mistura de enxofre e caulim, na proporção 6:1. A figura 31 mostra o caldeirão e os gabaritos utilizados na realização do capeamento. Posteriormente à realização do capeamento era verificado o nível do mesmo para conferência da horizontalidade, conforme a figura 32.



Figura 31: caldeirão e gabaritos para realização do capeamento



Figura 32: verificação da horizontalidade do capeamento

Finalmente, após todos os processos de preparação dos corpos-de-prova, os mesmos foram ensaiados à compressão, conforme a NBR 5739²⁷. A figura 33 mostra a execução do ensaio de determinação da resistência à compressão.



Figura 33: ensaio de resistência à compressão

²⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo serão abordados os resultados obtidos e feitas considerações sobre os mesmos.

6.1 Tratamento de Dados Espúrios

Previamente à avaliação do comportamento observado nos ensaios, foi necessário um tratamento dos dados. O descarte de dados espúrios foi realizado segundo o método descrito no trabalho de doutorado de Lima (2005, p. 133):

a) critério 1: os dados numéricos coletados foram considerados **suspeitos** quando o valor absoluto da variável de resposta subtraído da média de suas repetições era maior que o desvio padrão;

b) critério 2: uma vez identificados os valores suspeitos, foram calculados as novas médias e os novos desvios padrões dos grupos sem considerar estes valores suspeitos. A seguir, procedeu-se novamente a subtração da variável de resposta suspeita pela nova média calculada, sendo classificado como **valor espúrio** o resultado cujo valor absoluto ultrapassasse duas vezes o novo desvio padrão.

Adicionalmente, considerou-se uma margem mínima de 5% de afastamento em relação à nova média do critério 2.

6.2 Resistência à Compressão

Apresenta-se, nesse item, as curvas de resistência à compressão em função da idade para os concretos utilizados nessa pesquisa. As curvas apresentadas nas figuras a seguir foram formadas pelo ensaio de, pelo menos, 3 CP em cada uma das idades de interesse constantes na curva. A figura 34 apresenta a curva de resistência para o concreto sem fibras, formado pelo conjunto das concretagens 200, 400 e 500, visto que o traço era o mesmo e que as resistências obtidas para as concretagens individualmente foram próximas.

A figura 35 apresenta a curva de resistência para a concretagem 600, que possui adição de 1,5 kg/m³ de fibras de polipropileno. Por sua vez, a figura 36 apresenta a curva de resistência para a concretagem 700, que possui adição de 2,0 kg/m³ de fibras de polipropileno.

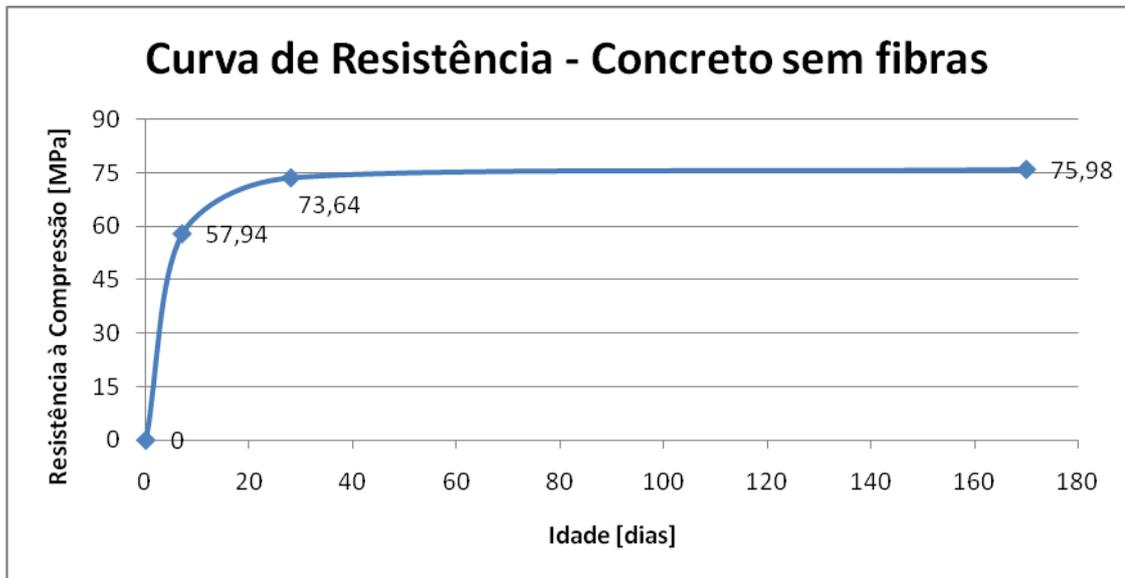


Figura 34: curva de resistência – concreto sem fibras

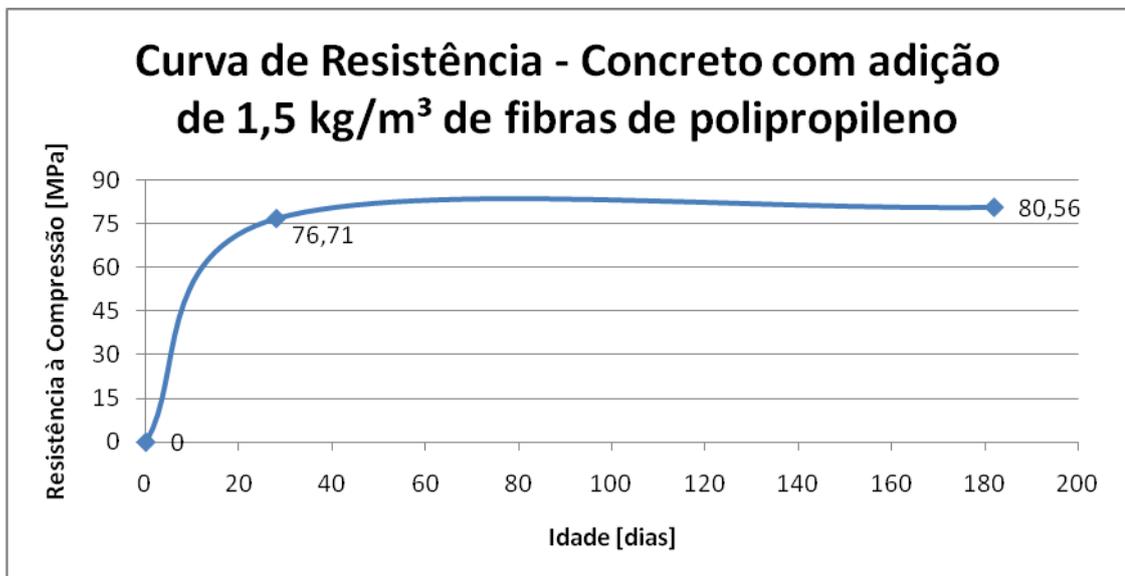


Figura 35: curva de resistência – concreto com adição de 1,5 kg/m³ de fibras de polipropileno

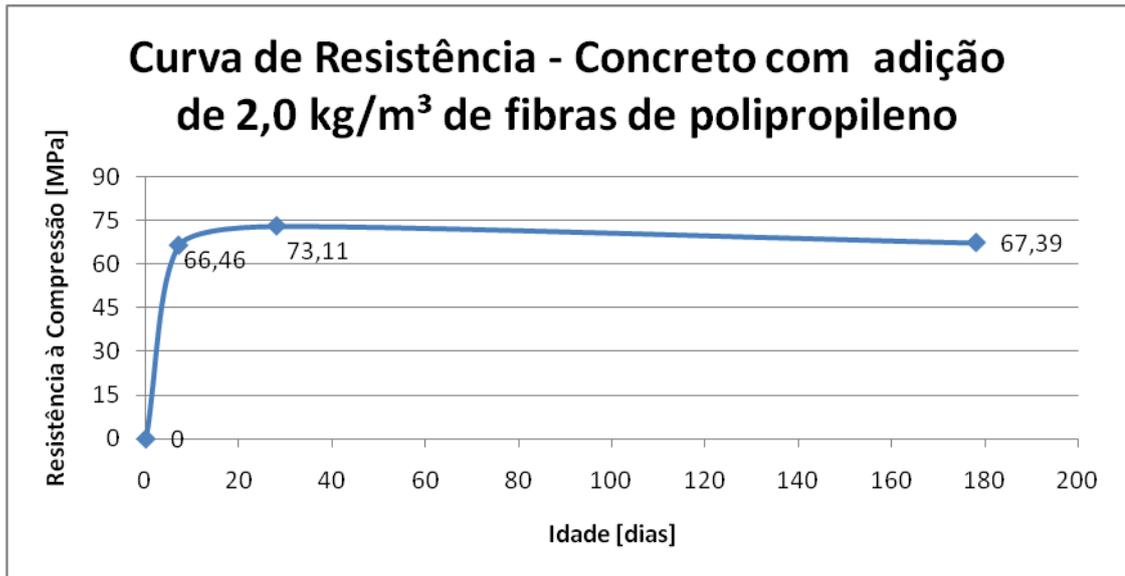


Figura 36: curva de resistência – concreto com adição de 2,0 kg/m³ de fibras de polipropileno

6.3 Spalling

Nesse item serão apresentados os resultados dos ensaios de exposição a elevadas temperaturas e os critérios de valoração dos deslocamentos ocorridos.

6.3.1 Valoração dos Deslocamentos

Para que se pudesse fazer uma análise mais profunda dos deslocamentos ocorridos, estabeleceu-se alguns critérios de valoração dos mesmos. Isso permitiu fazer uma análise comparativa dos deslocamentos ocorridos em termos de volume de concreto deslocado. A figura 37 apresenta exemplos, cujos volumes de concreto deslocados foram avaliados como grande, médio e pequeno tamanho. Ressalta-se que essa avaliação dos deslocamentos foi feita de maneira visual, sem o real cálculo dos volumes de concreto desprendidos. Atribuiu-se os seguintes pesos de ponderação em função do volume de concreto:

- a) Pequeno = 1
- b) Médio = 2
- c) Grande = 3



Figura 37: volumes de concreto deslocados avaliados como grande [A], médio [B] e pequeno [C]

O índice de deslocamentos guarda uma relação direta com o volume de concreto deslocado, sendo tanto maior o índice quanto maior for o volume deslocado. O índice de deslocamentos foi calculado pela fórmula 5:

$$Q = \sum_{i=1}^n D_i \times V_i \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

Q = índice de deslocamentos

D_i = deslocamento avaliado para o elemento i

V_i = peso de ponderação atribuído ao deslocamento avaliado para o elemento i

6.3.2 Resultados dos Ensaios

De posse dos dados obtidos nos ensaios, elaborou-se uma série de gráficos para facilitar as análises, os quais serão apresentados e comentados a seguir. Ressalta-se novamente que cada ensaio foi constituído por uma amostra de 6 CP.

6.3.2.1 Concreto sem Fibras

As análises e gráficos desse item foram feitos com base nos resultados dos ensaios dos CP das concretagens 200, 400 e 500. Os concretos sem adição de fibras de polipropileno foram ensaiados com duas taxas de aquecimento, sendo apresentados os resultados nos próximos itens.

6.3.2.1.1 Concreto sem Fibras - Taxa de Aquecimento de 27,4°C/min

A taxa de aquecimento utilizada nesses ensaios foi de **27,4°C/min**. Apresenta-se na figura 38 o percentual de CP com ocorrência de *spalling*, dando-se destaque a influência da temperatura na ocorrência do fenômeno.

Percebe-se da figura 38 que não ocorreram deslocamentos para a temperatura de 400°C. Com o aumento da temperatura máxima de exposição para 500°C, ocorreram deslocamentos para CP com um dos teores ensaiados e, para a temperatura de 600°C, ocorreram deslocamentos em todos os ensaios. Percebe-se que o aumento da temperatura máxima de exposição favorece a ocorrência do fenômeno. Em relação aos ensaios conduzidos na temperatura de 600°C, percebe-se que ocorreram deslocamentos em um maior número de CP para o teor de umidade de 90%.

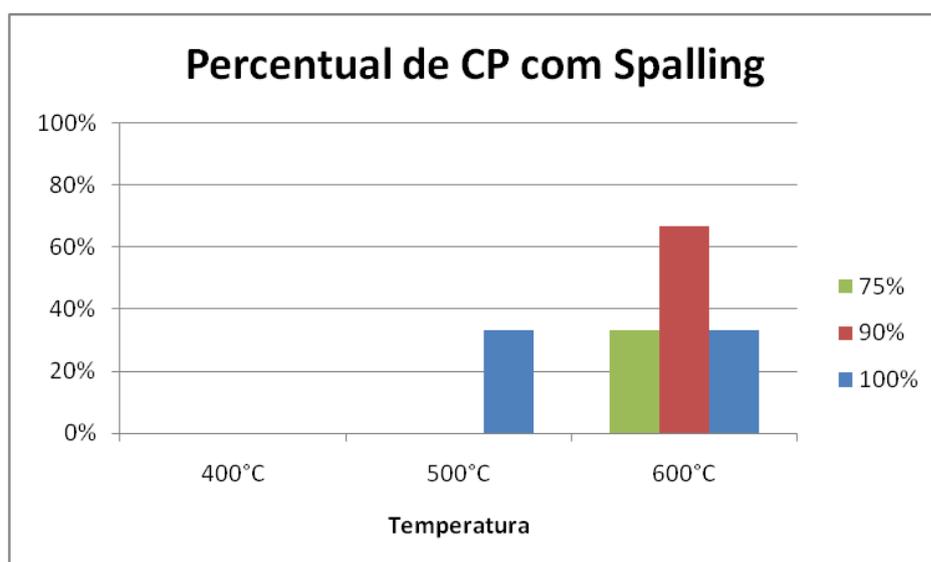


Figura 38: percentual de CP ensaiados com ocorrência de *spalling*

A figura 39 apresenta uma análise do fenômeno por outro critério [número de deslocamentos]. Essa análise é de grande importância, visto que revela a quantidade de ocorrências do fenômeno. Dessa figura, pode-se perceber diferenças anteriormente mascaradas pela igual quantidade de CP com ocorrência do fenômeno.

Primeiramente, percebe-se que a quantidade de deslocamentos ocorridos para uma temperatura de exposição de 600°C e teor de umidade de 90% é ainda maior do que para as demais condições de ensaio. Em relação aos deslocamentos ocorridos para o teor de umidade de 100%, percebe-se uma maior ocorrência de lascamentos na temperatura de 600°C. Isso evidencia que, apesar do igual número de CP com *spalling* para as temperaturas de 500°C e 600°C, houve um maior número de ocorrências para a temperatura de 600°C.

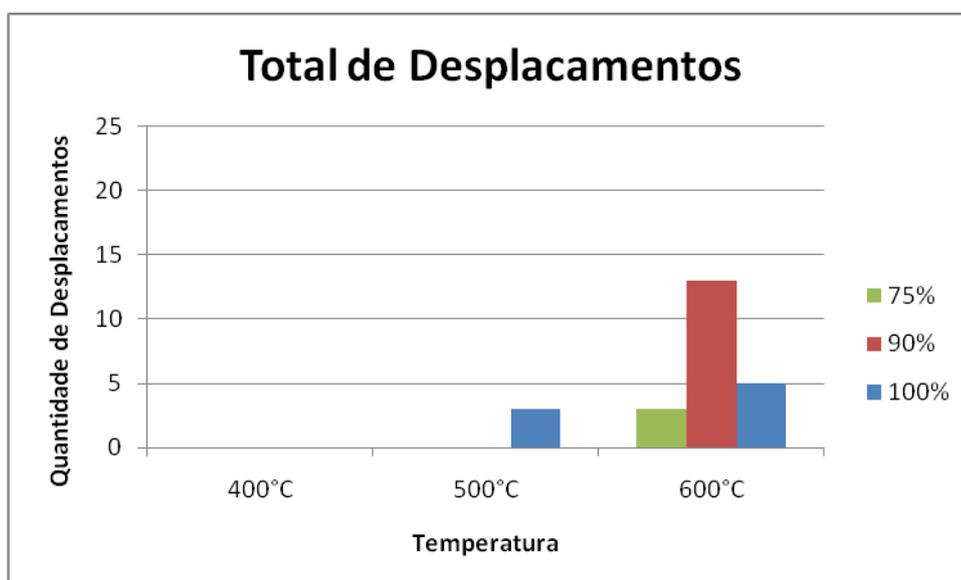


Figura 39: total de deslocamentos

Complementando as análises, apresenta-se na figura 40 o índice de deslocamentos. Essa análise é fundamental no estudo do fenômeno, visto que permite saber qual a condição de exposição que causou mais danos efetivos nos CP. Analisando essa figura, percebe-se que aumenta a diferença entre os danos ocorridos para o teor de umidade de 100% a 500°C e 600°C. A partir dessa figura, também se percebe que, apesar do igual número de CP com *spalling* e da igual quantidade de deslocamentos ocorridos para as condições de 600° com 75% de teor de umidade, e 500°C com 100% de teor de umidade, houve o deslocamento de um maior volume de concreto para a condição de 600°C com 75% de teor de umidade.

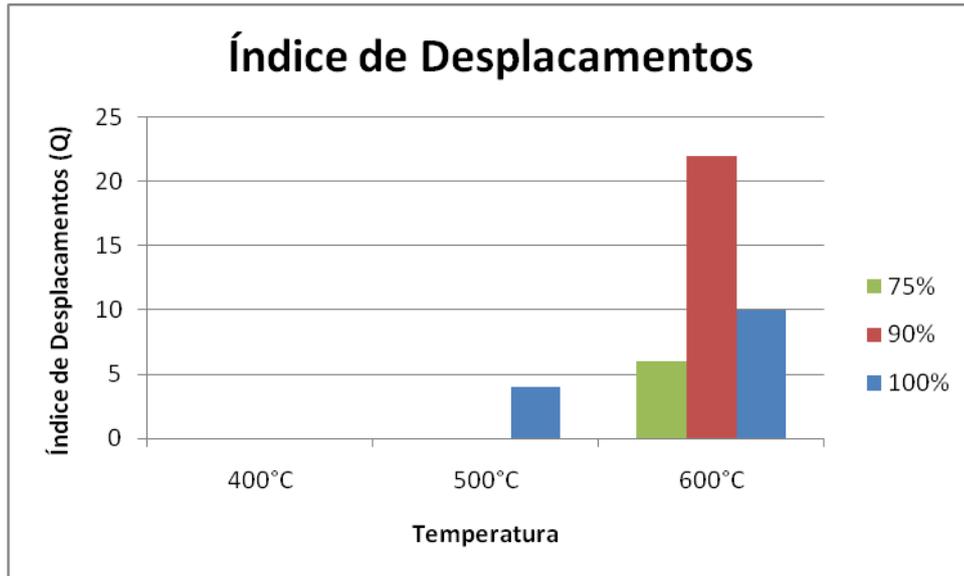


Figura 40: índice de deslocamentos

As três próximas figuras, 41, 42 e 43, apresentam os mesmos dados, dando enfoque na visualização do efeito da variação do teor de umidade. Da figura 41, percebe-se que ocorreram lascamentos para todos os teores de umidade ensaiados, mas apenas para a temperatura de 600°C. O teor de umidade de 100% também levou a ocorrência de lascamentos para a temperatura de 500°C.

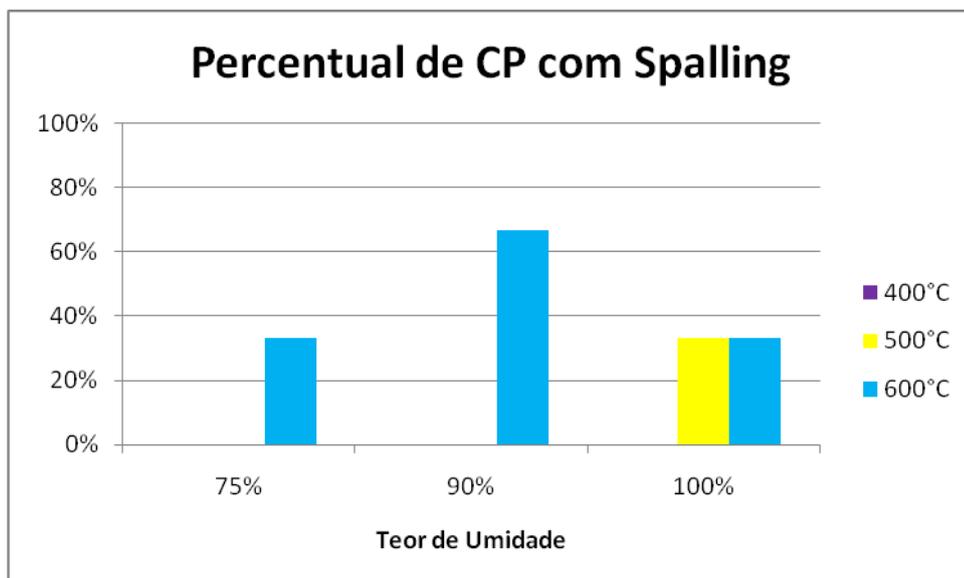


Figura 41: percentual de CP ensaiados com ocorrência de *spalling* – foco na variação do teor de umidade

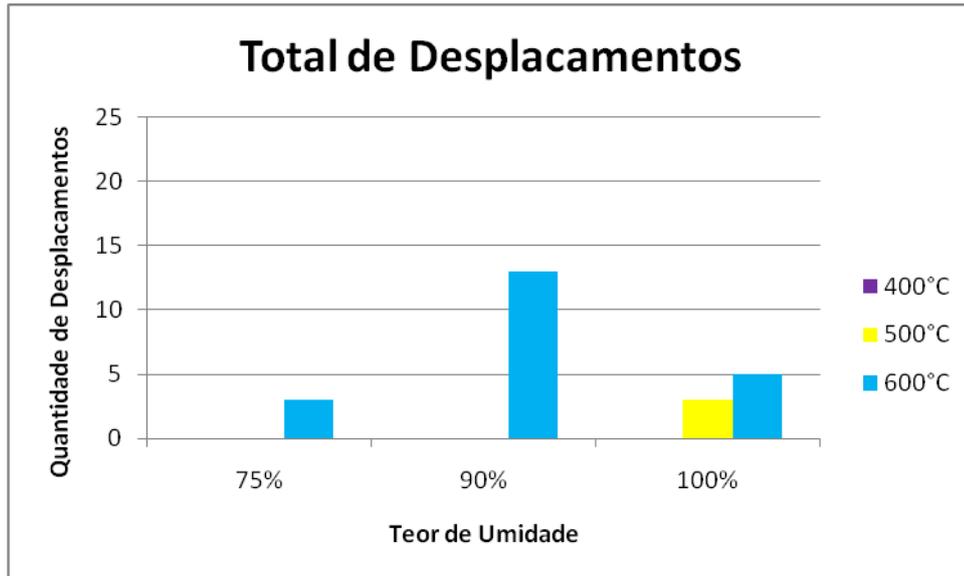


Figura 42: total de deslocamentos – foco na variação do teor de umidade

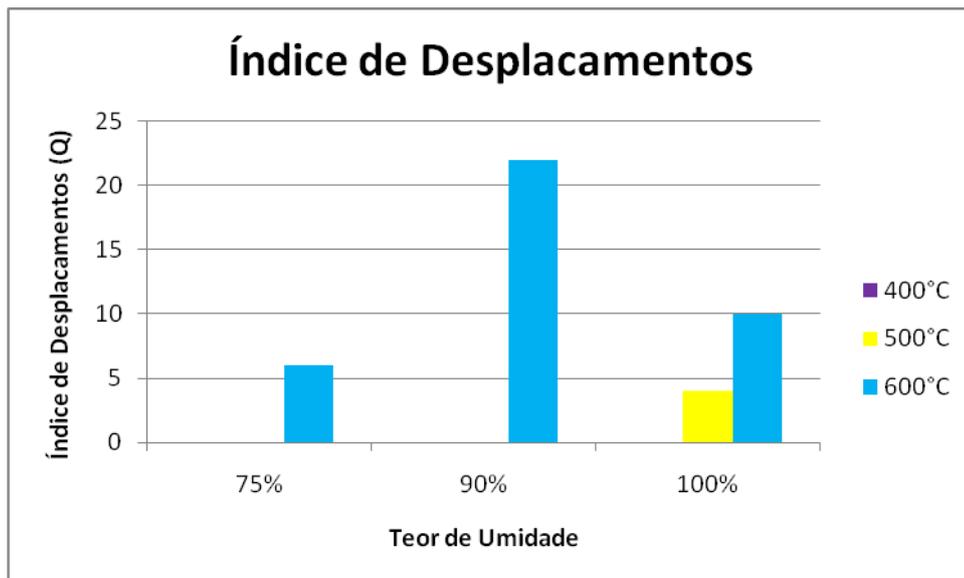


Figura 43: índice de deslocamentos – foco na variação do teor de umidade

6.3.2.1.2 Concreto sem Fibras - Taxa de Aquecimento de 45°C/min

Esse item se destina a apresentar um comparativo dos resultados obtidos com duas taxas de aquecimento. A taxa de aquecimento utilizada nesses ensaios foi à máxima alcançada dentro da capacidade de aquecimento do forno. Diferentemente dos ensaios com a taxa de 27,4°C/min, cujos aquecimentos se deram de maneira relativamente linear, o aquecimento na

condição limite do forno se deu de forma polinomial, atingindo maiores taxas para temperaturas menores e uma redução dessa taxa conforme a temperatura se aproximava do patamar máximo de temperatura.

Os ensaios conduzidos com essa taxa de aquecimento avaliaram os mesmos teores de umidade que para a outra taxa de aquecimento. No entanto, somente foram conduzidos ensaios com a temperatura máxima de patamar igual a 600°C. Apresenta-se na figura 44 as duas curvas reais de aquecimento do forno utilizadas nesse trabalho, registradas com um cronômetro e o leitor do termopar embutido no interior do forno.

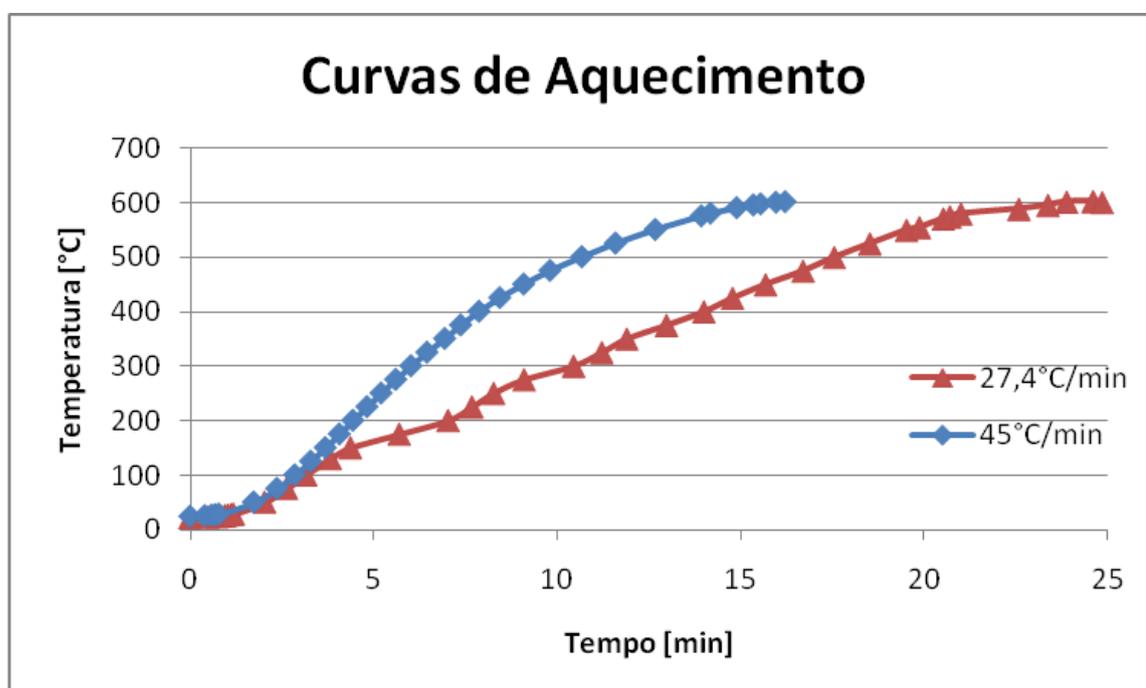


Figura 44: curvas reais de aquecimento do forno

Visto que a temperatura de interesse era 600°C e que a taxa de aquecimento variava desde 2,5°C/min no começo do aquecimento até 68,18°C/min entre 175 e 200°C, optou-se por referenciar a taxa de aquecimento como a taxa média necessária para alcançar os 500°C. A taxa de aquecimento média verificada nos ensaios foi de **45°C/min**.

A figura 45 apresenta o percentual de CP com ocorrência de *spalling*. Dessa figura, se percebe igual número de ocorrências entre as diferentes taxas de aquecimento para o teor de umidade de 90%. Contrapondo-se, percebe-se maior ocorrência no teor de 75% de umidade para

menores taxas ao passo que para o teor de 100% de umidade, há maior ocorrência para maiores taxas de aquecimento.

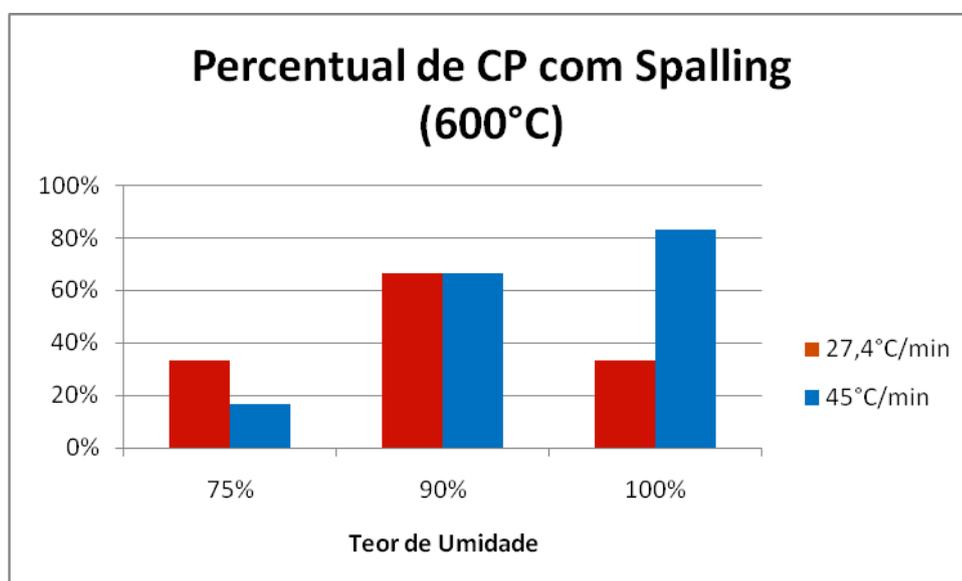


Figura 45: percentual de CP com *spalling* – duas taxas de aquecimento

A figura 46 apresenta os resultados em função do número de deslocamentos. Analisando por esse critério, percebe-se um aumento dos danos causados com menores taxas de aquecimento para todos os teores de umidade ensaiados. A diferença relativa para o teor de umidade de 75% aumenta a favor da taxa de 27,4°C/min, a igualdade no teor de 90% de umidade é desfeita em favor da menor taxa, e a maior ocorrência de deslocamentos para o teor de umidade de 100% deixa de ser ocasionada por maiores taxas, passando-se à igualdade de deslocamentos.

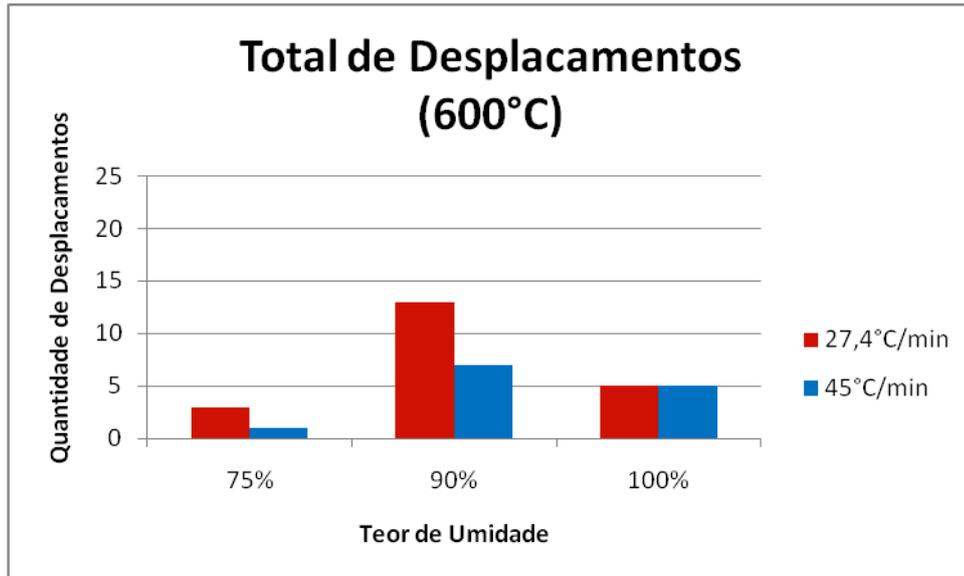


Figura 46: total de deslocamentos – duas taxas de aquecimento

Por fim, uma análise mais ampla, considerando o volume de concreto deslocado, é apresentada na figura 47. Dando continuidade a tendência apresentada nos gráficos anteriores, percebe-se que houve um maior volume de concreto deslocado para todos os teores de umidade ensaiados quando da exposição à taxa de aquecimento de 27,4°C/min.

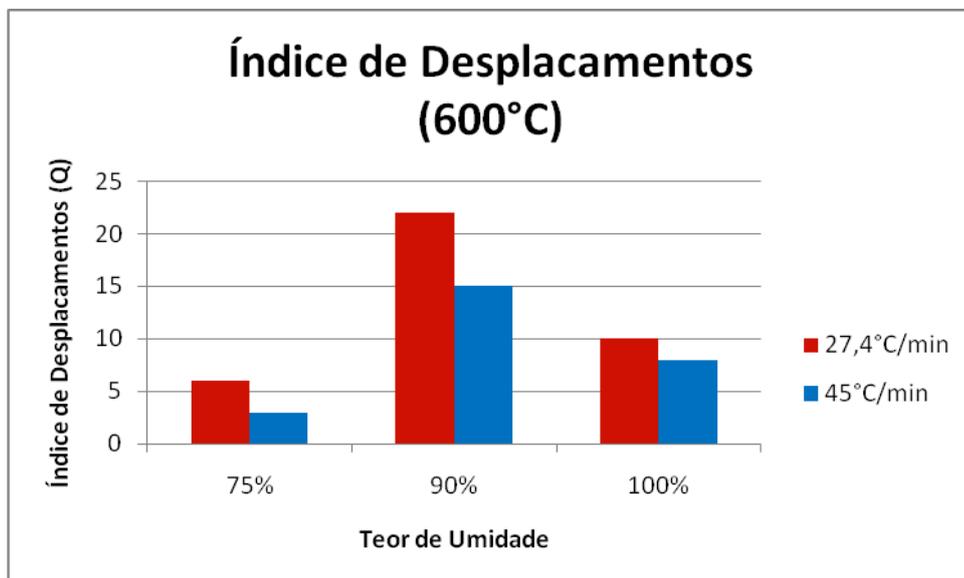


Figura 47: índice de deslocamentos – duas taxas de aquecimento

6.3.2.2 Concreto com Fibras de Polipropileno

Visto que o objetivo dos ensaios de concretos com fibras era a verificação da eficácia dessa adição na amenização da ocorrência do fenômeno, foram conduzidos ensaios apenas na condição que originalmente se julgava ser a mais crítica: 600°C, 90% de teor de umidade e taxa de aquecimento de 45°C/min.

Ambos os teores de adição de fibras de polipropileno [1,5 kg/m³ e 2,0 kg/m³] se mostraram eficazes, não tendo sido registrada nenhuma ocorrência de deslocamento.

6.3.3 Características dos Deslocamentos

Baseado na classificação visual dos deslocamentos e na região de ocorrência, apresenta-se abaixo, nas figuras 48 e 49, gráficos estatísticos de todos os deslocamentos ocorridos.

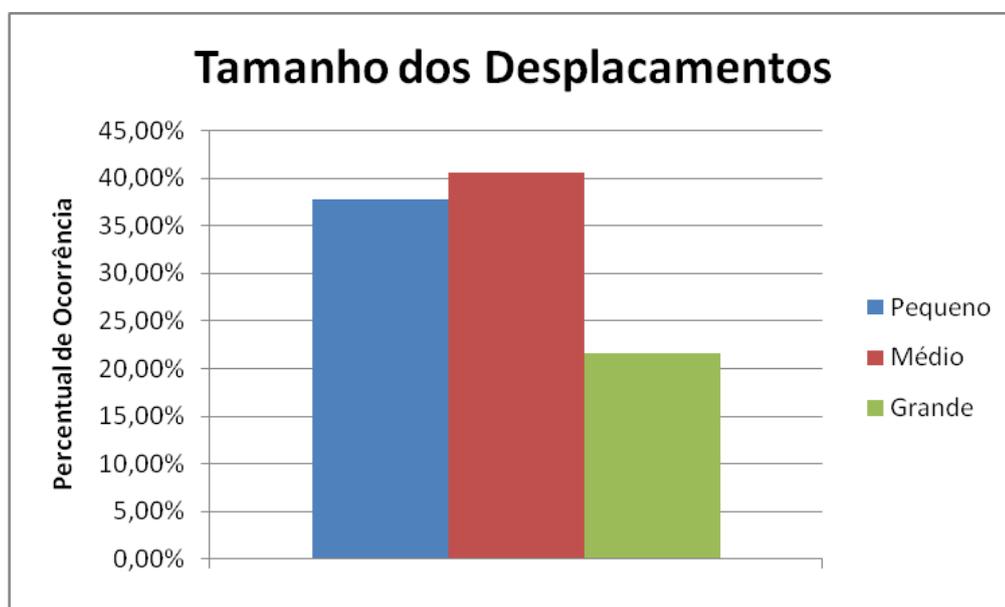


Figura 48: tamanho dos deslocamentos

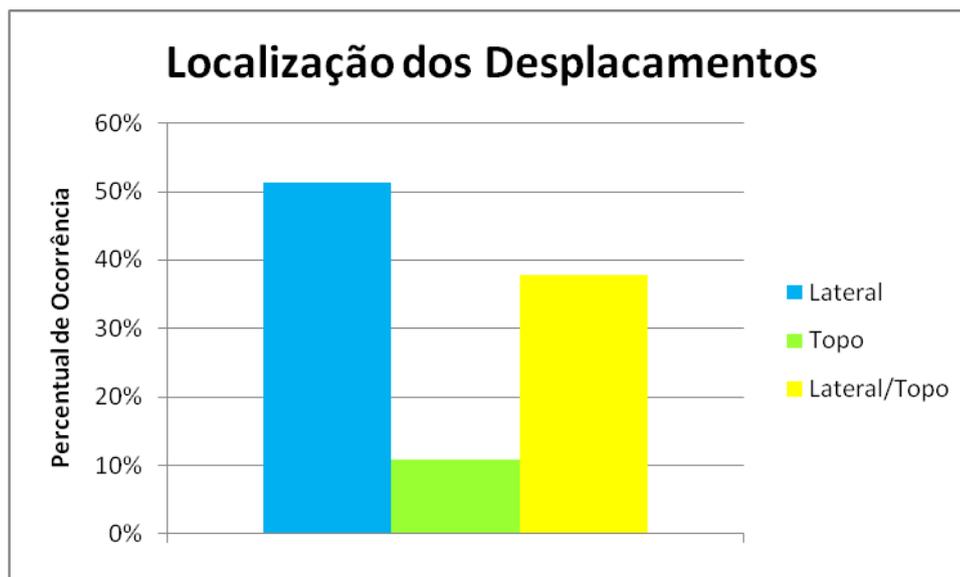


Figura 49: localização dos deslocamentos

Da figura 48, percebe-se que a maioria dos *spalling* ocorridos nos ensaios eram de médio e pequeno volume, sendo que somente um pouco mais de um quinto dos *spalling* eram de grande volume.

Da figura 49, percebe-se que mais da metade dos deslocamentos foram oriundos da região lateral dos CP. Também, perto de dois quintos dos deslocamentos foram da região de interface entre a lateral e o topo. Apenas uma pequena fração dos deslocamentos foram oriundos exclusivamente do topo.

Analisando todos os registros de temperatura e tempo de ocorrência dos deslocamentos, obtiveram-se os quadros 14 e 15. Analisando esses dados, percebeu-se que a temperatura de ocorrência dos deslocamentos aparentemente independe do teor de umidade e da taxa de aquecimento. Um maior conjunto amostral é necessário para confirmar essa conclusão. No entanto, o tempo de ocorrência dos deslocamentos é dependente da taxa de aquecimento, sendo menores os tempos necessários para ocorrência de lascamentos quando aplicadas maiores taxas de aquecimento.

Características dos deslocamentos - Temperatura do Forno		
Temperatura [°C]	Mínima	501
	Máxima	601
	Média	572
	Mediana	590

Quadro 14: características dos deslocamentos – temperatura do forno

Características dos deslocamentos - Tempo				
			Taxa de Aquecimento [°C/min]	
Tempo [min:seg]	Mínimo	17:47	27,4°C/min	
	Máximo	30:30		
	Médio	22:28		
	Mediano	21:18		
				45°C/min
	Mínimo	11:22		
	Máximo	31:20		
	Médio	16:58		
	Mediano	15:11		

Quadro 15: características dos deslocamentos – tempo

6.3.4 Análise do Forno

Uma análise muito importante nesse trabalho consistiu na averiguação do real controle de uma das variáveis. Esse estudo consistiu na verificação, por meio da análise dos deslocamentos, da homogeneidade do aquecimento no interior do forno. Apresenta-se na figura 50 os esquemas com a divisão do forno em regiões para análise.

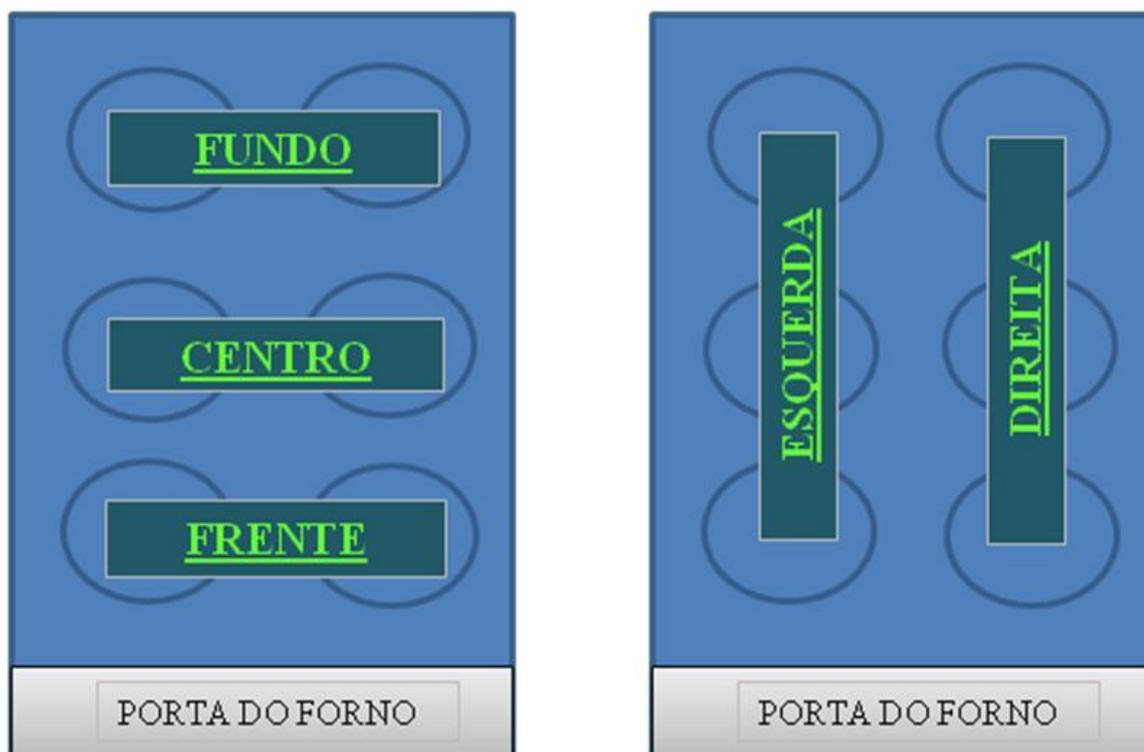


Figura 50: regiões do forno segundo os esquemas 1 [fundo, centro e frente] e 2 [esquerda e direita]

Em uma primeira análise, subdividiu-se o forno nas regiões fundo, centro e frente. A figura 51 apresenta o número de CP com deslocamentos por região. Dessa figura pode-se ver que houve uma pequena quantidade a mais de deslocamentos na região do fundo.

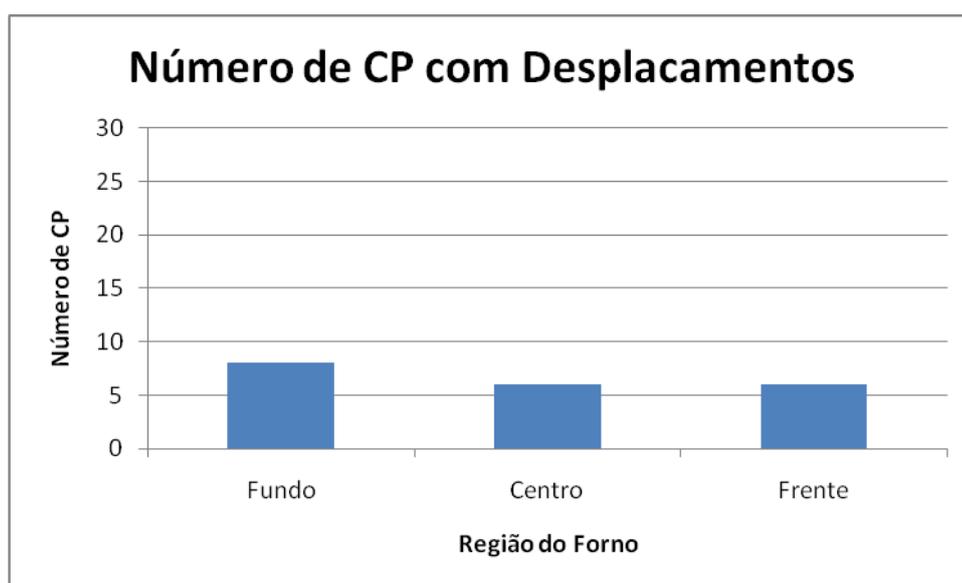


Figura 51: número de CP com deslocamentos por região – esquema 1

As figuras 52 e 53 mostram a quantidade de deslocamentos e o índice dos mesmos.

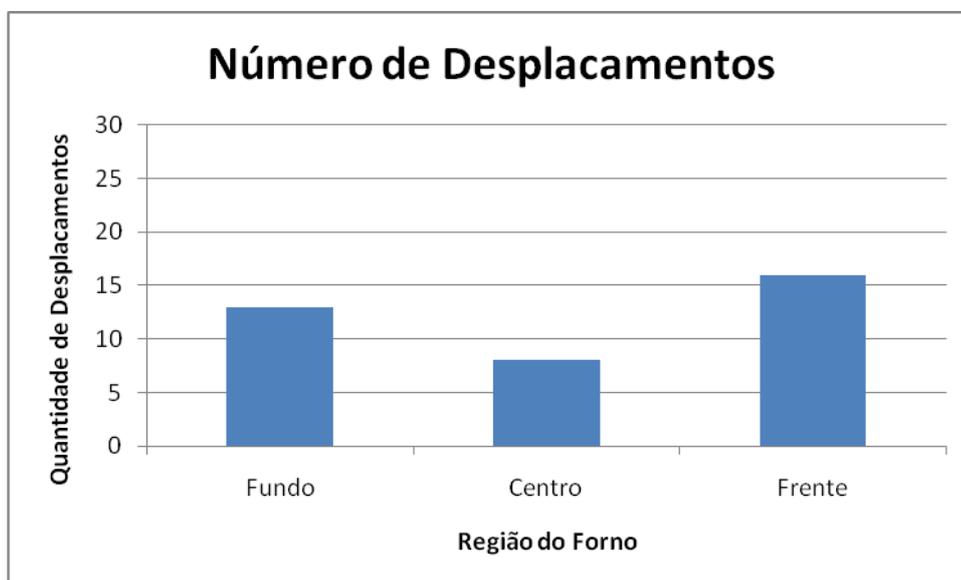


Figura 52: número de deslocamentos por região – esquema 1

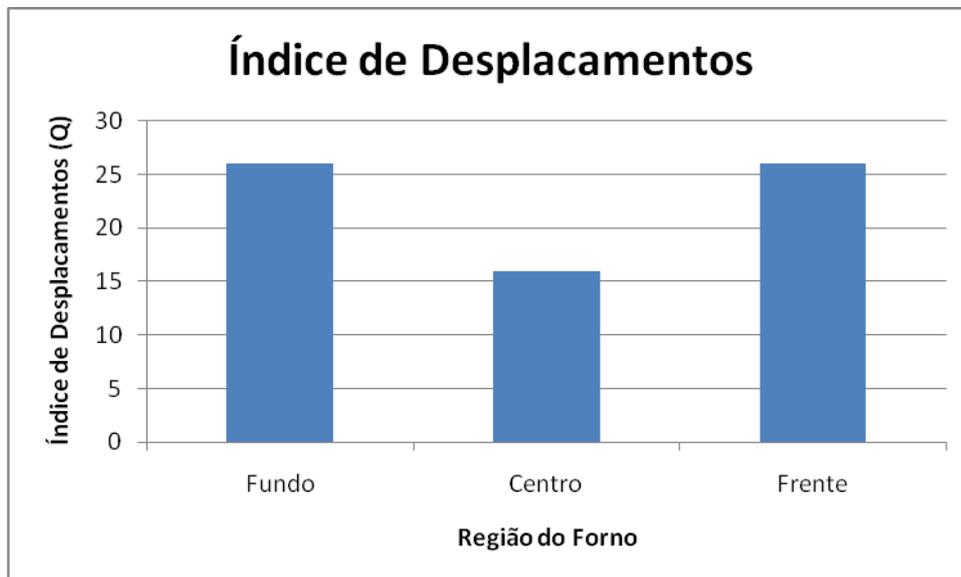


Figura 53: índice de deslocamentos por região – esquema 1

Das figuras 52 e 53, percebe-se que, ao invés de haver uma região com um pouco mais de deslocamentos que as outras, há uma região com considerável quantidade e volume de concreto deslocado a menos que as outras regiões. Conclui-se disso que a região central do forno provavelmente foi sujeita a um aquecimento diferenciado das demais regiões. Isso

poderia ser devido à menor quantidade de resistências do forno na região central. Também, uma pequena abertura para comunicação com o meio externo que se situa no topo da região central do forno pode vir a ter gerado influência.

Uma segunda análise foi feita segundo o esquema 2, subdividindo-se o forno nas regiões esquerda e direita, conforme a figura 50. Os resultados dessas análises estão nas figuras 54, 55 e 56.

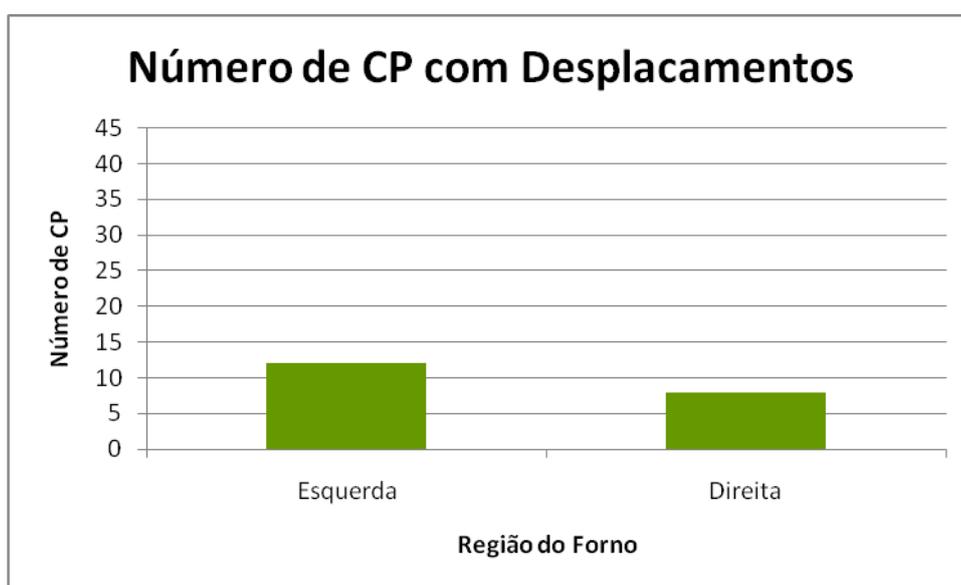


Figura 54: número de CP com deslocamentos por região – esquema 2

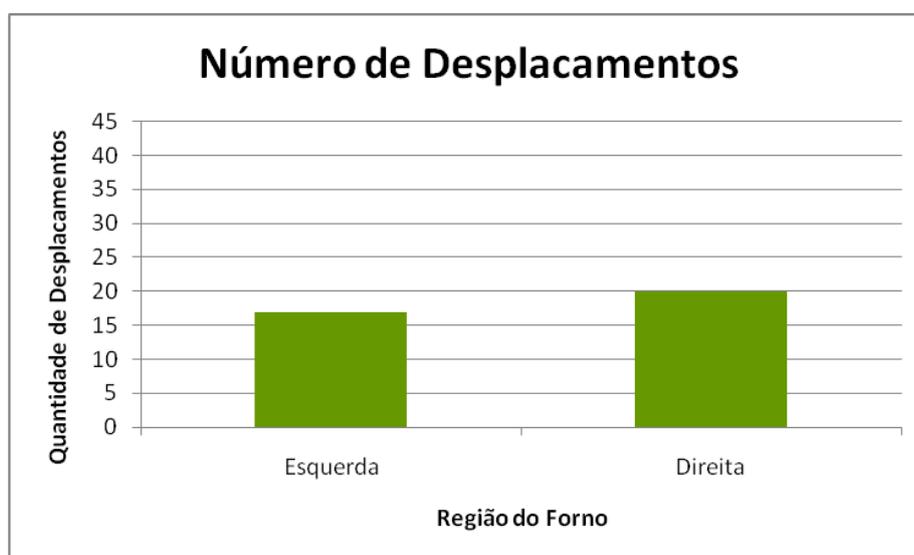


Figura 55: número de deslocamentos por região – esquema 2

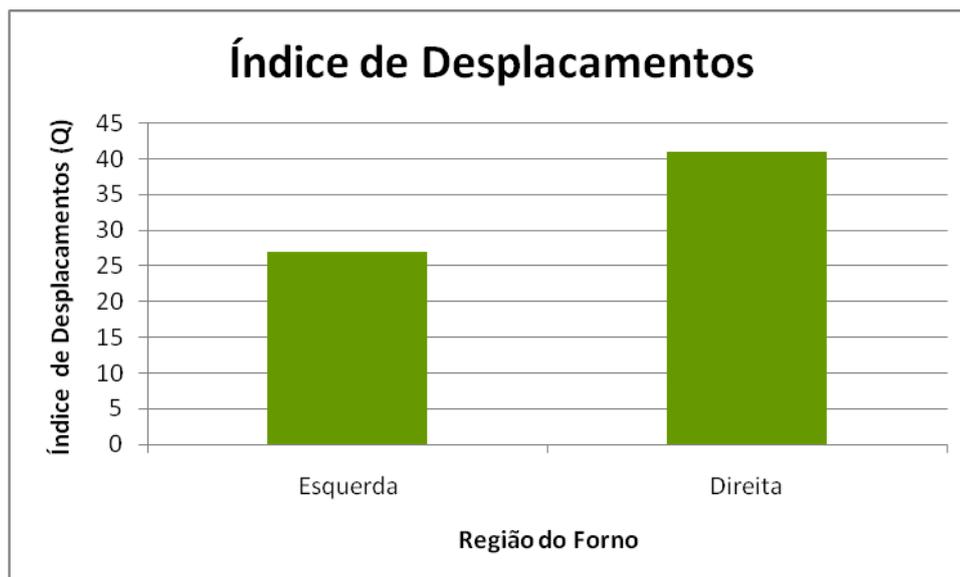


Figura 56: índice de deslocamentos por região – esquema 2

Percebe-se dessas figuras que, apesar da região esquerda do forno ter apresentado um maior número de CP com *spalling*, a quantidade e volume de concreto deslocado pela região direita do forno foi muito superior. Ressalta-se que, apesar de um **menor** número de CP com deslocamento, a região direita obteve **maior** quantidade e volume de concreto deslocado. Isso evidencia que os danos causados nos CP da região direita do forno foram de muito maior magnitude que os causados nos CP situados na região esquerda.

Essa diferença entre as regiões esquerda e direita pode ser devida a algum ou vários fatores fora de controle, tais como aquecimento não uniforme das resistências do forno, influência do termopar do forno [situado na região esquerda], influência dos pedaços de tijolo utilizados para elevação dos CP ou quaisquer outros fatores desconhecidos.

6.4 VARIAÇÕES DA COR E TEXTURA

Não foi verificada nenhuma mudança **permanente** na cor nem na textura dos CP expostos a elevadas temperaturas. Apesar disso, não se pode dizer que não ocorreram mudanças. Todos os CP expostos a quaisquer das condições de ensaio desse trabalho apresentaram mudanças **superficiais** da cor e textura. As alterações visuais se refletiram em uma fina camada esbranquiçada e descamante, a qual podia ser removida sem dificuldades por um passar de mão sem esforço. A figura 57 apresenta uma foto de um CP após o aquecimento. Pode-se

perceber a coloração original [cinza] na região onde o CP foi identificado por um número, e a fina camada esbranquiçada resultante do aquecimento.



Figura 57: foto de um CP com alteração da superfície decorrente do aquecimento

Acredita-se que essa fina camada superficial esbranquiçada seja decorrente de um processo de lixiviação por parte da água originalmente presente no interior do concreto. Quando do rápido aquecimento do CP, a evaporação da água pode, e provavelmente acaba carregando o hidróxido de cálcio presente no interior do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008, p.157), “[...] o produto lixiviado interage com o CO_2 presente no ar e forma uma crosta esbranquiçada de carbonato de cálcio na superfície. O fenômeno é conhecido como eflorescência.”

Estudos de difratometria de raios X estão sendo conduzidos para poder confirmar essa teoria.

7 CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados nesse trabalho percebeu-se que há maior ocorrência de deslocamentos para maiores temperaturas de exposição.

Constatou-se que, para as condições de ensaio empregadas, não há ocorrência de spalling para temperaturas de até 400°C.

A condição de exposição com menor temperatura, e que resultou em lascamentos, foi para 500°C e teor de umidade de 100%. Acredita-se que a condição crítica de começo de ocorrência do fenômeno esteja no entorno dessa condição.

Entre os teores de umidade ensaiados, o teor de umidade de 90% acarretou em mais danos do que os teores de 75% e 100%.

O teor de umidade que acarreta em mais danos ao concreto provavelmente encontra-se entre 90% e 100%.

Uma taxa de aquecimento de 27,4°C/min gerou maiores danos por ocorrência de *spalling* que uma taxa de 45°C/min. Ressalta-se, porém, que isso não significa que menores taxas de aquecimento resultem em maiores danos que maiores taxas.

A taxa de aquecimento de 45°C/min levou a ocorrência de lascamentos com um tempo inferior ao necessário para a taxa de 27,4°C/min.

A adição de fibras de polipropileno se mostrou uma medida eficaz para impedir a ocorrência de deslocamentos.

Além do grande número de variáveis sob as quais não se há controle, deve-se ficar atento às variáveis influentes que supostamente estão sob controle, isto é, deve-se atentar para eventuais falhas no controle das variáveis.

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se o estudo da influência de taxas de aquecimento mais baixas que $27,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mas não tão baixas quanto 1 ou $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, que já possuem estudos realizados. Sugere-se avaliar o efeito de uma taxa de aquecimento por volta dos 10 a $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Sugere-se avaliar o efeito de teores de umidade intermediários, para definir o teor de umidade crítico e aumentar a precisão das informações conhecidas sobre o comportamento do fenômeno.

Sugere-se a realização de ensaios carregados, onde os CP estejam submetidos a um considerável percentual de sua carga de ruptura.

Sugere-se a avaliação das mesmas variáveis analisadas nesse trabalho, mas para diferentes concretos, com diversas e diferentes resistências e com diversos e diferentes agregados.

9 ADICIONAIS

Para um melhor entendimento do fenômeno, foram conduzidos ensaios de avaliação da resistência residual e da compacidade, através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Também foram verificadas as variações na massa decorrente da exposição a elevadas temperaturas. A catalogação da massa e localização dos fragmentos deslocados visou aprimorar essa análise.

Estão sendo conduzidos ensaios de difração de raios X para avaliação das modificações ocorridas na superfície e centro dos CP em função dos ensaios a altas temperaturas.

Também estão sendo conduzidos ensaios de microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Além disso, também estão sendo realizados ensaios de determinação da permeabilidade segundo uma metodologia nova, desenvolvida por um grupo de pesquisadores do LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

CAJOT, L. Cost-effective fire performance. [S.l.]: Arcelor Mittal, 2008. Disponível em: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1993_7_Cajot.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2010.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. 2008. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CAUÊ CIMENTOS SA. Cauê Exato. Disponível em: <<http://www.caue.com.br/Institucional/LinhaCimentos/Paginas/caue-exato.aspx>>. Acesso em: 21 maio 2011.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas. In: NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 4., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2002a.

_____. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002b.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio. In: NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 5., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2004.

FITESA FIBERWEB. Efeito “anti-spalling” das fibras de polipropileno, 2004. Boletim técnico n. 06. Disponível em: <http://www.fitesa.com.br/publicacaotecnica/pbt_6.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2010.

GOUVEIA, S. M. F. Glenium 54. São Paulo: Basf SA; Disponível em: <<http://www.basf-cc.com.br/PT/produtos/aditivos/GLENIUM54/Documents/GLENIUM%20AE%2054.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2011.

IMPERCIA ATACADISTA LTDA. Representante e distribuidor de produtos químicos para a construção civil. Goiânia/GO. Disponível em: <<http://www.impercia.com.br/pt-br/home.php>>. Acesso em: 21 maio 2011.

KHOURY, G. A.; ANDERBERG, Y. Concrete spalling review. [s.l.]: Fire Safety Design, 2000. Relatório submetido à Administração Rodoviária Nacional Sueca. Disponível em: <<http://www.fsd.se/FoU/artiklar/Spalling-Review-Final.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2010.

LIMA, R. C. A. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de Altas Temperaturas no Concreto: “Novos materiais e tecnologias emergentes”. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/EE/UFRGS, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

PROMAT TUNNEL. Fire Curves. Disponível em: <<http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>>. Acesso em: 3 jun. 2010.

SILVA, D. S. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na Grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.