



**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA PERDA DE MASSA E DA VELOCIDADE
DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NAS CAMADAS
SUPERFICIAIS DE AMOSTRAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À
AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS**

SÃO PAULO

2014



ESTELA ELKE YOSHIDA BERGAMIN
MARCELA BARROS DE SOUZA SOLLERO
RICARDO KEITH YOSHIDA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA PERDA DE MASSA E DA VELOCIDADE
DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NAS CAMADAS
SUPERFICIAIS DE AMOSTRAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À
AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

SÃO PAULO
2014

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. De Luca, pela orientação fornecida ao longo dos meses e pela nota técnica trazida de Madri em um momento muito oportuno.

Ao Prof^o Armando Moreno, da FEC/ UNICAMP, pela orientação e apoio na definição do trabalho, fundamentais na sua realização. Ao Luciano Passos, pelo valioso apoio na moldagem dos corpos de prova e no uso do forno. À Micaela, Daiane e Nathalia, que também acompanharam e auxiliaram o desenvolvimento da parte laboratorial desse trabalho na FEC/ UNICAMP.

Ao Prof^o Rodrigo Moysés, pela orientação na fase inicial do trabalho.

À Heloísa Bolorino, Karina Cavalcante, Seila de Souza, Lilian Quattrone e ao Rodrigo Tadeu, da Concremat Engenharia e Tecnologia S.A., pelas importantíssimas informações técnicas e pela realização dos ensaios.

Ao Limiro Justimiano, da EPT Engenharia e Pesquisas Tecnológicas S.A., pelo auxílio em todas as fases do trabalho e, em conjunto ao Paulo Aquino, pela realização do corte das amostras.

Ao Marcos Azevedo, pelo apoio e auxílio desde a definição das primeiras ideias.

À Monize Neves, da Silva Solar Comércio, Incorporações e Participações Ltda., e ao Zeferino Ferreira Velloso Neto, da VIP – Vistorias e Inspeções Prediais Ltda., pelo apoio durante o desenvolvimento desse trabalho.

Sem vocês, nada disso teria sido possível.

FOLHA DE APROVAÇÃO**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA PERDA DE MASSA E DA VELOCIDADE
DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NAS CAMADAS
SUPERFICIAIS DE AMOSTRAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À
AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS**

Por

ESTELA ELKE YOSHIDA BERGAMIN

MARCELA BARROS DE SOUZA SOLLERO

RICARDO KEITH YOSHIDA

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

São Paulo (SP) ____ de ____ de ____.

Luis Cesar Siqueira de Luca

Cesar Henrique Sato Daher

André Tadeu Moreno Figueiró

RESUMO

O presente trabalho visa analisar a variação da perda de massa resultante dos ensaios de perda ao fogo e da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas superficiais de amostras de concreto. Essa análise é justificada pela busca por uma alternativa pouca invasiva para a identificação da espessura de concreto danificada pelas altas temperaturas, que implique em aumento da precisão das especificações técnicas e orçamentos, além da qualidade das recuperações executadas, e na redução do desperdício de recursos naturais aplicados. Para isso, foram moldados corpos de prova de concreto de resistência à compressão normal e de alta resistência à compressão. As amostras foram submetidas em grupos à ação das altas temperaturas, atingindo 200 °C, 400 °C e 600 °C, com taxa de aquecimento e resfriamento de 1 °C/min, seguindo as recomendações RILEM TC 200 HTC e 129-MHT. Constatou-se que a elevação da temperatura reduziu nas amostras a velocidade de propagação média de ondas ultrassônicas entre 4 e 59% e a perda ao fogo média entre **x e x%**, valor intensificado em função da elevação da temperatura e da superficialidade da camada analisada.

Palavras chave: concreto, perda ao fogo, ultrassom, UPV, altas temperaturas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Lei de Sitter - Representação da evolução dos custos em função da fase da vida da estrutura em que a intervenção é feita (CARMONA FILHO & HELENE <i>apud</i> HELENE, 2004)	18
Figura 2 – Classe de danos causados por incêndios em estruturas de concreto (FIB <i>apud</i> KLEIN, 2011)	25
Figura 3 – Fator de redução da resistência característica à compressão do concreto em altas temperaturas (COSTA <i>apud</i> BRITEZ, 2011)	27
Figura 4 – Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura (ABNT, 2012)	27
Figura 5 – Efeito do resfriamento rápido na resistência à compressão (CANOVAS <i>apud</i> MORENO JÚNIOR; SOUZA, 2010)	28
Figura 6 – Variação da resistência à compressão residual do concreto em amostras de resistência normal (OC) e alta (HPC) (CARRÉ, HAGER, KRZEMIEN).....	29
Figura 7 – Variação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto em amostras de resistência normal (OC) e alta (HPC) (CARRÉ, HAGER, KRZEMIEN).....	29
Figura 8 – Parâmetros de redução da resistência à tração do concreto $K_{c,t,\theta}$ em função da temperatura (EN 1992-1-2-1994 <i>apud</i> KLEIN, 2011)	30
Figura 9 – Comparação entre os parâmetros de redução da resistência à compressão e à tração do concreto em função da temperatura (EN 1992-1-2-1994 <i>apud</i> KLEIN, 2011)	31
Figura 10 – Redução do módulo de elasticidade em função da temperatura (ABNT, 2004)	32
Figura 11 – Evolução da distribuição de tamanho de poros da pasta de cimento e da zona de transição de argamassas expostas a altas temperaturas (ANDRADE et al <i>apud</i> LIMA, 2005)	33

Figura 12 – Transformação na distribuição dos poros durante aquecimento (ANDRADE et al <i>apud</i> LIMA, 2005)	34
Figura 13 – Coloração do concreto superaquecido (ROSSO <i>apud</i> CAMPOS et al, 2011).....	36
Figura 14 – Detalhe da alteração de cor promovida pela reação química de redução do óxido de ferro nos primeiros 55 mm de profundidade do elemento de concreto (BRITTEZ, 2011)	37
Figura 15 – Determinação da resistência à compressão residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).	41
Figura 16 – Determinação da resistência à tração direta residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).	43
Figura 17 – Determinação do módulo de elasticidade residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).	44
Figura 18 – Fase 01: Caracterização dos materiais utilizados e moldagem das amostras.....	45
Figura 19 – Fase 02: Preparação das amostras para exposição à ação das altas temperaturas	46
Figura 20 – Fase 03: Exposição das amostras à ação das altas temperaturas	46
Figura 21 – Fase 04: Realização dos ensaios.....	47
Figura 22 – Formas metálicas de 10x30 cm.	50
Figura 23 – Vista dos corpos de prova.	50
Figura 24 – Vista dos corpos de prova na estufa.....	51
Figura 25 – Vista dos corpos de prova envolvidos em plástico filme, entre o aquecimento na estufa e o aquecimento no forno.....	52
Figura 26 – Vista do forno vertical elétrico.	52
Figura 27 – Programação do forno através do software Flycon.	53
Figura 28 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 200 °C (Grupo 2).	54

Figura 29 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 400 °C (Grupo 4).	54
Figura 30 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 600 °C (Grupo 5).	55
Figura 31 – Gráfico de acompanhamento da temperatura do forno gerado em tempo real pelo software Flycon.	56
Figura 32 – Aquecimento dos corpos de prova até 200 °C e posterior resfriamento (Grupo 2).	56
Figura 33 – Aquecimento dos corpos de prova até 400 °C e posterior resfriamento (Grupo 3).	57
Figura 34 – Aquecimento dos corpos de prova até 600 °C e posterior resfriamento (Grupo 4).	57
Figura 35 – Aquecimento dos corpos de prova complementares até 400 °C e posterior resfriamento.	58
Figura 36 – Vista do corpo de prova “1a”.	58
Figura 37 – Vista dos corpos de prova vedados com filme plástico. .	59
Figura 38 – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.	59
Figura 39 – Posicionamento do corpo de prova para corte de camada.	60
Figura 40 – Vista de uma das camadas cortadas.	60
Figura 41 – Vista dos corpos de prova agrupados após o aquecimento e a realização dos cortes.	62
Figura 42 – Corpos de prova de controle.	62
Figura 43 – Corpos de prova aquecidos a 200 °C.	63
Figura 44 – Corpos de prova aquecidos a 400 °C.	63
Figura 45 – Corpos de prova aquecidos a 600 °C.	63
Figura 46 – Detalhe da fissuração dos corpos de prova aquecidos a 600 °C.	64

Figura 47 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 destinados ao controle (Grupo 1).	67
Figura 48 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 200 °C (Grupo 2).	67
Figura 49 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 400 °C (Grupo 3).	67
Figura 50 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 600 °C (Grupo 4).	67
Figura 51 – Relação entre a perda ao fogo a 440 ± 5 °C e a velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1.	68
Figura 52 – Relação entre a perda ao fogo a 1100 ± 50 °C e a velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classe de Agressividade Ambiental (ABNT, 2014).....	24
Tabela 2- Parâmetros para avaliação do concreto em função da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (CANOVAS, 1988).....	39
Tabela 3- Traços utilizados.	48
Tabela 4- Caracterização do agregado miúdo.....	49
Tabela 5- Caracterização do agregado graúdo	49
Tabela 6- Resultados da determinação da resistência à compressão axial.	65
Tabela 7- Resultados da determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	66
Tabela 8- Resultados da determinação da perda ao fogo.	67
Tabela 9- Análise dos resultados do Programa Experimental – Traço 1.	67
Tabela 10- Resultados da determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova complementares.....	69
Tabela 11- Análise dos resultados complementares.....	70
Tabela 12- Análise dos resultados do Programa Experimental – Traço 2.	70
Tabela 13- Parâmetros para avaliação do concreto em função da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (CANOVAS, 1988).....	72
Tabela 14- Resultados da avaliação da qualidade do concreto quanto à homogeneidade e compacidade.....	73
Tabela 15- Resultados da análise tátil-visual.....	74

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	10
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1. Objetivo Geral.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. HIPÓTESE	15
1.4. JUSTIFICATIVAS	16
1.4.1. Tecnológicas	16
1.4.2. Econômicas	18
1.4.3. Sociais.....	19
1.4.4. Ecológicas.....	20
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. CONCRETO.....	23
2.1.1. Características do Concreto Submetido à Ação das Altas Temperaturas.....	24
2.2. ENSAIOS	38

2.2.1. Avaliação da Homogeneidade e Compacidade do Concreto através da Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica	38
2.2.2. Determinação da Perda ao Fogo	39
2.2.3. Determinação da Resistência à Compressão Axial do Concreto	41
2.2.4. Determinação da Resistência à Tração do Concreto.....	42
2.2.5. Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto.....	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS.....	48
3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA EXPOSIÇÃO À AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS	51
3.3. EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS À AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS	52
3.4. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	59
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1. INTRODUÇÃO

As edificações se destinam a oferecer segurança e conforto aos seus usuários; dentre os requisitos que devem ser cumpridos para isso, encontra-se a resistência ao fogo.

A norma ABNT NBR 15200/12 estabelece parâmetros para o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, de forma que elas resistam à ação do fogo por tempo suficiente para sua desocupação e para as operações de combate ao incêndio.

Como a norma admite a ocorrência de plastificações, ruínas e até colapsos locais durante o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), ela estabelece que as edificações só podem ser reutilizadas após um incêndio se forem vistoriadas, tiverem sua capacidade remanescente verificada e sua recuperação for projetada e executada.

Para a adequada especificação das metodologias de recuperação das estruturas de concreto afetadas pelas altas temperaturas resultantes de incêndios, é necessário conhecer a espessura danificada dos elementos estruturais, que pode variar de acordo com a temperatura atingida, a duração do incêndio, o método de resfriamento e as características dos materiais utilizados, dentre outros fatores.

O presente trabalho visa estudar propriedades de corpos de prova de concreto submetidos à ação de altas temperaturas através de ensaios de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e de determinação da perda ao fogo pelo método aqui denominado como HB, derivado do método do Boletim 25 do IPT, realizados nas camadas superficiais das amostras. O formato, a taxa de aquecimento e a taxa de resfriamento dos corpos de prova baseiam-se nas recomendações RILEM TC 200 HTC e 129-MHT, focadas na análise das propriedades residuais de concretos submetidos à ação das altas temperaturas.

Adicionalmente, serão realizados nas amostras análise tátil-visual, ensaios de determinação de resistência à compressão axial e, a serem apresentados em complementação, ensaios de determinação da resistência à compressão axial, do módulo de elasticidade e de resistência à tração residuais.

Com a realização dessas atividades, busca-se analisar as variações e verificar a existência de correlações entre os resultados dos ensaios de maneira a avaliar as características do concreto camada a camada com técnicas pouco invasivas. Os resultados esperados devem fornecer subsídios para a especificação de metodologias de recuperação do concreto, processo para qual o conhecimento da espessura danificada do material é determinante.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a variação da perda de massa, resultante dos ensaios de determinação da perda ao fogo, e da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas superficiais de amostras de concreto submetidas à ação das altas temperaturas?

1.2. OBJETIVOS

Neste item apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar a variação da perda de massa resultante dos ensaios de perda ao fogo e da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas superficiais de amostras de concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos

São os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Obter a perda de massa das camadas analisadas das amostras através da determinação da perda ao fogo pelo método HB e correlacioná-la com os resultados dos demais ensaios;
- b) Obter a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas analisadas das amostras e correlacioná-la com os resultados dos demais ensaios;
- c) Correlacionar os resultados obtidos à diferença de resistência à compressão dos diferentes traços utilizados;
- d) Correlacionar a variação da cor das amostras às temperaturas alcançadas no forno.

1.3. HIPÓTESE

Tem-se como hipótese que os valores de perda de massa obtidos através dos ensaios de determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas são menores nas camadas mais próximas da superfície de amostras de concreto submetidas à ação das altas temperaturas do que nas camadas mais profundas.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

As estruturas de concreto afetadas por altas temperaturas são frequentemente recuperadas através da substituição da camada superficial do elemento, parcial ou integralmente, por graute ou argamassa próprios para a execução de reparos – a escolha entre os dois materiais se dá basicamente pela extensão da área, pelas condições de acesso e pela profundidade do reparo.

A profundidade do reparo depende do volume de concreto escarificado; as especificações de recuperação normalmente estabelecem que a escarificação deve ocorrer até que se encontre concreto são, coeso e não friável, parâmetros que admitem um certo grau de subjetividade, uma vez que não é determinado previamente, por exemplo, quão coeso o concreto deve estar, e esta avaliação se torna dependente da sensibilidade do executor da recuperação. Cabe destacar que, ainda que o concreto seja aprovado nessa avaliação, suas características como resistência à compressão, compactidade e homogeneidade podem se apresentar prejudicadas, afetando negativamente o desempenho da estrutura quanto aos aspectos da durabilidade e até mesmo da estabilidade.

É comum indicar que a espessura do concreto afetada pelas altas temperaturas seja analisada pela mudança de coloração, após a extração de testemunhos de concreto. Além desse procedimento ser marcadamente invasivo, é preciso considerar que a composição dos materiais empregados na fabricação do concreto exerce grande influência na coloração do material, tanto antes como após a exposição às altas temperaturas, e que para uma melhor avaliação dos resultados é necessário submeter corpos de prova extraídos de trechos sãos da estrutura

afetada pelas altas temperaturas à condições similares aquelas que causaram o dano, em laboratório, de forma a obter uma relação cor/ temperatura específica para o caso, processo de difícil execução devido ao reduzido número de fornos próprios para esse uso no país. A análise das condições do concreto é dificultada também pelo fato que as alterações mais marcantes de coloração acontecem após o atingimento da temperatura de 600° C, mas os danos ao concreto ocorrem a partir de aproximadamente 200 °C (WENDT, 2006).

Indica-se ainda a realização de ensaios de determinação da perda ao fogo pelo método do Boletim 25 do IPT e pelo método HB em estruturas afetadas por altas temperaturas. Os resultados desses ensaios, atualmente, são analisados de forma que se pode-se afirmar apenas se houve mais perda de massa nas camadas mais externas do que nas internas, indicando se houve algum tipo de dano, mas não sua severidade.

Os fabricantes de graute e argamassa para reparo comumente estabelecem como pré-requisito para a aplicação de seus produtos que o substrato apresente resistência ao arrancamento mínima de 1,5 Mpa, o que implica em resistência à compressão de aproximadamente 15 Mpa, valor abaixo do exigido da maioria das estruturas construídas nos últimos anos e inferior aos 20 Mpa que a NBR 6118/14 recomenda até para a Classe de Agressividade mais branda (Classe I) (ABNT, 2014). É importante destacar que o fato do substrato apresentar condições ideais para a aplicação de produtos de recuperação não significa que ele possua desempenho adequado quanto à durabilidade e estabilidade.

Com base nos fatores apresentados, pode-se afirmar que esses parâmetros, apesar de comumente utilizados pelo mercado, são insuficientes para a adequada especificação de metodologias de recuperação, uma vez que o concreto considerado pelo executor da recuperação como são, como um substrato em boas condições, pode não apresentar qualidade o suficiente para que os melhores resultados, ou mesmo os resultados esperados, sejam obtidos.

A pesquisa a ser desenvolvida visa oferecer uma alternativa pouco invasiva para a análise das camadas superficiais do concreto na fase de inspeção de estruturas afetadas por altas temperaturas, avaliando a viabilidade de correlacionar os resultados da determinação da perda ao fogo com os resultados da avaliação da homogeneidade e da compacidade do concreto, propriedades afetadas pelas referidas altas temperaturas e que podem ser associadas à durabilidade e à resistência à compressão dos elementos.

1.4.2. Econômicas

Um dos grandes obstáculos para o estabelecimento da cultura de manutenção das estruturas no país é a resistência à realização de investimentos ao longo da vida útil das construções enquanto eles não se tornam visivelmente inadiáveis, situação que leva ao agravamento do quadro patológico e ao aumento dos valores efetivamente utilizados na execução dos reparos.

De forma geral, os responsáveis pela manutenção das estruturas ignoram a chamada Lei de Sitter, ilustrada na Figura 1, a qual preconiza que os custos das intervenções em estruturas aumentam de acordo com uma progressão geométrica de razão 5 a cada etapa em que são adiadas (HELENE, 2002).

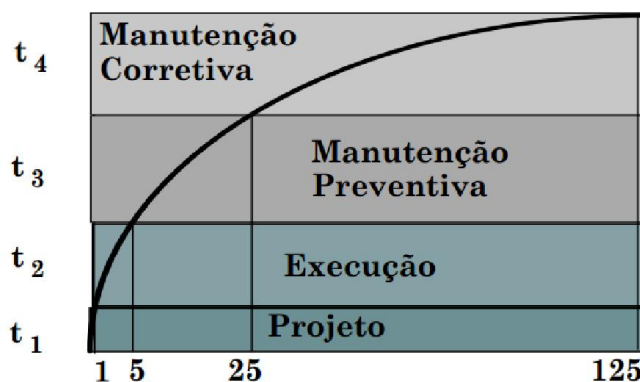


Figura 1 - Lei de Sitter - Representação da evolução dos custos em função da fase da vida da estrutura em que a intervenção é feita (CARMONA FILHO & HELENE *apud* HELENE, 2004)

Pode-se observar no gráfico que, quanto mais se avança no tempo, maior é o custo da manutenção corretiva.

O aumento da precisão na especificação das recuperações resulta em diversas vantagens: permite a execução de orçamentos e planejamentos mais realistas, dotando o investidor de mais segurança e aumentando a chance da manutenção corretiva ser realizada de forma correta e breve; reduz desperdícios na recuperação de elementos de concreto submetido às altas temperaturas, ao evitar que camadas em condições aceitáveis sejam removidas e substituídas por um novo material; diminui o risco de ser necessário refazer o serviço devido à ineficiência dos reparos, condição que pode resultar do manutenção de trechos de concreto deficiente devido à avaliação falha do executor da recuperação.

1.4.3. Sociais

A presença de danos visíveis nas estruturas causa desconforto aos seus usuários e à comunidade, diminuindo a sensação de segurança. Quando essas estruturas são recuperadas, mas as intervenções apresentam falhas a curto e médio prazo – derivadas normalmente da má especificação ou execução-, há uma crescente perda de confiança, tanto na capacidade técnica quanto no bom uso das verbas destinadas à manutenção das estruturas, situação que cria obstáculos à atuação dos patologistas do concreto.

É de grande interesse para a comunidade técnica que seus membros possuam recursos para desenvolver trabalhos de elevada qualidade, que contribuam para a credibilidade da Engenharia Civil junto à população.

Como benefício adicional, especificações corretas e precisas de recuperação das estruturas tendem a reduzir as interferências e tempo de serviço totais dedicados à recuperação de concretos submetidos às altas temperaturas, diminuindo o transtorno causado à sociedade.

1.4.4. Ecológicas

A identificação mais precisa das camadas de elementos de concreto afetados por altas temperaturas que devem ser removidas durante a execução de recuperações evita o desperdício de recursos naturais.

As especificações inadequadas podem levar à substituição desnecessária de material em condições aceitáveis ou ao manutenção de concreto que deveria ser removido, criando a necessidade de se refazer o serviço, posteriormente. Dessa forma, especificações de recuperação mais precisas poupam energia e material, reduzindo o impacto ambiental das intervenções.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Buscando atingir os objetivos já expostos, a pesquisa será constituída pelas seguintes etapas:

- a) Revisão Bibliográfica, com foco na alteração das propriedades do concreto pela ação das altas temperaturas e nos métodos utilizados para avaliá-la. Será baseada na consulta a artigos técnicos e científicos, normas técnicas, teses e visará subsidiar o Programa Experimental.
- b) Programa Experimental, composto pela classificação e separação das amostras de concreto em grupos, pela exposição de parte das amostras ao aquecimento em um forno, seguindo as recomendações RILEM TC 200 HTC e 129-MHT, e pela posterior realização de ensaios tecnológicos de determinação da resistência à compressão axial, da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da perda ao fogo pelo método HB. Os ensaios seguiram as recomendações de

normas técnicas aplicáveis. Adicionalmente, foi efetuada a análise tátil visual dos corpos de prova.

- c) Compilação e análise dos dados obtidos. A partir desse processo, será possível apresentar considerações sobre as propriedades dos materiais e as correlações entre os ensaios.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em seis capítulos, descritos a seguir.

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas e os procedimentos metodológicos adotados para o estudo da variação da perda de massa resultante dos ensaios de perda ao fogo e da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas camadas superficiais de amostras de concreto.

O **Capítulo 2** é formado pela revisão bibliográfica pertinente ao tema estudado, percorrendo sobre propriedades do concreto submetido à ação das altas temperaturas, e sobre os ensaios mais indicados para a avaliação das propriedades do concreto após sua exposição : Determinação da Perda ao Fogo pelo Método HB, Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica, Determinação da Resistência à Compressão Axial do Concreto, Determinação da Resistência à Tração do Concreto e Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto.

O **Capítulo 3** aborda o programa experimental. Nesse capítulo, são apresentados as etapas e os dados do programa experimental proposto.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos no programa experimental, composta pela avaliação da variação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica verificadas nas diversas amostras, além dos resultados obtidos na determinação da resistência à compressão axial e

na análise tátil visual. O Capítulo 4 se dedica ainda à análise dos dados obtidos, levando-se em consideração as informações que compõe a revisão bibliográfica do Capítulo 2.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

O **Capítulo 6** é formado pelas referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados os resultados da revisão bibliográfica do presente projeto de pesquisa.

A revisão bibliográfica encontra-se dividida no subitem 2.1 Concreto, em que são apresentados conceitos relacionados ao material e características do concreto submetido à ação das altas temperaturas, e no item 2.2 Ensaio, em que são apresentados os ensaios tecnológicos mais relevantes para a avaliação das propriedades residuais do concreto.

2.1. CONCRETO

O concreto é, atualmente, o mais importante material estrutural e de construção civil. Ele pode ser definido como um material de construção formado pela mistura de um aglomerante – no caso, o cimento – agregados graúdos, agregados miúdos e água. Nos últimos anos, é comum que ele contenha ainda adições, como o metacaulim e a sílica ativa, e aditivos, além de poder contar com pigmentos e fibras. O endurecimento da mistura resulta da reação do cimento e da água; após esse processo, o concreto adquire resistência mecânica (PETRUCCI, 1988; HELENE e ANDRADE, 2010).

A norma ABNT NBR 6118/14 estabelece que as estruturas de concreto devem atender, além dos requisitos definidos em acordo entre o projetista e o contratante, aos requisitos mínimos de qualidade, a saber: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade.

A capacidade resistente pode ser entendida como a segurança à ruptura; o desempenho em serviço se refere à capacidade da estrutura de manter suas condições de uso durante a vida útil para a qual foi projetada; a durabilidade é a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas em projeto,

fase em que o ambiente deve ser classificado em relação à sua Classe de Agressividade, conforme a Tabela 1 (ABNT, 2014):

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural/ Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha/ Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Industrial/ Respingos de Maré	Elevado

Tabela 1- Classe de Agressividade Ambiental (ABNT, 2014).

2.1.1. Características do Concreto Submetido à Ação das Altas Temperaturas

O concreto é um material incombustível e que não emite gases tóxicos quando exposto às altas temperaturas, o que torna seu desempenho nessas condições adequado, especialmente ao se considerar que é capaz de manter resistência por tempo relativamente longo (MEHTA; MONTEIRO *apud* WENDT, 2006; NEVILLE, 1982). A norma ABNT NBR 15200/12 estabelece parâmetros para que esse tempo, por condições de projeto, seja suficiente para a fuga dos usuários e as operações de combate a incêndio, principal causa da exposição do concreto as altas temperaturas em situações reais.

A norma determina que os requisitos gerais de proteção contra incêndio no projeto de estruturas de concreto compreendem ainda a redução do risco de incêndio, o controle do fogo em estágios iniciais, a limitação da área exposta ao fogo, a criação de rotas de fuga e a facilitação da operação de combate ao incêndio.

Os danos causados por um incêndio vão desde o manchamento da superfície, com consequências meramente estéticas, até a completa destruição das estruturas (MORENO JÚNIOR, SOUZA; 2010). Dentre os efeitos que podem

resultar da exposição do concreto à ação das altas temperaturas estão a redução da resistência à compressão, à tração e do módulo de elasticidade, a fissuração decorrente de tensões térmicas, as alterações químicas dos compostos e a perda de aderência entre a pasta de cimento e os agregados (GEORGALI, TSAKIRIDIS; SHORT et al; *apud* WENDT, 2006).

A Figura 2 apresenta as classes de dano causadas por incêndios em estruturas de concreto, de acordo com o Boletim 38 do FIB (KLEIN, 2011):

Classe	Caracterização	Descrição
1	Dano estético, superficial	Caracterizado por depósitos de fuligem e descoloração, podendo ser removidos com uma lavagem em muitos casos. Pode ser necessário substituir alguns revestimentos. Odores podem ser removidos com produtos químicos específicos.
2	Dano técnico, superficial	Danos na superfície e revestimentos dos elementos estruturais. Pouco <i>spalling</i> no concreto e corrosão em elementos metálicos desprotegidos. Superfícies pintadas podem ser reparadas. Acabamentos à base de plásticos podem ser substituídos. Danos pequenos devido ao <i>spalling</i> podem ser ignorados ou resolvidos com pequenos reparos.
3	Dano estrutural, superficial	Há <i>spalling</i> e alguma fissuração do concreto, superfícies de madeira levemente carbonizadas, alguma deformação em superfícies metálicas ou corrosão moderada. Os reparos são semelhantes aos descritos na Classe 2.
4	Dano estrutural, seção transversal	Maior ocorrência de <i>spalling</i> e fissuração na alma de vigas com seção I, flanges deformadas e seções transversais parcialmente carbonizadas em elementos de madeira, plásticos degradados. Observam-se também grandes deformações da estrutura que reduzem a capacidade portante e afetam o posicionamento dos subsistemas da edificação. Esse comportamento manifesta-se principalmente em estruturas metálicas.
5	Danos estruturais de elementos e componentes	Danos severos em elementos estruturais e componentes, com falhas localizadas e grandes deformações. <i>Spalling</i> generalizado, armaduras expostas e zonas comprimidas são afetadas. Deformações permanentes em estruturas metálicas devido à redução da capacidade portante. Elementos de madeira podem ter as seções transversais totalmente carbonizadas. Diminuição da resistência dos materiais. Os danos da Classe 5 normalmente resultam na demolição da estrutura, sem possibilidade de reparos.

Figura 2 – Classe de danos causados por incêndios em estruturas de concreto (FIB *apud* KLEIN, 2011)

Wendt aponta que o principal fator físico de deterioração do concreto submetido às altas temperaturas é o desenvolvimento de tensões internas devido à evaporação da água e à dilatação diferencial dos materiais constituintes. Do ponto de vista químico, as principais alterações sofridas são a carbonatação, a desidratação do Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), a decomposição do C-S-H e do CaCO_3 (carbonato de cálcio) (BRITZ, 2011; WENDT, 2006).

A norma ABNT NBR 15200/12 especifica o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) para diversos tipos de estruturas; durante esse tempo, a ocorrência de plastificações, ruínas e até colapsos locais são admissíveis, desde que os requisitos gerais sejam atendidos. Devido ao grau de dano tolerado, para a reutilização das edificações é necessário realizar uma vistoria em suas estruturas, verificar sua capacidade remanescente e, caso seja considerado necessário, sua recuperação deve ser executada após a execução de um projeto (ABNT, 2012).

Os subitens a seguir abordam a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto e o efeito provocado pelas altas temperaturas nessas propriedades, assim como na coloração do material.

2.1.1.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada, geralmente, a propriedade fundamental do concreto, embora em muitos casos a durabilidade e a impermeabilidade possam ser mais importantes. Ainda assim, a resistência pode fornecer uma ideia geral da qualidade do concreto por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 1982).

Diversos autores em normas, incluindo a norma ABNT NBR 15200/12, apontam a redução da resistência à compressão do concreto como um dos efeitos de sua exposição às altas temperaturas. A

Figura 3 expõe o fator de redução da resistência à compressão do concreto adotado por algumas normas internacionais:

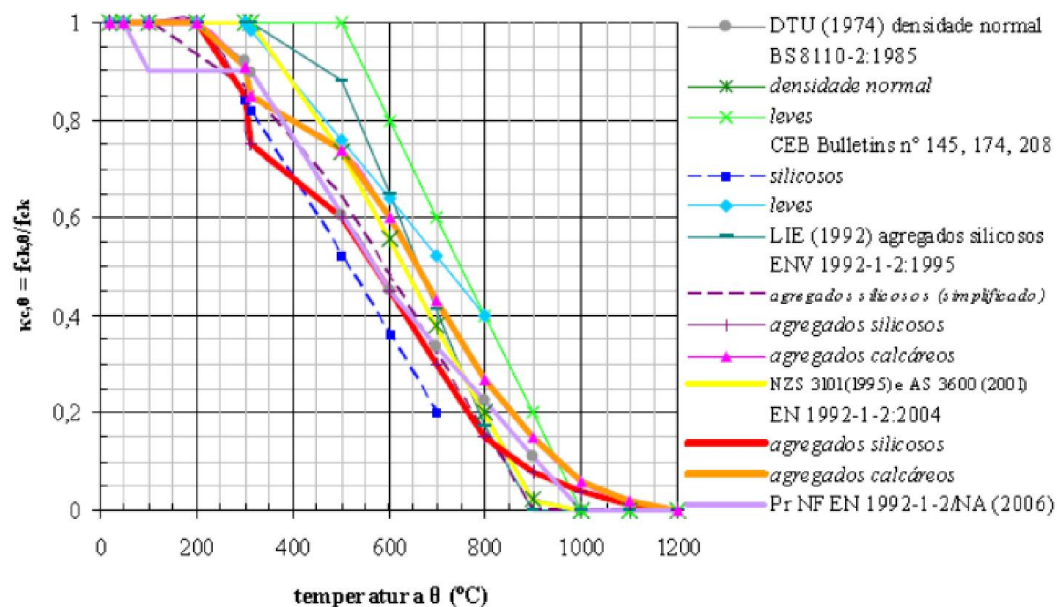


Figura 3 – Fator de redução da resistência característica à compressão do concreto em altas temperaturas (COSTA *apud* BRITEZ, 2011)

A Figura 4 apresenta a curva que correlaciona o fator de redução da resistência à compressão do concreto e a temperatura, proveniente da ABNT NBR 15200/14.

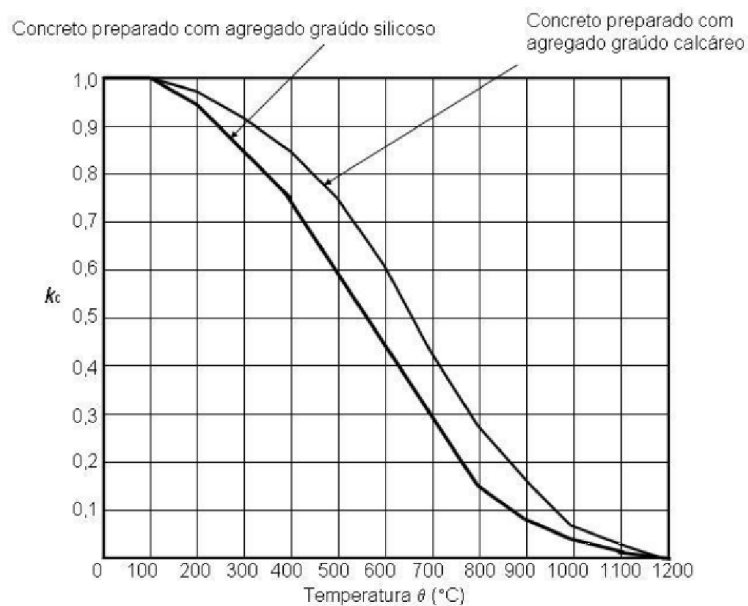


Figura 4 – Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura (ABNT, 2012)

Cabe ressaltar que as curvas devem ser utilizadas com cuidado, dada a limitação dos tipos de agregado abrangidos e as diferenças que podem resultar das variações nos métodos de ensaio (COSTA *apud* BRITEZ, 2011).

Outro fator que exerce grande influência na redução da resistência à compressão é a forma de resfriamento da estrutura: as estruturas submetidas ao resfriamento rápido, consequência comum das ações de contenção de incêndios em estruturas reais, sofrem um decréscimo da resistência muito mais acentuado devido aos gradientes de temperatura que se originam. A Figura 5 ilustra essa situação:

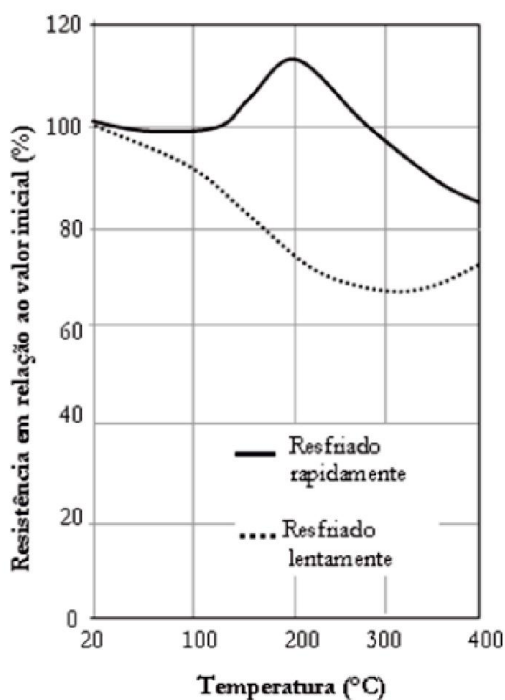


Figura 5 – Efeito do resfriamento rápido na resistência à compressão (CANOVAS *apud* MORENO JÚNIOR; SOUZA, 2010)

A estimativa da resistência à compressão residual do concreto pode ser realizada ainda por métodos alternativos, tal como a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Ambas as propriedades são fortemente ligadas à densidade do concreto (NEVILLE *apud* WENDT, 2006).

Tanto a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas quanto a resistência à compressão do concreto são reduzidas pela exposição do material às altas temperaturas (CARRÉ, HAGER, KRZEMIEN) - Mohmadbhai afirma que a avaliação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas pode fornecer indicações das temperaturas atingidas pelo concreto até melhores do que a análise da resistência à compressão residual (MOHMADBHAI *apud* WENDT, 2006).

A Figura 6 e a Figura 7 ilustram a variação dessas propriedades em amostras submetidas à ação das altas temperaturas:

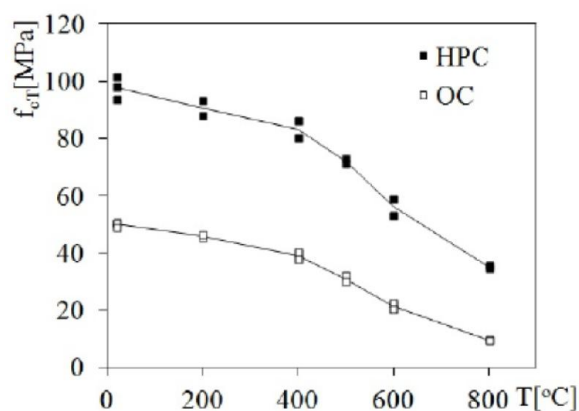


Figura 6 – Variação da resistência à compressão residual do concreto em amostras de resistência normal (OC) e alta (HPC) (CARRÉ, HAGER, KRZEMIEN)

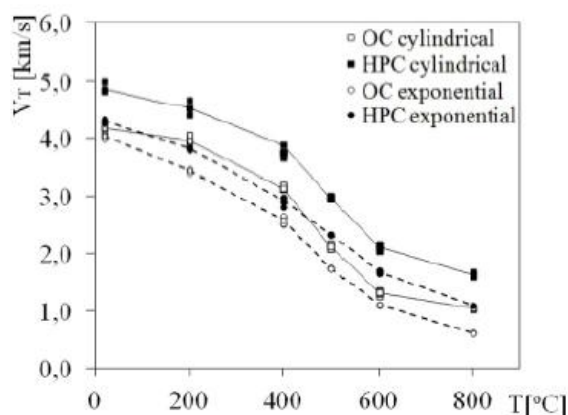


Figura 7 – Variação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto em amostras de resistência normal (OC) e alta (HPC) (CARRÉ, HAGER, KRZEMIEN)

2.1.1.2. Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é notadamente inferior a sua resistência à compressão, variando de 7 a 16%, em concretos normais.

Dado que o concreto não é normalmente utilizado para resistir aos esforços de tração, o conhecimento dessa propriedade é útil para estimar a carga sob a qual o concreto fissurará.

A resistência à tração do concreto pode ser determinada através de diversos ensaios; os mais comuns utilizam a flexão e a compressão diametral, sendo que esse último é mais simples e proporciona resultados mais uniformes.

Na ausência de ensaios, há diversas expressões a fim de estimar o valor da resistência à tração do concreto, sendo que a ABNT NBR 6118/14 indica o uso das equações $f_{ctk_{inf}} = 0,7 (0,3 f_{ck}^{2/3})$ [MPa] e $f_{ctk_{sup}} = 1,3 (0,3 f_{ck}^{2/3})$ [MPa] para concretos até a Classe C50. (ABNT, 2014; NEVILLE, 1982).

A resistência à tração do concreto também é reduzida pela ação das altas temperaturas. A norma europeia EN 1992-1-2:2004 recomenda que essa propriedade seja ignorada na situação de incêndio, em fase de projeto ou que sejam utilizados coeficientes redutores. A aplicação desses coeficientes leva ao gráfico apresentado na Figura 8 (EN 1992-1-2:2004 *apud* KLEIN, 2011):

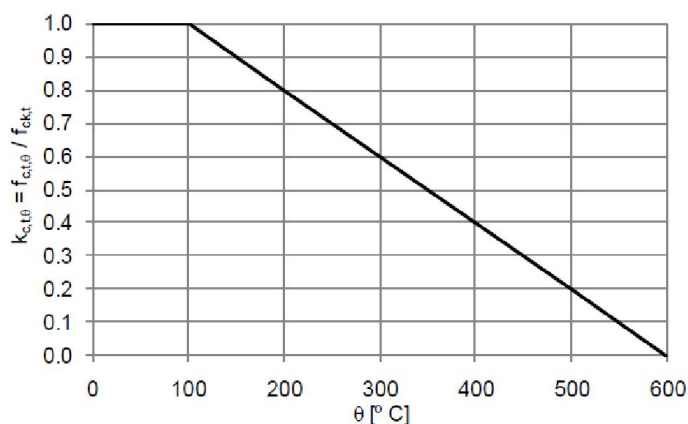


Figura 8 – Parâmetros de redução da resistência à tração do concreto $K_{c,t,\theta}$ em função da temperatura (EN 1992-1-2:1994 *apud* KLEIN, 2011)

Na análise da redução da resistência à tração do concreto sob a ação das altas temperaturas, é importante considerar ainda que ela decresce em uma velocidade maior do que a resistência à compressão, sob as mesmas condições, conforme exposto pela Figura 9 a seguir, em que $k_{c,t,\theta}$ representa a resistência à tração e $k_{c,\theta}$, a resistência à compressão do concreto.

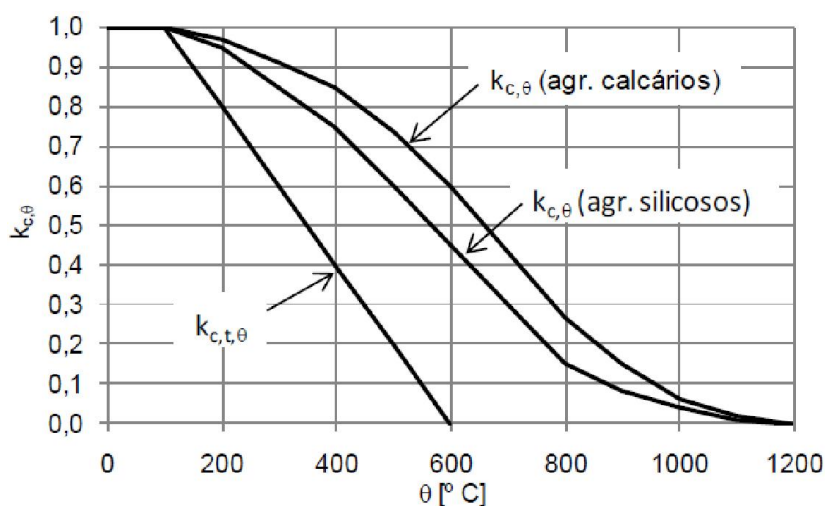


Figura 9 – Comparação entre os parâmetros de redução da resistência à compressão e à tração do concreto em função da temperatura (EN 1992-1-2-1994 *apud* KLEIN, 2011)

2.1.1.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto, denominado por alguns autores como módulo de deformação, é a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado. Ele avalia a resistência do material à deformação elástica.

Essa propriedade exerce influência significativa em um projeto estrutural, pois está associado à deformação máxima permitida, antes que o material adquira deformação permanente (MEHTA; MONTEIRO *apud* BENETTI, 2012). O conhecimento do módulo permite, dentre outras atividades, o cálculo das flechas máximas admissíveis de um elemento estrutural, viabilizando

a definição de limites para evitar a fissuração do concreto (LEVY *apud* BENETTI, 2012).

A determinação do módulo de elasticidade do concreto tende a ser um processo complexo, pois ele não é um material realmente elástico e porque as deformações e restrições não são uniformes ao longo dos elementos estruturais (MEHTA; MONTEIRO *apud* BENETTI, 2012).

Diversas normas técnicas adotam equações para a estimativa do módulo de elasticidade com base na resistência à compressão do concreto. A NBR 6118/14 estabelece que, para obtenção do módulo de elasticidade deve-se utilizar a metodologia de ensaio prevista na ABNT NBR 8522/08. Quando a realização do ensaio não é possível, a norma apresenta ainda uma série de equações para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade, de acordo com o uso pretendido do resultado (ABNT, 2014).

A exposição do concreto à ação das altas temperaturas reduz seu módulo de elasticidade. A ABNT NBR 15200/04 indica a aplicação de um coeficiente para estimar essa redução, conforme a Figura 10:

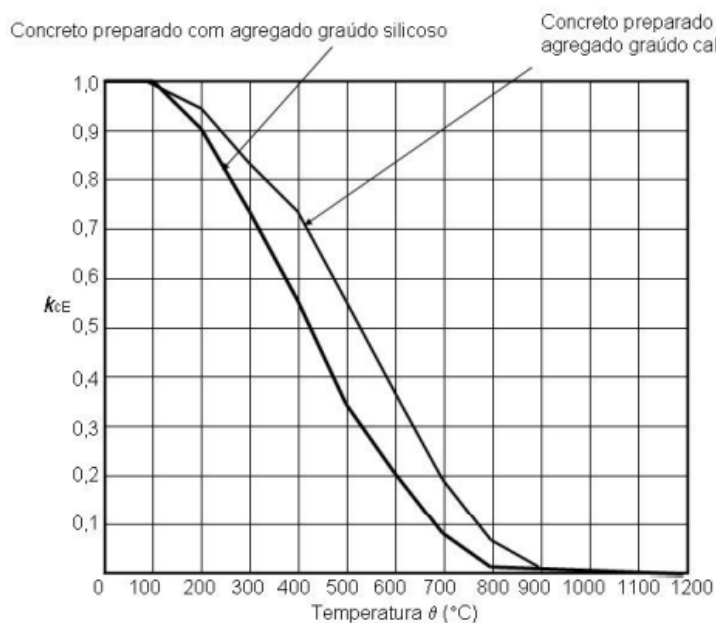


Figura 10 – Redução do módulo de elasticidade em função da temperatura (ABNT, 2004)

2.1.1.4. Compacidade do Concreto

A compacidade do concreto é uma propriedade relacionada à presença de vazios no interior do material – quanto maior a quantidade e o tamanho dos poros, menor a compacidade do concreto – e resulta do grau de adensamento da mistura, quando fresca. Dessa forma, pode-se afirmar que a compacidade do concreto é diretamente ligada à porosidade do mesmo.

A porosidade do concreto é afetada pela exposição às altas temperaturas, seja pela desidratação do material ou pela expansão das fases sólidas. É importante ressaltar que o aumento da porosidade resultante da perda de massa sob a ação das altas temperaturas é ainda mais marcante em concretos de alta resistência mecânica.

A Figura 11 ilustra a evolução da estrutura dos poros de pastas de cimento e da zona de transição junto ao agregado em função do aumento da temperatura. (LIMA, 2005). Cabe destacar que a diferença entre o comportamento das argamassas e do concreto quando submetidos às altas temperaturas se dá pelo fato que a fissuração do concreto é mais intensa, o que decorre da expansão dos agregados (PETRUCCI *apud* LIMA, 2005), e que o aumento da quantidade de poros no concreto não ocorre de forma linear.

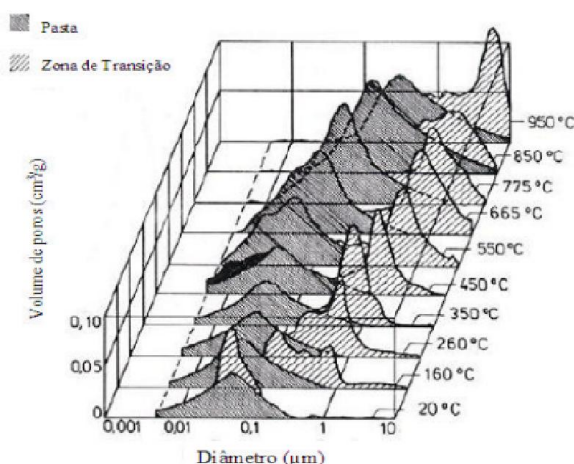


Figura 11 – Evolução da distribuição de tamanho de poros da pasta de cimento e da zona de

transição de argamassas expostas a altas temperaturas (ANDRADE et al *apud* LIMA, 2005)

A análise da Figura 11 expõe que há uma tendência ao aumento do diâmetro e do volume dos poros em temperaturas mais elevadas mais acentuada na zona de transição junto aos agregados do que na pasta de cimento, relacionada ao aumento da fissuração do material na região.

A Figura 12 demonstra que, de forma geral, as transformações na distribuição dos poros são função das temperaturas atingidas (LIMA, 2005):

Poros \ T [°C]	0 – 100	100 – 300	300 – 500	500 – 800	> 800
Gel [< 0,005µm]	Inalterado	Redução	Desaparece	Desaparece	Nova formação
Capilar [< 0,005µm]	Inalterado	Aumento	Aumento	Redução	Inalterado
Capilar [< 0,005 – 5µm]	Inalterado	Inalterado	Aumento	Aumento	Aumento
Ar incorporado [< 5µm]	Inalterado	Inalterado	Aumento	Aumento	Aumento

Figura 12 – Transformação na distribuição dos poros durante aquecimento (ANDRADE et al *apud* LIMA, 2005)

Os resultados dos ensaios realizados com os corpos de prova extraídos do Edifício Windsor, em Madri, após um incêndio de 16 horas de duração, corroboram esses dados. Os corpos de prova foram fatiados em três camadas – superficial, intermediária e interna- e comprovou-se, através da avaliação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no material, que houve redução da compacidade do concreto, marcadamente mais elevada nas camadas superficiais do que nas camadas intermediárias e internas (MONTIJA, 2006).

2.1.1.5. Coloração do Concreto

A coloração do concreto sofre variações em função das altas temperaturas, relacionáveis à temperatura máxima atingida. Como essas variações permanecem após o resfriamento do material, sua análise é uma ferramenta indicada para a estimativa preliminar do nível de degradação do concreto.

Há diversos estudos acerca das alterações na coloração do concreto em função da temperatura, mas a variabilidade dos resultados apresentados, resultante das diferenças entre os materiais utilizados e as condições de ensaio, dificulta seu uso. Dessa forma, para que a análise seja eficiente, é necessária a realização de estudos com materiais da mesma origem do concreto afetado pela ação das altas temperaturas. No caso de estruturas reais afetadas por incêndios, isso pode ser obtido pela extração de testemunhos de concreto de regiões sãs, cujo concreto possua a mesma origem do material atingido, ou pela reconstituição do concreto com base nos registros da construção, caso existam.

Dentre os estudos existentes sobre o assunto, a maioria avalia a variação de coloração com base na inspeção visual das amostras, sujeita às variações pessoais de percepção, e poucos utilizam ferramentas de análise colorimétrica, como colorímetros e microscopia ótica combinada com análise digital de imagens (KLEIN, 2011 & WENDT, 2006). É preciso destacar que a mudança de coloração muitas vezes é sutil e somente perceptível por um observador treinado, sob luz adequada (BESSEY *apud* CPPT, 1999), tornando-se mais marcantes apenas para temperaturas superiores a 600 °C (CPPT, 1999).

Mesmo que não haja uma correlação direta entre as alterações de cores e de resistência do concreto, sua análise é interessante por permitir avaliar rapidamente as áreas mais danificadas (FIB *apud* KLEIN, 2011). A Figura 13 apresenta um levantamento acerca da relação entre a cor do concreto e a temperatura atingida:

Temperatura [°C]	Cor	Aspecto visual / Desempenho
<250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285-300	Cinza-Roseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
300	Rosa	Início de mudança de cor
50 - 400		Redução do módulo de deformação
535-550	Roxo	Fissuração profunda – friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790-800		Lascamentos do cobrimento das armaduras, com exposição até 25% da superfície das mesmas
900	Amarelo alaranjado	Superfície pulverulenta
1000	Amarelo claro	

Figura 13 – Coloração do concreto superaquecido (ROSSO *apud* CAMPOS et al, 2011)

O Boletim 38 do FIB afirma que, para a recuperação da estrutura, as camadas de concreto que atingiram ou ultrapassaram 300° C devem ser removidas (FIB *apud* KLEIN, 2011). Nota-se que, na Figura 13, a mudança de coloração se iniciou na temperatura de 285° C. Com base na Figura 4 e na Figura 10, pode-se afirmar que ao atingir 300° C o concreto já teve reduzidos em aproximadamente 15 a 25% sua resistência à compressão e seu módulo de elasticidade e em cerca de 40% sua resistência à tração. Esses valores podem ser excessivos, dependendo das condições de projeto e serviço da estrutura. Dessa forma, é preciso considerar os resultados da avaliação da coloração com cautela.

Cabe destacar ainda que a mudança de coloração para cinza-róseo e rosa resulta da oxidação do ferro hidratado presente no concreto – especialmente nos agregados silicosos, como a areia -e tanto a tonalidade atingida quanto a temperatura em que o processo de mudança se inicia variam de acordo com a composição química dos materiais e pode ser afetada por fatores como a cor original da rocha de origem do agregado (BESSEY *apud* WENDT, 2006; CPPT, 1999).

A adição de pigmento de óxido de ferro sintético (Fe_2O_3) ao concreto fresco pode ser utilizada como uma forma de intensificar a alteração de cor derivada da ação das altas temperaturas (BRITEZ, 2011). A partir de aproximadamente 570°C , ocorre a redução do óxido de ferro Fe_2O_3 , de cor vermelha, em Fe_2O_4 , de cor preta (NOLDIN JÚNIOR, ROSENQVIST; ROSS et al, *apud* BRITEZ, 2011), criando uma delimitação evidente no concreto, conforme exposto pela Figura 14.



Figura 14 – Detalhe da alteração de cor promovida pela reação química de redução do óxido de ferro nos primeiros 55 mm de profundidade do elemento de concreto (BRITEZ, 2011)

Segundo Bessey, a mudança da cor do concreto ocorre com a variação da cor do agregado. Em seus estudos, constatou-se a alteração da cor da areia quartzosa e do arenito de amarelo ou marrom para rosa ou marrom avermelhado em torno de 250°C e 300°C , do calcário de branco para rosa e avermelhado entre 250 e 400°C . Não foi observada alteração de cor dos basaltos e granitos (BESSEY *apud* WENDT, 2006).

2.2. ENSAIOS

A seguir, são apresentados ensaios voltados para a análise de amostras de concreto submetidas à ação de altas temperaturas no presente projeto de pesquisa. Cabe destacar que os ensaios de determinação da perda e fogo e de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica são a base do presente trabalho e que os demais ensaios são complementares, destinando-se à melhor caracterização das amostras.

2.2.1. Avaliação da Homogeneidade e Compacidade do Concreto através da Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

A norma ABNT NBR 8802/13 estabelece o procedimento de ensaio para determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em concreto com o objetivo de verificar a homogeneidade do concreto, detectar vazios ou imperfeições e variações no concreto ao longo do tempo (ABNT, 2013). Cabe destacar que a homogeneidade e a compacidade são propriedades indissociáveis durante a realização desse ensaio e que ambas são afetadas pela ação das altas temperaturas.

De fato, há autores que ressaltam que as altas temperaturas tornam cada vez mais evidentes a anisotropia e a heterogeneidade do concreto (HOFF; BILODEAU; MALHOTRA, *apud* BRITEZ, 2011). De forma geral, a distribuição do calor na peça afeta a forma como a compacidade será afetada e altera sua homogeneidade. Apesar da incidência do calor poder ser controlada em laboratório para que ocorra por igual, isso não acontece em situações reais de incêndio.

O ensaio é realizado utilizando um circuito gerador-receptor de ondas de baixa frequência ultrassônica, um circuito medidor de tempo – geralmente, integrado no mesmo aparelho que o circuito gerador-receptor-, um transdutor

receptor e um transdutor emissor ligados aos circuitos por cabos coaxiais, material acoplante – como gel condutor ou vaselina – e uma barra de referência.

Após a calibração do equipamento com a barra de referência, os transdutores são posicionados no concreto, cuja superfície deve ter sido preparada para se apresentar lisa. Os arranjos possíveis para o posicionamento dos transdutores são três: direto, em que os transdutores se localizam em faces opostas do elemento a ser ensaiado, indireto, em que os transdutores são dispostos adjacentes na mesma face do elemento, e semi-direto, em que os transdutores são fixados em faces perpendiculares do elemento. Após essa etapa, emitem-se as ondas ultrassônicas e registra-se o resultado: sua velocidade de propagação no material, em m/s (ABNT, 2013).

Diversos estudos propõem parâmetros para avaliação dos resultados. Um dos mais comuns é o apresentado por Manuel Cãnovas (CÂNOVAS, 1988):

Velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Tabela 2- Parâmetros para avaliação do concreto em função da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (CANOVAS, 1988).

2.2.2. Determinação da Perda ao Fogo

O Boletim 25 do IPT, publicado inicialmente em 1940, apresenta uma metodologia para reconstituição de traço de concreto amplamente utilizada, atualmente. Dentre as etapas para a reconstituição de traço, está a determinação da perda ao fogo do concreto após calcinação de amostra a 1000° C durante 01 hora, em uma mufla (IPT, 1940).

A variação desse ensaio aqui denominada como HB determina a perda ao fogo do concreto nas temperaturas de 440 ± 5 °C e 1100 ± 50 °C. Tais temperaturas encontram fundamento em estudos como o de Bhattý e Reid, que dividem as temperaturas ligadas à decomposição da pasta de cimento em 3 fases – L_{dh} , L_{dx} e L_{dc} , a saber:

- a) L_{dh} (105 °C a 440 °C): desidratação devido à perda de água facilmente removível, interlaminar e adsorvida do silicato de cálcio hidratado (C-S-H);
- b) L_{dx} (440 °C a 580 °C): perda de massa pela de-hidroxilação do $CA(OH)_2$, com pico da reação aproximadamente aos 600 °C;
- c) L_{dc} (580 °C a 1000 °C): perda de massa pela de-carbonatação do $CaCO_3$, com pico da reação aproximadamente aos 780 °C.

Bhattý e Reid consideram ainda que a perda de água total resulta da soma de L_{dh} e L_{dx} e que a soma de L_{dc} a esse valor indica a perda por ignição LOI. A água quimicamente combinada (AQC) e o teor de $CA(OH)_2$ podem ser estimados com base nesses resultados (BHATTY, REID *apud* RODRIGUES, 2004; FORDHAM, SMALLEY *apud* RODRIGUES, 2004).

Elevados teores de carbonatação podem ser indicados por uma perda de massa da pasta de cimento superior a 3% em relação à massa total, em temperaturas acima de 550 °C. Acima dessa temperatura, ocorrem também a perda de massa devido ao CO_2 e aos estágios finais da decomposição do C-S-H e dos aluminatos (TAYLOR *apud* RODRIGUES, 2004).

2.2.3. Determinação da Resistência à Compressão Axial do Concreto

O ensaio de determinação da resistência à compressão axial do concreto em corpos de prova cilíndricos é abordado pela norma ABNT NBR 5739/07. Ela especifica que os corpos de prova, após sua devida preparação, devem ser rompidos à compressão em prensa própria para esse uso. Para isso, é aplicado carregamento à velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/ s até a ruptura da amostra.

Antes de sua utilização, o resultado obtido é corrigido em função das dimensões do corpo de prova.

A norma RILEM TC 129-MHT, que foca na análise das propriedades residuais do concreto submetido à ação das altas temperaturas, possui um procedimento de ensaio para determinação da resistência à compressão do concreto em sua parte 3. Os corpos de prova utilizados possuem termopares embutidos e sua relação altura/ diâmetro é de 3:1 ou 4:1. O ensaio pode ser realizado durante o aquecimento dos corpos de prova ou após sua realização e o carregamento é aplicado à velocidade constante de $0,5$ MPa s⁻¹ até a ruptura da amostra (SCHNEIDER, 1995).

A Figura 15 ilustra a realização do ensaio de resistência à compressão durante o aquecimento e o posterior resfriamento da amostra:

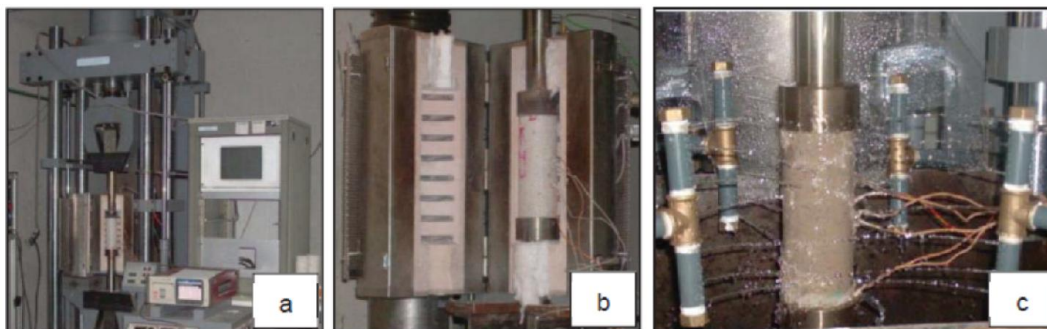


Figura 15 – Determinação da resistência à compressão residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).

2.2.4. Determinação da Resistência à Tração do Concreto

A resistência à tração do concreto pode ser determinada em laboratório por tração direta, por compressão diametral e na flexão.

O método para determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto é abordado pela norma ABNT NBR 7222/11. Consiste na aplicação de carga em um corpo de prova disposto em posição horizontal em uma prensa própria para esse uso, até que ocorre a ruptura da amostra, separando-a em duas metades em relação ao plano diametral vertical (ABNT, 2011).

Além de fornecer a resistência à tração desse concreto, esse método permite a visualização da seção longitudinal do elemento ensaiado, tal como utilizado no ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade com o propósito de verificar até que altura a água ascendeu no interior do elemento (ABNT, 2012).

A determinação da resistência à tração na flexão é regida pela norma ABNT NBR 12142/10 e é obtida através do ensaio de corpos de prova prismáticos. A carga é aplicada através de um elemento posicionado sobre a face superior do terço central do corpo de prova e calculada com base nas fórmulas indicadas na norma (ABNT, 2010).

A resistência à tração direta residual, por sua vez, pode ser determinada de acordo com a recomendação RILEM TC 129-MHT Part 4, durante ou após a submissão das amostras à ação das altas temperaturas. A recomendação indica a confecção de corpos de prova cilíndricos, de seção constante ou com a parte central (2/3 do comprimento total) de seção reduzida, e a fixação de termopares nos mesmos. As extremidades dos corpos de prova são presas ou coladas em placas metálicas e tracionadas até a ruptura da amostra (RILEM, 2000). Esse procedimento é ilustrado pela Figura 16.

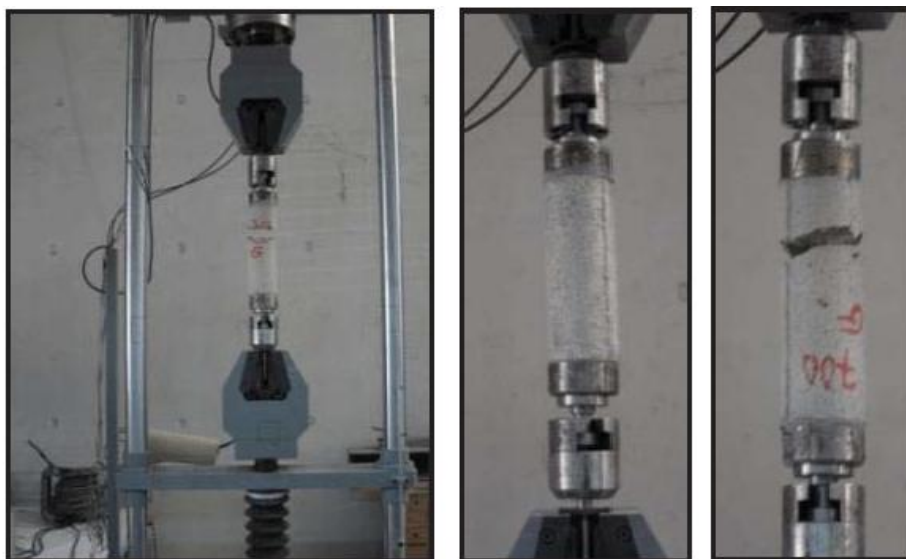


Figura 16 – Determinação da resistência à tração direta residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).

2.2.5. Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto

O procedimento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto é definido pela norma ABNT NBR 8522/08. De acordo com a norma, para a obtenção do módulo é necessário submeter corpos de prova à aplicação de uma força em equipamento específico, enquanto as deformações são medidas por instrumentos elétricos ou mecânicos.

Para a determinação do módulo de elasticidade, é necessário conhecer previamente a resistência à compressão de 02 corpos de prova similares e com a mesma origem que as demais amostras a serem ensaiadas. A norma apresenta duas metodologias para a execução do ensaio e para o cálculo do módulo de elasticidade do concreto ensaiado, com base nos valores obtidos para cada corpo de prova (ABNT, 2008).

O módulo de elasticidade residual do concreto submetido às altas temperaturas também pode ser obtido através do procedimento descrito na norma

RILEM TC 129-MHT. O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos dotados de termopares, submetidos a um carregamento cíclico em uma prensa própria para esse uso. O módulo de elasticidade resulta da aplicação dos resultados em fórmulas indicadas na recomendação técnica (RILEM, 2004). A Figura 17 ilustra a realização desse ensaio.



Figura 17 – Determinação do módulo de elasticidade residual do concreto (RODRIGUES; SANTOS, 2011).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental proposto é composto por quatro fases, repetidas para cada um dos dois traços utilizados e ilustradas pelos fluxogramas apresentados na Figura 18, na Figura 19, na Figura 20 e na Figura 21.



Figura 18 – Fase 01: Caracterização dos materiais utilizados e moldagem das amostras

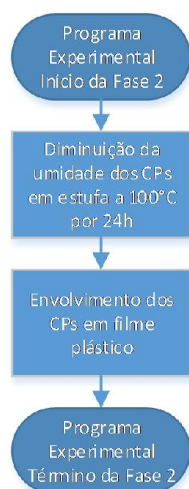


Figura 19 – Fase 02: Preparação das amostras para exposição à ação das altas temperaturas

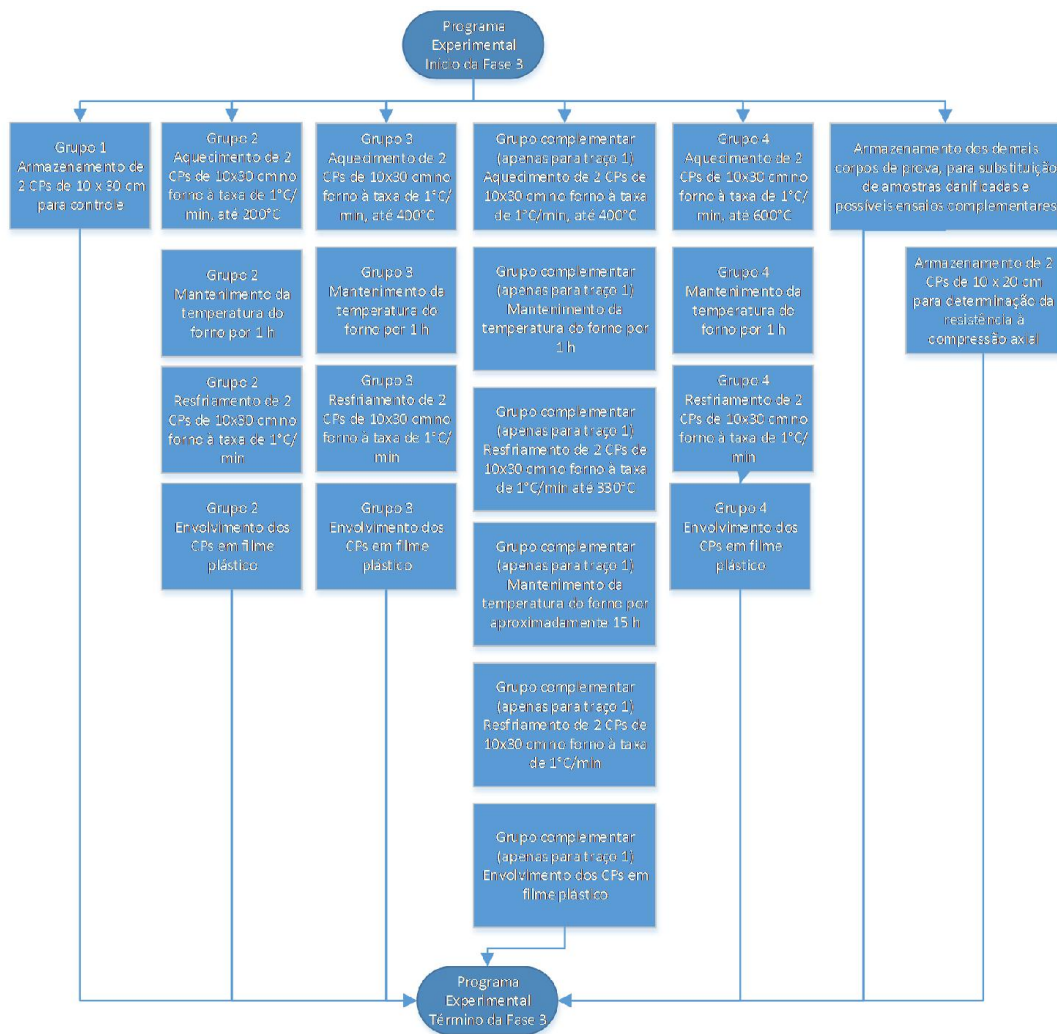


Figura 20 – Fase 03: Exposição das amostras à ação das altas temperaturas

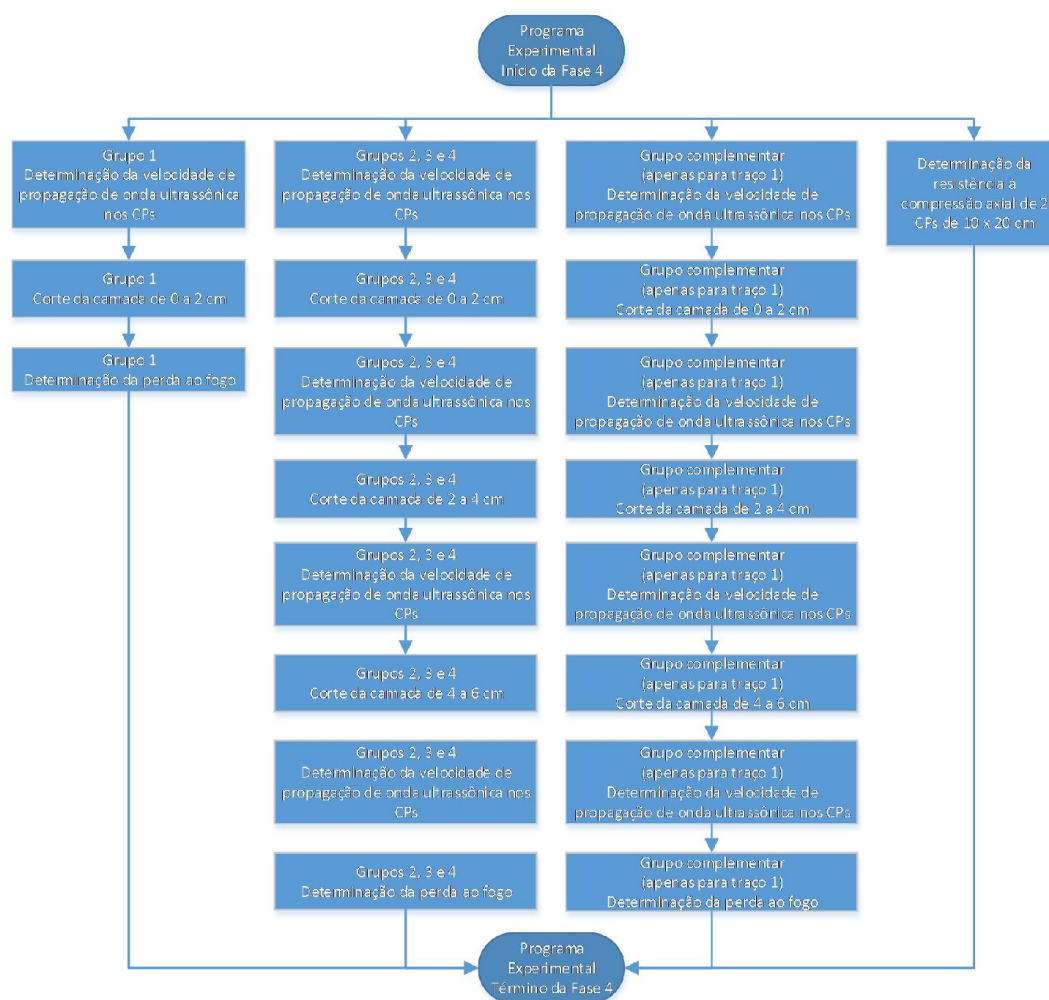


Figura 21 – Fase 04: Realização dos ensaios

As amostras foram nomeadas sequencialmente por um número, indicativo do traço utilizado, e por uma letra. As combinações não utilizadas em corpos de prova de 10 x 30 cm e compreendidas entre 1a e 1l, 2a e 2l, foram atribuídas a corpos de prova cuja taxa de aquecimento e/ ou resfriamento no forno não atingiu os padrões estabelecidos pelas recomendações RILEM TC 200 HTC e 129-MHT. Tais amostras foram descartadas e não integram o presente estudo, à exceção dos CPs 1B e 1C. As amostras 1m a 1o e 2m a 2o foram moldadas para substituir outros corpos de prova que eventualmente se danificassem no decorrer das atividades e não foram utilizadas.

Os corpos de prova de 10 x 20 cm foram nomeados da mesma forma, utilizando o número de identificação do traço associado a letras compreendidas entre “p” e “aa”. Contudo, apenas as amostras “p” e “q” foram utilizadas.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Os corpos de prova utilizados na pesquisa foram concretados utilizando dois traços diferentes, desenvolvidos com o propósito de representar um concreto de resistência normal (Traço 1) e um concreto de alta resistência (Traço 2).

A Tabela 3 apresenta os traços utilizados.

Traço	Proporção do material					
	Cimento Portland Tipo CPII-E-32	Areia fina	B (basalto)	Sílica de casca de arroz	Aditivo plastificante	Relação água/cimento
1	1	3	3	-	-	0,60
2	1	1,5	1,5	0,1	0,015	0,35

Tabela 3- Traços utilizados.

Os agregados utilizados foram caracterizados antes de seu uso. A Tabela 4 apresenta os dados resultantes da caracterização do agregado miúdo e a Tabela 5 apresenta os dados resultantes da caracterização do agregado graúdo.

Peneira (mm)	Massa da peneira (g)	Massa retida (g)	% retida		% retida acumulada	
4,75	500,2	501,7-500,2=1,5	0,31	0	0,31	0
2,36	486,4	497,0-486,4=10,6	2,16	2	2,47	2
1,18	494,0	540,7-494,0=46,7	9,51	10	11,98	12
0,6	419,4	528,7-419,4=109,3	22,26	22	34,24	34
0,3	407,8	561,1-409,0=153,3	31,22	31	65,46	65

Peneira (mm)	Massa da peneira (g)	Massa retida (g)	% retida		% retida acumulada	
0,15	409,0	547,0-409,0=138,0	28,11	28	93,57	93
Fundo	406,0	437,6-406,0=31,6	6,43	7	100	100
Total	-	491	100	100	-	-
MF = 2,08		D _{máx} = 2,36				

Tabela 4- Caracterização do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Massa da peneira (g)	Massa retida (g)	% retida		% retida acumulada	
25	7750	7750	0	0	0	0
19	7350	7650-7350=300	3,00	3	3,00	3
12,5	8200	14100-8200=5900	59,00	59	62,00	62
9,5	7550	9400-7550=1850	18,50	18,5	80,50	80,5
6,3	6200	8000-6200=1800	18,00	18	98,50	98,5
4,8	5950	6100-5950=150	1,50	1,5	100	100
2,4	-	-	-	-	100	100
1,2	-	-	-	-	100	100
0,6	-	-	-	-	100	100
0,3	--	--	-	-	100	100
0,15	-	-	-	-	100	100
Fundo	-	-	-	-	100	100
Total	-		100	100	-	-
MF = 6,83		D _{máx} = 19 mm				

Tabela 5- Caracterização do agregado graúdo.

Os corpos de prova foram moldados em formas de 10x20 cm e em formas de 10x30 cm, confeccionadas com o propósito de atender as recomendações RILEM TC 200 HTC e 129-MHT. A Figura 22 apresenta as formas referenciadas e a Figura 23, os corpos de prova logo após a moldagem.



Figura 22 – Formas metálicas de 10x30 cm.



Figura 23 – Vista dos corpos de prova.

Ainda de acordo com os procedimentos da recomendação RILEM TC 200 HTC e 129-MHT, os corpos de prova foram vibrados em uma mesa vibratória antes de serem destinados a cura por 28 dias em câmara úmida.

3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA EXPOSIÇÃO À AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS

Após o término da cura de 28 dias em câmara úmida, os corpos de prova foram aquecidos em uma estufa à 100°C por 24 h, de forma a reduzir sua umidade e diminuir a possibilidade de ocorrência de *spalling* (lascamento explosivo) no forno. A Figura 24 ilustra o aquecimento dos corpos de prova na estufa.



Figura 24 – Vista dos corpos de prova na estufa.

Destaca-se que, à temperatura de 100°C e durante o período de 24 h, não são esperadas alterações na resistência à compressão, na resistência à tração, no módulo de elasticidade, na porosidade ou na coloração do concreto.

As amostras foram envolvidas em filme plástico, conforme a Figura 25, entre a pesagem após o aquecimento na estufa e o aquecimento no forno, de modo a evitar a absorção de umidade presente no ar.



Figura 25 – Vista dos corpos de prova envolvidos em plástico filme, entre o aquecimento na estufa e o aquecimento no forno.

3.3. EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS À AÇÃO DAS ALTAS TEMPERATURAS

Para exposição das amostras à ação das altas temperaturas, foi utilizado um forno vertical elétrico composto por 3 módulos de 1,20 m de altura e 0,70 m de diâmetro cada e equipado com um termopar. A Figura 26 apresenta uma vista do forno.



Figura 26 – Vista do forno vertical elétrico.

A programação do forno foi realizada com o software Flycon, como ilustrado pela Figura 27.

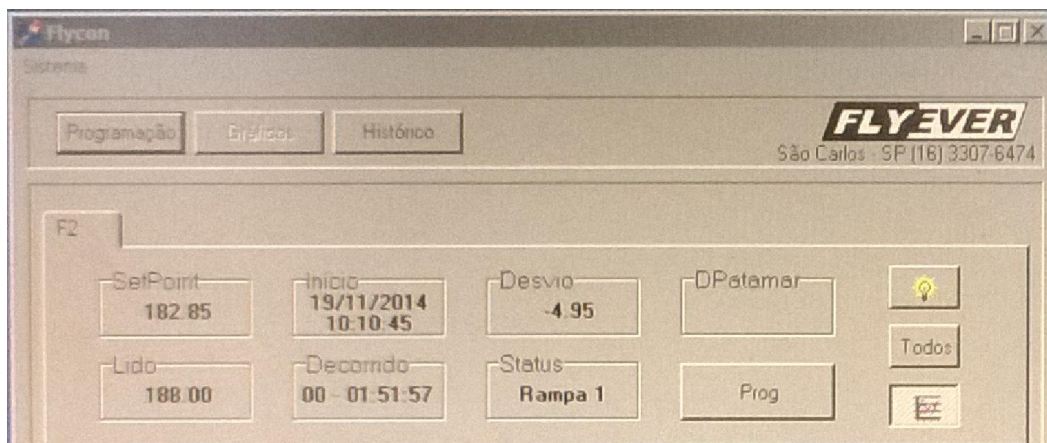


Figura 27 – Programação do forno através do software Flycon.

As amostras foram aquecidas em 3 grupos– Grupos 2 a 4 - de 4 corpos de prova, sendo 2 de cada traço. O aquecimento e o resfriamento basearam-se na recomendação RILEM TC 129-MHT, com taxa de 1 °C/ min e patamar de 1 h na temperatura máxima. O Grupo 2 atingiu 200 °C, o Grupo 3, 400 °C e o Grupo 4, 600° C. Destaca-se que o Grupo 1 não sofreu aquecimento no forno, destinando-se ao controle dos resultados, e que foram aquecidos a 400 °C os corpos de prova complementares 2B e 2C.

A Figura 28 ilustra o posicionamento dos corpos de prova no forno para aquecimento até 200 °C, a Figura 29, até 400 °C e a Figura 30, até 600 °C.



Figura 28 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 200 °C
(Grupo 2).

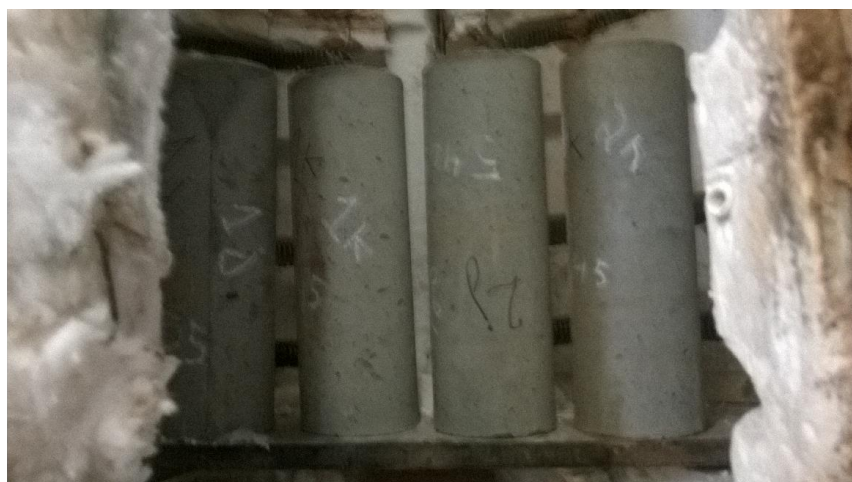


Figura 29 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 400 °C
(Grupo 4).



Figura 30 – Posicionamento dos corpos de prova no forno para o aquecimento até 600 °C (Grupo 5).

A temperatura de 200 °C foi escolhida por marcar o início aproximado da degradação térmica do concreto, segundo Wendt, e a temperatura de 400 °C por ser um valor intermediário logo após o atingimento da temperatura necessária para a alteração da coloração da areia e para o aumento da porosidade das amostras. A temperatura de 600 °C foi definida por ser o limite esperado da resistência à tração do concreto, segundo a EN 1992-1-2-1994.

O gráfico apresentado na Figura 31 exemplifica o acompanhamento da oscilação da temperatura durante o uso do forno possibilitado pelo software Flycon, de aproximadamente 10°C. A linha azul representa o comportamento programado e a linha vermelha, o comportamento real do forno.

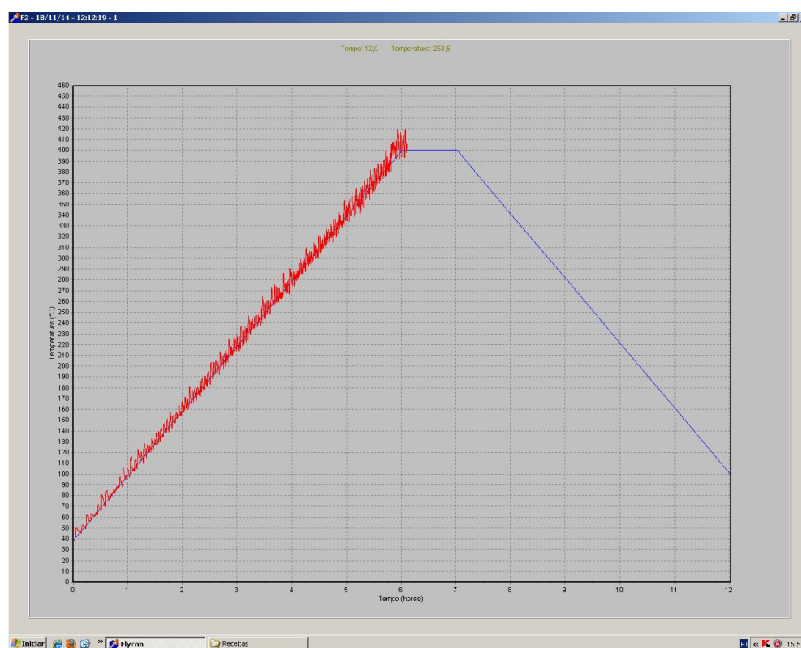


Figura 31 – Gráfico de acompanhamento da temperatura do forno gerado em tempo real pelo software Flycon.

Os gráficos apresentados na Figura 32, na Figura 33 e na Figura 34 apresentam o ciclo de aquecimento e resfriamento das amostras, desconsiderando as oscilações de pequena grandeza.

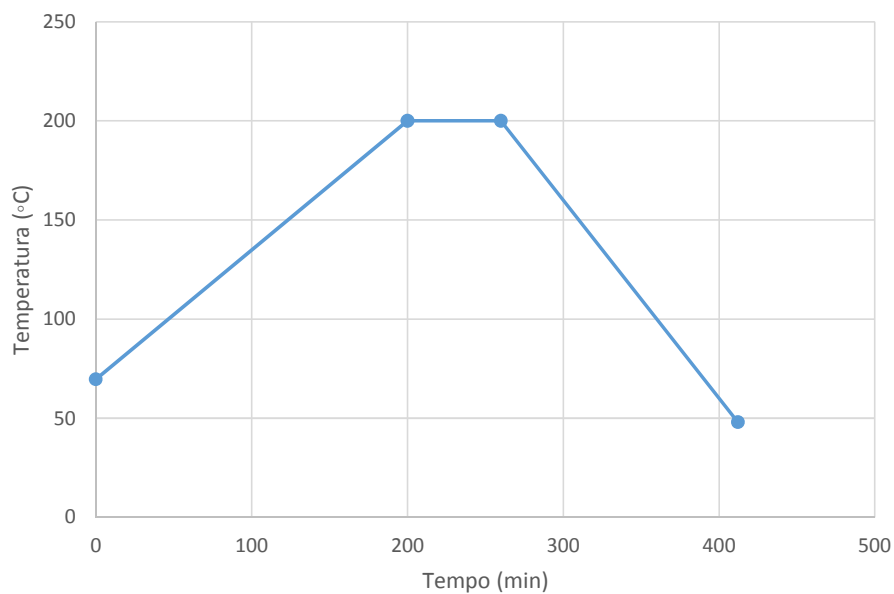


Figura 32 – Aquecimento dos corpos de prova até 200 °C e posterior resfriamento (Grupo 2).

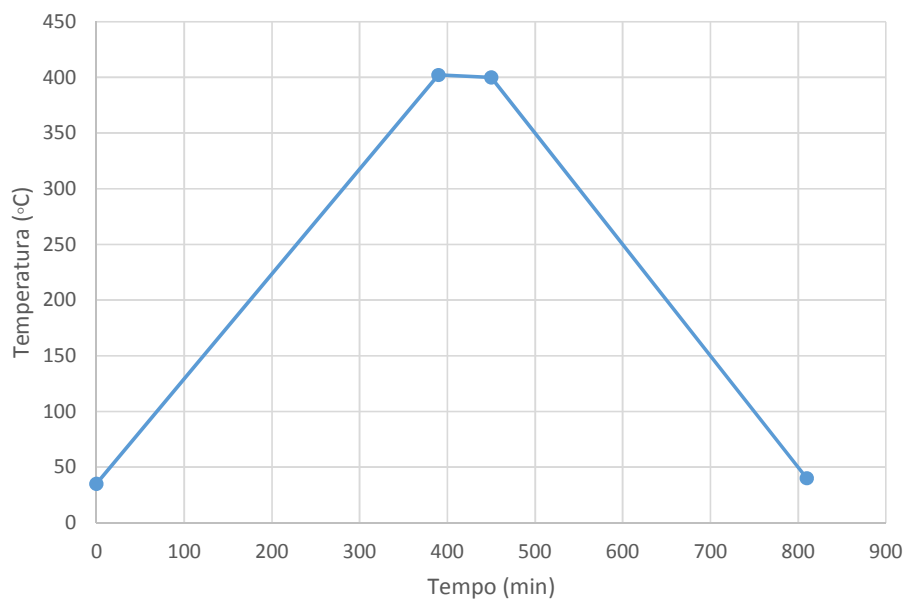


Figura 33 – Aquecimento dos corpos de prova até 400 °C e posterior resfriamento (Grupo 3).

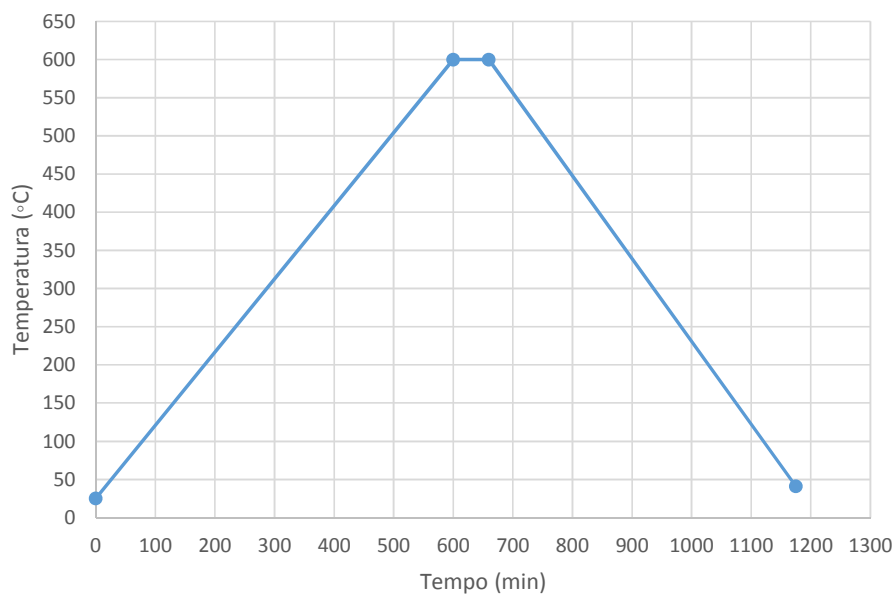


Figura 34 – Aquecimento dos corpos de prova até 600 °C e posterior resfriamento (Grupo 4).

Os corpos de prova 1B e 1C, aquecidos até a temperatura de 400 °C, conforme a Figura 35, foram utilizados com o propósito de corroborar a tendência

dos resultados de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica obtidos do Grupo 3.

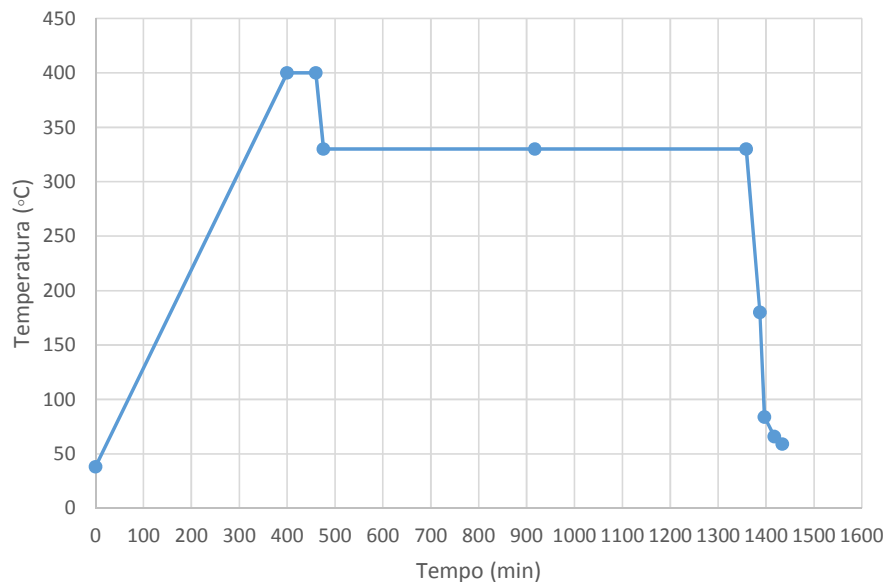


Figura 35 – Aquecimento dos corpos de prova complementares até 400 °C e posterior resfriamento.

Observou-se a ausência de lascamento explosivo em todos os grupos de amostras.

Durante a retirada do forno, o corpo de prova “1a” se rompeu em duas partes, conforme ilustrado pela Figura 36, limitando a aplicação do ultrassom.



Figura 36 – Vista do corpo de prova “1a”.

Após seu resfriamento, os corpos de prova foram vedados com filme plástico, como ilustrado na Figura 37, de modo a evitar sua reidratação com a umidade ambiente até a realização dos ensaios.



Figura 37 – Vista dos corpos de prova vedados com filme plástico.

3.4. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica utilizando o equipamento Pundit Lab e transdutores de face de 54 kHz, conforme ilustrado pela Figura 38.

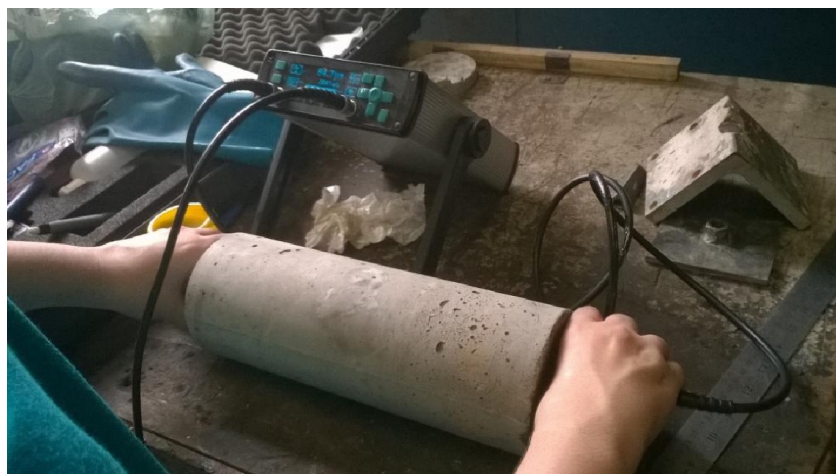


Figura 38 – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Após a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, foi realizado o corte à seco com serra diamantada de uma camada dos corpos de prova, como ilustrado pela Figura 39 e pela Figura 40.



Figura 39 – Posicionamento do corpo de prova para corte de camada.



Figura 40 – Vista de uma das camadas cortadas.

Salienta-se que o corte foi realizado à seco tanto para impedir a reidratação das amostras, que implica em alterações nos compostos que a formam, quanto para evitar seu umedecimento, que interferiria na velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Esse procedimento se repetiu até o comprimento dos corpos de prova ser reduzido a 24 cm e se obterem 3 camadas de 2 cm de espessura de cada um deles, denominadas camadas “0 a 2 cm”, “2 a 4 cm” e “4 a 6 cm”.

Destaca-se que as leituras da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova 2C e 2D não apresentaram estabilização e intensidade de sinal satisfatórias, apesar do nivelamento da superfície, mas as medições puderam ser realizadas.

As leituras dos corpos de prova CP 1A e CP 1D, contudo, não apresentaram estabilização e intensidade satisfatórias e suas superfícies não se mantiveram íntegras após o corte, impossibilitando a medição do ensaio após o corte das camadas.

Após a conclusão dos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, as camadas cortadas foram devidamente identificadas e encaminhadas para a determinação da perda ao fogo em laboratório, juntamente aos corpos de prova 1p, 1q, 2p e 2q, que foram destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão axial de acordo com a NBR 5739/07.

Por fim, foi realizada a análise tátil-visual dos corpos de prova. A Figura 41 expõe os corpos de prova alinhados e organizados por faixa de temperatura, de forma a facilitar a comparação de sua coloração. A primeira coluna é composta pelos corpos de prova de controle, a segunda pelos corpos de prova aquecidos a 200 °C, a terceira pelos corpos de prova aquecidos a 400 °C e a quarta, pelos corpos de prova aquecidos a 600 °C.



Figura 41 – Vista dos corpos de prova agrupados após o aquecimento e a realização dos cortes.

A Figura 42, a Figura 43, a Figura 44 e a Figura 45 apresentam fotos aproximadas, respectivamente, dos corpos de prova de controle e dos corpos de prova submetidos às temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600° C.



Figura 42 – Corpos de prova de controle.



Figura 43 – Corpos de prova aquecidos a 200 °C.



Figura 44 – Corpos de prova aquecidos a 400 °C.



Figura 45 – Corpos de prova aquecidos a 600 °C.

Nota-se que os corpos de prova 1a e 1d apresentam-se rompidos, como resultado de cortes feitos após a obtenção das camadas, com o propósito de viabilizar a visualização de seu interior em diversos pontos e corroborar a análise tátil-visual realizada.

Visualmente, as alterações de coloração do concreto em decorrência da temperatura foram de pequena monta. Observou-se o escurecimento e a aquisição de uma tonalidade levemente rosada nos corpos de prova aquecidos à 400 °C. A alteração da tonalidade foi mais acentuada nos corpos de prova do traço 1.

No que se refere à textura, os corpos de prova aquecidos à 200 °C e a 400 °C não apresentaram variações nítidas. Os corpos de prova aquecidos a 600° C apresentaram fissuração capilar, destacada na Figura 49, e se mostram friáveis na seção transversal, exposta após o corte das camadas.



Figura 46 – Detalhe da fissuração dos corpos de prova aquecidos a 600 °C.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores obtidos nos ensaios de determinação da resistência à compressão axial do concreto compõem a Tabela 6.

Traço	Corpo de prova	Resistência à compressão axial (MPa)			
		Determinação	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
1	CP 1p				
	CP 1q				
2	CP 2p				
	CP 2q				

Tabela 6- Resultados da determinação da resistência à compressão axial.

Os resultados obtidos nos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica são apresentados na Tabela 7.

Temperatura atingida no forno	Corpo de prova	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)			Tempo (μ s)			Tamanho do CP (m)	Momento da medição
		1	2	3	1	2	3		
-	CP 1i	4360	4322	4373	68,81	69,41	68,60	0,30	Antes dos cortes
	CP 1l	4120	4213	4231	72,82	71,21	70,91	0,30	Antes dos cortes
200 °C	CP 1e	3351	3333	3337	89,53	90,01	89,90	0,30	Antes dos cortes
		3313	3340	3325	84,51	83,82	84,22	0,28	Após 1 corte
		3318	3358	3338	78,37	77,42	77,90	0,26	Após 2 cortes
		3292	3278	3278	72,90	73,21	73,21	0,24	Após 3 cortes
	CP 1f	3393	3382	3386	88,42	88,70	88,60	0,30	Antes dos cortes
		3519	3594	3566	79,58	77,90	78,51	0,28	Após 1 corte
		3518	3571	3596	73,91	72,82	72,31	0,26	Após 2 cortes
		3488	3493	3503	68,81	68,71	68,51	0,24	Após 3 cortes
400 °C	CP 1j	2516	2493	2500	119,24	120,34	120,00	0,30	Antes dos cortes
		2414	2399	2362	116,01	116,73	118,53	0,28	Após 1 corte
		2361	2411	2411	110,13	107,84	107,84	0,26	Após 2 cortes
		2417	2369	2371	99,30	101,32	101,21	0,24	Após 3 cortes

Temperatura atingida no forno	Corpo de prova	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)			Tempo (μ s)			Tamanho do CP (m)	Momento da medição
		1	2	3	1	2	3		
	CP 1k	2437	2437	2448	123,10	123,10	122,55	0,30	Antes dos cortes
		2498	2491	2439	112,11	112,40	114,81	0,28	Após 1 corte
		2131	2136	2123	122,00	121,70	122,45	0,26	Após 2 cortes
		2702	2718	2699	88,81	88,31	88,92	0,24	Após 3 cortes
600 °C	CP 1d	4115	4109	4137	72,90	73,01	72,52	0,30	Antes dos cortes
-	CP 2i	4658	4754	4724	64,41	63,10	63,51	0,30	Antes dos cortes
	CP 2l	4950	4950	4901	60,61	60,61	61,21	0,30	Antes dos cortes
200 °C	CP 2e	4531	4524	4545	66,21	66,31	66,01	0,30	Antes dos cortes
		4515	4582	4582	62,01	61,11	61,11	0,28	Após 1 corte
		4668	4618	4618	55,70	56,31	56,31	0,26	Após 2 cortes
		4660	4669	4724	51,50	51,41	50,80	0,24	Após 3 cortes
	CP 2f	4366	4366	4385	68,71	68,71	68,42	0,30	Antes dos cortes
		4451	4416	4451	62,91	63,41	62,91	0,28	Após 1 corte
		4610	4593	4593	56,40	56,60	56,60	0,26	Após 2 cortes
		4452	4469	4545	53,91	53,71	52,81	0,24	Após 3 cortes
400 °C	CP 2j	3080	3105	3039	97,40	96,62	98,72	0,30	Antes dos cortes
		3604	3604	3664	77,70	77,70	76,41	0,28	Após 1 corte
		3576	3626	3636	72,71	71,70	71,51	0,26	Após 2 cortes
		3619	3603	3598	66,31	66,61	66,71	0,24	Após 3 cortes
	CP 2k	2666	2747	2747	112,53	109,21	109,21	0,30	Antes dos cortes
		3369	3305	3399	83,10	84,72	82,37	0,28	Após 1 corte
		3566	3561	3585	72,90	73,01	72,52	0,26	Após 2 cortes
		3438	3390	3347	69,82	70,80	71,70	0,24	Após 3 cortes
600 °C	CP 2c	1628	1629	1614	184,28	184,16	185,87	0,30	Antes dos cortes
		3621	2755	2301	77,32	101,63	121,70	0,28	Após 1 corte
		3371	3381	1710	77,32	76,90	152,05	0,26	Após 2 cortes
		3089	1387	2561	77,70	173,01	93,72	0,24	Após 3 cortes
	CP 2d	3521	1615	1980	85,20	185,76	151,52	0,30	Antes dos cortes
		2721	2281	1945	102,92	122,75	143,95	0,28	Após 1 corte
		2616	3746	1672	99,40	69,41	155,52	0,26	Após 2 cortes
		2806	1207	3085	85,52	198,81	77,80	0,24	Após 3 cortes

Tabela 7- Resultados da determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Os resultados da determinação da perda ao fogo das amostras compõe a Tabela 8.

Tabela 8- Resultados da determinação da perda ao fogo.

Os dados obtidos nos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da perda ao fogo realizados nos corpos de prova do traço 1 são analisados quanto a sua variação na **Tabela 9**. Destaca-se que a velocidade de propagação de onda ultrassônica associada a cada camada foi a medida no corpo de prova antes do corte da mesma.

Tabela 9- Análise dos resultados do Programa Experimental – Traço 1.

Os gráficos da Figura 47, da Figura 48, da Figura 49 e da Figura 50 expõe os valores de perda ao fogo e velocidade de propagação de onda ultrassônica obtidas nas camadas dos corpos de prova do submetidos à ação das altas temperaturas e executados com o traço 1.

Figura 47 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 destinados ao controle (Grupo 1).

Figura 48 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 200 °C (Grupo 2).

Figura 49 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 400 °C (Grupo 3).

Figura 50 – Resultados da determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 600 °C (Grupo 4).

Os gráficos da Figura 51 e da Figura 52 relacionam a velocidade de propagação de onda ultrassônica, respectivamente, à perda ao fogo a 440 ± 5 °C e à perda ao fogo a 1100 ± 50 °C para os corpos de prova do traço 1.

Figura 51 – Relação entre a perda ao fogo a 440 ± 5 °C e a velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1.

Figura 52 – Relação entre a perda ao fogo a 1100 ± 50 °C e a velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova do traço 1.

Através da observação dos dados que compõe a Tabela 8, verifica-se que o dano nas camadas das amostras tornou-se mais intenso conforme a elevação da temperatura atingida no forno.

Constata-se que as camadas de 0 a 2 cm dos corpos de prova do traço 1 sofreram uma redução de x% a% da perda ao fogo média e de 21% a 42% da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas nas amostras submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs.

As camadas de 2 a 4 cm dos mesmos corpos de prova sofreram uma redução de x% a% da perda ao fogo média e de 19% a 43% da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas nas amostras submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs.

Observou-se também uma redução de sofreram uma redução de x% a% da perda ao fogo média e de 19% a 43% da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas nas camadas de 4 a 6 cm dos mesmos corpos de prova submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs.

Verificou-se que a redução da velocidade de propagação das ondas nos corpos de prova do traço 1 aquecidos a 200 °C foi mais particularmente acentuada antes do corte da camada de 0 a 2 cm, indicando a maior intensidade do dano nessa região.

As amostras aquecidas a 400 °C apresentaram uma redução irregular da velocidade de propagação das ondas. Visando corroborar os resultados, realizou-se a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em 2 corpos de prova do traço 1, aquecidos a 400 °C no forno. Seus resultados integram a Tabela 10.

Temperatura atingida no forno	Corpo de prova	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)			Tempo (μs)			Tamanho do CP (m)	Momento da medição
		1	2	3	1	2	3		
400 °C	CP 1b	2076	2112	2108	144,51	142,05	142,31	0,30	Antes dos cortes
		2314	2285	2312	121,02	122,55	121,11	0,28	Após 1 corte
		2468	2464	2490	105,34	105,52	104,42	0,26	Após 2 cortes
		1782	1819	1846	134,71	131,93	130,04	0,24	Após 3 cortes
	CP 1c	2076	2124	2156	144,51	141,24	139,15	0,30	Antes dos cortes
		2069	2062	2069	135,32	135,81	135,32	0,28	Após 1 corte
		2162	2143	2185	120,24	121,31	119,00	0,26	Após 2 cortes
		2190	2194	2195	109,61	109,41	109,33	0,24	Após 3 cortes

Tabela 10- Resultados da determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova complementares

A Tabela 9 apresenta a análise da variação da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos corpos de prova complementares em relação às amostras de controle.

Traço	Grupo	Temperatura atingida no forno	Camada	Velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)			
				Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Variação em relação as amostras de controle
	1	-	-	4270	99	2%	-
1	Complementar	400°C	0 a 2 cm	2109	30	1%	-51%
			2 a 4 cm	2185	130	6%	-49%
			4 a 6 cm	2319	171	7%	-46%
			Média	2204			-48%

		Desvio padrão	106		2%
		Coeficiente de variação	5%		-5%

Tabela 11- Análise dos resultados complementares

Os corpos de prova complementares apresentaram uma redução de 46% a 51% da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em suas camadas em comparação com as amostras sãs. Observa-se que a redução da velocidade foi mais intensa nas camadas mais externas, como notado no Grupo 2.

A maior degradação do concreto nas amostras complementares pode ser explicada pela diferença do seu resfriamento em relação às amostras do Grupo 3, ao incluir a permanência em um patamar de 330° C por quase 15 h.

Como referência, pode-se afirmar que os valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica obtidos nos corpos de prova do traço 1 são significativamente maiores do que os resultados apresentados no artigo de Carré, Hager e Krzemien para amostras de concreto de resistência à compressão normal estudadas - redução da velocidade em aproximadamente 10% aos 200 °C e 20% aos 400 ° C (CARRÉ, HAGER E KRZEMIEN).

Destaca-se novamente que, como exposto no item 3.4, os corpos de prova do traço 1 aquecidos a 600 °C não tiveram sua velocidade de propagação de onda ultrassônica determinada.

Os dados obtidos nos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da perda ao fogo realizados nos corpos de prova do traço 2 são analisados quanto a sua variação na Tabela 12.

Tabela 12- Análise dos resultados do Programa Experimental – Traço 2.

Os corpos de prova do traço 2, assim como os corpos de prova do traço 1, apresentaram uma intensificação do dano sofrido pelas amostras conforme a o aumento da temperatura atingida no forno.

A observação dos dados apresentados na Tabela 12 permite constatar que houve uma redução de $x\%$ a $a\%$ da perda ao fogo e de 8% a 59% da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nas amostras submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs nas camadas de 0 a 2 cm dos corpos de prova do traço 2.

As camadas de 2 a 4 cm dos corpos de prova do traço 2 apresentaram uma redução de $x\%$ a $a\%$ da perda ao fogo e de 7% a 46% da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nas amostras submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs.

Por sua vez, as camadas de 4 a 6 cm dos corpos de prova do traço 2 uma redução de $x\%$ a $a\%$ da perda ao fogo e de 4% a 43% da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nas amostras submetidas a ação das altas temperaturas em comparação com as amostras sãs nas camadas de 4 a 6 cm.

A redução da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas foi progressivamente maior nas camadas mais externas de todos os corpos de prova do traço 2 analisados. Nota-se ainda que a degradação das camadas externas em relação às mais internas, proporcionalmente, foi mais acentuada nos corpos de prova do traço 2 do que nos corpos de prova do traço 1, que possuíam resistência à compressão menor.

Observou-se também que a temperatura de 200 °C degradou mais os corpos de prova do traço 1 do que os corpos de prova do traço 2.

Os valores de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica encontrados nos ensaios realizados são próximos aos indicados para as amostras de concreto de alta resistência à compressão estudadas no artigo de Carré, Hager e Krzemie, que apresentaram redução de aproximadamente 10% aos 200 °C, 20% aos 400 °C e 55% aos 600 °C (CARRÉ, HAGER E KRZEMIEN).

No que se refere à qualidade do concreto avaliada quanto à sua homogeneidade e compacidade os resultados podem ser avaliados de acordo com

os parâmetros indicados por C novas, apresentados na revisão bibliográfica e repetidos na Tabela 13.

Velocidade de propaga�o linear (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	�timo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Tabela 13- Parâmetros para avalia o do concreto em fun o da velocidade de propaga o de ondas ultrassônicas (CANOVAS, 1988).

Os resultados da avalia o qualidade do concreto quanto   sua homogeneidade e compacidade compõe a Tabela 14.

Traço	Grupo	Temperatura atingida no forno	Camada	Velocidade média de propaga�o de onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
	1	-	-	4270	ótimo
	2	200�C	0 a 2 cm	3364	Bom
			2 a 4 cm	3443	Bom
			4 a 6 cm	3450	Bom
			Média	3419	Bom
			Desvio padrão	48	-
			Coefficiente de varia�o	1%	-
1	3	400�C	0 a 2 cm	2472	Regular
			2 a 4 cm	2434	Regular
			4 a 6 cm	2262	Regular
			Média	2389	Regular
			Desvio padrão	112	-
			Coefficiente de varia�o	5%	-
	Resumo - Grupos 2 a 4		0 a 2 cm	2918	Regular
			2 a 4 cm	2938	Regular
			4 a 6 cm	2856	Regular
			Média	2904	Regular

Traço	Grupo	Temperatura atingida no forno	Camada	Velocidade média de propagação de onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
			Desvio padrão	43	-
			Coefficiente de variação	1%	-
	1	-	-	4823	Excelente
	2	200°C	0 a 2 cm	4453	Ótimo
			2 a 4 cm	4499	Ótimo
			4 a 6 cm	4617	Excelente
			Média	4523	Excelente
			Desvio padrão	84	-
			Coefficiente de variação	2%	-
	3	400°C	0 a 2 cm	2897	Regular
			2 a 4 cm	3491	Bom
			4 a 6 cm	3592	Ótimo
			Média	3327	Bom
			Desvio padrão	375	-
			Coefficiente de variação	11%	-
	4	600°C	0 a 2 cm	1998	Ruim
			2 a 4 cm	2604	Regular
			4 a 6 cm	2749	Regular
			Média	2450	Regular
			Desvio padrão	399	-
			Coefficiente de variação	16%	-
	Resumo - Grupos 2 a 4		0 a 2 cm	3116	Bom
			2 a 4 cm	3531	Ótimo
			4 a 6 cm	3653	Ótimo
			Média	3433	Bom
			Desvio padrão	281	-
			Coefficiente de variação	8%	-

Tabela 14- Resultados da avaliação da qualidade do concreto quanto à homogeneidade e compacidade

A análise tátil-visual dos corpos de prova submetidos às temperaturas tem seus resultados expostos na Tabela 15. Para sua interpretação, é necessário considerar que a avaliação foi feita sem o auxílio de instrumentos ópticos, como lentes de aumento e microscópios, e que a mudança de coloração foi graduada em uma escala de 0 a 10, sendo 0 equivalente à imperceptível e 10, à intensa.

Traço	Temperatura atingida no forno	Aumento da porosidade	Fissuração capilar	Friabilidade na superfície externa	Friabilidade na superfície interna	Mudança de coloração
1	200 °C	Não	Não	Não	Não	0
	400 °C	Não	Não	Não	Não	3
	600 °C	Sim	Intensa	Não	Sim	1
2	200 °C	Não	Não	Não	Não	0
	400 °C	Não	Não	Não	Não	2
	600 °C	Sim	Mediana	Não	Sim	1

Tabela 15- Resultados da análise tátil-visual

Os corpos de prova aquecidos até 200 °C não apresentaram alteração na coloração, como esperado para concretos executados com agregado basáltico, com base nos estudos de Bessey indicados na revisão bibliográfica.

A variação de cor observada nos corpos de prova aquecidos à 400 °C, que se apresentaram levemente escurecidas e rosadas, foi mais acentuada nas amostras do Traço 1. Essas amostras possuem um teor maior de areia e, provavelmente, um teor mais elevado de óxido de ferro hidratado, que oxida com o calor (BESSEY *apud* WENDT, 2006; CPPT, 1999).

O aumento visível da porosidade restringiu-se aos corpos de prova que atingiram 600 °C, assim como a ocorrência de friabilidade e fissuração, características de temperaturas superiores a 535 °C segundo Rosso (ROSSO *apud* CAMPOS et al, 2011).

Para a melhor avaliação dos resultados da análise tátil-visual, é preciso considerar que foram encontradas dificuldades na determinação da velocidade de

propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova 2C, 2D, 1A e 1D. Nota-se que essas amostras foram submetidas ao aquecimento até 600 °C e que a desagregação do concreto apresentada por elas, entendida aqui como perda da capacidade aglomerante do cimento e o consequente desprendimento dos agregados, não afetou os corpos de prova submetidos às temperaturas inferiores.

A análise tátil-visual desses corpos de prova possibilitou ainda detectar uma mudança de coloração muito sutil, sua fissuração capilar e um aumento da friabilidade exclusivamente na área interna, exposta após os cortes. Essas alterações das características das amostras sugerem a fácil identificação das áreas degradadas do concreto pelos executores de intervenções de recuperação que atingiram temperaturas a partir de 600 °C através da análise tátil-visual, desconsiderando a variação de cor.

Salienta-se que atingida a temperatura de 600 °C, é esperado que o concreto tenha perdido aproximadamente de 40 a 65% de sua resistência à compressão, de 60 a 75% da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas – como já mencionado - e que a resistência à tração tenha sido praticamente anulada (ABNT, 2012; CARRÉ, HAGER E KRZEMIEN; EN 1992-1-2-1994 *apud* KLEIN, 2011).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As considerações finais deste trabalho, assim como as sugestões para novos estudos na área, integram o presente capítulo.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental realizado teve como objetivo a análise da variação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da determinação da perda ao fogo nas camadas superficiais de amostras de concreto.

Dado que a variação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da determinação da perda ao fogo nas camadas superficiais das amostras foi compilada e analisada, considera-se que o objetivo do presente trabalho foi atingido.

Considera-se ainda que a hipótese levantada – que os valores de perda de massa obtidos através dos ensaios de determinação da perda ao fogo e da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas são menores nas camadas mais próximas da superfície de amostras de concreto submetidas à ação das altas temperaturas do que nas camadas mais profundas – foi corroborada.

A análise dos resultados demonstra que, nos corpos de prova de resistência à compressão normal, a variação da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas em comparação com a amostras de controle foi -21 a -42 % na camada de 0 a 2 cm, de -19 a -43 % na camada de 2 a 4 cm e de -19 a -47% na camada de 4 a 6 cm.

Dada a irregularidade dos resultados dos corpos de prova aquecidos à 400 °C do traço 1, realizou-se uma análise adicional em mais 2 corpos de prova aquecidos à essa temperatura, em que se verificou de 51 a 46% de redução da

velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas, mais intensa nas camadas mais externas das amostras.

A variação da perda ao fogo média nos corpos de prova de resistência à compressão normal em comparação com a amostras de controle foi -xx a -xx % nas camadas de 0 a 2 cm, de -xx a -xx % nas camadas de 2 a 4 cm e de -xx a -xx% nas camadas de 4 a 6 cm.

Nos corpos de prova de resistência à compressão alta, a variação da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas em comparação com a amostras de controle foi -8 a -59 % na camada de 0 a 2 cm, de -7 a -46 % na camada de 2 a 4 cm e de -4 a -43% na camada de 4 a 6 cm.

A variação da perda ao fogo média nos corpos de prova de alta resistência à compressão em comparação com a amostras de controle foi -xx a -xx % nas camadas de 0 a 2 cm, de -xx a -xx % nas camadas de 2 a 4 cm e de -xx a -xx% nas camadas de 4 a 6 cm.

A relação entre a variação da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas e da perda ao fogo média x

Adicionalmente, verificou-se que a variação da cor das amostras foi sutil, sendo mais perceptível nos corpos de prova do traço 1, em especial nos que foram aquecidos até 400 °C e se tornaram levemente rosados.

Os corpos de prova aquecidos a 200 °C não apresentaram variação de cor e os que foram aquecidos a 600 °C adquiriram uma tonalidade acinzentada/rosada mais discreta do que os que foram aquecidos à 400 °C.

Com base nos dados apresentados, conclui-se que a determinação da velocidade de propagação média das ondas ultrassônicas em diferentes camadas de corpos de prova é um método efetivo para a avaliação da intensidade do dano em cada profundidade e que a determinação da perda ao fogo

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os itens abaixo constituem proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- a) Repetição dos ensaios realizados ampliando o número de amostras, atingindo outros patamares de temperatura no forno e/ ou determinando a perda ao fogo em outras temperaturas;
- b) Repetição dos ensaios realizados alterando o tipo de concreto (variação do traço, do tipo de cimento e/ ou dos tipos de agregados);
- c) Comparação da variação da perda ao fogo e dos resultados de outros ensaios não destrutivos, como a análise da dureza superficial e da variação de cor com colorímetros, em amostras submetidas à ação das altas temperaturas;
- d) Comparação dos resultados obtidos no presente estudo com resultados obtidos aplicando taxas de aquecimento e resfriamento provenientes de outras normas e/ou recomendações;
- e) Comparação dos resultados obtidos no presente estudo com resultados derivados da análise de estruturas que foram expostas à ação direta do fogo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Roger de; ARGENTON, Marcelo Bortolin; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto Da. **Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de pulso ultra-sônico de concretos submetidos a altas temperaturas** in SIC 2011 - XXIII Salão de Iniciação Científica UFRG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**. – Argamassa e Concreto –Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**. Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**. Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**. Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**. Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

Autores não identificados. **Mudança de cor do concreto exposto a condições de incêndio**. CPPT. II Seminário Brasileiro de Eng. Forense – VI Seminário Nacional de Perícia em Crimes de Trânsito – VII Seminário Brasileiro de Perícia em Identificação Veicular. Centro de Pesquisas, Perícias e Testes do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro . Novembro, 1999. Disponível em: www.cppt.cbmerj.gov.br/modules.php?name=News&file=pront&sid=255.

Acesso em 10/08/14 às 23 horas.

BENETTI, Joana Kirchner. **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. São Leopoldo, 2012. Dissertação (Mestrado).

BRITEZ, 2011, Carlos Amado. **Avaliação de Pilares de Concreto Armado Colorido de Alta Resistência Submetidos a Elevadas Temperaturas**. São Paulo, 2011. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana M. Patriota; MORALES, Gilson. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Seminário Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, jan./mar. 2011.

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

HAGER, Izabela; CARRÉ, Hélène; KRZEMIENÍ, Katarzyna. **Damage assessment of concrete subjected to high temperature by means of the ultrasonic pulse velocity-upv method**. Studies and Researches – V.32. Politecnico di Milano, Italy.

HELENE, Paulo. **A Nova NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: II Seminário de Patologia das Construções, 2004, Porto Alegre. Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. Porto Alegre: LEME.UFRGS, 2004.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland**. Capítulo 29. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 945-984 ISBN 978-85-98576-14-5 e 978-85-98576-15-2.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reconstituição de Traço de Concreto e Argamassas**. Publicação, 103 - Boletim, 25, São Paulo, 1940.

KLEIN JÚNIOR, Odinir. **Pilares de Concreto Armado em Situação de Incêndio Submetidos à Flexão Normal Composta**. Ed. Rev. São Paulo, 2011. Dissertação

(Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

LIMA, Rogério C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Porto Alegre, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MONTIJA, Fernando. **Estrutura de Concreto Resiste a 16 Horas de Incêndio**. In: Revista Concreto & Construções. Ed. IBRACON, n. 42. São Paulo, p.28-31, 2006.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador M. Giammusso. São Paulo: PINI, 1982.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13º Ed. Rev. por Vladimir Antônio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

RILEM. **RILEM TC 200-HTC** - Mechanical concrete properties at high temperature – Modeling and applications. Materials and Structures, vol.38, 2005, p. 913-919.

RODRIGUES, Conrado de Souza. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2004.

RODRIGUES, João Paulo C; SANTOS, Cristina Calmeiro dos. **O Efeito das Altas Temperaturas nas Propriedades Mecânicas Residuais do Betão**. 2ª

Jornada de Segurança aos Incêndios Urbanos – Universidade de Coimbra – Portugal. Coimbra, 2011.

SCHNEIDER, Ulrich. **Compressive Strength for Service and Accident Conditions**. RILEM Draft Recommendation Projet de Recommandation de La RILEM 129-MHT Test Methods For Mechanical Properties Of Concrete At High Temperatures. Materials and Structures, 1995, 28, 410-414.

SOUZA, Adriana A.A; MORENO JÚNIOR, Armando L. **Efeito de Altas Temperaturas na Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Módulo de Deformação do Concreto**. In: IBRACON Structures and Materials Journal. Ed. IBRACON, vol.3, n. 4, p.432-448, 2010.

WENDT, Sheila Cristina. **Análise da Mudança de Cor em Concretos Submetidos a Altas Temperaturas como Indicativo de Temperaturas Alcançadas e da Degradação Térmica**. Porto Alegre, 2006. Dissertação (Mestrado).