

UNIVERSIDADE TECNÓLOGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GERSON GROSS

EFEITOS DA ALTA TEMPERATURA NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2024

GERSON GROSS

EFEITOS DA ALTA TEMPERATURA NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

EFFECTS OF HIGH TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE OF CONCRETE

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2024



4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



GERSON GROSS

EFEITOS DA ALTA TEMPERATURA NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 12 de Junho de 2024

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Arthur Medeiros, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. George Cajaty Barbosa Braga, Doutorado - Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 12/06/2024.

Dedico este trabalho a todos os profissionais que entregam suas vidas à concepção e construção de edificações cada vez mais seguras contra incêndios para o uso humano.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR e ao PPGECC por ter-me aceitado no programa de mestrado em Engenharia Civil, aos seus funcionários, professores e todos que fazem desta universidade um polo de conhecimento e excelência no ensino.

À minha esposa Lidiamara e meus filhos Lucas Henrique e Gabriela pelo incentivo, parceria e apoio na busca pela realização de meus sonhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wellington Mazer, pela amizade e incentivo em fazer parte do programa, pelos conhecimentos repassados, por mostrar o caminho e seguir junto comigo nesta jornada.

À DUARCO Engenharia Civil, na pessoa do amigo e irmão Fernando Duarte, pelo apoio na consecução deste mestrado.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Paraná, pela oportunidade de uma carreira inteira dedicada à segurança contra incêndio, sempre na busca por uma qualidade de vida melhor aos paranaenses e brasileiros. Pela contribuição para o desenvolvimento de nosso Estado ao proporcionar edificações seguras para moradia, para o exercício de atividades profissionais, produtivas, comerciais, educacionais e de lazer.

“If we could first know where we are, and whither we are tending we could then better judge what to do and how to do it.” (Abraham Lincoln, 1858, House divided speech.)

“Se desde o início pudermos saber onde estamos e onde queremos chegar, será mais fácil decidirmos o fazer e como fazer.” (Abraham Lincoln, 1858)

GROSS, Gerson. **Efeitos da alta temperatura na microestrutura do concreto**. Curitiba, 2023. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

RESUMO

Os adensamentos populacionais têm provocado a verticalização das cidades, demandando uso em larga escala do concreto armado nas estruturas das edificações. Este fenômeno traz consigo a concertação de riscos, entre eles o de incêndio. Os incêndios podem afetar a resistência do concreto. Pesquisas têm sido desenvolvidas para estudar o comportamento do concreto em situação de incêndio e sua perda de resistência já é sabida. O entendimento do comportamento da microestrutura do concreto e sua influência na resistência residual dos elementos estruturais pode desencadear soluções para o aumento dessa resistência em situação de incêndio. O presente estudo tem por objetivo buscar conhecimento sobre a influência das altas temperaturas na microestrutura do concreto, relacionando-as aos estudos já realizados. É sabido, também, que a intensidade do fogo numa situação de incêndio não ocorre de forma padronizada e afeta a estrutura de concreto de maneira aleatória, conforme a posição do elemento na estrutura e conforme a temperatura avança para o interior desse elemento. Neste estudo esta condição não foi avaliada, mas sim a microestrutura de maneira geral. Para o presente estudo foram confeccionados corpos de prova de concreto convencional e com adição de óxido de ferro hematita (Fe_2O_3), que pode funcionar como indicador colorimétrico do avanço da temperatura no interior do elemento. Os corpos de prova foram aquecidos em forno mufla e após a submissão à temperatura a microestrutura dos elementos foi estudada e comparada entre os grupos com o intuito de verificar-se as alterações ocorridas por conta do calor. Os resultados obtidos mostram que a microestrutura do concreto, na área atingida pelas altas temperaturas, sofre significativa deterioração, alterando quimicamente os componentes da pasta cimentícia e criando microfissuras na zona de transição agregado-pasta cimentícia.

Palavras-chave: incêndio, concreto, microestrutura, comportamento, transição.

ABSTRACT

GROSS, Gerson. **Effects of high temperature on the microstructure of concrete.** Curitiba, 2023. 84 p. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, Curitiba, 2023.

Population densities have caused the verticalization of cities, demanding large-scale use of reinforced concrete in building structures. This phenomenon brings with it a combination of risks, including fire. Fires can affect the strength of concrete. Research has been carried out to study the behavior of concrete in a fire situation and its loss of resistance is already known. Understanding the behavior of the concrete microstructure and its influence on the residual resistance of structural elements can trigger solutions to increase this resistance in fire situations. The present study aims to seek knowledge about the influence of high temperatures on the microstructure of concrete, relating them to studies already carried out. It is also known that the intensity of fire in a fire situation does not occur in a standardized way and affects the concrete structure randomly, depending on the position of the element in the structure and as the temperature advances towards the interior of that element. In this study, this condition was not evaluated, but the microstructure in general. For the present study, conventional concrete test specimens were made with the addition of hematite iron oxide (Fe_2O_3), which can function as a colorimetric indicator of the temperature increase inside the element. The specimens were heated in a muffle furnace and after being subjected to the temperature, the microstructure of the elements was studied and compared between the groups in order to verify the changes that occurred due to the heat. The results obtained show that the microstructure of the concrete, in the area affected by high temperatures, suffers significant deterioration, chemically altering the components of the cement paste and creating microcracks in the aggregate-cement paste transition zone.

Key words: fire, concrete, microstructure, behavior, transition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – World Trade Center – Nova Iorque, EUA	22
Figura 2 - Torre Windsor – Madrid, Espanha	22
Figura 3 - Edifício Wilton Paes de Almeida - São Paulo, SP, Brasil	23
Figura 4 - Edifício da Secretaria de Segurança Pública – Porto Alegre, RS, Brasil	23
Figura 5 – Co ocorrências de palavras-chave	26
Figura 6 – Primeiro Edifício do mundo construído no sistema Hennebique.....	27
Figura 7 – Representação gráfica do fogo	31
Figura 8 – Formas de transmissão do calor (esquema)	32
Figura 9 – Curva da evolução do incêndio celulósico	33
Figura 10 – Linha do tempo das edições da norma de segurança contra incêndio no Paraná..	38
Figura 11 – Esquema do ensaio realizado por Britez	40
Figura 12 – Mudança de coloração da magnetita, transformada em hematita pela ação do calor aos 570°C.....	41
Figura 13 – Processo físico-químico do concreto em situação de incêndio	44
Figura 14 – Incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento.....	47
Figura 15 – Insumos para confecção dos Corpos de Prova: cimento (1), areia (2), brita 0 (3), e água (4).....	53
Figura 16 – Materiais utilizados: Água (1), cimento (2), areia (3) e brita (4).	53
Figura 17 – Preparação dos moldes (1), batimento da mistura (2), moldagem (3), pré-cura 24h (4) e cura úmida 28 dias (5).....	54
Figura 18 – Processo experimental: Retiradas as amostras do processo de cura foram colocadas para secagem na estufa por 24 h à 100°C (1), as amostras secas foram pesadas para a definição da massa aparente seca.....	55
Figura 19 – Disposição dos corpos de prova no forno mufla e indicativo das temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C.....	56
Figura 20 – Aspectos dos Corpos de prova após submissão à temperaturas de 300°C (1), 500°C (2) e 800°C (3).....	56
Figura 21 – Ensaio de compressão axial nos CP de concreto	57
Figura 22 – Corpos de prova cúbicos nas formas.....	58
Figura 23 – Aspecto dos corpos de prova pré-ensaio de temperatura	58

Figura 24 – Sequência do experimento em corpos de prova cúbicos: (1) verificação da massa após a cura, (2) aquecimento em forno mufla nas temperaturas alvo, (3) verificação da massa 24 horas após o aquecimento, (4) elementos cortados.	59
Figura 25 – Efeito do calor na pigmentação dos corpos de prova cúbicos	71
Figura 26 – Aspecto visual das superfícies dos corpos de prova cúbicos em função das temperaturas alvo.....	71
Figura 27 – Aspecto no interior dos elementos após corte.....	72
Fluxograma 1 – Fluxograma do processo experimental.....	49
Gráfico 1 – Demonstrativo de documentos publicados por ano.....	25
Gráfico 2 – Demonstrativo de publicação por país	26
Gráfico 3 – Curva-padrão temperatura-tempo (material celulósico).....	34
Gráfico 4 – Curva-padrão temperatura-tempo para hidrocarbonetos	35
Gráfico 5 – Redução da resistência a compressão do concreto silicoso.....	44
Gráfico 6 – Granulometria da areia	50
Gráfico 7 – Granulometria da brita.....	51
Gráfico 8 – Perda de massa de massa após aquecimento – CP Cilíndrico.....	63
Gráfico 9 – Perda de massa após aquecimento – CP cúbico	65
Gráfico 10 - Perda de massa após aquecimento – CP cúbico.....	67
Gráfico 11 – Resultados da resistência dos corpos de prova medida por esclerometria	70
Quadro 1 – Composição da pasta cimentícia e a função de cada componente	29
Quadro 2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova cilíndricos sem adição de óxido de ferro	74
Quadro 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova cúbicos pigmentados.....	75
Quadro 4 – Difractogramas das amostras analisadas	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo requerido de resistência ao fogo, TRRF, em minutos (ABNT NBR 14432:2001).....	37
Tabela 2 – Composição granulométrica da areia.....	50
Tabela 3 - Limites do módulo de finura NBR 7211 (ABNT, 2005)	50
Tabela 4 - Composição granulométrica da brita.....	51
Tabela 5 - Índices físicos da brita.....	52
Tabela 6 – Preparação do concreto 1:2:3.....	53
Tabela 7 - Distribuição dos corpos de prova para comparação	55
Tabela 8 – Preparação do concreto 1:2:3 + 4% óxido de ferro em relação ao cimento	58
Tabela 9 – Distribuição dos corpos de prova cúbicos para submissão à temperatura alvo	60
Tabela 10 - Massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C.....	62
Tabela 11 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C	63
Tabela 12 – Teste de Tukey desenvolvido para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C	63
Tabela 13 - Massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados após cura e submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C	64
Tabela 14 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados e curados à temperatura ambiente e após submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C	65
Tabela 15 – Teste de Tukey desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados e curados à temperatura ambiente e após submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C	66
Tabela 16 - Resistência à compressão dos corpos de prova após aquecimento	66
Tabela 17 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de resistência dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C	67

Tabela 18 – Teste de Tukey desenvolvido para avaliação da perda de resistência dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C	68
Tabela 19 – Resultados do ensaio de esclerometria nos corpos de prova cúbicos.....	69
Tabela 20 – Compostos cristalizados identificados nas amostras	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BET	Técnica de determinação da porosidade do concreto após exposição à altas temperaturas, desenvolvida por Brunauer, Emmett e Teller
CBMPR	Corpo de Bombeiros Militar do Paraná
CH	Hidróxido de Cálcio
COL	Colorimetria
CONFEA	Confederação Nacional de Engenharia e Agronomia
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CSCIP	Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difratometria de Raio X
DTA	Análise Térmica Diferencial
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NFPA	<i>National Fire Prevention Association</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NPT	Norma de Procedimento Técnico
PET	Petrografia
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
TGA	Termogravimetria
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WTC	<i>World Trade Center</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	21
2.2	ESTADO DA ARTE	25
2.3	O USO DO CONCRETO NAS EDIFICAÇÕES.....	27
2.4	A MICROESTRUTURA DO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	28
2.5	INCÊNDIO: SUAS CARACTERÍSTICAS E DESENVOLVIMENTO.....	30
2.5.1	Representação gráfica do fogo	31
2.6	A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS E OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	35
2.6.1	Segurança contra incêndios no mundo e no Brasil.....	35
2.6.2	Proteção Passiva e Ativa	38
2.7	O COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	39
2.8	ENSAIOS PARA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	FLUXOGRAMA DA PESQUISA	48
3.2	MATERIAIS	49
3.2.1	Composição granulométrica da areia	49
3.2.2	Composição granulométrica da Brita	51
3.2.3	Equipamentos utilizados.....	52
3.3	MÉTODOS.....	52
3.3.1	Ensaaios em laboratório	52
3.3.2	Ensaaios em corpos de prova cúbicos pigmentados	57

3.3.3	Tratamento Estatístico dos dados	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DA MASSA APARENTE DOS CORPOS DE PROVA	62
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO:.....	66
4.2.1	Resultados dos ensaios de resistência com a utilização do esclerômetro nos corpos de prova cúbicos.....	68
4.3	RESULTADOS DA COLORIMETRIA NOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS: ..	70
4.4	RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	73
4.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DRX	76
5	CONCLUSÃO	80
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade proporcionou a aglomeração de pessoas em centros urbanos. As cidades se verticalizam a cada dia mais para proporcionar melhor aproveitamento dos espaços e para atender à demanda por moradia, locais trabalho, lazer, espaços de convivência e outros. Duarte, Ono e Bento (2021), afirmam que a verticalização das cidades é um processo que já se verifica há alguns séculos e que começou a tomar pulso a partir do desenvolvimento e aperfeiçoamento dos elevadores, do bombeamento do concreto e de novos materiais de construção. A verticalização das edificações traz consigo também a concentração de riscos inerentes ao seu uso, dentre eles o risco de incêndio. A preocupação quanto aos riscos e perigos dos incêndios em edificações altas é uma realidade mundial e ainda carece de muita pesquisa e desenvolvimento

O estudo de Forigo, Lopes e Vanalli (2021) aponta que o concreto armado tem uso em larga escala na construção civil mundial. Neste sentido a busca por conhecimento de suas propriedades e de seu comportamento, especialmente nas situações de incêndio é uma demanda recorrente. Silva (2016) expõe que o efeito do calor extremo nas estruturas de concreto é um fator de redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, além disso ficou evidente que outros esforços solicitantes adicionais decorrentes das restrições às deformações causadas pela temperatura podem ocorrer.

De um modo geral, as estruturas de concreto podem apresentar um bom desempenho frente às condições de incêndio, devido a fatores como a incombustibilidade e baixa difusão térmica. No entanto, entender seu comportamento e editar normativas que melhorem esta situação é muito importante. Este tema era pouco estudado no Brasil, visto que Coughi (2006) afirmava que pouco se investia em pesquisa nesta área. Comprova-se esta afirmativa na falta de legislação sobre o tema à época. Fernandes et al. (2021) apresentam em seu artigo que atualmente houve um incremento nas pesquisas, como se pode verificar pelos trabalhos técnicos científicos publicados. Resultados dessas pesquisas são as mudanças ocorridas nas normas de segurança contra incêndio para edificações, incluindo-se a melhoria na exigência do dimensionamento das estruturas seja de aço ou de concreto armado em situações de incêndio. Assim, dentre outras, foram editadas normas de segurança contra incêndios a serem adotadas na construção de edifícios, como a NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações (ABNT, 2001), a NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimentos (ABNT, 2012) e, mais recentemente a NBR 15200: Projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio (ABNT, 2014). Esta

última norma teve a primeira versão editada em 2004, passando por uma profunda revisão que resultou na versão de 2014.

Além das normas da ABNT, os Corpos de Bombeiros Militares do Brasil também passaram a melhorar suas normas com a edição de atualizações nos códigos estaduais de segurança contra incêndio e pânico, revisados e publicados a partir de 2011. Mudanças mais significativas foram verificadas a partir da Lei 13.425, de 20 de março de 2017 (BRASIL, 2017), que estabeleceu diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos. Esta lei ficou conhecida como “Lei Kiss”, referindo-se ao incêndio ocorrido na Boate Kiss em Santa Maria – RS, no ano de 2013, que vitimou 242 pessoas.

As legislações atualizadas dos Códigos de Segurança Contra Incêndio e Pânico estabelecem que a segurança das pessoas que vivem e trabalham nos edifícios é dever de todos os atores envolvidos neste processo, desde a concepção do projeto da edificação, a sua construção e o uso e conservação adequados. Neste sentido, dentro da engenharia, se faz necessário discutir e entender cada vez mais o comportamento do concreto submetido à altas temperaturas. Entender como o calor se dissipa no elemento estrutural e quais as alterações químicas e físicas decorrentes.

A problemática central abordada por este estudo é direcionada para a análise do comportamento da microestrutura do concreto e sua influência nas propriedades mecânicas quando submetido à altas temperaturas, comparando-se os resultados entre os grupos de temperatura ensaiados em forno mufla (pequena escala).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar os efeitos da alta temperatura na microestrutura do concreto.

1.1.2 Objetivos específicos

Para entender como se processam os efeitos da alta temperatura na microestrutura do concreto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Realizar ensaios preliminares em corpos de prova cilíndricos para definição das amostras e comprovação da perda de massa e perda de resistência em três faixas de temperatura: 300°C, 500°C e 800°C, após secagem dos corpos de prova por 24 horas à 100°C para evaporação da água livre nos poros do concreto;
- b. Avaliar o efeito de diferentes temperaturas (550°C, 750°C e 850°C) na microestrutura do concreto utilizando-se corpos de prova cúbicos pigmentados com óxido de ferro (Fe_2O_3), avaliando-se inicialmente a perda de massa, a perda de resistência com uso de esclerômetro, difusão do calor por colorimetria e exames de microscopia eletrônica de varredura – MEV e difração de raios X – DRX;
- c. Comparar os resultados dos ensaios entre os grupos de temperatura para analisar as alterações da microestrutura do concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os incêndios em edifícios não são eventos corriqueiros, mas quando acontecem podem ter efeitos devastadores. Suas consequências causam, além da perda patrimonial, danos à vida dos ocupantes da edificação sinistrada e, até mesmo de outras pessoas como as envolvidas nas operações de combate ao fogo, ocupantes de edificações vizinhas e curiosos. São comuns também os efeitos temporários e os permanentes resultantes, como a necessidade de deslocamento de famílias para abrigos ou alojamentos alternativos, perdas de documentações, cultura, história, transtornos de locomoção das pessoas no entorno do local do sinistro e transtornos ao cotidiano urbano.

Lin (2021), assevera que “para atender à demanda da verticalização e dos edifícios cada vez mais altos, deve-se estudar, e muito, não somente após a construção deles, mas desde sua concepção, arquitetura, *design* e engenharia”. Neste sentido, levar a segurança contra incêndio em consideração, entender sua dinâmica, potenciais usos não previstos atualmente, sistemas integrados de segurança contra incêndio e inovação com tecnologias antes nunca utilizadas são essenciais para que vencer estas etapas.

A prevenção de incêndios e a segurança das pessoas começa justamente na concepção dos projetos, na definição de materiais que apresentem um bom desempenho em situações de incêndio, na execução da obra e na ocupação consciente das edificações. Para isso a proteção passiva que é composta por medidas adotadas já na fase de projeto, prevendo-se e calculando-se o tempo de resistência ao fogo das estruturas, a compartimentação de áreas e as saídas de emergência são essenciais. Na questão estrutural, se faz necessário entender cada vez mais o

comportamento do concreto em situação de incêndio. Estudar a ação do calor na sua estrutura química, pode contribuir para se estabelecer uma relação entre estas estruturas e sua resistência mecânica em situações de temperatura extrema, para que medidas possam ser propostas no sentido de melhorar esta performance.

A importância deste estudo se revela na possibilidade de subsidiar o desenvolvimento de ações para se evitar o colapso estrutural de edificações, com isso preservar vidas, o meio ambiente e o patrimônio. Ainda pode contribuir para o desenvolvimento de mecanismos para definição da capacidade de recuperação de uma estrutura, tendo em vista os efeitos da temperatura nos elementos estruturais.

As pesquisas na área de resistência do concreto têm demonstrado que, quando este elemento é submetido a altas temperaturas, ocorrem alterações significativas na microestrutura do material, principalmente nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade (GIORGALI e TSAKIRIDIS, 2005). Pode-se identificar, por meio de experimentos, a resistência residual do material e as alterações físicas, químicas e mineralógicas ocorridas pela exposição do concreto à altas temperaturas.

Serão abordados neste trabalho os aspectos da estrutura química, mineralógica e cristalográfica do concreto e sua relação com a resistência residual após sua submissão à altas temperaturas, buscando-se compreender quais modificações ocorrem, capazes de alterar suas propriedades iniciais. Neste estudo, além dos ensaios de resistência à compressão, serão utilizadas técnicas de MEV, DRX, colorimetria e esclerometria para identificação dos danos causados pela alta temperatura nos elementos de concreto.

A evolução da humanidade acontece após eventos catastróficos. Pode-se constatar isso pelas legislações e normas redigidas e aprovadas após grandes eventos como o atentado ao World Trade Center, em Nova York – EUA, em 2001 e outros eventos mundiais. Aqui no Brasil, alterações legislativas ocorreram após os incêndios nos Edifícios Andraus e Joelma, na década de 1970 e, conforme afirmam Duarte, Ono e Bento (2021), além do evento Boate Kiss, conforme a edição da Lei 14.325, em 2017. Atualmente pode-se constatar uma movimentação na área da engenharia por conta do desabamento do Edifício Wilton Paes de Almeida e do edifício da SSP-RS, ambos pela ação do fogo em 2018 e 2021 respectivamente.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por 05 (cinco) partes, denominadas como capítulos, incluindo a introdução, onde são tratados em cada um deles os seguintes temas:

- **Capítulo 1** – Apresentação da introdução e justificativa da pesquisa, bem como os objetivos geral e específicos frente à problemática relacionada ao estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio, como os pesquisadores têm envidado esforços no sentido de entender esta situação conforme os estudos realizados no Brasil e no mundo;
- **Capítulo 2** – Revisão bibliográfica sobre o tema, buscando pesquisadores que tenham abordado estudos sobre a microestrutura do concreto em situação de incêndio, bem como a fundamentação dos ensaios realizados para esta análise. Também buscou-se contextualizar o leitor no assunto relativo à engenharia de incêndio, com seus princípios básicos e a importância de sua correlação com tema tratado nesta dissertação;
- **Capítulo 3** – Descrição detalhada dos materiais e métodos empregados na presente pesquisa;
- **Capítulo 4** – Discussão acerca dos resultados alcançados, comparando-os a experimentos já realizados;
- **Capítulo 5** – Conclusões frente à análise dos casos. São também sugeridos trabalhos futuros, baseados nas constatações obtidas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil e o mundo têm testemunhado incêndios de proporções tamanhas, ceifando vidas, destruindo patrimônios e prejudicando o meio ambiente. Há uma série de grandes incêndios ocorridos no Brasil e no mundo nos últimos anos, porém serão destacados aqui apenas quatro eventos importantes, sendo dois no Brasil, um nos Estados Unidos – EUA e outro na Espanha. Esses eventos compartilham a característica de terem ocorrido em edifícios altos, com estruturas de concreto armado ou mistas envolvendo estruturas metálicas revestida em concreto ou metálicas e concreto. O comportamento da estrutura de concreto em cada um dos incêndios que serão citados ocorreu de maneira diferente. Muitos são os fatores que influenciam neste comportamento, tais como temperatura do incêndio, ventilação do local, existência ou não de proteção da estrutura, dentre outros.

O episódio referente aos EUA ocorreu em 2001, e ficou conhecido como Atentado ao *World Trade Center* – WTC, o qual era representado por dois prédios. Houve a colisão de dois aviões, um em cada torre, resultando em um grande incêndio pela explosão das aeronaves que estavam com os tanques de combustível cheios. O choque das aeronaves não foi a causa direta do colapso dos edifícios, e sim o incêndio secundário em função do choque das aeronaves que tomou proporções jamais ocorridas ou previstas em situações de dimensionamento (DWYER e FLYNN, 2005). O Prof. Knapton (2001), professor de engenharia estrutural na Universidade de *Newcastle*, no Reino Unido, em uma entrevista concedida à BBC News, assim se pronunciou: “As estruturas de aço e concreto tiveram um desempenho surpreendentemente bom, acredito que dezenas de milhares de vidas foram salvas pela integridade estrutural dos edifícios. Grande parte da estrutura deles foi retirada, mas eles permaneceram intactos por mais de uma hora, permitindo o escape de milhares de pessoas”. Considerando-se, ainda, que após o atentado ocorrido na década de 90 foi implementada proteção contra o fogo nas estruturas metálicas aparentes do WTC. Neste sentido é preciso levar-se em conta as condições que se apresentaram pelo choque dos aviões e pelo incêndio secundário que ocorreu com temperaturas elevadíssimas (por volta de 1000°C), mesmo assim, a estrutura da primeira torre colapsou após 102 minutos do impacto. Este evento deixou um resultado de 2749 vítimas fatais (DWYER e FLYNN, 2005) e um número não mensurado de vítimas feridas (Dado prejudicado por não constar nos meios de informação pesquisados). A

Figura 1 a seguir possui registros de como o WTC se encontrava antes do incêndio, a situação do incêndio e o colapso total após o desastre.

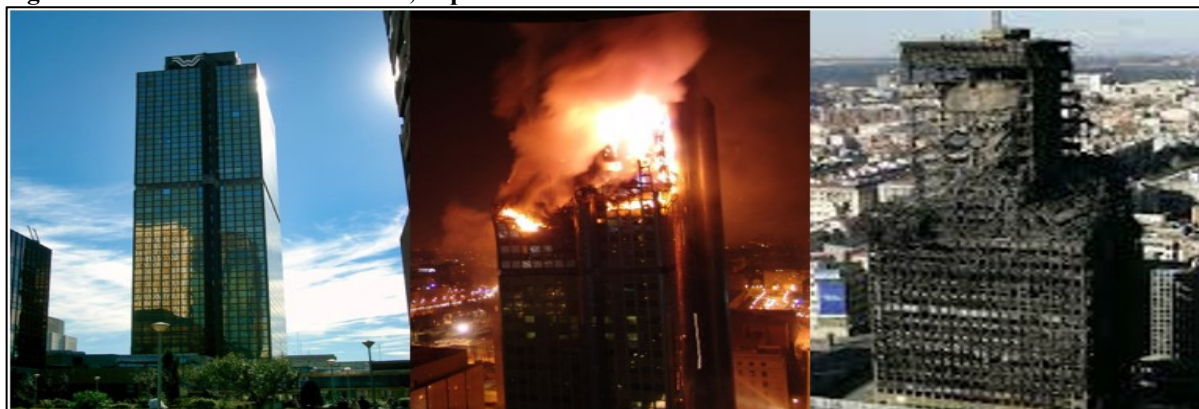
Figura 1 – World Trade Center – Nova Iorque, EUA



Fonte: Adaptada de VEJA, 2017.

O incêndio ocorrido na Torre *Windsor*, em Madrid, em 12 de fevereiro de 2005, causou colapso parcial da edificação na parte da estrutura metálica. O concreto manteve-se firme mesmo após 16 horas de incêndio. Neste evento não houve vítimas fatais ou feridas. Após análises realizadas na obra os especialistas decidiram pela demolição do prédio (ROSA, 2011). A Figura 2 possui registros da Torre *Windsor* antes do incêndio, a situação das chamas e o colapso parcial após o desastre.

Figura 2 - Torre Windsor – Madrid, Espanha



Fonte: Adaptada de EXPANSION, 2023.

No Brasil, o primeiro caso a ser citado é do edifício Wilton Paes de Almeida, no Largo Paissandu, em São Paulo, ocorrido em 01 de maio de 2018. O colapso estrutural aconteceu após 80 minutos do início das chamas. Neste episódio sete pessoas perderam a vida. A Figura 3

mostra como se encontrava o edifício Wilton Paes de Almeida antes do incêndio, a situação do incêndio e as ruínas do colapso após o incêndio.

Figura 3 - Edifício Wilton Paes de Almeida - São Paulo, SP, Brasil



Fonte: Adaptada de VEJA, Revista (2018) e MURARO (2018).

Outro evento ocorrido em território nacional foi na Secretaria de Segurança Pública do Estado do Rio Grande do Sul (SSP-RS), em Porto Alegre, no dia 14 de julho de 2021. O incêndio neste local durou três dias. Após 115 minutos do início do incêndio houve o colapso da estrutura. Este colapso causou a morte de dois Bombeiros Militares que atuavam no combate às chamas. Segundo Rodrigues (2023), a dificuldade em combater ao incêndio se deu pela situação do colapso estrutural que não derrubou totalmente o prédio, deixando as estruturas restantes em condições precárias e com risco de desabamento. Os corpos dos Bombeiros foram encontrados após 5 dias de buscas nos escombros. Apesar de estarem trabalhando 50 pessoas no prédio no início do incêndio, todas foram evacuadas pelas escadas de emergência e nenhuma ficou ferida. A Figura 4 a seguir mostra o edifício da SSP RS em situação do incêndio e o colapso parcial provocado pelo incêndio.

Figura 4 - Edifício da Secretaria de Segurança Pública – Porto Alegre, RS, Brasil



Fonte: Adaptada de CLEMENTE, 2021.

Nestes casos específicos, os prédios foram totalmente envoltos pelas chamas. A estrutura do WTC era do tipo mista, formada por concreto e estrutura metálica, a configuração estrutural suportou o incêndio por 102 minutos para, então, colapsar (DWYER e FLYNN, 2005). Na busca de uma explicação da queda das torres, apurou-se que o colapso estrutural do WTC foi o resultado de muitos fatores diferentes que trabalharam em conjunto de uma forma complexa (SANDER, 2021). Foi possível chegar a esta conclusão após uma profunda análise com simulações reais e computacionais, de última geração, levando-se em conta os múltiplos impactos de aviões e detritos, a propagação de incêndios em vários andares provocados por combustível de aviação ou detritos voadores, o enfraquecimento de componentes estruturais relacionado ao calor de componentes estruturais com materiais à prova de fogo intactos ou desalojados e a complexa resposta das estruturas do edifício que levam ao seu colapso (SANDER, 2021).

Já a estrutura da Torre *Windsor*, também mista em concreto e metálica teve uma performance diferente. A Torre *Windsor* teve colapso das estruturas metálicas localizadas em partes dos andares superiores do prédio. Contudo, as estruturas de concreto mantiveram a edificação estável após o incêndio, que, segundo Helene (2019), durou cerca de 16 horas. Rosa (2011), aponta que sua demolição foi concluída em 13 de agosto daquele mesmo ano.

A estrutura do Edifício Wilton Paes de Almeida, construído na década de 1960, teve uma realidade diferente. O colapso estrutural, que culminou com o desabamento total do prédio, aconteceu cerca de 80 minutos após o início do incêndio. De acordo com Helene (2019), este colapso prematuro surpreendeu a engenharia de estruturas de concreto, pois é sabido que o concreto armado apresenta alta resistência estrutural à ação do fogo e às intempéries.

No mesmo sentido, a estrutura do edifício da SSP do Rio Grande do Sul, construído no ano de 1972, suportou 115 minutos de fogo, quando veio a colapsar parcialmente. Rodrigues (2023) explica que foi observado que o colapso se deu inicialmente nas lajes dos pavimentos mais altos e que os colapsos das lajes desencadearam o colapso das demais estruturas de vigas e pilares interligados em efeito “cascata” para os pavimentos abaixo subsequentes. Apesar das circunstâncias, em todos os casos, podem-se dizer que as estruturas de concreto dos edifícios apresentaram bom desempenho frente à ação do fogo, pois foi possível realizar a evacuação segura das pessoas que ocupavam os prédios antes do colapso.

2.2 ESTADO DA ARTE

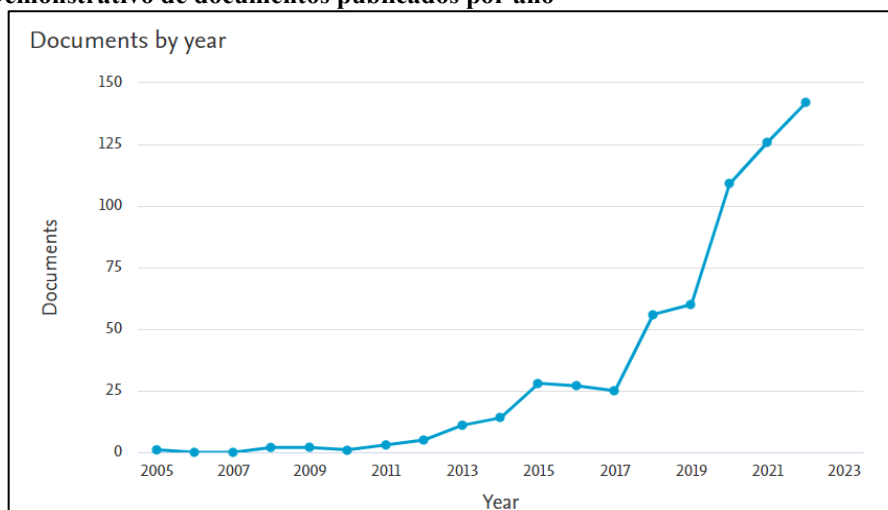
Na UTFPR, a partir da participação de membros do Corpo de Bombeiros Militar do Paraná nos programas de Mestrado e Doutorado, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, houve um aumento dos estudos do comportamento do concreto em situação de incêndio. Em uma busca nos títulos catalogados na Biblioteca da Instituição encontram-se quatro títulos relacionados ao assunto. Estas pesquisas foram realizadas de 2018 a 2022.

No Brasil e no mundo o estudo em relação ao comportamento do concreto em situação de incêndio vem crescendo nos últimos 10 anos. Verifica-se este fenômeno quando da análise bibliométrica na plataforma “*Scopus*”, o qual criou a seguinte *string* de busca, cujos resultados estão expressos nos gráficos abaixo e comentados no decorrer desse capítulo:

```
'((((TITLE-ABS-KEY(("concrete"))) e) AND (((chemistry)) AND (durability))
AND (microstructure)) AND (reinforced concrete)) AND (durability)) AND
(structures) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"cp") OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar"
) OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI") OR
LIMIT-TO (SUBJAREA,"MATE")) AND (LIMIT-TO
(EXACTSRCTITLE,"Construction And Building Materials") OR LIMIT-TO
(EXACTSRCTITLE,"Materials") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE,"Cement
And Concrete Research")) AND (LIMIT-TO
(EXACTKEYWORD,"Compressive Strength") OR (LIMIT-TO
(EXACTKEYWORD,"Durability") OR
(EXACTKEYWORD,"Microstructure"))'. O autor.
```

Na pesquisa foram obtidos 612 resultados referentes à *string* utilizada, que foram organizados conforme o Gráfico 1 a seguir:

Gráfico 1 – Demonstrativo de documentos publicados por ano

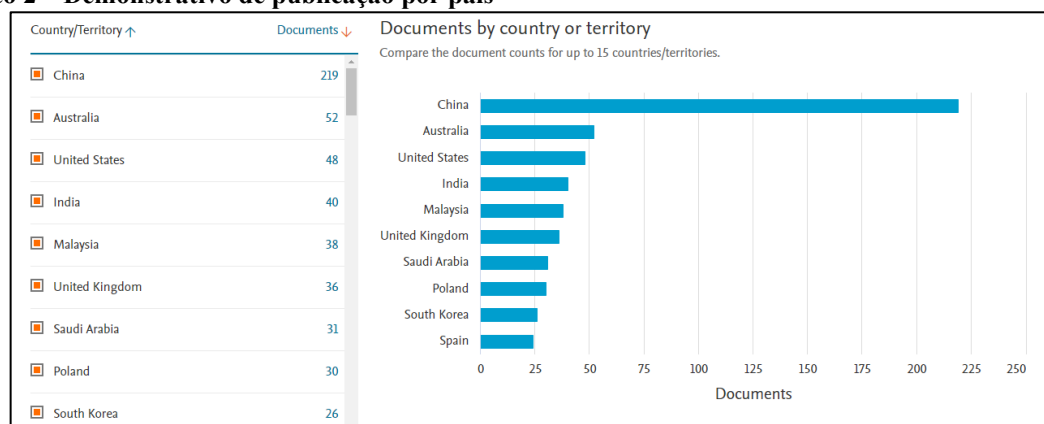


Fonte: plataforma de pesquisa Scopus. Pesquisa realizada em 20 nov. 2022.

Observa-se no gráfico que o crescimento de estudos relativos ao tema de resistência do concreto em situação de incêndio, aqui restrito, ainda, à sua microestrutura, teve um importante crescimento de 2013 até 2022.

Quando verificamos em relação ao país que mais estuda sobre o assunto, a China se destaca com mais de 200 artigos publicados. O Brasil não aparece no *ranking* de resultados porque tem menos de 25 publicações, conforme pode-se constatar no Gráfico 2 a seguir.

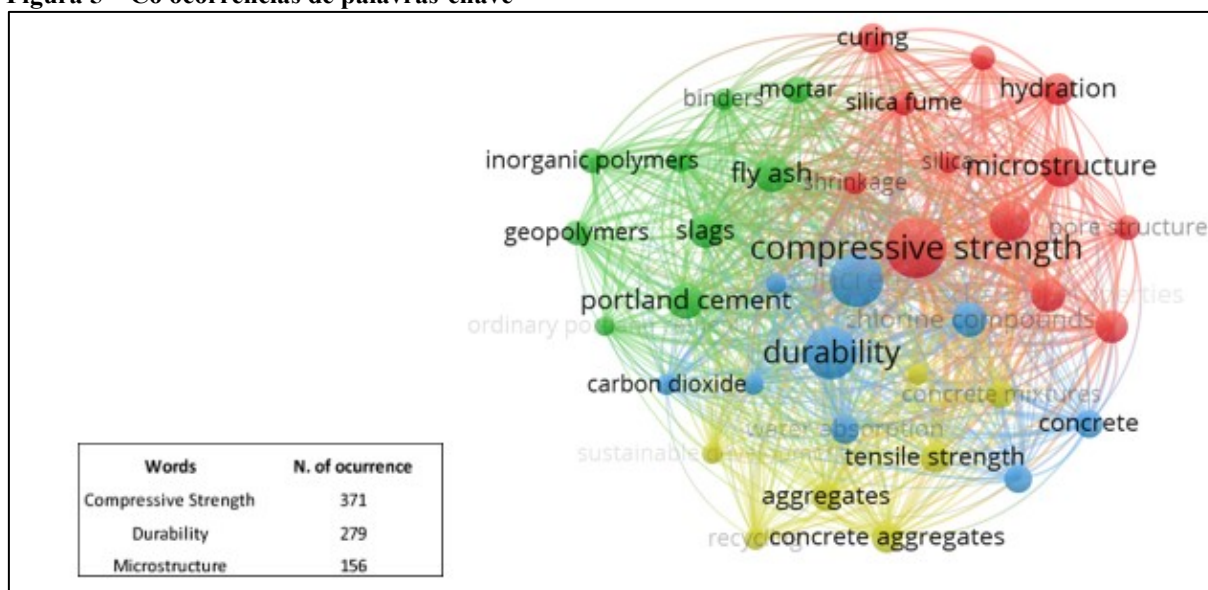
Gráfico 2 – Demonstrativo de publicação por país



Fonte: plataforma de pesquisa Scopus. Pesquisa realizada em 20 nov. 2022.

Em relação aos assuntos com mais ocorrência verifica-se que a resistência a compressão aparece com maior ênfase e a microestrutura também começa a se destacar como o 3º assunto mais pesquisado. É possível constatar esse fato na Figura 5.

Figura 5 – Co ocorrências de palavras-chave



Fonte: plataforma de pesquisa Scopus. Pesquisa realizada em 20 nov. 2022.

2.3 O USO DO CONCRETO NAS EDIFICAÇÕES

O sistema construtivo com o emprego de estruturas de concreto armado foi patenteado por Francois Hennebique, em 1892, que utilizou como *slogan* de sua propaganda “plus d’incendies désastreux”, ou seja, nunca mais incêndios desastrosos (HELENE, 2019). Desde a sua concepção, sabe-se que este elemento estrutural apresenta alta resistência estrutural à ação do fogo e às intempéries. Helene (2019), utiliza como exemplo desta afirmação uma foto da primeira edificação construída em 1900 (Figura 6) utilizando o sistema Hennebique com elementos estruturais em concreto armado, localizada na Rue Danton, 1, Paris – França, esta edificação está em pleno uso até hoje.

Figura 6 – Primeiro Edifício do mundo construído no sistema Hennebique.



Fonte: Acervo pessoal Paulo Helene (apud HELENE, 2019)

Segundo Santos (2008), o sistema desenvolvido e patenteado por François Hennebique consistia em um sistema estrutural completo, baseado num esqueleto monolítico importante, composto por vários elementos estruturais interligados, como vigas, pilares, capitéis, plintos de fundação. O concreto armado é utilizado no mundo em larga escala nas estruturas das edificações.

Santos (2008), especifica que o concreto foi introduzindo no Brasil no início do século XX, como produto patenteado, distribuído por filiais de empresas estrangeiras aqui estabelecidas. Ganhou difusão tecnológica a partir da instalação das cimenteiras em meados dos anos 1920 e foi normalizado pela ABNT nos anos 1940 e teve suas atribuições profissionais reguladas pelo sistema CONFEA-CREA.

Neste sentido, pode-se verificar que o concreto armado está presente em todo o território nacional. Forigo, Lopes e Vanalli (2021), afirmam que o concreto é amplamente utilizado como material estrutural no mundo. A resistência à água e a plasticidade são propriedades do concreto que o destacam como material construtivo, diferente da madeira e do aço (PEDROSO, 2009). Apesar de seu baixo custo e a facilidade de obtenção e emprego nas obras, o Eurocode 2 (EC2, 2004) especifica que, quando submetido a situações pontuais extremas, como as elevadas temperaturas geradas por um incêndio, a resistência do concreto é reduzida pela degeneração de suas propriedades mecânicas ou pela redução da área resistente.

2.4 A MICROESTRUTURA DO CONCRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O cimento *Portland* é um material obtido através da margem do clínquer e da adição de sulfatos e cálcio entre 5-10%, na forma de dihidrato (gipsita ou anidrita), que varia em cada cimento específico, e serve para moderar e retardar o início da pega. O pó de cimento é composto por grãos de vários tamanhos e formas, variando de 1 μm a 50 μm (MEHTA e MONTEIRO, 2006)

O concreto, basicamente, é formado por componentes inertes, reagentes e água. Os componentes inertes são os agregados, aditivos inertes do cimento e o próprio cimento anidro, ou que não se hidrata na reação de hidratação. Os componentes reagentes são os que reagem com a água hidratando-se e formando cristais e gases no processo de hidratação do cimento. Neste sentido, quatro estruturas básicas compõem a microestrutura do concreto: a pasta de cimento hidratado, o agregado, a zona de transição na interface entre pasta de cimento e agregado e o sistema de poros e capilares (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A evolução na área de materiais resultou no reconhecimento do princípio de que as propriedades têm origem na sua microestrutura interna, ou seja, estas podem ser modificadas quando certas alterações ocorrem em sua microestrutura. A microestrutura do concreto é heterogênea e altamente complexa. Portanto, para que haja entendimento das relações microestrutura-propriedades, certo conhecimento sobre os elementos essenciais da microestrutura é necessário para se discutir os fatores de influência nas suas propriedades importantes para a engenharia, tais como: resistência, elasticidade, retração, fluência, fissuração e durabilidade.

O módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto estão relacionadas diretamente com a fase agregada. O agregado graúdo tem pouca influência na resistência,

porém sua forma tem grande influência na interface pasta ligante - agregado. Quanto mais lamelar e liso for o agregado graúdo, maior a possibilidade de retenção de água na interface com a pasta ligante, tornando sua ligação mais fraca (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Na fase ligante, a dispersão das partículas influencia na resistência do concreto. Quanto menos uniforme a dispersão, maior será a resistência: tanto a microestrutura dos poros quanto a geometria dos cristais formados na hidratação do cimento influem na resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Para Roy e Idorn (1993), na hidratação do cimento, o espaço inicialmente preenchido por água é substituído por compostos hidratados e seu preenchimento é inversamente proporcional à relação água/cimento.

No processo de hidratação são formados compostos químicos a partir da composição básica do cimento que formam a pasta cimentícia e são compostos pelos seguintes elementos, denominados “Compostos de Bougue”, que desempenham funções de estabilidade e resistência conforme compilados no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 – Composição da pasta cimentícia e a função de cada componente

Continua

Elemento	Fórmula	% na composição	Características/Funções
Silicato dicálcico	C_2S	16,6%	• A sua hidratação é mais demorada e acontece em idades avançadas; • Após um ano, sua contribuição para a resistência e dureza é quase igual à do C_3S; • Fornece resistência ao ataque químico • Sua hidratação produz 82% de CSH e 18% de CH.
Silicato tricálcico	C_3S	57%	• Pode ser considerado o melhor material de cimentação; • Aumenta a resistência ao congelamento e descongelamento; • Hidrata na fase inicial, por isso confere resistência inicial à pasta de cimento; • Sua hidratação e características de gel desenvolvido provocam dureza e resistência aos 7 dias. • Sua hidratação produz 61% de CSH e 39% de CH.
Aluminato tricálcico	C_3A	10,8	• Pode reagir rapidamente com a água; • Causa o endurecimento imediato do clínquer finamente moído pelo enrijecimento imediato da paste de cimento. Para se evitar esta reação imediata adiciona-se gesso na proporção de 2-3% no momento da moagem do clínquer. • É responsável pela pega inicial, alto calor de hidratação e alterações volumétricas, portanto, é a causa da fissuração; • Sua hidratação é um processo complexo e forma um sistema CaO, Al_2O_3 e H_2O • No processo de fabricação do clínquer pode ser produzido C_3A ortorrômbico ou C_3A Cúbico, tendo em vista a quantidade de K_2O na composição da matéria prima o que pode acelerar ou retardar a sua hidratação. • Seu processo final de hidratação resulta em C_3AH_6 e outros cristais como A_4AH_{19} e C_2AH_8 • O processo de hidratação, reagindo com a gipsita forma a precipitação de Etringita, que é o hidrato de trissulfato de aluminato de cálcio – $C_6AS_3H_{22}$

Continuação do Quadro 1

Elemento	Fórmula	% na composição	Características/Funções
Aluminoferrita tetracálcica	C ₄ AF	9,1	• Juntamente com o C₃A é responsável pela pega rápida do cimento, porém gera menos calor de hidratação; • Seu valor de cimentação é o menor de todos; • O aumento de seu conteúdo reduz a resistência a compressão • Sua hidratação forma o sistema CaO, Fe₂O₃ e H₂O. • Sua hidratação final forma o C₃FH₆; • O processo de hidratação, reagindo com a gipsita forma a precipitação de Etringita, que é o hidrato de trissulfato de aluminato de cálcio – C₆AS₃H₂₂.

Fonte: O autor.

Todos esses compostos fazem parte de 90,5% da pasta de cimento endurecida. Outros vários elementos compõem o restante da pasta base, cerca de 9,5%, e são, dentre outros: CaSO₄, 2H₂O, MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O, Na₂O e álcalis.

O C₃S e o C₂S juntos constituem 70 a 80% dos compostos do cimento. A maior parte da resistência do cimento é derivada apenas desses dois compostos. Após a hidratação eles resultam em C₃S₂H₃ (C-S-H) e Ca(OH)₂ (CH).

2.5 INCÊNDIO: SUAS CARACTERÍSTICAS E DESENVOLVIMENTO

O fogo é uma das descobertas que movimentou a evolução humana e acompanha a sociedade desde os tempos remotos. Quando se perde o controle do fogo, o mesmo pode se transformar em um incêndio, e este descontrole pode gerar consequências catastróficas.

A NPT 003 – Terminologia de segurança contra incêndio (PARANÁ, 2014, p. 23), traz a definição de fogo como sendo “[...] uma reação química de oxidação (processo de combustão), caracterizada pela emissão de calor, luz e gases tóxicos. Para que o fogo exista, é necessário a presença de quatro elementos: combustível, comburente (normalmente o Oxigênio), calor e reação em cadeia”. O fogo é o resultado de uma reação química exotérmica denominada combustão. Já a NBR 13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio (ABNT, 1997, p. 6), define o fogo como um “[...] processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz. As normas internacionais americanas como a NFPA e a ISO trazem definições diferentes, mas sempre citando a reação de combustão e emissão de luz, calor e fumaça”. Seito (et al., 2008) comenta que o estudo do fogo como ciência tem pouco mais de vinte anos, e apesar dos avanços ainda não há um consenso mundial sobre a definição de fogo.

2.5.1 Representação gráfica do fogo

Segundo Seito (et al., 2008), com a descoberta do halon¹, um agente extintor que atua no combate a incêndios pela reação com os radicais livres, o fogo passou a ser representado graficamente por um tetraedro, onde cada lado representa um elemento do fogo: combustível, comburente, calor e reação em cadeia. A Figura 7 a seguir traz a representação gráfica do fogo e seus elementos.

Figura 7 – Representação gráfica do fogo



Fonte: Adaptado de IFSTA, 2008.

Os componentes do tetraedro do fogo se interligam da seguinte maneira: o calor é a energia de ignição, responsável por dar início à reação, manter e aumentar sua propagação; o comburente (oxigênio) é necessário para que ocorra a combustão (reação de oxidação), está presente no ar atmosférico; o combustível é denominado como “campo de propagação do fogo” e pode ser encontrado nos estados sólido, líquido ou gasoso; a reação em cadeia é o conjunto de reações intermediárias exotérmicas que torna o processo de queima autossustentável (IFSTA, 2008).

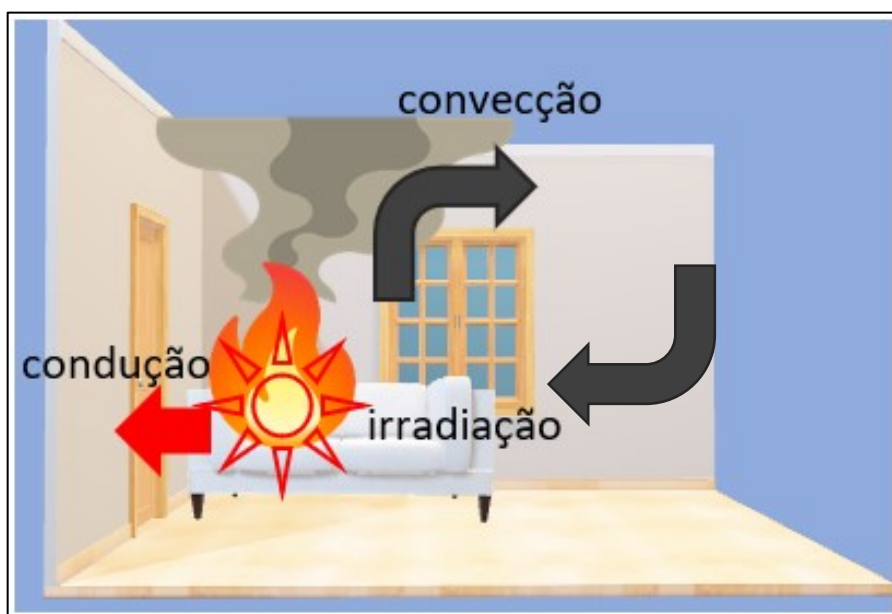
Como exposto, o calor é a energia de ignição, responsável por dar início à reação de combustão, manter e aumentar sua propagação. Neste sentido, verifica-se nos estudos

¹ O halon consiste num composto químico orgânico constituído por um ou dois átomos de carbono, ligados a um átomo de bromo e a outro halogéneo. Os mais utilizados são o halon 1211 (bromoclorodifluormetano) e o halon 1301 (bromotrifluormetano). Os halons são gases muito utilizados em extintores de incêndios. São até dez vezes mais perigosos do que os clorofluorocarbonetos (CFC), aos quais se encontram quimicamente relacionados, na destruição da camada de ozônio. Seu uso em extintores de incêndios foi proibido em janeiro de 1994. (INFOPÉDIA, Porto Editora), disponível em: [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$halon?uri=portugues-neerlandes/halogéneo](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$halon?uri=portugues-neerlandes/halogéneo), acessado em 28/06/2022.

relacionados à segurança contra incêndio que a contenção do calor, aliado ao controle dos materiais combustíveis em uma edificação são pontos de preocupação e atuação das normas.

O calor pode se propagar no ambiente de três formas conhecidas: por irradiação (ou radiação), por convecção e por condução. Segundo Silva (2016), a radiação é o processo pelo qual o calor flui na forma de propagação de ondas, de um corpo em alta temperatura para outro em temperatura mais baixa. Seito (et al., 2008) define que a condução do calor é o mecanismo onde a energia (calor) é transferida por meio do material sólido, ou seja, pelo contato entre as moléculas dos materiais do corpo submetido ao calor. Define ainda que a convecção do calor é o mecanismo no qual a energia (calor) se transmite pela movimentação do meio fluido aquecido (líquido ou gás). A Figura 8 demonstra de forma esquemática as formas de transmissão do calor em um incêndio compartimentado.

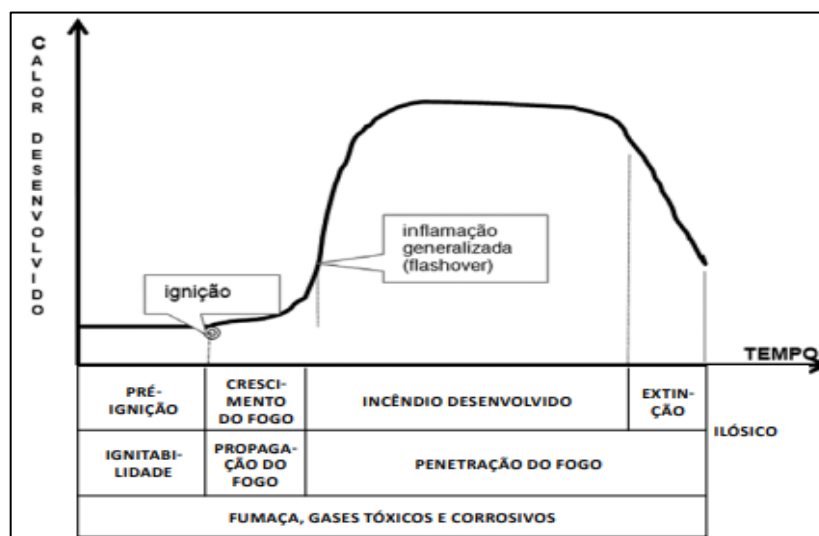
Figura 8 – Formas de transmissão do calor (esquema)



Fonte: do autor, 2023.

Importante destacar para o presente estudo que em se tratando do efeito do calor nas estruturas de concreto, é essencial o entendimento da curva de temperatura média dos gases aquecidos em função do tempo decorrido de incêndio (Figura 9), esta curva é denominada “curva do incêndio real”.

Figura 9 – Curva da evolução do incêndio celulósico



Fonte: - ISO/TR3814:1989(E) *Tests to measuring reaction to fire of buildings materials – Their development and application* (apud. SEITO, 2008)

Silva (2016) alerta que, em virtude da turbulência que ocorre durante um incêndio, é usual adotar, em métodos simplificados de análise, uma distribuição uniforme da temperatura após a ocorrência da inflamação generalizada (*flashover*). Segundo Seito (2008), o incêndio se desenvolve em três fases:

- a) Na **primeira fase**, denominada incêndio incipiente, apresenta crescimento lento e pode ter duração entre 5 e 20 minutos;
- b) Na **segunda fase**, denominada crescimento do fogo, se caracteriza pelo crescimento das chamas que aquecem o ambiente, quando a temperatura atinge cerca de 600°C. Os gases e vapores combustíveis decorrentes da pirolise dos combustíveis sólidos tomará todo o ambiente e poderá ocorrer, então, a inflamação generalizada (*flashover*) formando grandes labaredas, tendo o incêndio crescimento exponencial nesta fase;
- c) Na **terceira fase**, denominada decadência, ocorre a diminuição gradual da temperatura e das chamas, isso ocorre pelo esgotamento dos combustíveis disponíveis.

Os sistemas de detecção e alarme devem atuar na primeira fase e o combate ao princípio de incêndio deve acontecer. Caso o sistema não funcione ou inexistir, entrando o incêndio na segunda fase, a possibilidade de controle fica muito prejudicada. O tempo de duração do incêndio é determinado pela quantidade de material combustível e oxigênio disponível ou pela ação de combate às chamas. Silva (2016) explica que em favor da segurança, admite-se que a temperatura do ambiente em chamas atinge sempre seu valor máximo, devendo a estrutura ser verificada para esta situação.

Neste sentido, para verificação das estruturas em situação de incêndio, por uma questão de simplicidade, é consenso no meio técnico a utilização da curva-padrão de incêndio, para fornecer parâmetros de projeto. Vale ressaltar que a curva padronizada possui apenas um ramo ascendente, admitindo-se, portanto, que a temperatura dos gases é sempre crescente em relação ao tempo, sem levar em consideração as características do ambiente e nem da carga de incêndio. Silva (2016) esclarece que quaisquer conclusões baseadas nessa curva devem ser analisadas com muito cuidado, porque não correspondem ao comportamento real do incêndio ou das estruturas expostas ao fogo.

A NBR 14432 (ABNT, 2000) e NBR 5628 (ABNT, 2022) recomendam que seja utilizada a Equação 1 para consideração da elevação padronizada da temperatura em função do tempo, conforme a ISO 834 (1990).

$$\theta_g = 345(8t + 1) + \theta_{g,0} \quad (1)$$

Onde:

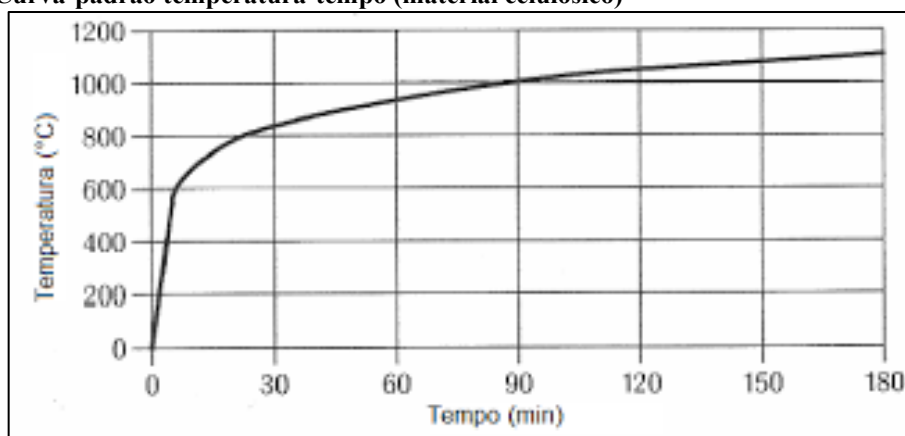
θ_g - Temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

$\theta_{g,0}$ - Temperatura dos gases no instante $t = 0$, geralmente admitida 20°C;

t - Tempo (min).

Partindo-se da Equação 1, é possível construir a curva padronizada de incêndio, conforme o Gráfico 3, estabelecida para incêndio envolvendo material celulósico, como madeira, papel e outros.

Gráfico 3 – Curva-padrão temperatura-tempo (material celulósico)



Fonte: SILVA, 2016.

Esta Curva-padrão estabelecida pela ISO 834 é aplicada para carga de incêndio com potencial calorífico similar à madeira. Quando se trata da análise de material com de origem

em hidrocarbonetos, o incêndio tem maior severidade, devendo ser utilizada outra curva. Nesses casos utiliza-se a Equação 2 (EUROCODE 1, 2002).

$$\theta_g = 1.080 (1 - 0,33e^{-0,17t} - 0,68e^{-2,50t}) + 20 \quad (2)$$

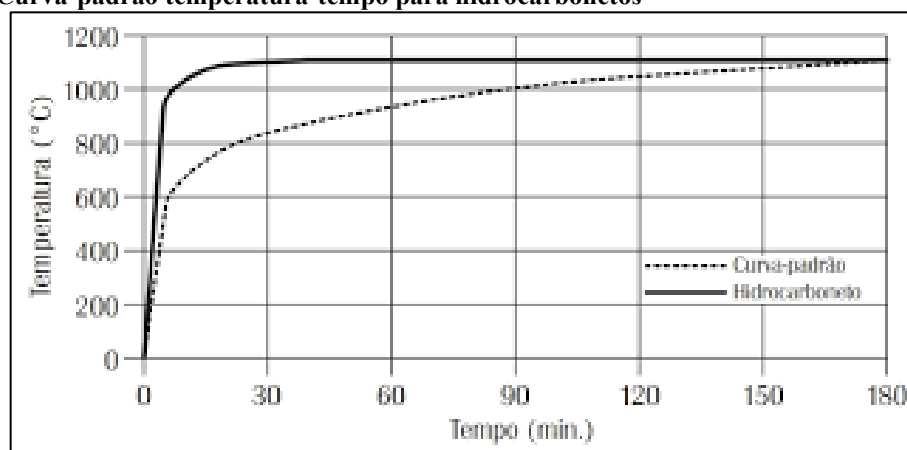
Onde:

θ_g - temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

t - tempo (min)

A partir dessa fórmula é possível traçar o gráfico de desenvolvimento do incêndio-padrão para derivados de hidrocarbonetos, conforme o Gráfico 4 a seguir.

Gráfico 4 – Curva-padrão temperatura-tempo para hidrocarbonetos



Fonte: SILVA, 2016.

2.6 A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS E OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.6.1 Segurança contra incêndios no mundo e no Brasil

Carlo (2008) explica que, internacionalmente a segurança contra incêndio é considerada como uma ciência, portanto, área de pesquisa, desenvolvimento e ensino.

Voltado para a área de segurança contra incêndio nas estruturas, existem vários códigos e normas no exterior. Britez (2011) aponta que o *Building Research Establishment* publicou um documento no ano de 2004, denominado *Fire safety of concrete structur: Background to BS 8110 fire design*, que traz um apanhado histórico sobre todos os códigos referentes à segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio.

Britez (2011) explica que o conteúdo desse extenso documento demonstrou quanto conservadores eram os códigos, quando assumidos os valores tabulares divulgados na maioria

das normas internacionais, podendo chegar a valores superiores ao dobro do prescrito em relação ao valor realmente medido em programas experimentais padronizados.

Esta realidade parece estar se alterando atualmente, se consideradas adequadamente as premissas do Eurocode 2 (BRITEZ, 2011).

No Brasil, segundo Mata (2019) a segurança contra incêndio está baseada em regulamentações, leis e normatizações técnicas dos Corpos de Bombeiros Militares, que devem ser seguidas, garantindo-se um mínimo de segurança nas edificações. Porém esta realidade passou por um longo processo até sua implantação.

Grandes mudanças aconteceram após os incêndios dos edifícios Andraus, em 1972 e Joelma, em 1974. Estes incêndios resultaram em muitas mortes e perdas econômicas, o que levou a uma compreensão da extensão catastrófica dos incêndios. Mata (2019) aborda a evolução das normas citando que as primeiras eram voltadas à especificação de materiais construtivos e aos sistemas de proteção, principalmente aos voltados ao combate a incêndios, assim como a NBR 5627 (ABNT, 1980) que foi redigida, entretanto, cancelada em 2001. Na sequência outras normas vieram dando conta da segurança das estruturas como a NBR 14432 (ABNT, 2001) e a NBR 14323 (ABNT, 2003) que tratam da proteção de estruturas de aço. Logo após, no ano de 2004 foi editada a NBR 15200 (ABNT, 2004), que trata da segurança de estruturas de concreto armado em situação de incêndio.

Ainda no âmbito nacional, entrou em vigor a Lei Federal n.º 13.425 (BRASIL, 2017), que trata sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público.

No estado do Paraná, a exemplo do que ocorreu nos outros estados do Brasil, o Corpo de Bombeiros Militar realizou uma profunda mudança no Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico - CSCIP no ano de 2011. Na ocasião passaram a vigorar as Normas de Procedimento Técnico, a exemplo das Instruções Técnicas do Estado de São Paulo, Instruções Normativas de Santa Catarina e outras nos diversos Estados brasileiros.

As alterações ocorridas passaram a abordar a segurança nas estruturas das edificações, definindo o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo – TRRF, conforme estabelecido na NBR 14432 (ABNT, 2001). O TRRF é um tempo mínimo preestabelecido de resistência ao fogo que deve ser atendido por um elemento construtivo, quando sujeito ao incêndio-padrão, mantendo sua integridade estrutural, estanqueidade e isolamento (COSTA, 2002). Silva (et al., 2010) definem de uma maneira mais simples o entendimento de que o TRRF é o “tempo mínimo, descrito em minutos e aceito por uma determinada sociedade, que os elementos construtivos

devem resistir (com respeito à integridade, estanqueidade e isolamento, onde aplicável) a uma ação térmica padronizada, em um ensaio laboratorial”.

A NBR 14432 (ABNT, 2001), isenta algumas edificações de pequeno porte, indústrias e depósitos (edificações com baixo potencial de risco à vida), da verificação da resistência estrutural à situação de incêndio, em contrapartida devem adotar medidas passivas e ativas que devem ser especificadas em projeto. A seguir, a Tabela 1 apresenta uma parte da tabela da NBR 14432 (ABNT, 2001), que expressa a necessidade de tempo de resistência ao fogo das estruturas em função da ocupação e altura da edificação.

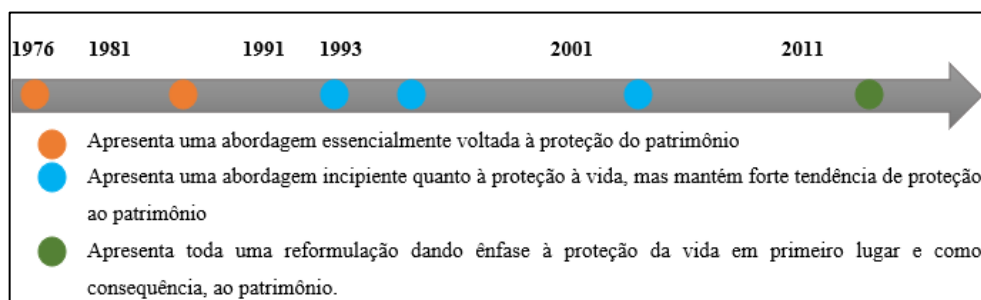
Tabela 1 – Tempo requerido de resistência ao fogo, TRRF, em minutos (ABNT NBR 14432:2001)

Ocupação/Uso	Altura da Edificação				
	$h \leq 6 \text{ m}$	$6 < h \leq 12 \text{ m}$	$12 < h \leq 23 \text{ m}$	$23 < h \leq 30 \text{ m}$	$h > 30 \text{ m}$
Residencial	30	30	60	90	120
Hotel	30	60	60	90	120
Supermercado	60	60	60	90	120
Escritório	30	60	60	90	120
Escola	30	30	60	90	120
Shopping	60	60	60	90	120
Hospital	30	60	60	90	120

Fonte: NBR 14432 (ABNT, 2001) adaptada por Mata (2019).

Analisando-se as normativas do Estado do Paraná, conforme a linha do tempo a ser apresentadas na Figura 10, verificasse que até 1991 era dada muita ênfase nas medidas de proteção patrimonial, como extintores e hidrantes, com uma pequena parte da norma dedicada a saídas de emergência. Já a legislação de 1991 tratava, de forma insipiente a classificação dos riscos por carga de incêndio, a compartimentação de áreas com poucas informações de procedimentos e as saídas de emergência deveriam seguir a recém-lançada norma NBR 9077 (ABNT, 1990). Em uma revisão do Código de Segurança Contra Incêndio do Paraná em 1993 passou-se a adotar para as saídas de emergência a versão da NBR 9077 (ABNT, 1993), que já trazia exigências de compartimentação das áreas relativas ao acesso e caixa das escadas enclausuradas e das escadas enclausuradas à prova de fumaça.

Figura 10 – Linha do tempo das edições da norma de segurança contra incêndio no Paraná



Fonte: do autor.

Com a revisão profunda na normativa do Estado do Paraná em 2011, quando foi lançado o Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico – CSCIP, totalmente reformulado e completo, verifica-se uma grande ênfase na proteção à vida, sistematicamente levada a efeito com as exigências de compartimentação de áreas, resistência ao fogo dos elementos construtivos, controle de materiais de acabamento e revestimento, controle de fumaça e saídas de emergência. O CSCIP foi revisto novamente em 2018 por conta da promulgação da Lei Estadual n.º 19.449, que trata do poder de polícia administrativa do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Paraná, mantendo sua essência de 2011.

Verifica-se esta mudança de ação justamente no art. 2º da referida normativa, conforme a seguir:

“Artigo 2º – Os objetivos deste Código são:

- I – proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;
 - II – dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;
 - III – proporcionar meios de controle e extinção do incêndio;
 - IV – dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros Militar;
 - V – proporcionar a continuidade dos serviços nas edificações e áreas de risco.”
- (PARANÁ, Corpo de Bombeiros Militar. CSCIP, 2018)

2.6.2 Proteção Passiva e Ativa

A proteção contra incêndios é dividida em duas linhas de ação, sendo elas: passiva e ativa. A proteção ativa está relacionada aos equipamentos e sistemas que entram em funcionamento para o combate direto ao incêndio, como sistema de chuveiros automáticos, hidrantes, extintores, iluminação e emergência e outros.

A segurança passiva contra incêndio é iniciada desde a concepção de uma edificação. Silva (2016) ensina que a proteção passiva consiste no conjunto de medidas incorporadas ao sistema construtivo da edificação, sendo funcional durante o uso normal da edificação, reagindo

passivamente ao desenvolvimento do incêndio, ou seja, não propiciando seu crescimento e propagação. Neste sentido, o entendimento do comportamento do concreto em situação de incêndio está relacionado diretamente à proteção passiva, pois seu tempo de resistência ao fogo, evitando-se o colapso da estrutura antes da evacuação da edificação e combate às chamas será a abordagem deste estudo especificamente.

O dimensionamento das estruturas quanto à resistência ao fogo ajuda a garantir sua estabilidade e equilíbrio durante o tempo necessário para que as pessoas possam abandoná-la em caso de sinistro. Verifica-se, então, que a solução para a segurança nas edificações deve ter uma abordagem sistêmica começando no projeto estendendo-se por toda a vida útil da edificação (BERTO e OLIVEIRA, 2018).

2.7 O COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

Para o desenvolvimento de um bom projeto de estrutura que atenda aos requisitos de norma, a proposta do presente estudo é fornecer conhecimento pormenorizado do concreto e seu comportamento frente à altas temperaturas. Para isso se faz necessário, inicialmente, entender como o incêndio se desenvolve, quais temperaturas são atingidas e como estas temperaturas influenciam na resistência da estrutura. O vasto estudo das estruturas de concreto mostra que estas estão sujeitas a constantes agressões do meio, sendo eles, dentre outros, o ataque de sulfatos, de cloretos e da temperatura. Este último, muito agressivo especialmente nas situações de incêndio. Como abordado anteriormente, reforça-se o entendimento de que o incêndio não é uma situação não corriqueira, especialmente nas edificações em altura, mas quando acontece, seus efeitos são graves e em um espaço de tempo reduzido. Dependendo da severidade das temperaturas desenvolvidas em um incêndio, são desencadeadas alterações na microestrutura do concreto que podem ser reveladas na escala macro e resultam em modificações das suas propriedades físicas e mecânicas.

De Souza e Moreno Jr. (2010), realizaram um estudo sobre os efeitos de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto utilizando cimento e agregados usuais definidos pelas normas brasileiras.

No presente trabalho os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 300°C, 500°C, e 800 °C nos ensaios preliminares e 550°C, 750°C e 850°C nos ensaios dos corpos de prova cúbicos pigmentados para verificação de alterações colorimétricas nas peças, além de se

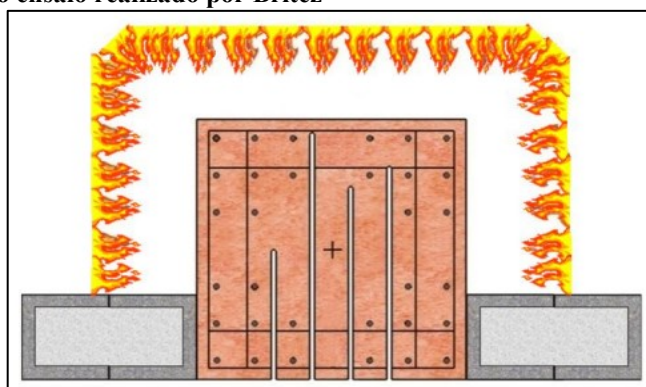
avaliar prováveis alterações na resistência à compressão, no módulo de elasticidade e na microestrutura das peças. Nessa pesquisa foram obtidos resultados importantes sobre o efeito de altas temperaturas nas propriedades mecânicas do concreto.

Britez (2011), desenvolveu sua Tese de Doutorado estudando o comportamento de um pilar de concreto armado colorido de alta resistência, submetido à elevadas temperaturas. O estudo consistiu em submeter um pilar com as características descritas a seguir sob ação das temperaturas estabelecidas na curva-padrão de incêndio ISO 834, por 180 min.

“[...] Esta pesquisa apresenta um programa experimental pioneiro realizado no Brasil em um pilar de concreto de alta resistência, armado, colorido, com idade de oito anos, $f_{c,8 \text{ anos}}$ de 140 MPa, agregado graúdo basáltico, agregado miúdo quartzoso, seção transversal de 70cm x 70cm, 200cm de altura, ensaiado sem carregamento e com exposição de três faces pelo período de 180 minutos (3h), sob as temperaturas da curva-padrão de incêndio ISO 834. O pilar protótipo ensaiado é réplica dos pilares reais do edifício e-Tower, construído em 2002, na cidade de São Paulo, Brasil [...]” (BRITEZ, 2011).

Os resultados da pesquisa trazem significativos ensinamentos quanto à reação do concreto de alta resistência, no caso estudado o protótipo comportou-se de forma íntegra frente à ação do fogo. Outro ponto que a pesquisa trouxe foi que o pigmento utilizado no pilar lhe dando a coloração vermelha, à base de óxido de ferro, segundo Britez (2011, p. 222): “[...] pode atuar como um excelente termômetro natural, auxiliando na avaliação da condição da estrutura pós incêndio”. A Figura 11 apresenta um esquema do ensaio que foi realizado por Britez (2011).

Figura 11 – Esquema do ensaio realizado por Britez



Fonte: Britez, 2011.

A Figura 12 apresenta a mudança de coloração do óxido de ferro, resultante da reação de redução da hematita (Fe_2O_3), transformando-se em magnetita (Fe_3O_4). Esta reação, segundo Britez (2011) ocorreu pela presença de pequena quantidade de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), pela queima incompleta do combustível gás natural do forno durante a

realização do ensaio. Esta reação de redução do Fe_2O_3 em Fe_3O_4 ocorre à temperatura aproximada de 570° . A mudança de coloração aconteceu nos primeiros 55mm de profundidade do pilar partindo-se do centro da face exposta ao calor (NOLDIN JUNIOR, 2002; ROSENQVIST, 2004; ROSS, ADAMS E MARSHALL, 1980; e BRITEZ, 2011).

Figura 12 – Mudança de coloração da magnetita, transformada em hematita pela ação do calor aos 570°C



Fonte: Britez, 2011.

Gil (et al., 2018) analisou experimentalmente o fenômeno de deslocamento em pilares de concreto pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas. O referido estudo constatou que o maior deslocamento ocorreu nos pilares com maior espessura de cobrimento, com resistência à compressão de 61,9 MPa, sendo que, apesar de concretos de elevada resistência possuírem menor permeabilidade, esta característica pode ser balanceada com maiores valores de resistência à tração.

Mata (2019) realizou uma análise da influência do combate a incêndio nas temperaturas de um compartimento. Importante destacar que o estudo de Mata (2019) buscou desenvolver um modelo calibrado, através da análise da influência dos tipos de combate a incêndio (intervenções) nas temperaturas de um compartimento – tipo container marítimo – *high cube*, com aproximadamente $28,3 \text{ m}^2$ de área interna, utilizado como simulador de uma real situação de incêndio. O estudo realizou comparação entre o calor desenvolvido no simulador e as curvas de incêndio real até o fenômeno de *flashover*, inflamação generalizada. Os resultados obtidos pela pesquisadora demonstram que os treinamentos simulam de maneira coerente os incêndios reais. Importante destacar que os dados obtidos foram submetidos e analisados subsidiariamente por simulação computacional. Mata (2019) concluiu que uma vez validados os dados, a metodologia estudada fornece subsídios e fomenta eventuais pesquisas e experimentos futuros sobre o comportamento de estruturas e materiais construtivos em altas temperaturas, tendo em vista que os reais valores e comportamento da temperatura, nesse compartimento sinistrado, transformou-o em um forno adaptado para ensaios controlados.

Como se observa, o campo de estudos do comportamento do concreto submetido à elevadas temperaturas é bastante amplo. Suas reações dependem de vários fatores, como seus componentes, sua resistência, seu emprego, das condições do incêndio a que foi submetido e até das ações de combate ao fogo que propiciam o resfriamento do ambiente e da própria estrutura.

Os ensaios realizados nesta pesquisa buscam possibilitar a análise da microestrutura do concreto utilizando-se dos estudos já realizados. Pretende-se adotar o pigmento óxido de ferro nos corpos de prova para concreto convencional a fim de se identificar a difusão térmica no concreto quando de sua submissão à temperatura elevada. Pretende-se também fazer uma análise comparativa da microestrutura do concreto após sua submissão à alta temperatura no forno mufla em laboratório e no simulador de incêndio real em escala reduzida.

Como visto anteriormente a propagação do calor nos incêndios, pode prejudicar muito os materiais e elementos estruturais das edificações pela sua degradação, além de causar danos físicos às pessoas envolvidas, como vítimas e até os Bombeiros na ação de combate ao fogo. Como o foco deste trabalho é a ação do calor nas estruturas de concreto, serão caracterizados a seguir os danos que a propagação do calor pode causar nestas estruturas.

A estrutura de concreto quando submetida à alta temperatura estará sujeita ao fenômeno da fragmentação, também denominado como *spalling* e caracteriza-se pelo lascamento da superfície de uma estrutura de concreto submetido a um incêndio. Este deslocamento ocorre devido à pressão interna da água ao evaporar-se e ao comportamento diferencial dos componentes do concreto (SILVA, 2019). O fenômeno do *spalling* pode reduzir a área de resistência além de expor a armadura ao fogo.

Assim, como no ambiente ocorre a transmissão do calor por convecção e por irradiação, a estrutura de concreto, que recebe esse calor externo passa a desenvolver a transmissão do calor, internamente, pela ação da condução causando alterações físicas e químicas em sua microestrutura (BRITEZ, 2011). Estas alterações se referem à incompatibilidade térmica entre a pasta de cimento os agregados, além de reações químicas expansivas devido à ação térmica externa.

Conforme o estudo de Britez (2011), o concreto submetido à altas temperaturas pela ação do fogo pode experimentar três problemas principais:

- a) A redução de suas propriedades mecânicas;
- b) Os danos causados pelas deformações térmicas excessivas; e
- c) A ocorrência de deslocamento intenso, caso a dosagem do material e o dimensionamento não forem cuidadosamente considerados.

Silva (2016) aponta que já em 1899, Freitag publicou um artigo por sobre o comportamento do concreto em altas temperaturas mostrando, através de ensaios, que o concreto apresentava redução de resistência. Outro estudo citado por Silva (2016) dá conta de que Mörsch, em 1948 publicou um artigo alertando sobre a necessidade de se verificar as estruturas de concreto armado em situação de incêndio, associando-as apenas à armadura em seu interior.

Importante citar que, em geral, observou-se que as pesquisas monitoram a temperatura dos incêndios não abordando o fluxo de calor proveniente do incêndio. No entanto, Britez (2011) relaciona que os problemas apresentados pelo concreto submetido a altas temperaturas podem ser relacionados com o fluxo de calor proveniente do incêndio e com a distribuição de temperatura no interior do elemento. O fluxo de calor proveniente do incêndio depende da taxa de aquecimento, do nível de temperatura e da duração do fogo, já a temperatura no interior do elemento depende da caracterização dos materiais utilizados na dosagem do concreto como tipo de cimento, agregados e adições, depende também da geometria e da seção transversal do elemento, da massa específica, do teor de umidade, da idade, da relação água-cimento e da porosidade do elemento de concreto.

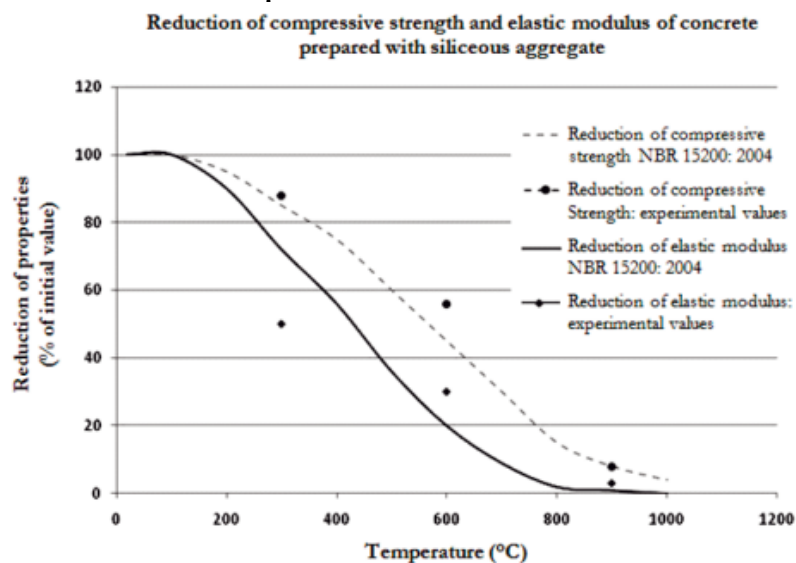
No caso do concreto armado a espessura do cobrimento, o arranjo da armadura (longitudinal e transversal) e a taxa de aço, especificadas no projeto estrutural influenciam na ocorrência dos problemas abordados.

Nesse sentido, Britez (2011) relaciona a ocorrência desses problemas com o gradiente térmico desenvolvido no interior do elemento estrutural.

Atualmente é sabido que a capacidade de resistência à compressão do concreto é reduzida quando em situação de incêndio, atribuindo-se a isso a degeneração das propriedades mecânicas dos materiais ou a redução da área resistente.

Souza e Moreno Jr. (2010) estudaram os efeitos de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. No estudo, compararam os resultados obtidos em seus ensaios aos dados da NBR 15200 (ABNT, 2014) e concluíram que os resultados foram muito similares. Ou seja, quanto maior a temperatura, menor a resistência do concreto naquele objeto de estudo. O Gráfico 5 demonstra os resultados obtidos por Souza e Moreno Jr. comparados com o gráfico de redução da resistência do concreto silicioso especificado na NBR 15200 (ABNT, 2014).

Gráfico 5 – Redução da resistência a compressão do concreto silicoso

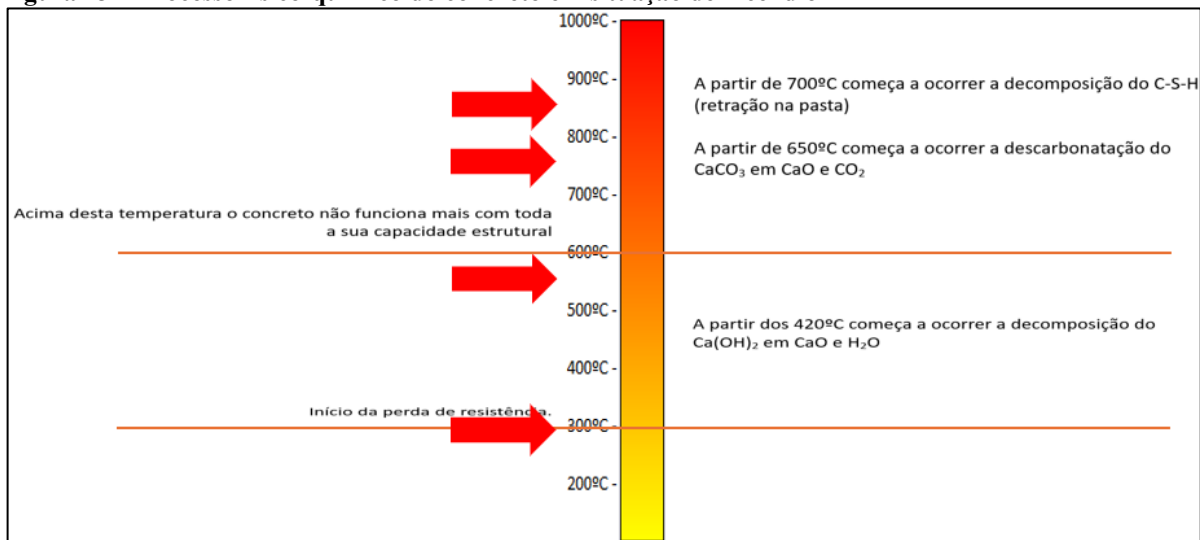


Fonte: Souza e Moreno Jr., 2010.

Neste estudo de Souza e Moreno Jr. confirma-se a especificação da NBR 15200 (ABNT, 2014).

Britez (2011), de maneira geral, traz os efeitos da temperatura no concreto, descrevendo o processo físico-químico envolvendo a interação da pasta de cimento e os agregados, em situação de incêndio, conforme um esquema simplificado, demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Processo físico-químico do concreto em situação de incêndio



Fonte: adaptado pelo Autor de THE CONCRETE CENTRE, 2004.

Analisando-se o Gráfico 5 e o esquema apresentado na Figura 13, é possível destacar três pontos de temperatura importantes e que serão analisados no presente estudo e estão relacionados a alterações na microestrutura do concreto, corroborando com o que foi levantado

por Noumowé (et al., 2010). Os pesquisadores observaram em seus ensaios por meio da Difractometria de Raio X e Raio X que entre 150°C e 300°C ocorre um incremento na resistência residual dos modelos ensaiados, com exceção do concreto vibrado, que apresentou um decréscimo na ordem de 5%.

Entre 450°C e 550°C a portlandita se decompõe pela desidroxilação. Outras alterações significativas nos produtos resultantes da hidratação do concreto ocorrem a partir destas temperaturas, assim como observado por Noumowe (et al., 2001), a 573°C ocorre uma transformação aleatória do quartzo α em quartzo β causando uma expansão e um craqueamento nos agregados silicosos (PLATRET, 2002).

Entre 700°C e 900 °C o carbonato de cálcio se decompõe e o CO₂ escapa do concreto. Pode-se concluir, então que as temperaturas que demonstram grande modificação na microestrutura do concreto são 300°C, 600°C e 800°C. Estas temperaturas serão alvo do presente estudo na fase preliminar onde serão analisadas a perda de massa dos corpos de prova e a perda de resistência mecânica axial. Na fase de análise da microestrutura, onde serão utilizados os corpos de prova cúbicos pigmentados com óxido de ferro (Fe₂O₃), as temperaturas alvo serão: 550°C, 750°C e 850°C. Nestas temperaturas será possível observar a alteração de cor do elemento pela transformação do óxido de ferro Fe₂O₃ (hematita) em Fe₃O₄ (magnetita), que deve ocorrer a 570°C. Serão observadas e analisadas também as alterações microestruturais, químicas e físicas por conta da influência a temperatura.

2.8 ENSAIOS PARA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

Georgali e Tsakiridis (2005), em seus estudos, constataram que a exposição do concreto à altas temperaturas altera suas propriedades físicas e químicas, resultando, além das alterações de suas propriedades mecânicas, fissuras, deslocamento e fluência transiente. Estas alterações comprometem a capacidade resistente dos elementos e a estabilidade global do sistema estrutural.

Hager (2013) corroborando com o Bulletin 38 da *Fédération internationale du béton* (FIB, 2007) apontam que os fatores relacionados ao material, como tipo de agregado, de cimento, a relação água-cimento e as adições, estão diretamente ligados à deterioração das propriedades do concreto submetidos à altas temperaturas. As condições do ambiente, como tempo de exposição, a taxa de aquecimento, a carga aplicada e a umidade, também influenciam.

A FIB (2007), estabelece que as alterações nas propriedades do concreto exposto a altas temperaturas estão relacionadas com as alterações na microestrutura do material. Dessa maneira, procedimentos experimentais podem identificar a resistência residual do material, identificando estas alterações físicas, químicas e mineralógicas.

Tutikian (et al., 2017) realizaram uma interessante revisão bibliográfica acerca do tema, relacionando estudos realizados sobre ensaios e técnicas tais como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X, análise termogravimétrica, poro simetria por injeção de mercúrio, colorimetria e petrografia, que são amplamente utilizados no estudo da degradação do concreto após submissão à altas temperaturas. No estudo, abordaram aspectos relativos ao efeito das altas temperaturas na microestrutura do material (alterações físico-químicas) e técnicas microestruturais para avaliação do concreto degradado.

Khoury (2000), esclarece que o concreto quando exposto a altas temperaturas sofre deterioração, atribuída a três fatores: alterações químicas na pasta de cimento, nos agregados e incompatibilidade térmica entre ambos. Os efeitos da alta temperatura no concreto, focando nas alterações da microestrutura dos agregados, da pasta de cimento hidratada e da zona de transição são de relevante importância no entendimento das suas alterações físico-químicas.

Para o entendimento do comportamento do concreto submetido à altas temperaturas se faz necessário entender o comportamento dos materiais que o compõe, neste sentido Paulon e Kirchheim (2011), em seu estudo demonstram que a zona de transição, ou seja, a interface entre o agregado e a pasta de cimento, que geralmente apresenta uma espessura de 50 μm , é conhecida como o “elo fraco” do concreto. Assim, Mehta e Monteiro (2014), corroboram com esta tese e explicam que nessa região existe um grande volume de vazios e fissuras, ainda mais o C-S-H pouco cristalino e estruturas cristalinas secundárias de portlandita e etringita.

A expansão térmica diferencial que ocorre entre a pasta de cimento e o agregado pelo aquecimento se dá por conta da desidratação da pasta de cimento, causando um processo intenso de retração. Já os agregados sofrem um processo de expansão. Este procedimento causa o surgimento de fissuras na zona de transição que é mais frágil (ANNEREL e TAERWE, 2009; HAGER, 2013). Bolina (2016) observou que a fragilização da zona de transição, também pode induzir ao processo de deslocamento do concreto submetido a altas temperaturas. O fenômeno é potencializado pela pressão dos vapores oriundos do interior do material, o que pode promover uma redução da secção transversal do elemento estrutural, gerando uma redução de sua capacidade de resistência, nos momentos iniciais de exposição ao calor (GEROGALI e TSAKIRIDIS, 2005; HAGER, 2013).

A Figura 14, a seguir demonstra o gráfico adaptado por Fernandes (et al., 2017) de FIB (2007) sobre o comportamento da matriz cimentícia e do agregado quando submetidos à altas temperaturas.

Figura 14 – Incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento



Fonte: FIB (2007), adaptado por FERNANDES (et al., 2017).

Fernandes (et al., 2017), elaboraram um sumário referente às pesquisas sobre o comportamento da microestrutura do concreto submetido à altas temperaturas, trazendo cerca de 35 pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo, desde o ano de 1980 até 2014, a cerca desse tema. O sumário traz os autores das pesquisas, o ano de desenvolvimento do estudo, a temperatura máxima dos ensaios e os tipos de ensaios realizados.

A análise do sumário desenvolvido por Fernandes (et al., 2017), traz informações importantes, como a utilização de amostras confeccionadas em laboratório em 31 pesquisas e 4 amostras retiradas de estruturas em 4 pesquisas, os ensaios tiveram temperaturas que variaram entre 100°C e 1200°C, as técnicas utilizadas nas pesquisas foram: MEV em 19, DRX em 15, PIM em 11, DTA/TGA em 14, COL em 6, PET em 1 e 9 pesquisas utilizaram outras técnicas como microscopia de fluorescência, absorção capilar, BET, absorção de nitrogênio, microtomografia 3D, e microscopia de força atômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

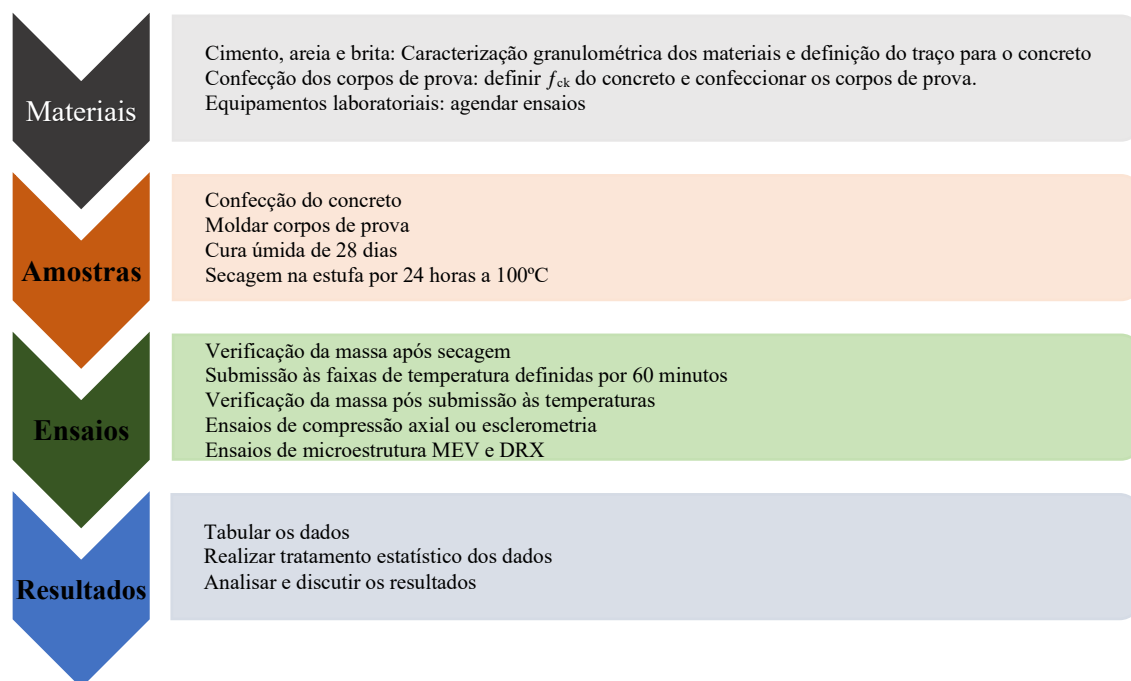
Para a presente pesquisa foi utilizada a metodologia experimental para coleta e análise dos dados. A pesquisa foi realizada em duas etapas, dessa maneira estruturadas:

- a) **Fase preliminar**, ensaios de perda de massa e resistência à compressão, com o objetivo de caracterizar os materiais e definir o traço do concreto a ser utilizado. Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com traço 1:2:3 de cimento:areia:brita e fator água cimento 0,5. Nesta fase os corpos de prova foram submetidos à secagem por 24 em estufa à 100°C para retirar toda a água livre após o período de cura úmida de 28 dias. Foi verificada sua massa e após foram submetidos às temperaturas alvo de 300°, 600°C e 800°C para então passar para a verificação da resistência mecânica axial;
- b) **Fase de análise da microestrutura e difusão do calor**: com o objetivo de analisar as alterações causadas pela temperatura na microestrutura química e física do concreto. Foram confeccionados corpos de prova cúbicos, com o mesmo traço do concreto utilizado no ensaio preliminar, pigmentados com óxido de ferro (Fe_2O_3) na proporção de 4% da massa do cimento. A finalidade dos ensaios foi verificar a perda de massa e a perda de resistência mecânica por esclerometria, analisar a dispersão do calor nos elementos por colorimetria e a microestrutura do concreto com a utilização de microscópio eletrônico de varredura, difração de raio “x” e fluorescência de raio “x”.

3.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e análise da microestrutura de concreto, que serão descritos neste Capítulo. O fluxograma da pesquisa, contemplando ações tanto da fase preliminar como da fase de análise da microestrutura é demonstrado no Fluxograma 1 a seguir.

Fluxograma 1 – Fluxograma do processo experimental



Fonte: do autor.

3.2 MATERIAIS

Em fase preliminar da pesquisa foram confeccionados 25 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de Ø50mm e altura 100mm, para verificação de sua perda de massa e resistência à compressão por influência da alta temperatura. Para isso foi realizada a seleção e caracterização dos materiais a serem utilizados para determinação do traço do concreto a ser utilizado no processo experimental tanto na fase preliminar como na fase de análise da microestrutura: cimento do tipo *Portland* CII-Z, areia natural extraída do Rio Iguaçu e Brita tipo 0.

3.2.1 Composição granulométrica da areia

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria para areia estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

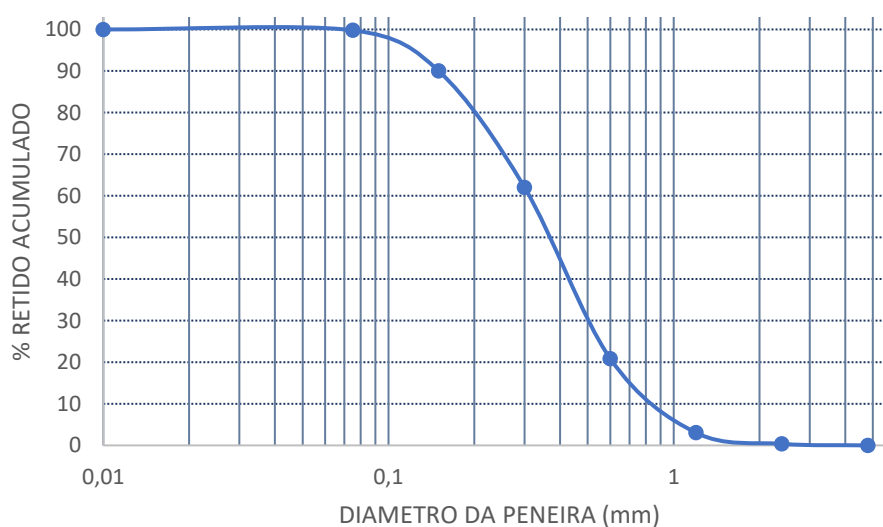
Tabela 2 – Composição granulométrica da areia

Percentagens retidas acumuladas da areia segundo NBR NM 248 (2011).								
Peneira Ø (mm)	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075	Fundo
R Acumulado (%)	0	0,37	3,04	20,85	62,04	90,01	99,79	100

Fonte: do autor.

Com os dados da Tabela 2 foi possível gerar o Gráfico 6 onde está demonstrada a curva granulométrica da areia utilizada no presente estudo.

Gráfico 6 – Granulometria da areia



Fonte: do autor.

A NBR 7211 (ABNT, 2005), prescreve que para agregados miúdos, sua granulometria seja uniforme apresentando as faixas utilizáveis e ótimas para aceitação dos agregados miúdos. A Tabela 3 a seguir apresenta estas faixas aceitáveis de módulo de finura da areia. A areia analisada apresentou módulo de finura 2,76, que está dentro da zona ótima de utilização.

Tabela 3 - Limites do módulo de finura NBR 7211 (ABNT, 2005)

Zona de utilização	Módulo de finura
Utilizável inferior	1,55 a 2,20
Ótima	2,20 a 2,90
Utilizável superior	2,90 a 3,50

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005.

3.2.2 Composição granulométrica da Brita

Da mesma maneira que a areia, a brita também foi submetida ao ensaio granulométrico e os resultados obtidos estão expostos na Tabela 4 a seguir.

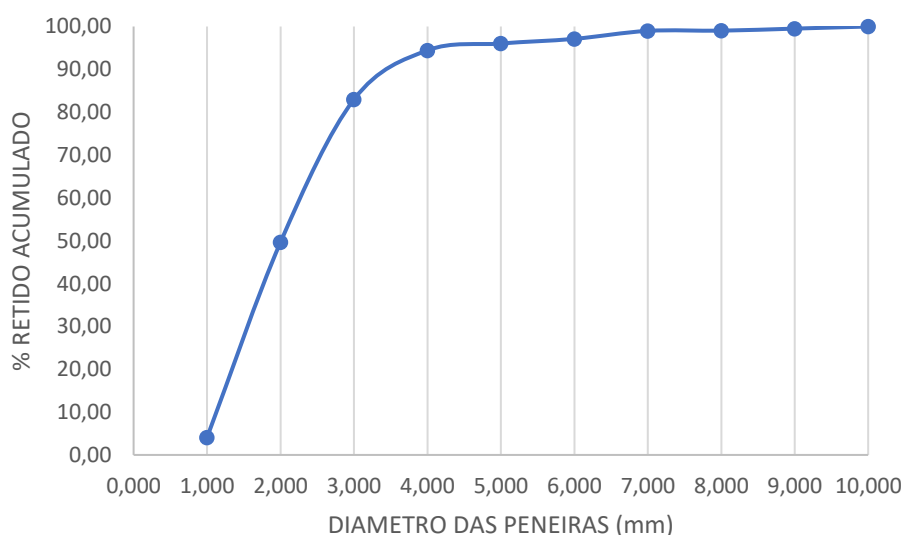
Tabela 4 - Composição granulométrica da brita

Percentagens retidas acumuladas da areia segundo NBR NM 248 (2011).	
Peneira Ø (mm)	R (%)
9,5	4,091
6,3	49,65
4,8	82,98
2,4	94,43
1,2	96,030
0,6	97,119
0,3	98,980
0,15	99,030
0,075	99,51
Fundo	100

Fonte: do autor.

Com os dados da composição granulométrica da Tabela 4 foi montada a curva granulométrica da brita analisada, conforme o Gráfico 7 a seguir.

Gráfico 7 – Granulometria da brita



Fonte: do autor.

Os índices físicos da brita adotada foram obtidos mediante ensaios laboratoriais e estão descritos na Tabela 5. A Brita foi classificada como brita 0 (zero). Para os agregados graúdos,

A NBR 7211 (ABNT, 2005) estabelece parâmetro máximo apenas para o material pulverulento, que é $MP \leq 1\%$ do total de agregados usado para o ensaio.

Tabela 5 - Índices físicos da brita

Índices físicos.	Brita	Unidade
Absorção de água	2,55	%
Massa específica aparente do agregado seco - d	2,62	g/cm ³
Massa específica do agregado saturado superfície seca - d _s	2,69	g/cm ³
Massa específica aparente - d _a	2,27	g/cm ³
Massa unitária do agregado seco	1,50	ρ _a .Kg/dm ³
Massa unitária do agregado saturado superfície seca	1,48	ρ _s .Kg/dm ³
Índice de volume de vazios	11,2	%
Material pulverulento	0,50	%

Fonte: do autor.

A brita adotada para a confecção dos corpos de prova apresenta MP=0,50% de material passante na peneira de Ø 0,075mm. Portanto atende aos parâmetros exigidos na norma.

3.2.3 Equipamentos utilizados

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados os equipamentos existentes nos laboratórios multiusuários da UTFPR, campus Ecoville e no Centro de Multiusuário de Caracterização de Materiais no Campus Centro, ambos em Curitiba/PR, sendo eles:

- Forno mufla Jung modelo Especial 1200°C;
- Prensa Emig PC 200;
- Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15;
- Difratômetro de Raios-X Shimadzu, modelo XRD-7000;
- Esclerômetro manual Schmidt 2,25 Nm.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Ensaio em laboratório

Depois de realizada a caracterização dos agregados foi definido o traço do concreto em 1:2:3 com fator água/cimento de 0,5, traço mais comum para confecção de concreto convencional utilizado em obras de pequeno porte na região de Curitiba, com uma resistência esperada f_{ck} de 25 MPa aos 28 dias. Como, para o concreto estabelecido foram definidos agregados de baixa granulometria, foi utilizada uma argamassadeira para sua mistura. A Tabela

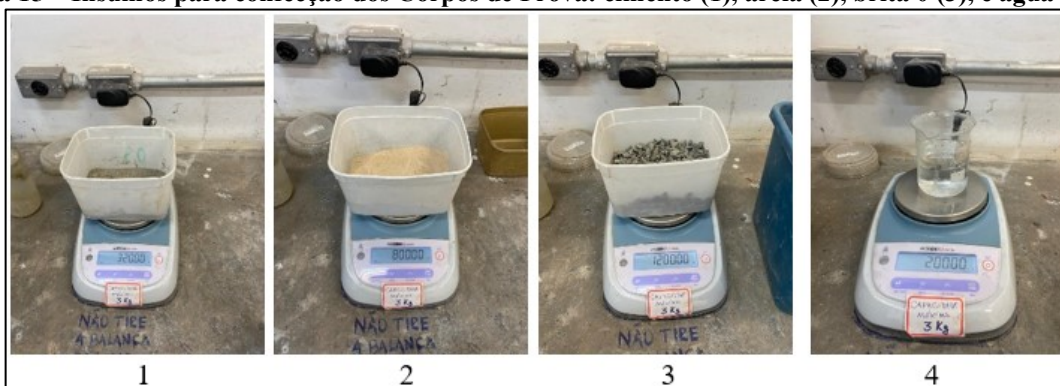
6 e as Figuras 15 e 16 a seguir mostram os o dimensionamento do traço utilizados no concreto para os ensaios preliminares.

Tabela 6 – Preparação do concreto 1:2:3

CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	BRITA (kg)	ÁGUA (kg)	a/c	TOTAL CP'S
2,0	4,0	12,0	1,0	0,5	25

Fonte: do autor.

Figura 15 – Insumos para confecção dos Corpos de Prova: cimento (1), areia (2), brita 0 (3), e água (4)



Fonte: do autor.

Figura 16 – Materiais utilizados: Água (1), cimento (2), areia (3) e brita (4).

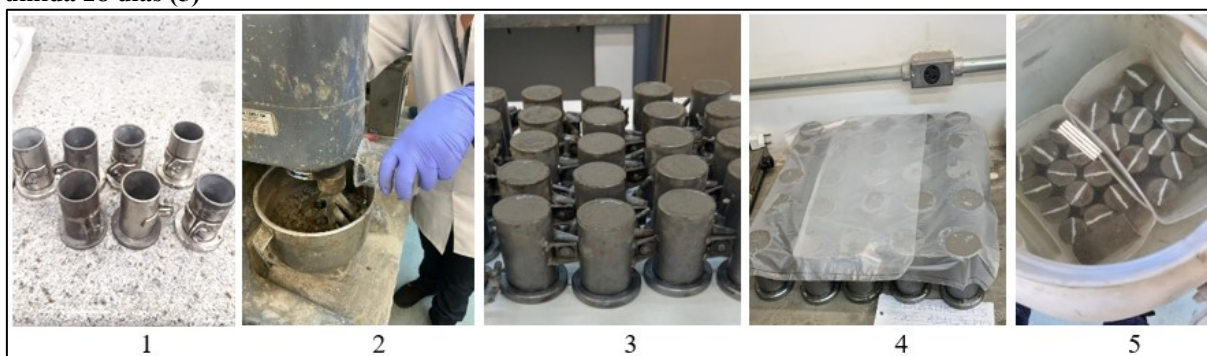


Fonte: do autor.

Quando finalizado o preparo do concreto, as misturas foram depositadas em moldes metálicos cilíndricos de tamanho 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para confecção dos

corpos de prova (CP). Optou-se por utilizar estes tamanhos de moldes devido às dimensões máximas dos agregados componentes do concreto em estudo. Os corpos de prova foram moldados conforme previsto na norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes e inseridos em cura úmida por 28 dias, conforme recomendações da norma NBR 5738 (ABNT, 2015). As etapas de preparação dos Corpo de prova são mostradas na Figura 17 a seguir.

Figura 17 – Preparação dos moldes (1), batimento da mistura (2), moldagem (3), pré-cura 24h (4) e cura úmida 28 dias (5)



Fonte: do autor.

3.3.1.1 Ensaios preliminares

Dando sequência ao processo experimental, após o a cura úmida de 28 dias os corpos de prova ficaram por 96 horas em uma sala à temperatura de 23°C e após foram colocados na estufa à 100°C por 24 horas e resfriados por 24 horas (Figura 18). Na sequência, foram pesados e depois submetidos às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C, seguindo as referências de temperatura de Souza e Moreno Jr (2010), pesados novamente para verificação de possível perda de massa. A Tabela 7 demonstra a quantidade de corpos de prova por grupo de temperatura confeccionados para o experimento.

Figura 18 – Processo experimental: Retiradas as amostras do processo de cura foram colocadas para secagem na estufa por 24 h à 100°C (1), as amostras secas foram pesadas para a definição da massa aparente seca



Fonte: do autor.

Tabela 7 - Distribuição dos corpos de prova para comparação

Temperatura (°C)	Qtd. Corpos de Prova
Referência 100	6
300	6
500	6
800	6
Total	24

Fonte: do autor.

A temperatura de referência, para estes corpos de prova foi considerada 100°C por terem sido submetidos à estufa nesta condição por 24 horas. A secagem em estufa teve a finalidade de retirar a água livre dos poros dos corpos de prova para avaliar alterações de massa dos elementos após aquecimento nas temperaturas alvo, buscando-se comparação com as perdas a serem verificadas nos ensaios dos corpos de prova cúbicos pigmentados que não foram submetidos ao processo de secagem na estufa.

Na continuidade do experimento os corpos de prova foram aquecidos a 300°C, 500°C e 800°C por 30 minutos, divididos em grupos de 6. Após a retirada do forno, eles foram resfriados naturalmente por 24 horas à temperatura ambiente, novamente pesados para verificar a possível variação de massa em relação à temperatura inicial (100°C). Ato contínuo, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão na metodologia descrita pela NBR 5739 (ABNT, 2019). A Figura 19 apresenta a disposição dos CP no forno mufla e as temperaturas a que foram submetidos por 30 minutos.

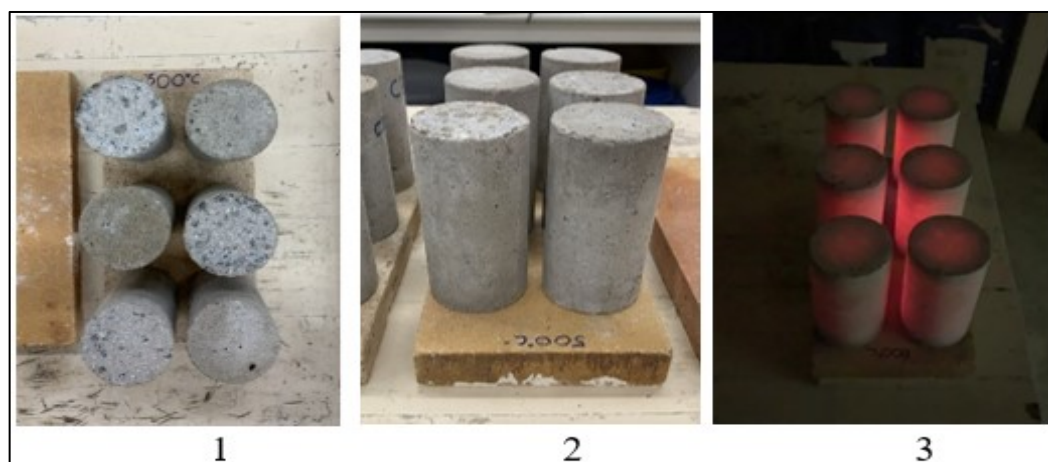
Figura 19 – Disposição dos corpos de prova no forno mufla e indicativo das temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C



Fonte: do autor.

A Figura 20 demonstra o aspecto dos corpos de prova logo em seguida de sua retirada do forno, em que é possível observar que os corpos de prova aquecidos a 800°C ficaram incandescentes (3 da Figura 20).

Figura 20 – Aspectos dos Corpos de prova após submissão à temperaturas de 300°C (1), 500°C (2) e 800°C (3)



Fonte: do autor.

A Figura 21 apresenta o ensaio de compressão axial realizado no Laboratório de prensas da sede Ecoville do Campus Curitiba.

Figura 21 – Ensaio de compressão axial nos CP de concreto



Fonte: do autor.

Os corpos de prova ensaiados preliminarmente, após o ensaio à compressão axial, foram submetidos aos ensaios de DRX e MEV para verificação de suas microestruturas com a finalidade de serem comparados com os ensaios subsequentes dos demais corpos de prova, o quais serão apresentados e comentados no Capítulo 4.

3.3.2 Ensaios em corpos de prova cúbicos pigmentados

3.3.2.1 Definição do traço e confecção dos corpos de prova cúbicos pigmentados

Para a confecção dos corpos de prova cúbicos foram utilizados os mesmos materiais caracterizados anteriormente nos ensaios preliminares de resistência à compressão. O traço do concreto também foi o mesmo, sendo acrescentado o óxido de ferro (Fe_2O_3) vermelho – hematita, para pigmentação do concreto. Os corpos de prova foram moldados nas dimensões de 0,15m x 0,15m x 0,15m (0,00337m³). A proporção de pigmento seguiu a indicação de Britez (2011), sendo que a proporção dos demais componentes foram modificados pelo autor, pois Britez (2011) proporcionou uma mistura para concreto de alta resistência. A proporção da água em relação aos corpos de prova preliminares também foi alterada tendo em vista a quantidade adicionada de óxido de ferro, que é material pulverulento. Para o presente experimento a

dosagem do concreto está expressa na Tabela 8 a seguir, onde foi possível moldar 12 corpos de prova:

Tabela 8 – Preparação do concreto 1:2:3 + 4% óxido de ferro em relação ao cimento

CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	BRITA 0 (kg)	ÓXIDO DE FERRO (kg)	ÁGUA (kg)	a/c	TOTAL CP'S
15	30	45	0,6	8,25	0,55	12

Fonte: do autor.

A utilização da pigmentação com óxido de ferro - Fe_2O_3 , hematita, está baseada nos achados de Britez (2011) que identificou que este composto químico, de coloração predominantemente vermelha, à temperatura de 570° é reduzido ao óxido de ferro Fe_3O_4 , magnetita, de cor predominantemente negra. A intensão do experimento foi verificar a mudança de coloração do composto químico e profundidade dessa mudança para identificar o fluxo do calor no interior do corpo de prova, o que justifica as dimensões adotadas para os corpos de prova. As Figuras 22 e 23 a seguir demonstram a forma utilizada e o aspecto dos elementos de ensaio após a desforma.

Figura 22 – Corpos de prova cúbicos nas formas



Fonte: do autor.

Figura 23 – Aspecto dos corpos de prova pré-ensaio de temperatura



Fonte: do autor.

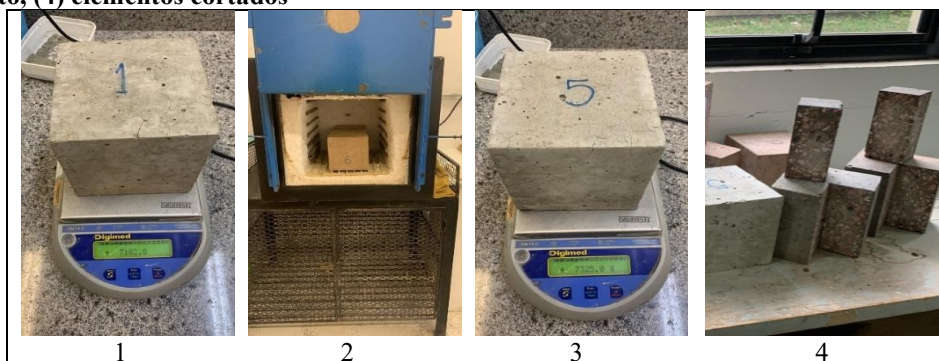
Na Figura 23 é possível verificar que a coloração dos elementos de pesquisa ficou vermelha clara, não atingindo a coloração vermelha intensa esperada.

3.3.2.2 Ensaio de aquecimento e verificação de massa específica aparente dos corpos de prova cúbicos

Após o processo da cura em câmara úmida por 28 dias os corpos de prova ficaram por 96 horas em uma sala à temperatura de 23°C. Estes elementos de ensaio não foram colocados em estufa, passaram pelo processo de pesagem diretamente para definição de sua massa aparente. O objetivo de não os submeter à temperatura de 100°C foi justamente verificar a perda de massa após aquecimento em comparação com seu estado normal aos 32 dias de idade. Na sequência, foram submetidos às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C, por 30 minutos, pesados novamente para verificação de possível perda de massa. Após a verificação da massa dos elementos após aquecimento, estes foram cortados com a utilização de uma serra específica para concreto. Os cortes foram realizados de modo a tornar possível verificar o núcleo da peça e a possível mudança de coloração pelo efeito do calor.

As temperaturas alvo de 550, 750 e 850 foram definidas em função das alterações encontradas no concreto conforme a literatura. A temperatura de 550° foi definida como inicial, pois, conforme Britez (2011) observou-se que a hematita (Fe_2O_3) transformou-se em magnetita (Fe_3O_4) aos 570 °C, sendo assim, este autor definiu esta temperatura, pois não haveria alteração de coloração na peça nesta temperatura. As demais temperaturas com o intuito de verificar qual a intensidade na alteração de coloração do óxido de ferro. A Figura 24 a seguir ilustra a sequência do processo de ensaio e a Tabela 9 demonstra a quantidade de corpos de prova por grupo de temperatura alvo. O resultado será apresentado e comentado no Capítulo 4.

Figura 24 – Sequência do experimento em corpos de prova cúbicos: (1) verificação da massa após a cura, (2) aquecimento em forno mufla nas temperaturas alvo, (3) verificação da massa 24 horas após o aquecimento, (4) elementos cortados



Fonte: do autor.

Tabela 9 – Distribuição dos corpos de prova cúbicos para submissão à temperatura alvo

Temperatura °C	Quantidade de elementos
Referência 25	3
550	3
750	3
850	3
Total	12

Fonte: do autor.

Na sequência, foi realizada verificação da resistência do concreto com a utilização do esclerômetro manual. Para este ensaio foram aplicados 9 golpes em cada corpo de prova, sendo aleatoriamente aplicados 3 golpes em pontos diferentes em três faces do elemento. O ensaio de esclerometria foi realizado nos corpos de prova cúbicos, pois nos ensaios preliminares foi confirmado o resultado apontado pela literatura de que o concreto perde resistência conforme a temperatura a que é submetido. A intenção do ensaio nestes espécimes não era de destruí-los, justamente para que pudessem ser cortados para verificação de possíveis alterações colorimétricas no seu interior.

Após a coleta de dados da resistência dos corpos de prova, procedeu-se ao corte na linha central das arestas em direção ao centro da peça em duas faces, permitindo a retirada de aproximadamente 25% do seu volume. Em seguida ao corte, foram retiradas amostras da parte interior do corpo de prova para serem verificadas as alterações na microestrutura por meio de MEV e DRX.

3.3.3 Tratamento Estatístico dos dados

Os resultados de perda de massa e resistência à compressão conforme o aumento da temperatura nos corpos de prova foram organizados, tratados estatisticamente e analisados pela aplicação do método de análise ANOVA (análise de variância) e Teste de Tukey, de maneira análoga ao utilizado por Britez (2011).

O nível de significância estatística adotado foi de $\alpha=5\%$. Assim buscando-se a probabilidade de certeza de 95%, conferindo alto grau de acerto nas conclusões das análises.

Para a avaliação da influência da temperatura na perda de massa e na diminuição da resistência mecânica do concreto foi aplicado o método ANOVA (teste de variância), com o objetivo de estabelecer a existência de uma diferença significativa nos valores médios dos dados das amostras. Para complementar a análise foi realizado também o Teste de Tukey, que busca indicar os fatores responsáveis pelos efeitos verificados nos grupos de amostras, neste caso, o

efeito da elevação da temperatura na perda de massa e de resistência mecânica das amostras. A análise estatística dos dados foi realizada com a utilização do *software Past*, versão 4.03.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados obtidos nos experimentos foi realizada pela avaliação da influência da temperatura no concreto, inicialmente no seu desempenho quanto a resistência à compressão em temperatura ambiente e submetido à altas temperaturas. A submissão dos corpos de prova à altas temperaturas foram realizadas para verificar o desempenho do concreto frente às altas variações de temperatura, conforme vários estudos já realizados com o concreto convencional (ALI, 2002; BRITEZ, 2011).

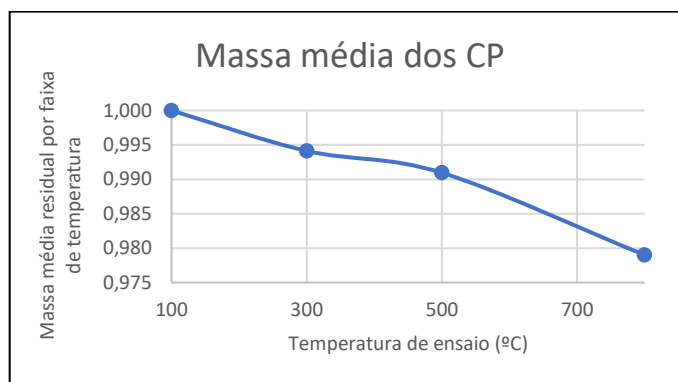
4.1 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DA MASSA APARENTE DOS CORPOS DE PROVA

A Tabela 10 e o Gráfico 8 apresentam o resultado das massas aferidas conforme proposta de experimento preliminar nos corpos de prova cilíndricos.

Tabela 10 - Massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C

Temperaturas de 100 °C, 300 °C e 500 °C					
Temperatura (°C)	CP de Concreto Convencional Cilíndrico				
	Qtd CP	Volume CP (cm³)	Massa (g)	Massa média (g)	μ média (kg/m3)
100	6	196,35	442,480	445,180	2267,164
			449,150		
			441,290		
			449,960		
			449,760		
			438,440		
300	6		441,220	442,568	2253,982
			448,250		
			448,420		
			436,190		
			442,580		
			438,750		
500	6		446,200	443,153	2256,961
			446,110		
			435,040		
			446,820		
			438,340		
			446,410		
800	6		434,680	435,837	2219,689
			431,550		
			440,210		
			437,060		
			438,310		
			433,210		

Fonte: do autor.

Gráfico 8 – Perda de massa de massa após aquecimento – CP Cilíndrico

Fonte: do autor.

Considerando os dados de massa e temperatura obtidos neste procedimento foi aplicada a ANOVA, sendo seu resultado apresentado na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C

	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrados Médios (MQ)	F	Valor - p
Entre grupos	295,15	3	98,3832	3,849	0,02521
Dentro dos grupos	511,207	20	25,5603		
Total	806,356	23			

Fonte: do autor.

O p-valor de 0,02521 indica que há uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos amostrais. Portanto, sugere que a perda de massa dos corpos de prova varia significativamente entre pelo menos um dos grupos testados.

Com esse resultado, procedeu-se ao Teste de Tukey, com o objetivo de identificar quais temperaturas apresentaram intervalos de confiança estatisticamente relevantes na perda de massa dos corpos de provas ensaiados. Os resultados estão demonstrados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Teste de Tukey desenvolvido para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C

	Referência	300°C	500°C	800°C
Referência		0,8117	0,9011	0,02181
		Confirma H0	Confirma H0	Rejeita-se H0
300°C	1,254		0,9971	0,1301
	Não se aplica		Confirma H0	Confirma H0
500°C	0,9706	0,2834		0,08935
	Não se aplica	Não se aplica		Confirma H0
800°C	4,516	3,261	3,545	
	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	

Fonte: do autor.

Verifica-se que a perda de massa dos corpos de prova aumenta significativamente quando a temperatura é elevada para 800°C quando comparada à temperatura de controle (100°C). Essa diferença é estatisticamente significativa, conforme indicado pelo teste ANOVA e pelo Teste de Tukey. As temperaturas intermediárias (300°C e 500°C) não mostraram diferenças significativas em relação ao controle ou entre si, sugerindo que os maiores efeitos na perda de massa ocorrem a temperaturas mais elevadas, especialmente a 800°C.

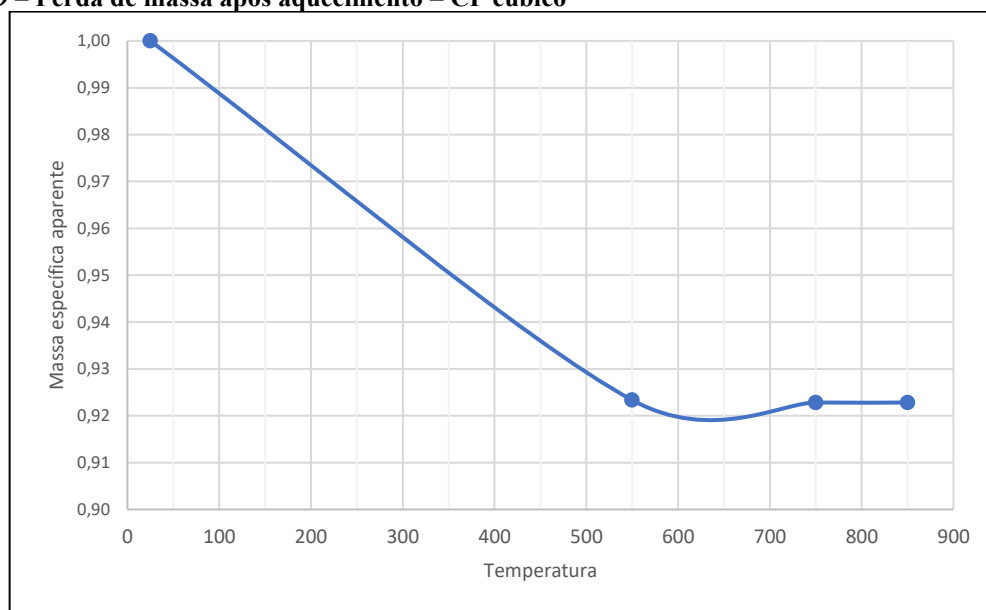
Há que se considerar que os corpos de prova dos ensaios preliminares foram aquecidos à 100°C justamente para a eliminação da água livre nos poros. Isso sugere que a 800°C ocorre alteração significativa na massa do corpo de prova tendo em vista as alterações em sua microestrutura devido às transformações químicas ocorridas pelo efeito da temperatura. Será possível observar esse fenômeno nas análises de MEV e de DRX.

A Tabela 13 e o Gráfico 9 apresentam a variação de massa aparente nos corpos de prova cúbicos pigmentados submetidos às temperaturas alvo em relação à referência.

Tabela 13 - Massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados após cura e submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C

Temperatura (°C)	CP de Concreto Convencional Cúbico				
	Qtd CP	Volume CP (cm³)	Massa média (g)		μ média (kg/m3)
Referência 25	3	3375,00	7.958,10	7.984,73	2.365,93
			7.995,40		
			8.000,70		
550	3		7.395,00	7291,67	2.160,5
			7.230,00		
			7.250,00		
750	3		7.207,30	7287,60	2.159,28
			7.223,50		
			7.432,00		
850	3		7.182,80	7287,60	2.159,28
			7.355,00		
			7.325,00		

Fonte: do autor.

Gráfico 9 – Perda de massa após aquecimento – CP cúbico**Fonte: do autor.**

Com os resultados obtidos foram realizados os testes ANOVA e Tukey para análise estatística dos dados conforme se verifica a seguir nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados e curados à temperatura ambiente e após submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C

	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrados Médios (MQ)	F	Valor - p
Entre grupos	1,08927E06	3	363091	44,26	2,507E-05
Dentro dos grupos	65627,5	8	8203,44		
Total	1,1549E06	11			

Fonte: do autor.

O p-valor de 2,507E-05, apresentado na Tabela 14, indica que há uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos amostrais. Portanto, sugere que a perda de massa dos corpos de prova varia significativamente entre pelo menos um dos grupos testados.

Com esse resultado, procedeu-se ao Teste de Tukey, com o objetivo de identificar quais temperaturas apresentaram intervalos de confiança estatisticamente relevantes na perda de massa dos corpos de provas ensaiados. Os resultados estão demonstrados na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15 – Teste de Tukey desenvolvida para avaliação da perda de massa dos corpos de prova cúbicos pigmentados e curados à temperatura ambiente e após submissão às temperaturas de 550°C, 750°C e 850°C

	Referência	550°C	750°C	850°C
Referência		6,389E-05	6,12E-05	6,12E-05
		Rejeita-se H0	Rejeita-se H0	Rejeita-se H0
550°C	13,25		0,9999	0,9999
	Não se aplica		Confirma H0	Confirma H0
750°C	13,33	0,07777		1
	Não se aplica	Não se aplica		Confirma H0
850°C	13,33	0,07777	0	
	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	

Fonte: do autor.

Verifica-se que há perda de massa significativa dos corpos de prova quando comparados entre o grupo de Referência e os grupos aquecidos a 550°C, 750°C e 850°C. Essas diferenças são estatisticamente significativas, conforme indicado pelo teste ANOVA e pelo Teste de Tukey. As comparações entre os grupos aquecidos 550°C, 750°C e 850°C não mostraram diferenças significativa sugerindo que a perda de massa é similar nesses níveis de temperatura. Portanto, a elevação de temperatura do ambiente aos níveis estudados resultou na perda de massa significativa dos corpos de prova.

Como estes corpos de prova foram aquecidos com a água livre em seu interior, observa-se uma maior perda de massa quando comparado o grupo de referência ao grupo aquecido à 550°C, ficando praticamente constante nas demais temperaturas (750°C e 850°C) o que sugere que, inicialmente ocorre a evaporação da água livre inicialmente e em seguida ocorrem as alterações em nível microestrutural devido às alterações químicas ocorridas pelo aumento da temperatura. Será possível observar esse fenômeno nas análises de MEV e de DRX.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO:

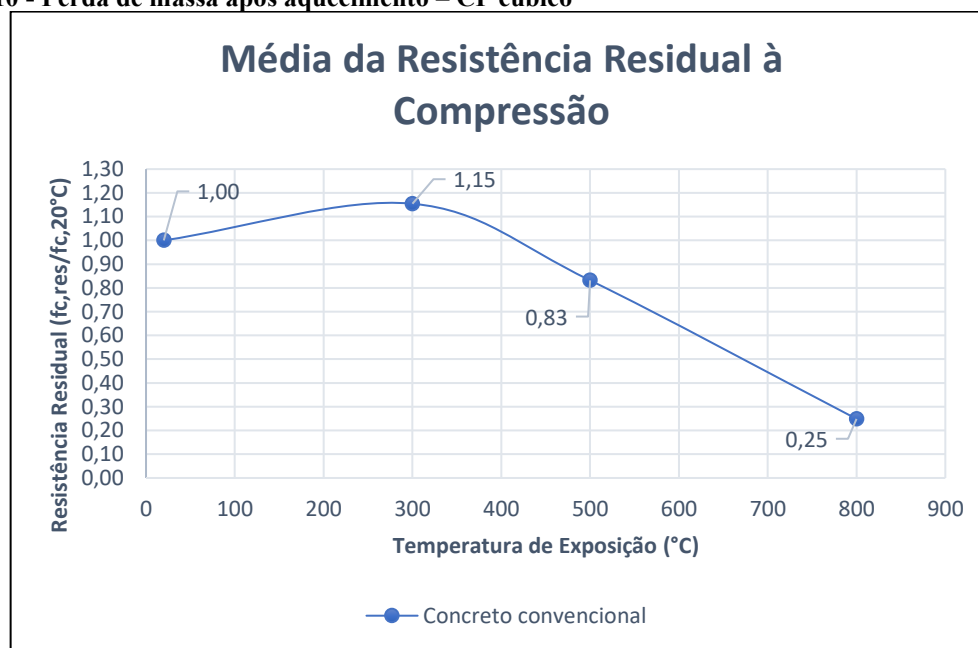
Os resultados do ensaio preliminar de compressão, envolvendo os corpos de prova cilíndricos foram tabulados na Tabela 16 e no Gráfico 10.

Tabela 16 - Resistência à compressão dos corpos de prova após aquecimento

Grupo por faixa de aquecimento (°C)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	CP6 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
100	18,8	21,6	24,5	22,3	24,7	24,0	22,6	2,3
300	26,1	24,9	27,5	26,3	24,3	27,8	26,1	1,4
500	19,1	19,0	19,8	18,2	18,7	18,1	18,8	0,7
800	5,2	6,0	6,0	5,6	5,2	5,9	5,6	0,4

Fonte: do autor.

Gráfico 10 - Perda de massa após aquecimento – CP cúbico



Fonte: do autor.

Como se pode observar, os corpos de prova cilíndricos seguiram a tendência verificada na literatura, ou seja, houve grande perda de resistência com o crescimento de temperatura. Vale ressaltar que os apontamentos feitos por Britez (2011) são muito importantes, pois os ensaios em escala reduzida não apontam a realidade dos ensaios em tamanho real. Porém, são válidos para proporcionar a observação, de um modo geral, no estudo da microestrutura, como ela é afetada em função da temperatura.

Observou-se ainda um aumento de cerca de 15% na resistência dos corpos de prova aquecidos a 300°C. Nas análises de microestrutura será possível observar que, os corpos de prova aquecidos à 100°C por 24 horas ocasionaram a evaporação da água livre do concreto e aceleraram a reação de hidratação do cimento anidro e do clínquer. Houve o surgimento do mineral tobermorita na análise cristalográfica do composto, o que pode ter incrementado sua resistência à compressão aos 300°C.

A análise estatística dos resultados utilizando-se os testes ANOVA e Teste de Tukey, estão expressos nas Tabelas 17 e 18 a seguir.

Tabela 17 – ANOVA desenvolvida para avaliação da perda de resistência dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C

	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrados Médios (MQ)	F	Valor - p
Entre grupos	1445,71	3	481,903	257,2	3,873E-16
Dentro dos grupos	37,4696	20	1,87348		
Total	1483,18	23			

Fonte: do autor.

O p-valor de 3,873E-16, apresentado na Tabela 17, indica que há uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos amostrais. Portanto, indica que a temperatura tem efeito significativo na perda de resistência à compressão do concreto.

Com esse resultado, procedeu-se ao Teste de Tukey, com o objetivo de identificar quais temperaturas apresentaram intervalos de confiança estatisticamente relevantes na perda de resistência dos corpos de provas ensaiados. Os resultados estão demonstrados na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 – Teste de Tukey desenvolvido para avaliação da perda de resistência dos corpos de prova cilíndricos após cura e secagem na estufa à 100°C por 24 horas e submissão às temperaturas de 300°C, 500°C e 800°C

	Referência	300°C	500°C	800°C
Referência		0,00138	0,0005614	3,397E-14
		Rejeita-se H0	Rejeita-se H0	Rejeita-se H0
300°C	6,255		6,713E-08	1,976E-14
	Não se aplica		Rejeita-se H0	Rejeita-se H0
500°C	6,812	13,07		1,934E-12
	Não se aplica	Não se aplica		Rejeita-se H0
800°C	30,43	36,69	23,62	
	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	

Fonte: do autor.

Os resultados apontam que todas as temperaturas comparadas apresentam diferenças significativas na resistência à compressão do concreto.

Verifica-se que a resistência à compressão do concreto diminuiu significativamente com o aumento da temperatura. Esta diminuição é evidente nas comparações do Teste de Tukey. Os corpos de prova submetidos à temperatura de 800°C apresentaram a menor resistência à compressão, indicando que altas temperaturas degradam significativamente a resistência do concreto.

Os resultados são críticos para o entendimento do comportamento do concreto em situação de incêndio. A redução da resistência à compressão, associado à perda de massa e análise de sua composição microestrutural podem revelar o mecanismo de ação da temperatura no concreto.

4.2.1 Resultados dos ensaios de resistência com a utilização do esclerômetro nos corpos de prova cúbicos

Os corpos de prova cúbicos foram submetidos ao ensaio de esclerometria. Conforme descrito anteriormente, não era a intenção destruí-los, mas sim, verificar, através de outro ensaio

equivalente, como a temperatura afetou sua resistência, uma vez que os ensaios preliminares, bem como a literatura apontaram para uma perda de resistência em função da temperatura aplicada. Os resultados estão tabulados e demonstrados na Tabela 19 a seguir.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de esclerometria nos corpos de prova cúbicos

Grupo temp. (°C)	Corpo de Prova	Medições dos índices esclerométricos em cada impacto (MPa)									Média (MPa)			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	IE (I)	IE(II)	IEf	Global Grupo
Referência (25)	10	31	40	32	30	38	29	22	30	23	31,56	29,19	27,00	25,00
	11	21	24	28	30	26	31	29	32	26	27,44	27,17	23,00	
	12	Corpo de prova danificado											--	
550	3	27	32	27	32	33	27	24	32	33	26,67	28,71	23,00	23,33
	4	23	28	26	26	34	27	31	29	28	28,00	27,33	21,00	
	6	31	30	32	30	34	30	27	32	28	30,44	30,43	26,00	
750	1	42	16	42	9	20	14	16	13	16	14,22	15,00	Prej.	Abaixo de 10
	2	40	16	16	14	20	11	11	48	48	14,89	15,33	Prej.	
	5	14	46	13	12	46	14	11	14	40	13,33	13,40	Prej.	
850	7	11	13	47	11	11	47	11	14	16	13,44	14,33	Prej.	Abaixo de 10
	8	--	11	11	12	13	46	12	--	40	12,14	11,80	Prej.	
	9	16	16	15	42	42	42	14	48	20	15,00	15,25	Prej.	

Fonte: do autor.

IE – Índice Esclerométrico

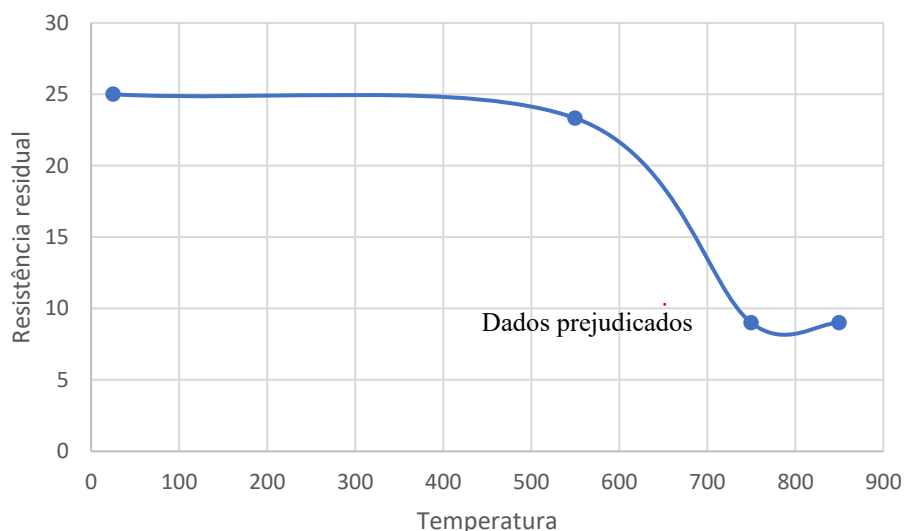
IEf – Índice Esclerométrico Efetivo

-- - valores cuja leitura do equipamento ficou prejudicada

Prej. – Valores menores que 10MPa que não são captados pelo equipamento

Segundo a norma NBR 7584 (ABNT, 2012), os valores que divergirem em 10 % da média inicial (IE - média I) devem ser excluídos dos resultados (células vermelhas com o texto tachado), na sequência, é calculada uma nova média com os valores remanescentes (IE- média II) e apurado o Índice Esclerométrico Efetivo (IEf), que é a resistência do elemento, foi obtido fazendo-se a interpolação dos dados obtidos no índice esclerométrico (IE - média II) com a curva de calibração do equipamento.

A Média Global por grupo é obtida por meio da média dos IEf de cada elemento em seu grupo de ensaio (Gráfico 11).

Gráfico 11 – Resultados da resistência dos corpos de prova medida por esclerometria

Fonte: do autor.

Os dados prejudicados neste gráfico são referentes aos índices mínimos de leitura do equipamento que não identifica resistência menor do que 10 no índice esclerométrico. Como foi constatado no ensaio preliminar e na literatura, os índices de resistência residual dos elementos cilíndricos ensaiados na prensa mostram que, realmente a resistência à compressão residual nas temperaturas acima de 700°C ficou abaixo de 10 MPa (ver Gráfico 10). O que sugere a conclusão de que o ensaio esclerométrico para determinação da resistência residual dos elementos seguiu a tendência apresentada nos ensaios preliminares e na literatura.

4.3 RESULTADOS DA COLORIMETRIA NOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS:

Conforme abordado anteriormente os corpos de prova cúbicos receberam pigmentação por óxido de ferro (Fe_2O_3) hematita, de cor avermelhada, que quando aquecido aos 570°, se transforma em magnetita (Fe_3O_4), de cor negra. A seguir será apresentado o aspecto dos corpos de prova antes e depois de sua submissão às temperaturas alvo e a mudança de coloração em cada faixa de temperatura.

A Figura 25 apresenta a colocação dos elementos de cada grupo, um ao lado do outro possibilitando a verificação da mudança de coloração do pigmento conforme a temperatura a que foi submetido.

Figura 25 – Efeito do calor na pigmentação dos corpos de prova cúbicos

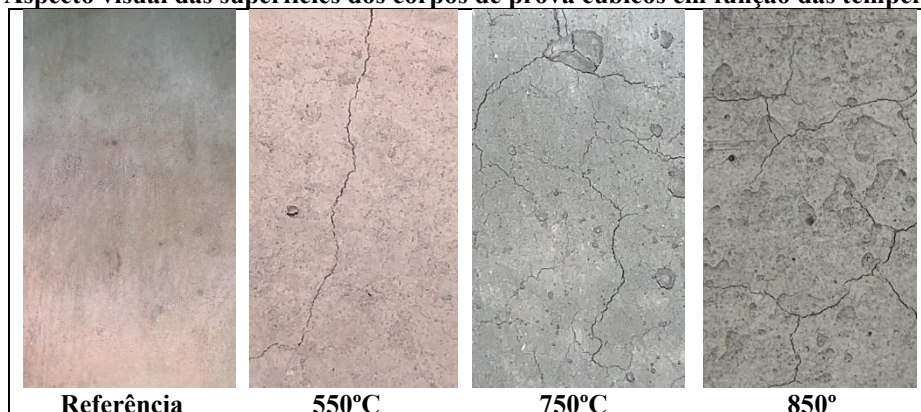


Fonte: do autor.

Na Figura 25 pode-se verificar a mudança de pigmentação dos corpos de prova cúbicos que estão assim dispostos, da esquerda para a direita: (1) corpo de prova de referência à temperatura ambiente (25°C); (2) temperatura de 550°C; temperatura de 750°C; temperatura de 850°C. Conforme era esperado houve a mudança de coloração, porém, não na tonalidade observada por Britez (2011). Este experimento tornou possível visualizar a transformação química ocorrida com o óxido de ferro hematita, conforme a temperatura. Pode-se observar que o corpo de prova de referência e o corpo de prova que foi aquecido à 550°C por 30 min mantiveram a coloração avermelhada, sendo que aos 550°C esta ficou mais acentuada. Na temperatura de 750°C houve uma mudança significativa na coloração, conferindo ao elemento ensaiado uma tonalidade cinza escura e aos 850°C uma tonalidade cinza clara.

Outro aspecto importante observado foi a possibilidade de verificação dos efeitos do calor na macroestrutura do concreto. A Figura 26 a seguir apresenta os aspectos visuais das faces dos elementos registradas por fotografia do aparelho celular, marca *Apple*, modelo *iPhone X*, a uma distância de 40 cm dos corpos de prova utilizando-se a iluminação por flash do próprio aparelho.

Figura 26 – Aspecto visual das superfícies dos corpos de prova cúbicos em função das temperaturas alvo

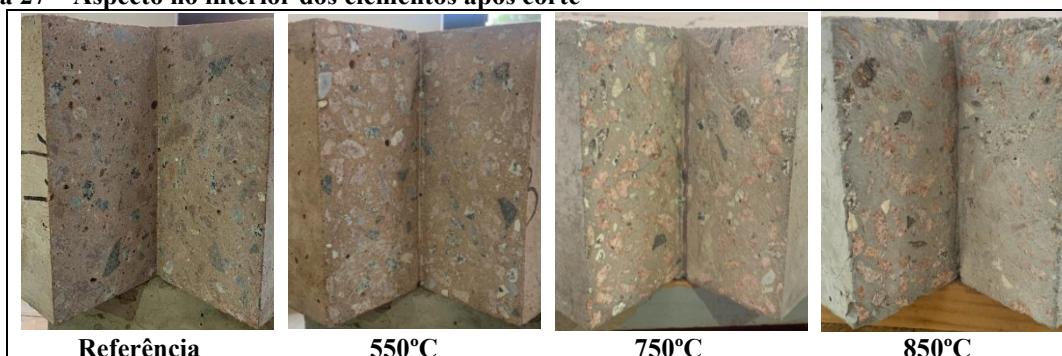


Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 26 que o corpo de prova de referência apresenta aspecto da superfície uniforme e homogêneo na pigmentação avermelhada, sem fissuras visíveis à distância de 40cm nem deslocamentos. No elemento submetido à 550°C de temperatura já é possível observar uma superfície com fissuras de espessura fina, uma coloração avermelhada mais acentuada. O corpo de prova aquecido a 750°C apresenta pigmentação alterada, na cor acinzentada e com um grande número de fissuras com espessuras maiores e pequenas áreas de deslocamento, assim como no elemento aquecido a 850°C que apresenta uma superfície com muitas fissuras e com áreas de deslocamento mais visíveis. Este último elemento apresentou decomposição superficial ao toque e manuseio, demonstrando grande fragilidade e desagregação de sua estrutura.

A Figura 27 a seguir apresenta o aspecto interno da coloração nos elementos. O objetivo era a avaliar a possibilidade observar o fluxo de calor no interior do elemento com alteração da pigmentação.

Figura 27 – Aspecto no interior dos elementos após corte



Fonte: do autor.

O corpo de prova de referência apresenta um interior com pigmentação homogênea e boa coesão entre a pasta de cimentícia e os agregados. O elemento aquecido a 550°C apresenta, da mesma forma um interior com pigmentação homogênea, com pigmentação um pouco mais acentuada se comparado a referência. Pode-se observar uma mudança na tonalidade dos agregados em relação ao elemento de referência, pois apresentam uma coloração mais acentuada e escurecida. Nos corpos de prova submetidos a 750°C e 850°C já é possível observar fissuras na área de transição agregado – pasta cimentícia, pigmentação com coloração acinzentada em todo o interior do elemento e significativa alteração na coloração dos agregados. A coloração acinzentada uniforme no interior dos corpos de prova sugere que a dissipação do calor no elemento ocorreu de forma uniforme, sendo aquecido o corpo de prova por inteiro. Tanto Britez (2011) quanto Helene (2010) entendem que conclusões quanto a resistência de

elementos de concreto analisados em laboratório com a utilização de forno mufla não representa o real comportamento de um elemento estrutural em tamanho real e aplicado em uma edificação.

Com o ensaio colorimétrico, foi possível corroborar com Britez (2011) e Helene (2010), neste sentido, pois os elementos ensaiados apresentaram uniforme dissipação do calor no seu interior. Os elementos estruturais alocados nas edificações apresentam comportamentos diferentes pois estão dispostos de maneira a não exporem todas as suas faces à situação de aquecimento, podendo apresentar uma difusão diferente do calor no seu interior. Além disso há que se considerar as dimensões desses elementos.

Contudo o ensaio se mostrou satisfatório para que seja possível se determinar os danos nos elementos estruturais à base de concreto justamente nas áreas atingidas pela temperatura elevada.

Na elaboração do concreto para este ensaio foi utilizado agregado gráudo granítico e, como abordado anteriormente, este apresentou alteração de coloração após aquecimento. Verificou-se também que o agregado perdeu sua estabilidade mecânica de resistência à compressão, sendo possível parti-lo com a força das mãos apenas.

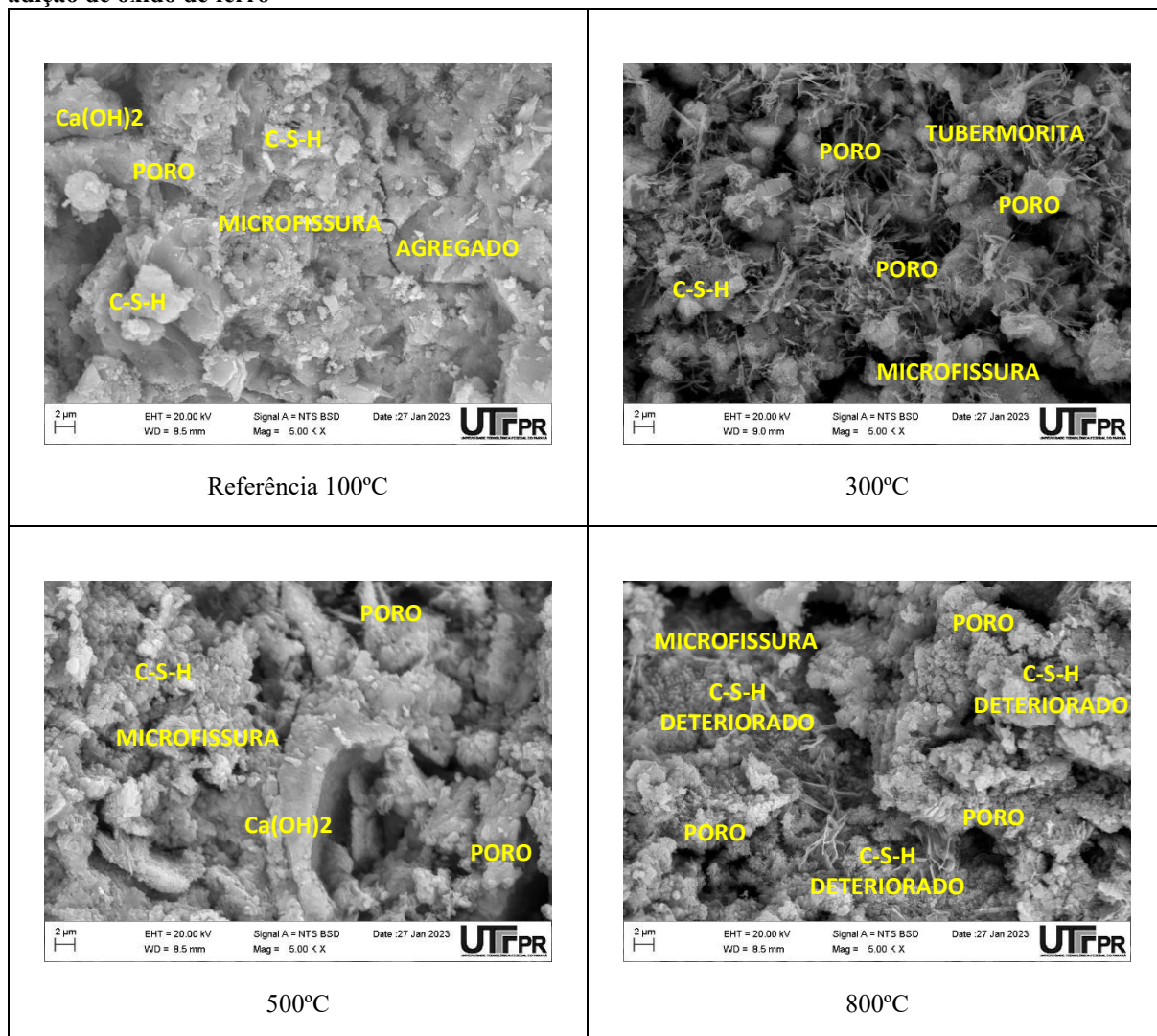
Este processo de observação pode corroborar com a literatura que estabelece que os diferentes tipos de rochas de obtenção dos agregados gráudos influências na resistência do elemento de concreto quando submetido à elevadas temperaturas. Estudos apontam que o agregado granítico apresenta moderada resistência à elevadas temperaturas e que o agregado basáltico é o que tem melhor desempenho neste quesito.

4.4 RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Os elementos de ensaio foram fragmentados e observados em microscópio eletrônico de varredura onde foi possível perceber a mudança na microestrutura devido ao efeito do calor, tanto na pasta cimentícia quando nos agregados.

A seguir, no Quadro 2, serão demonstrados os aspectos da microestrutura dos corpos de prova e suas alterações sob a influência da alta temperatura.

Quadro 2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova cilíndricos sem adição de óxido de ferro



Fonte: do autor.

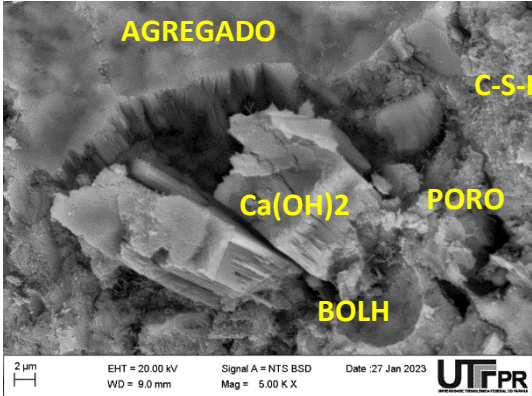
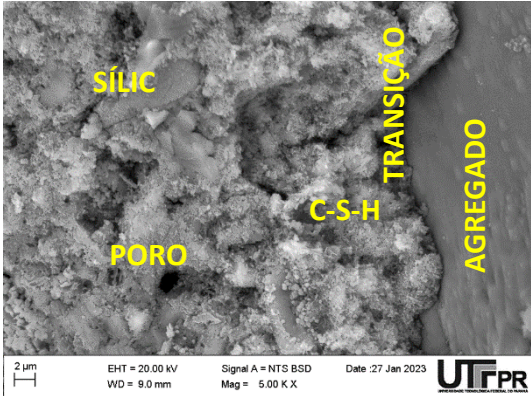
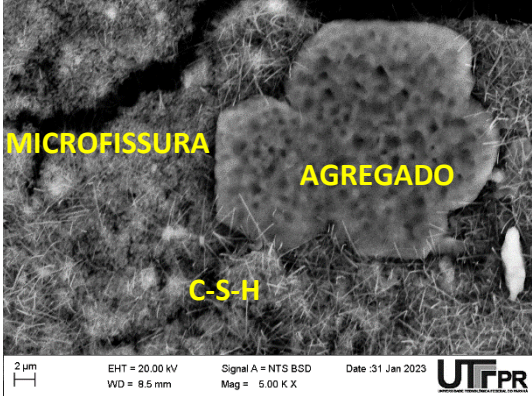
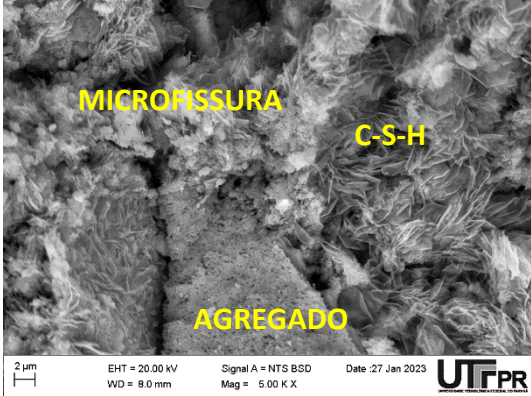
Comparando-se as imagens observa-se que ocorre a degradação da microestrutura do concreto em cada faixa de temperatura, conforme segue:

- a) a 100°C, temperatura de referência, é possível observar a estrutura do C-S-H bem homogênea e distribuída. A quantidade de poros é pequena e é possível identificar estruturas de Ca(OH)_2 e dos agregados, observa-se também uma microfissura;
- b) a 300°C já é possível detectar um aumento no número de poros e microfissuras, bem como a presença de cristais tubulares de tobermorita junto a cristais mal hidratados de C-S-H;
- c) A 500°C observa-se uma deterioração do C-S-H com a estrutura modificada. É possível observar a estrutura do Ca(OH)_2 com fissuras e fissuras entre esta estrutura e o C-S-H, além da quantidade de poros;

- d) na temperatura de 800°C a estrutura do C-S-H está totalmente deteriorada e fissurada, não é possível observar outras estruturas além de fissuras e poros.

A análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova cúbicos com adição de óxido de ferro mostram a mesma dinâmica de deterioração. O quadro 3 a seguir ilustra as imagens do aspecto microscópico dos corpos de prova cúbico.

Quadro 3 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova cúbicos pigmentados

 Referência 25°C	 550°C
 750°C	 850°C

Fonte: do autor.

Na análise das imagens é possível observar o seguinte:

- a) na amostra de referência existe uma boa coesão entre os elementos da microestrutura, principalmente na zona de transição agregado – pasta cimentícia. Observa-se também uma formação satisfatória de C-S-H e Ca(OH)_2 , com a aparência de suas estruturas de aspecto comum. Nesta imagem não foi observada a presença de etringita. Verificou-se, também um micro poro e uma bolha de ar;

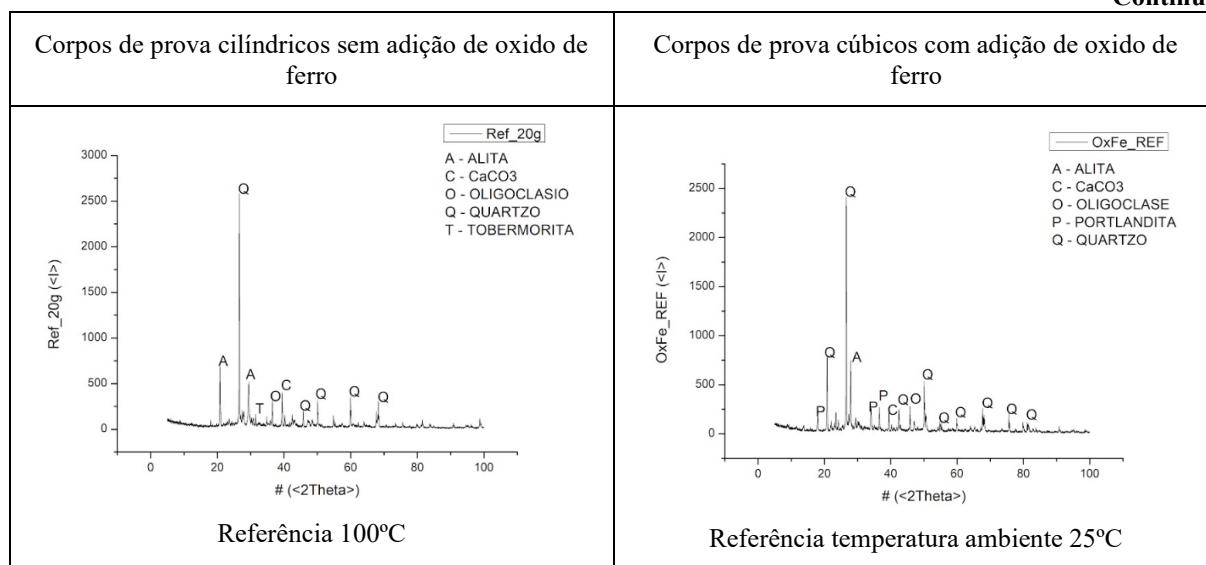
- b) a 550°C o C-S-H apresenta aspecto de deterioração, assim como a existência de microfissura na zona de transição agregado – pasta cimentícia;
- c) a 750°C o C-S-H se apresenta deteriorado pela ação do calor, assim como o agregado, que apresenta aspecto poroso e o Hidróxido de Cálcio que deveria ter formato hexagonal apresenta-se deteriorado. Observa-se ainda a presença grande número de microfissuras, inclusive na zona de C-S-H e na zona de transição agregado – pasta cimentícia. Nesta imagem aparecem formações que sugerem ser etringita, porém esta estrutura em formato de agulha representa a deterioração do C-S-H;
- d) a 850°C o C-S-H está totalmente deteriorado pela ação do calor, assim como a estrutura do hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, as microfissuras encontram-se presentes em grande número e com grande espessura. Nesta imagem constata-se que a estrutura química da pasta cimentícia foi totalmente alterada pela ação do calor. O C-S-H que é responsável pela resistência mecânica do elemento de concreto já não atua mais nesta condição.

4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DRX

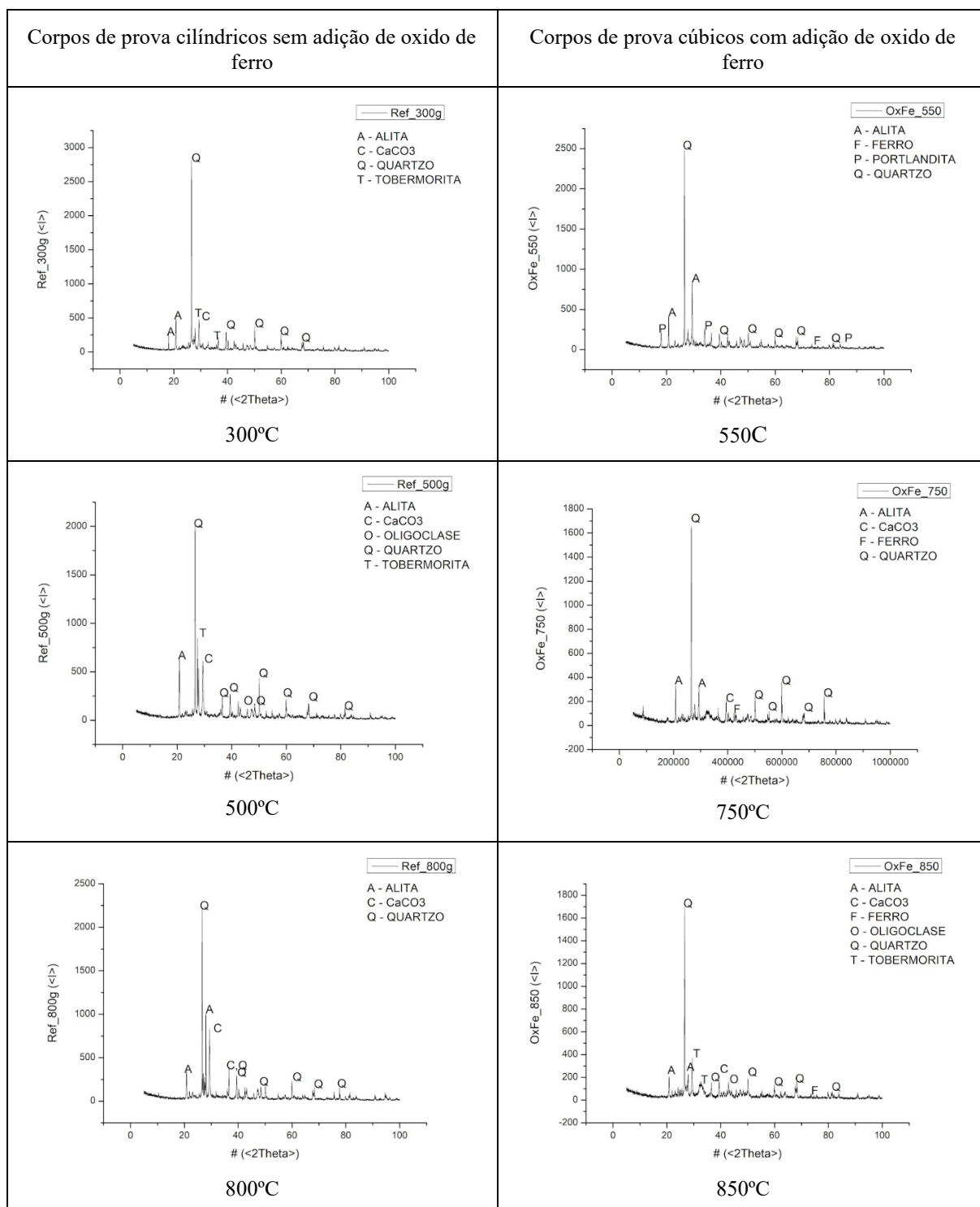
As amostras de concreto dos corpos de prova cilíndricos e cúbicos foram fragmentadas para a separação da porção de argamassa e descarte dos fragmentos de agregado graúdo. Em seguida, as argamassas obtidas foram moídas em cadinhos de porcelana e submetidos à câmara de vácuo por 24 horas. Os resultados das difrações de raios X podem ser observados (por amostra) no quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Difratogramas das amostras analisadas

Continua



Continuação do Quadro 4



Fonte: do autor.

Da análise dos difratogramas foi possível caracterizar os compostos mineralógicos cristalizados presentes nas amostras, que são apresentados na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20 – Compostos cristalizados identificados nas amostras

Minerais	Quimismo aproximado	Amostras							
		Corpos de prova cilíndricos				Corpos de prova cúbicos pigmentados			
		Ref. 100°C	300°C	500°C	800°C	Ref. 25°C	550°C	750°C	850°C
Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	**	**	**	***	*	***	**	*
Calcita	CaCO_3	***	***	***	***	***	--	*	*
Hematita	Fe_2O_3	--	--	--	--	--	tr	--	--
Magnetita	Fe_3O_4	--	--	--	--	--	--	tr	tr
Oligoclases	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	tr	--	tr	--	tr	--	--	tr
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	--	--	--	--	**	**	--	--
Quartzo	SiO_2	***	***	***	***	***	***	***	***
Tobermorita	$\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	tr	*	**	--	--	--	--	**

Legenda:

-- = não detectado tr = traços * = presente ** = pouco frequente *** = frequente

NOTA: A avaliação semiquantitativa (expressa em número de asteriscos) das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade constituinte

Fonte: do autor.

Observa-se nas amostras dos corpos de prova cilíndricos sem adição de óxido de ferro a presença do cristal tobermorita. No processo de hidratação do cimento *Portland*, em condições de cura hidrotermal (autoclave), ocorre a aceleração da cinética de hidratação do cimento, o que promove a formação de produtos de hidratação mais desenvolvidos e cristalizados, distintos daqueles normalmente observados em condições normais de hidratação. O principal produto de reação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que tem estrutura similar ao mineral tobermorita, responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas do concreto (RAMCHANDRAN, 1965). Destaca-se que os corpos de prova cilíndricos foram submetidos à estufa na temperatura de 100°C por 24 horas. É possível inferir esta ocorrência se deu devido a esta prática.

Em algumas amostras pode-se verificar traços de oligoclases, que são minerais que compõem rochas como o granito. A brita utilizada na composição do concreto é granítica. Esta detecção pode demonstrar uma pequena contaminação da amostra, que pode ter ocorrido no momento de sua coleta, pois fragmentos do agregado grão podem ter permanecido junto com a amostra de argamassa.

Verifica-se, também, que a ação da alta temperatura causou o desaparecimento da tobermorita aos 800°C o que pode justificar a significativa perda de resistência nos elementos cilíndricos de concreto convencional. Fato semelhante observa-se nos corpos de prova cúbicos pigmentados com óxido de ferro, onde a portlandita foi extinta aos 750°C.

Observa-se, que não é possível afirmar que houve alteração do óxido de ferro hematita para magnetita nas amostras pigmentadas aos 750°C, pois o ensaio de difratometria não foi preciso para esta conclusão. Foram observados picos de Ferro a partir da temperatura de 550°C. Tal situação pode-se concluir por uma contaminação da amostra, com a utilização de fragmentos com pouca quantidade de pasta cimentícia para a análise.

5 CONCLUSÃO

O objetivo da presente pesquisa foi analisar o efeito das altas temperaturas na microestrutura do concreto. Para esta análise foram produzidos corpos de prova e submetidos ao calor em forno mufla no laboratório da Universidade. Na sequência foram realizados ensaios de compressão axial, para verificação da sua resistência residual, ensaio de colorimetria, esclerometria, análise microscópica por MEV e análise de difração de raio X. Todos esses ensaios juntos formarão a base científica para as conclusões finais da presente dissertação.

Com os resultados obtidos é possível afirmar que o Objetivo geral da dissertação foi alcançado. Observou-se que a alta temperatura deteriora a microestrutura do concreto e modifica suas estruturas química mineralógica, vide as imagens de microscopia eletrônica de varredura, associado aos resultados de perda de massa e de perda de resistência dos elementos ensaiados, bem como os resultados da difratometria de Raio X.

Nos ensaios preliminares, primeiro objetivo específico, foi possível observar que o concreto que passou pela secagem de 100°C por 24 horas evaporou grande parte da água livre dos poros do corpo de prova. Os resultados apontaram uma perda de massa irrelevante entre os elementos ensaiados aquecidos nas temperaturas-alvo, porém a perda de resistência foi observada conforme as indicações da literatura.

Os ensaios realizados com os corpos de prova cúbicos coloridos com óxido de ferro hematita (Fe_2O_3), segundo objetivo específico, observou-se que o indicador colorimétrico funcionou da maneira esperada quanto ao aspecto visual da coloração dos elementos de ensaio. Comparando-se às imagens de MEV, foi possível realizar uma avaliação do efeito da temperatura na microestrutura do concreto, que mostraram que a perda da coloração avermelhada indica, também a perda de resistência. Quando associados os resultados da colorimetria, da perda de resistência, com as imagens de MEV e os resultados de DRX, não foi possível identificar com precisão a alteração da hematita em magnetita.

O terceiro objetivo específico, consistindo na comparação dos resultados dos ensaios entre as diversas faixas de temperatura, permitiu traçar uma similaridade entre os resultados entre os espécimes do mesmo grupo e os de grupos diferentes. Esta comparação foi fundamental para observar um padrão de degradação da microestrutura causada pela temperatura no concreto analisado. Especificamente foi possível observar a transformação dos componentes químicos e mineralógicos resultantes da hidratação do cimento. Ficou evidente a fragilidade da zona de transição entre a pasta cimentícia e o agregado, principalmente o gráudo. Estas transformações

químicas e mineralógicas resultam em diferentes reações do concreto nas faixas de temperatura analisadas:

- a) Até 300° C o concreto pode ter sua resistência incrementada em até 15% nas idades iniciais, pois a alta temperatura acelera o processo de hidratação do cimento anidro e clínquer resultando num aumento da produção de C-S-H, podendo aparecer inclusive o mineral tobermorita, resultante da aceleração da cinética de hidratação pelo processo hidrotermal;
- b) Foi confirmado o início da perda de resistência dos elementos ensaiados aos 500°C pelo aumento das microfissuras e aparência de poros pela evaporação da água livre no interior dos elementos;
- c) Foi constatada a perda de massa dos elementos pela perda da água livre até os 100°C e a perda da água de constituição (hidratação do cimento) a partir dos 550°C;
- d) Foi observado que a partir dos 750°C o C-S-H foi totalmente deteriorado, o que prejudica a resistência mecânica do concreto.

O resultado do ensaio colorimétrico com adição de óxido de ferro hematita para verificação da difusão do calor no interior dos elementos pode-se dizer que foi adequado quanto à mudança de coloração perceptível, porém não alcançou o resultado desejado para verificação da difusão do calor. Provavelmente pelo tamanho dos espécimes em comparação com a literatura que especifica que a exposição dos elementos à temperatura homogênea por até 120 minutos faz com que a difusão do calor ocorra até 5 cm em direção ao núcleo da peça. A pigmentação dos elementos foi importante para tornar possível a verificação do comportamento da estrutura do concreto no interior da peça após cortada.

Nesse sentido, pode-se dizer que a pesquisa, de forma ampla, atingiu os objetivos propostos, mas requer novos estudos neste campo para contribuir no conhecimento do comportamento do concreto quando submetido à altas temperaturas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, percebemos a necessidade de realizar estudos futuros sobre o comportamento das estruturas de concreto armado, especialmente analisando a interação entre o concreto e a armadura. A revisão da literatura mostrou que os colapsos dos edifícios WTC e SESP-RS começaram nas lajes dos pavimentos. Por isso, é essencial entender melhor como as estruturas horizontais interagem com as verticais para aprimorar o conhecimento.

Outro ponto importante é investigar o uso de aditivos nas misturas de concreto para reduzir os efeitos do calor na microestrutura do material. Isso pode ajudar a minimizar a

deterioração causada por mudanças químicas devido ao calor, aumentando a durabilidade do concreto.

Além disso, é necessário realizar simulações com elementos em tamanho real submetidos a incêndios reais associados ao carregamento das estruturas. Essas simulações são fundamentais para entender a extensão dos danos nos elementos estruturais e como eles interagem com as cargas e solicitações em diferentes posições e funções.

Por fim, estudar a recuperação de estruturas considerando a profundidade do calor nos elementos estruturais pode ser um campo promissor. Esse enfoque pode levar ao desenvolvimento de técnicas mais eficazes para reparar e manter estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS

ALI, F. A. **Is high strength concrete more susceptible to explosive spalling than normal strength concrete in fire?** *Fire and Materials*, n 26, p. 127-130, 2002.

ANNEREL, E.; TAERWE, L. Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 12, 2009, p. 1239–1249.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 5627**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR 14323**: dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 15200**: Projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 7584**: Concreto endurecido: avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BBC. News. **How the World Trade Center fell. Site de notícias**. Publicado em 13 de setembro de 2001. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/1540044.stm>>. Acesso em fevereiro de 2023.

BERTO, A. F.; OLIVEIRA, C. R. M. Resistência ao fogo das estruturas de concreto. **Revista Concreto e Construções**, IBRACON, São Paulo, ed. 89, p. 22 a 29, jan. a mar. 2018.

BOLINA, F. L. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado**. São Leopoldo, 2016. Thesis (Master). Curso de Arquitetura, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 180p

BRASIL. **Lei 13.425**: dispõe sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público e dá outras providências. Brasília: Imprensa Oficial, 2017.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. Thesis (doutorado em Engenharia Civil). Apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CLEMENTE, G. **Bombeiros ainda trabalham no combate a focos de incêndio no prédio da SSP-RS; veja imagens internas**. G1 RS site de notícias. Publicado em 16 de julho de 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2021/07/16/bombeiros-ainda-trabalham-no-combate-a-focos-de-incendio-no-predio-da-ssp-rs-veja-imagens-internas.ghtml>>. Acesso em abril de 2023.

COSTA, C. N. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

COUGH, R. S. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2006.

DE SOUZA, A. A. A.; MORENO JR., A. L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista IBRACON, de estruturas e materiais**, v. 3, nº 5, p. 432-448, São Paulo, Dezembro de 2010.

DUARTE, R. B.; ONO, R.; DA SILVA, S. B. **Problemática de incêndio em edifícios altos**. Edição do Autor. São Paulo. 2021.

DWYER, J.; FLYNN, K. **102 minutos: A história inédita da luta pela vida nas torres gêmeas**. Tradução de OLIVEIRA, M. L. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed, 2005, 314p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1993-1-2. **EUROCODE 2**: design of concrete structures – part 1.2: general rules – structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EXPANSION. **Se cumplen 18 años del incendio del Windsor y sigue sin estar claro su detonante**. Expansion.com, revista eletrônica, 15 de fevereiro de 2023. Disponível em: <<https://www.expansion.com/cine-y-series/2023/02/15/63ecb7e3468aebde548b4582.html>>. Acesso em abril de 2023.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. **FIB Bulletin 38**, 2007, 106 p.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo – SP, v. 10, nº4, p. 838-863, agosto de 2017. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000400004>>.

FORIGO, C.; LOPES, Y. D.; VANALLI, L. Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de onda

ultrassônicas. **Holos**, ano 37, v. 7, e. 9904, Natal-RN, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.15628/holos.2020.9904>>. Acesso em 24 jun. 2022.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. Microstructure of firedamaged concrete. A case study. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, 2005, p. 255–259.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. **Technical Sciences**, v. 61, n. 1, 2013, p. 1–10.

HELENE, P. **Edifício Wilton Paes de Almeida**. Parecer Técnico PhD 324/2019. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2019/04/19.04.30ParecerCompletoPaesAlmeida_final-compactado.pdf>. Acessado em 24 de junho de 2022. São Paulo, SP.

INTERNATIONAL FIRE SERVICE ASSOCIATION - IFSTA. **Essentials of firefighting**. Fire Protections Publications. Oklahoma State University, 5th edition. 2008. 1063 p.

KHOURY, G.A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 4, 2000, p. 429–447.

LIN, R. Prefácio. In: DUARTE, Rogério Bernardes; ONO, Rosália e DA SILVA, Sílvio Bento: **Problemática de incêndio em edifícios altos**. Edição do Autor. São Paulo. 2021. Prefácio, p. 14 – 15.

MATA, K. L. **Análise do combate a incêndio nas temperaturas de um compartimento**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019. 149 p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. **Revista IBRACON**, São Paulo, 2ed, 2014, 782 p.

MURARU, C. **Edifício Wilton Paes de Almeida: prédio que desabou em SP foi projetado na década de 1960 e era patrimônio histórico**. G1 site de notícias. Publicado em 01 de maio de 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/edificio-wilton-paes-de-almeida-predio-que-desabou-em-sp-foi-projetado-na-decada-de-1960-e-era-patrimonio-historico.ghtml>>. Acesso em abril de 2023.

NOLDIN JUNIOR, J. H. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores**. Dissertação (mestrado). Apresentado à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002

NOUMOWE, A; GALLE, C. **Study of high strength concretes at raised temperature up to 200°C: thermal gradient and mechanical behaviour**. In: Transactions, SMIRT, 16, 2001, Washington. [S.I. : s.n.], 2001. (Paper, n 1580)

PARANÁ. **Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico**. Corpo de Bombeiros Militar do Paraná. Curitiba, 2011.

_____. **Norma de Procedimento Técnico nº 003 – Terminologia de segurança contra incêndio**. Corpo de Bombeiros Militar do Paraná. Curitiba, 2014.

_____. **Lei Estadual 19.449**: Regula o exercício do poder de polícia administrativa pelo Corpo de Bombeiros Militar e institui normas gerais para a execução de medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres, conforme especifica. Estado do Paraná, 2018.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G.C. (Ed.), *Concreto: Ciência e Tecnologia*. **Revista IBRACON**, São Paulo, 2011: p. 585.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, v. 53, p. 14-19, 2009.

PLATRET, G. **Monitoring the hydration of cement and the evolution of solid phases in concrete by thermal analysis**. Microstructural characteristics and properties related to the durability of concrete. Methods of measuring and testing laboratory, test methods n° 58, Central Laboratory of Bridges and Roads, Paris, 2002.

RAMACHANDRAN, V.S. **Applications of differential thermal analysis in Cement Chemistry**. Chemical Publishing Company, New York, 1965. 308p.

RODRIGUES, Eduardo Estêvam Camargo. **A importância da proteção passiva na segurança contra incêndio**. Palestra ministrada no Seminário Internacional de Proteção Passiva. São Paulo, 2023.

ROSA, S. D. F. **Avaliação de custos do colapso de um edifício**. Dissertação (mestrado em engenharia civil) apresentada à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa - Pt, 2011. 72 p.

ROSENQUIST, T. **Principles of extractive metallurgy**. 2nd ed. Trondheim: Tapir Academic Press, c2004. 506p.

ROSS, H. U.; ADAMS, D. M.; MARSHALL, T. Physical chemistry. In: ____ **Direct reduced iron: technology and economics of production and use**. Warrendale: Iron and Steel Soc of AIME, 1980. P. 09-48.

ROY, D. M.; IDORN, G. M. **Concrete Microstructure, Strategic Highway Research Program C-340, National Research Council**, EUA, 1993

SANTOS, R. E. **A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. These (doutorado em educação) apresentada à Faculdade de Educação da UFMG. Belo Horizonte - MG, 2008. 338 p.

SEITO, A.; GIL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. Edição 01. Projeto Editora. São Paulo, 2008. DOI 10.13140/2.1.1133.5680.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**: conforme ABNT NBR 15200:2012. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, SP, 2016. 240 p.

VEJA. Revista. **20 imagens que contam como foi o ataque de 11 de setembro de 2001**. Edição publicada em 11 de setembro de 2017. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/mundo/20-imagens-que-contam-como-foi-o-ataque-de-11-de-setembro-de-2001>>. Acesso em abril de 2023.

VEJA. Revista. **Prédio que desabou em SP era ícone da arquitetura modernista.** Edição publicada em 02 de maio de 2018. Disponível em: <[https://veja.abril.com.br/brasil/pedio-que-desabou-em-sp-era-icone-da-arquitetura-modernista](https://veja.abril.com.br/brasil/predio-que-desabou-em-sp-era-icone-da-arquitetura-modernista)>. Acesso em abril de 2023.