

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
ENGENHARIA CIVIL

ANTONYA MARYA CRYSTYANE MARTINS CORREIA

**ESTUDO TEÓRICO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS
TEMPERATURA – UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

MACEIÓ – AL
2024

ANTONYA MARYA CRYSTYANE MARTINS CORREIA

**ESTUDO TEÓRICO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS
TEMPERATURA – UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito à obtenção
do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia
Gomes

Coorientador: Prof. Me. Karlisson André Nunes
da Silva

MACEIÓ – AL

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Cláudio Albuquerque Reis – CRB-4 – 1753

C824e Correia, Antonya Marya Crystyane Martins.

Estudo teórico do comportamento do concreto exposto a altas temperatura : uma
revisão bibliográfica / Antonya Marya Crystyane Martins. – 2024.
76 f. : il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.

Coorientador: Karlisson André Nunes da Silva.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade
Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia. f. 73-76.

1. Administração. 2. Administração de empresas. 3. Gestão de projetos. I. Título.

CDU: 624.012.4

Folha de Aprovação

ANTONYA MARYA CRYSTYANE MARTINS CORREIA

ESTUDO TEÓRICO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURA – UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal de Alagoas e
aprovada em 05 de dezembro de 2024.



Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR CORREIA GOMES
Data: 05/12/2024 11:33:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes – Universidade Federal de Alagoas



Documento assinado digitalmente
KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA
Data: 05/12/2024 12:07:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador: Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva – Universidade Federal de
Alagoas

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 22/01/2025 07:25:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno – Prof. Dr^a. Karoline Alves de Melo Moraes – Universidade
Federal de Alagoas



Documento assinado digitalmente
CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO
Data: 12/12/2024 22:43:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno – Prof. Dr^a. Cassia Vanessa Albuquerque de Melo – Universidade
Federal de Alagoas

À minha mãe, Gilda, e minhas irmãs, Ana e Adryelle, que sempre me incentivaram. Sem vocês nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado durante toda essa trajetória. Tenho certeza de que foi ele que me iluminou nos momentos de incerteza e acima de tudo, me permitiu alcançar esse sonho.

À minha mãe, Gilda, sou eternamente grata. Por ser exemplo de mulher guerreira, pelo apoio indispensável de suas preces, pelo amor, carinho e dedicação para priorizarmos nossos estudos acima de tudo, sem você, nada disso teria acontecido. Essa conquista é nossa!

Às minhas irmãs, Aninha e Adry, as quais tive a oportunidade de compartilhar a minha história desde sempre, por serem fonte de inspiração, minhas maiores apoiadoras e juntas sonharem e serem minha base quando tudo parece incerto. Tenham certeza que as palavras de apoio e os cafés da tarde foram essenciais para respirar e seguir em frente. Obrigada por toda paciência, por suportarem meus momentos difíceis, por entenderem minha ausência, e acima de tudo não desistirem de mim. Amo vocês!

Aos meus queridos e amados sobrinhos, Breno, Samuel e Martin, por me mostrarem todos os dias que alegria está nas pequenas coisas, pelos momentos de descontração e por entenderem minha ausência, saibam que podem contar comigo sempre.

Aos meus avós maternos, Seu Bibiano (*in memoriam*) e Dona Diva (*in memoriam*), que me ensinaram, juntos, o verdadeiro significado de família e a importância de amar, mesmo diante das diferenças. Tenho a certeza de que, onde quer que estejam, continuam intercedendo por mim. Dedico também a todos os meus familiares que, mesmo à distância, sempre vibram e torcem pelos meus sonhos e conquistas.

Ao Alisson, por segurar minha mão durante toda essa jornada, pelos dias e noites de apoio, pelo conforto nos dias difíceis e pelas vibrações e comemorações nos melhores dias. Sou grata pelo companheirismo, mas sou ainda mais grata por me mostrar que eu sou capaz. É um prazer evoluir e dividir a vida com você!

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes e ao Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva, pelo apoio, dedicação, orientação e confiança depositada em mim para realização deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdades e a todos que, contribuíram e acompanharam de perto essa trajetória. Cada palavra de conforto, apoio e incentivo foram essenciais durante essa jornada. Obrigada por tudo!

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Alagoas, em especial a todo corpo docente do Centro de Tecnologia, por todo empenho em proporcionar uma educação pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

O concreto é amplamente utilizado na construção civil devido à sua resistência, durabilidade e propriedades de não combustibilidade. No entanto, quando exposto a altas temperaturas, como em incêndios ou ambientes industriais próximos a fornos, o concreto sofre alterações químicas, físicas e mecânicas que podem comprometer a integridade de suas propriedades. Este trabalho teórico tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do concreto submetido a condições extremas de calor, identificando os principais danos que ocorrem, em sua estrutura física e química, alterando suas propriedades mecânicas. Além disso, a exposição a altas temperaturas impacta diretamente as propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Em cenários de calor intenso, essas propriedades podem ser severamente comprometidas, resultando em perda de rigidez e de capacidade de carga, o que afeta a estabilidade e segurança das construções. A pesquisa também aborda a importância da composição do concreto, enfatizando como a escolha dos agregados e do cimento pode influenciar o comportamento do material quando exposto a altas temperaturas. Componentes como o tipo de agregado, a proporção de água/cimento e o coeficiente de dilatação térmica são fatores críticos para a resistência térmica do concreto. Para diagnosticar e avaliar os danos causados pelo calor, métodos de análise variados foram revisados, incluindo técnicas que permitem identificar as mudanças na microestrutura e macroestrutura do concreto. Essas avaliações são essenciais para entender os efeitos térmicos no material e para propor estratégias de mitigação dos danos e recuperação da integridade estrutural. A compreensão dos impactos das altas temperaturas no concreto é fundamental para o desenvolvimento de composições mais resistentes e seguras, permitindo a construção de edificações com maior durabilidade. Este estudo, portanto, contribui para a formulação de diretrizes que visam a melhoria da resistência do concreto, especialmente em cenários críticos onde a segurança estrutural é essencial.

Palavras-chave: concreto, altas temperaturas, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Concrete is widely used in civil construction due to its strength, durability, and non-combustible properties. However, when exposed to high temperatures, such as in fires or industrial environments near furnaces, concrete undergoes chemical, physical, and mechanical changes that can compromise the integrity of its properties. This theoretical study aims to present a literature review on the behavior of concrete subjected to extreme heat conditions, identifying the main damages that occur in its physical and chemical structure, altering its mechanical properties. Furthermore, exposure to high temperatures directly impacts the mechanical properties of concrete, such as compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity. Under intense heat scenarios, these properties can be severely compromised, resulting in loss of stiffness and load-bearing capacity, which affects the stability and safety of structures. The research also highlights the importance of concrete composition, emphasizing how the choice of aggregates and cement can influence the material's behavior when exposed to high temperatures. Components such as the type of aggregate, the water/cement ratio, and the thermal expansion coefficient are critical factors for the thermal resistance of concrete. To diagnose and assess heat-induced damage, various analysis methods were reviewed, including techniques that identify changes in the microstructure and macrostructure of concrete. These assessments are essential for understanding the thermal effects on the material and for proposing strategies to mitigate damage and restore structural integrity. Understanding the impacts of high temperatures on concrete is fundamental for developing more resilient and safer compositions, enabling the construction of buildings with greater durability. This study, therefore, contributes to the formulation of guidelines aimed at improving the thermal resistance of concrete, particularly in critical scenarios where structural safety is paramount.

Keywords: concrete, high temperatures, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Edifício Wilton Paes de Almeida após colapso de sua estrutura	21
Figura 2: Edifício Joelma em chamas.	22
Figura 3: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos apresentados por diferentes normas.....	27
Figura 4: Comportamento de diferentes agregados durante o aquecimento	32
Figura 5: Imagem MEV de amostra de concreto com 90% de laterita/10% de pó de pedreira como agregado fino – Temperatura ambiente e aquecido a 250 °C.....	34
Figura 6: MEV da pasta de cimento endurecida após aquecimento em diferentes temperaturas altas.....	35
Figura 7: Difrátogramas da pasta de cimento aquecidas até 800 °C	36
Figura 8: Difrátograma do concreto de alta resistência sem adição mineral	36
Figura 9: Difrátogramas do CC 1:5 em função da temperatura	37
Figura 10: Porosidade total da pasta de cimento em função da temperatura	38
Figura 11: Distribuição do tamanho dos poros da pasta de cimento endurecida em três classes de concreto antes e depois da exposição a 600 °C.....	39
Figura 12: Avaliação da fração de fase da pasta de cimento Portland aquecida em função da temperatura determinada por DRX e TGA.....	40
Figura 13: Forno Elétrico - Mufla.....	42
Figura 14: Simulador de flashover tipo contêiner.....	44
Figura 15: Perspectiva isométrica do contêiner com a estante metálica em seu interior	44
Figura 16: Fator de redução da resistência do concreto, em função da temperatura	46
Figura 17: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição	47
Figura 18: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos de diferentes classes de resistência em função da variação da temperatura de exposição.....	47
Figura 19: Coeficientes de redução de resistência à compressão dos concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição	49
Figura 20: Valores da redução da resistência a compressão das misturas de concreto com teores de substituição (0%, 40% e 100%).....	49
Figura 21: Coeficientes de redução de resistência à compressão dos concretos de diferentes classes e resfriamento em função da variação da temperatura de exposição	50
Figura 22: Coeficientes de redução de resistência à compressão do concreto resfriado	

rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição	51
Figura 23: Coeficiente de redução das resistências à compressão por classe de concreto.....	52
Figura 24: Variação da resistência a compressão, conforme tipo de resfriamento, para concretos de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa	52
Figura 25: % de Resistência à compressão em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento	53
Figura 26: Coeficiente de redução $k_{c,t}(\theta)$ da resistência à tração ($f_{ck,t}$) do concreto em temperaturas elevadas.....	54
Figura 27: Coeficientes de redução de resistência à tração de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição	55
Figura 28: Coeficientes de redução de resistência à tração dos concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição	55
Figura 29: % de Resistência à tração em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento	56
Figura 30: Coeficientes de redução de resistência à tração do concreto resfriado rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição	56
Figura 31: Coeficientes de redução do módulo de elasticidade de concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição	58
Figura 32: Valores da redução dos módulos de elasticidade das misturas de concreto com teores de substituição (0%, 40% e 100%)	58
Figura 33: Coeficientes de redução de módulo de elasticidade de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição	59
Figura 34: % de Módulo de Elasticidade em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento	60
Figura 35: Coeficientes do módulo de elasticidade do concreto resfriado rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição	60
Figura 36: Spalling no concreto com F_{ck} de 25 MPa e 40MPa.....	63
Figura 37: Textura superficial das amostras de concreto expostas a temperaturas elevadas. .	63
Figura 38: Corpos de prova, apresentando fissuras após ensaio de lascamento explosivo (temperatura: 925 °C).	65
Figura 39: Alteração na resistência à compressão e coloração do concreto.....	67
Figura 40: Variação da coloração da superfície externa dos corpos de prova de concreto após exposição a determinadas	67
Figura 41: Diminuição da ocorrência do spalling no concreto à medida que se aumenta o teor	

de fibra de polipropileno.....	68
Figura 42: Influência da temperatura na resistência à compressão para traços contendo diferentes teores de fibra.....	68
Figura 43: Evolução da recuperação da resistência à compressão do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.....	69
Figura 44: Evolução da recuperação da resistência à tração do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.	70
Figura 45: Evolução da recuperação do módulo de elasticidade do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.....	70
Figura 46: Recuperação das propriedades mecânicas, em relação à resistência inicial do concreto em função do tipo de reidratação	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Qualidade do concreto em função da VPU	41
Tabela 2: Taxa de aquecimento recomendada, máxima taxa de resfriamento e máximo período entre medições de temperatura da superfície do corpo de prova.....	41
Tabela 3: Coeficiente de redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos e massa específica normal, em função da temperatura.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Grau Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
BSI	British Standards Institution
C ₃ S	Silicato dicálcico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CBMMG	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CC	Concreto Celular
CEN	Comité Européen de Normalisation
CH	Hidrocarbonetos
CO ₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de Raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
E _c	Módulo de elasticidade em temperatura ambiente
E _c (θ)	Módulo de elasticidade em temperatura elevada
EDX	Espectroscopia de Raios X
ELU	Estado Limite Último
f _{ck}	Resistência à compressão do concreto em temperatura ambiente
f _{ck} (θ)	Resistência à tração do concreto em temperatura elevada (θ)
f _{ck,t}	Resistência à tração do concreto em temperatura ambiente
f _{ct} (θ)	Resistência à tração do concreto em temperatura elevada (θ)
FIB	Fédération Internationale du Béton
HSD	Honest Significant Difference
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ISSO	International Organization for Standardization

ITE	Instrução Técnica de Ensino
$k_c(\theta)$	Coeficiente de redução da resistência à compressão em temperatura elevada (θ)
$k_{c,t}(\theta)$	Coeficiente de redução da resistência à tração em temperatura elevada (θ)
$k_{cE}(\theta)$	Coeficiente de redução do módulo de elasticidade em temperatura elevada (θ)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Megapascal
NB	Norma brasileira
NBR	Norma brasileira regulamentadora
NFPA	National Fire Protection Association
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio
RILEM	Research Institute of London for Experimental Mechanics
SciELO	Scientific Electronic Library Online
TGA	Análise Termogravimétrica
TRF	Tempo de resistência ao fogo
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
VPU	Velocidade de pulso ultrassônico
β -C ₂ S	Belita

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Considerações Iniciais	16
1.2.	Objetivos.....	17
1.2.1.	Objetivo Geral	17
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	17
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4.	METODOLOGIA.....	18
1.5.	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	18
2.	COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	20
2.1.	INCÊNDIO - HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS E CÓDIGOS	20
2.1.1.	Normalização Nacional	22
2.1.2.	Normalização Internacional	25
2.2.	COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES DO CONCRETO	27
2.2.1.	Água	28
2.2.2.	Pasta de Cimento Portland	29
2.2.3.	Agregados	31
2.3.	MÉTODOS, TÉCNICAS E ENSAIOS DE AVALIAÇÃO	33
2.3.1.	Microanálise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	34
2.3.2.	Difração de raios X (DRX).....	35
2.3.3.	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).....	38
2.3.4.	Análise Termogravimétrica (TGA)	39
2.3.5.	Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)	40
2.3.6.	Método RILEM-129 MHT (RILEM, 1995)	41
2.3.7.	Equipamentos para exposição ao calor	42
2.4.	INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	44

2.4.1. Resistência à compressão	45
2.4.2. Resistência à tração	53
2.4.3. Módulo de elasticidade.....	57
2.5. ALTERAÇÕES VISUAIS NO CONCRETO.....	61
2.5.1. Fenômeno de <i>Spalling</i>	61
2.5.2. Fissuração.....	64
2.5.3. Mudança na coloração	65
2.6. MEDIDAS DE PREVENÇÃO E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO	67
2.6.1. Medidas de prevenção - Adição de fibra	67
2.6.2. Recuperação por meio da reidratação do concreto	69
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O concreto é amplamente utilizado na construção civil devido à sua resistência, durabilidade e propriedades de não combustibilidade (Kodur, 2014). Além de ser o segundo material mais consumido no mundo, atrás apenas da água (Mehta e Monteiro, 2014), ele se destaca por seu custo acessível, versatilidade, longa vida útil e capacidade de adaptação a diferentes formas geométricas (Carmona Filho e Carmona, 2013). No entanto, quando exposto a altas temperaturas, como em situações de incêndio ou em ambientes industriais, o concreto pode sofrer alterações significativas em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Essas mudanças podem comprometer a integridade estrutural das edificações, evidenciando a necessidade de uma análise detalhada sobre seu comportamento nessas condições (Souza e Moreno Jr., 2010b).

A escolha dos materiais, incluindo o tipo e as propriedades dos agregados, exerce uma influência direta sobre o desempenho do concreto exposto a altas temperaturas (Lima *et al.*, 2004; Souza e Moreno Jr., 2010b). Em particular, o coeficiente de dilatação térmica dos agregados é um indicador importante, pois pode determinar a extensão dos danos que o concreto sofrerá quando aquecido (Sollero, 2018).

Para avaliar e diagnosticar os danos causados por altas temperaturas, diversas metodologias têm sido desenvolvidas. Essas abordagens permitem identificar as alterações estruturais e químicas do concreto, possibilitando um melhor entendimento dos impactos térmicos sobre o material (Fernandes *et al.*, 2017). Além disso, medidas preventivas e técnicas de recuperação, como modificações na composição do material e intervenções pós-exposição, têm se mostrado eficazes para reduzir danos e restaurar parcialmente as propriedades mecânicas comprometidas (Britez e Costa, 2011).

A degradação das propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, pode levar a uma perda de rigidez, comprometendo a segurança e a estabilidade estrutural das edificações (Souza e Moreno Jr., 2010b). Embora o concreto tenha boas características de resistência ao fogo, suas propriedades mecânicas podem ser significativamente afetadas quando submetidas a altas temperaturas (Tufail *et al.*, 2017; Arioiz, 2017). Nessas condições, a perda de resistência e rigidez pode colocar em risco a integridade das construções, evidenciando a importância de estudos detalhados sobre o comportamento do concreto exposto ao calor intenso.

A exposição prolongada ao calor intenso provoca alterações químicas, físicas e

mecânicas, resultando em fenômenos como o aparecimento de fissuras, mudanças na coloração e o *spalling*, que é a fragmentação e perda abrupta das camadas superficiais do material. Essas mudanças afetam a resistência e a coesão do concreto, devido à evaporação da água presente na matriz cimentícia e à dilatação térmica dos componentes, causando tensões internas que levam à degradação progressiva do material.

Dessa forma, compreender os efeitos das altas temperaturas no concreto é essencial para o avanço da engenharia civil, garantindo que as edificações sejam projetadas com maior segurança e durabilidade. Este trabalho visa explorar as mudanças que ocorrem no concreto quando submetido ao calor, bem como investigar estratégias que possam minimizar os impactos negativos causados pela exposição a altas temperaturas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho teórico é apresentar uma revisão bibliográfica do concreto quando exposto a altas temperaturas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar as limitações e lacunas nas normas brasileiras e internacionais relacionadas à resistência do concreto em altas temperaturas, considerando classes de resistência, condições de exposição e tipos de agregados.
- Revisar a influência dos componentes da mistura do concreto na resistência e durabilidade quando submetidos a altas temperaturas.
- Verificar métodos de análises das propriedades do concreto quando exposto a altas temperaturas, bem como, técnicas de recuperação pós exposição.

1.3. JUSTIFICATIVA

É fundamental entender como as propriedades mecânicas do concreto respondem a altas temperaturas e investigar materiais que mantenham seu desempenho em condições de calor extremo. Isso é crucial tanto para distinguir entre diferentes tipos de concreto quanto para avançar na formulação de composições mais resistentes ao calor.

Atualmente, códigos normativos, como a NBR 15200 (ABNT, 2024) e o EUROCODE 2 (CEN, 2004), tendem a considerar predominantemente apenas o agregado graúdo convencional como o único parâmetro relevante para a resistência ao fogo. Em contraste, a ACI

216R-89 (ACI, 1996) e a BS 8110-2 (BSI, 1985) que incluem agregados leves e reconhecem a importância de múltiplos fatores na avaliação da resistência ao fogo. Apesar disso, não definem procedimentos específicos para a realização de ensaios que determinem as propriedades mecânicas residuais do concreto após exposição a altas temperaturas. Além disso, muitos desses códigos ainda não abordam parâmetros cruciais, como a classe de resistência à compressão e outras características essenciais do concreto, resultando em lacunas importantes na avaliação do comportamento mecânico das misturas de concreto em altas temperaturas.

Dessa forma, torna-se necessário realizar um estudo aprofundado sobre o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas, avaliando suas propriedades mecânicas e os principais compostos utilizados em sua formulação. Além disso, é fundamental explorar técnicas de análise e recuperação após a exposição ao calor, destacando estratégias para mitigar danos. Esse estudo justifica-se pela importância de garantir que futuras construções sejam projetadas com materiais adequados às exigências de segurança, durabilidade e desempenho térmico.

1.4. METODOLOGIA

A presente pesquisa, de caráter essencialmente teórico, fundamenta-se em uma análise aprofundada da literatura existente sobre o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas. O estudo aborda aspectos como as propriedades mecânicas do material afetadas pelo calor extremo, a evolução das normas técnicas aplicáveis e os métodos de avaliação dessas propriedades, além de técnicas de recuperação e melhoria do desempenho do concreto, que constituem o foco principal da investigação.

Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, com o objetivo de identificar e delimitar o estado da arte sobre o tema. As fontes consultadas consistiram em artigos científicos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorado, acessadas por meio de bibliotecas virtuais e bases de dados acadêmicas relevantes, como *Google Scholar* e *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), entre outras.

1.5. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Esta monografia encontra-se organizada em 3 capítulos, além das referências bibliográficas. O primeiro capítulo é introdutório e nele foram abordadas as considerações iniciais, os objetivos gerais e específicos, justificativas, metodologia e a sua estruturação.

O segundo capítulo é dividido em seis partes, abordando os efeitos das altas temperaturas no concreto, detalhando alterações físicas, químicas e mecânicas que

comprometem sua integridade estrutural. Inicialmente, em sua primeira parte apresenta-se a evolução histórica das normas nacionais e internacionais sobre segurança contra incêndios, destacando eventos marcantes que impulsionaram a regulamentação. Na segunda parte, são analisados os componentes do concreto, como a água, a pasta de cimento Portland e os agregados, destacando sua influência no comportamento do material e no desempenho do concreto quando exposto a altas temperaturas. Na terceira parte, são explorados métodos e técnicas de avaliação para compreender as alterações microestruturais. A quarta parte, discute a perda de propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. A quinta parte, apresenta alterações visuais que ocorrem no concreto quando exposto a altas temperaturas, como fissuração, *spalling* e mudança de coloração. Por fim, na sexta parte, são apresentadas medidas de prevenção, como a adição de fibras, e técnicas de recuperação, como reidratação, para mitigar danos e restaurar o concreto.

Por fim, o terceiro capítulo apresenta as considerações finais do trabalho.

2. COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

A exposição do concreto a altas temperaturas, como em incêndios, provoca alterações significativas que comprometem sua integridade estrutural. Esses eventos geram tensões internas devido à dilatação térmica dos componentes e à evaporação da água presente na matriz cimentícia, o que pode resultar em fissuras, mudanças de coloração e no fenômeno de *spalling*, caracterizado pela expulsão abrupta de camadas superficiais do material. Essas alterações não apenas fragilizam o concreto, mas também reduzem suas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração (Mehta e Monteiro, 2014; Neville, 2016).

Para avaliar os danos causados pela exposição ao calor, métodos e técnicas de análise são indispensáveis. Essas abordagens permitem identificar as alterações estruturais e químicas do concreto, contribuindo para o entendimento detalhado dos impactos térmicos e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. Além disso, medidas preventivas e técnicas de recuperação, como modificações na composição do material e intervenções pós-exposição, têm se mostrado eficazes para reduzir danos e restaurar parcialmente as propriedades mecânicas comprometidas (Britez e Costa, 2011).

A composição do concreto exerce influência direta no comportamento do material em condições de alta temperatura. O tipo de cimento, a escolha dos agregados e a relação água/cimento determinam a intensidade dos danos e a capacidade de resposta do concreto ao calor. Componentes como a pasta de cimento e os agregados apresentam reações distintas, com a desidratação da matriz cimentícia e a expansão térmica dos agregados contribuindo para o surgimento de tensões internas que aceleram a degradação (Coelho *et al.*, 2019; Mehta e Monteiro, 2014).

2.1. INCÊNDIO - HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS E CÓDIGOS

Em uma estrutura de concreto, o aumento de temperatura, como o ocorrido durante um incêndio, pode levar à destruição parcial ou total da edificação. Isso gera impactos irreparáveis, tanto pela perda de vidas humanas quanto pelos altos custos financeiros associados à recuperação ou demolição da estrutura (Souza, 2014). Eventos marcantes, como o incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida em 2018 (Figura 1), que colapsou após ser devastado pelas chamas, evidenciam a importância de estudar o comportamento do concreto sob altas temperaturas. Sollero (2018) observa que o concreto é estruturalmente comprometido quando exposto a altas temperaturas.

Figura 1: Edifício Wilton Paes de Almeida após colapso de sua estrutura



Fonte: EL PAÍS (2018)

Afetando a integridade e segurança das construções e dos seres vivos, registros demonstram que os incêndios estão presentes na sociedade desde a antiguidade. O incêndio em Roma, ocorrido em 64 d.C., foi um dos mais marcantes da Era Cristã, devastando grande parte da cidade e resultando em milhares de mortes. Esse evento levou à criação do que pode ser considerado o primeiro sistema de combate a incêndios, com a formação dos *Vigiles* ou *Cohortes Vigilum*, que patrulhavam a cidade para detectar e apagar incêndios, além de impulsionar a regulamentação urbanística e penalidades (Tacito, 2022, Livro XV, Capítulos 38 a 44).

Ao longo da história, outros grandes incêndios em diversas partes do mundo reforçaram a necessidade de aprimorar a segurança contra incêndios. Nos Estados Unidos, em 1986 foi publicado o primeiro *Handbook*, um livro projetado para auxiliar companhias de seguros e seus inspetores. Antes de grandes incêndios com alta perda de vidas, a segurança contra incêndios focava principalmente na proteção de patrimônio. Com a publicação de quatro edições do Manual de Proteção Contra Incêndios (Fire Protection Handbook) e uma série de grandes incêndios fatais no início do século XX — incluindo o incêndio no Teatro Iroquois em Chicago em 1903, o Opera Rhoads em Boyertown e o *Lake View Elementary School* em Cleveland em 1908, e o *Triangle Shirtwaist Company* em Nova Iorque em 1911 — foi estabelecido um marco significativo da *National Fire Protection Association* (NFPA) e na segurança contra incêndios: a quinta edição de 1914, impulsionado pela recente tragédia do *Triangle Shirtwaist*, tinha como objetivo primário a proteção à vida. Além disso, a NFPA criou o Comitê de Segurança da Vida, que, posteriormente, recomendou a instalação de saídas de

emergência e escadas em edificações de grande movimentação, recomendações que continuam sendo a base dos códigos de segurança atuais (Silva, 2012).

No Brasil, pela falta de ocorrência de grandes incêndios até os anos 70, a regulamentação sobre o tema era restrita aos códigos de obras municipais. O Corpo de Bombeiros oferecia recomendações provenientes da área de seguros, que exigiam a instalação de hidrantes e extintores, bem como a sinalização adequada desses equipamentos. No entanto, a situação mudou drasticamente com o início de uma série de tragédias, como o do Edifício Andraus em 1972 e o Edifício Joelma em 1974 (Figura 2), ambos localizados em São Paulo (SP). Dessa forma, grandes incêndios com vítimas começaram a ser reconhecidos como eventos reais e significativos e uma sequência de acontecimentos quanto a legislações e normalizações referentes à prevenção contra incêndio surgiram (Silva, 2018).

Figura 2: Edifício Joelma em chamas.



Fonte: Reprodução/TV Globo (1974)

2.1.1. Normalização Nacional

Uma semana após o incêndio no Edifício Joelma, a Prefeitura Municipal de São Paulo instituiu normas para a segurança de edifícios, que passaram a ser seguidas na elaboração e execução dos projetos, com o Decreto Municipal nº 10.878 (São Paulo, 1974). Em março de 1974, o Clube de Engenharia do Rio de Janeiro, realizou o Simpósio de Segurança Contra Incêndio. Em julho deste mesmo ano, em Brasília, na Câmara dos Deputados, ocorreu o Simpósio de Sistemas de Prevenção Contra Incêndio promovido pela Comissão Especial de Poluição Ambiental. Ainda em 1974, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NB 208 (ABNT, 1974) – “Saídas de Emergências em Edifícios Altos”, substituída

em 2001 pela NBR 9077 (ABNT, 2001) - “Saída de emergência em edifícios”, que define os critérios para a criação e dimensionamento de saídas de emergência em edifícios, garantindo evacuação segura em situações de emergência, estabelecendo requisitos para escadas, rampas, portas e rotas de fuga, considerando a capacidade de ocupação, sinalização, proteção contra incêndio e acessibilidade, assegurando que as saídas estejam sempre desobstruídas e funcionais, permitindo evacuação rápida e segura.

Em 1977, surgiu a NBR 5627 (ABNT, 1977) - “Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo” que estabelecia requisitos específicos para estruturas de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo e orientava sobre o comportamento do concreto em situações de incêndio, visando apenas garantir a segurança estrutural durante esses eventos. Mas em 2001, a NBR 5627 (ABNT, 1977) foi cancelada, tendo suas diretrizes incorporadas em outras normas mais recentes e abrangentes.

Ainda em 1977, a ABNT publicou a NBR 5628 (ABNT, 2001) - “Componentes Construtivos Estruturais – Determinação da Resistência ao Fogo” que estabelecia os critérios e procedimentos para a avaliação da resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais como paredes, lajes, pilares e vigas. A norma especifica métodos para determinar a capacidade dos elementos estruturais em suportar incêndios por um período determinado, garantindo que eles mantenham a integridade estrutural e minimizem a propagação do fogo, permitindo a segurança dos ocupantes e o tempo necessário para evacuação ou combate ao incêndio, sendo sua versão mais recente atualizada em 2022.

No que diz respeito a estruturas em situação de incêndio, em 1999 a ABNT publicou a NBR 14323 (ABNT, 2013) - “Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio”, que define os procedimentos para o projeto seguro de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio, garantindo que elas mantenham sua integridade durante o tempo necessário para permitir evacuação e combate ao fogo.

Em 2001 publicou-se a 14432 (ABNT, 2001) - “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações”, que define o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), estabelecendo quanto tempo elementos construtivos, como paredes e vigas, devem resistir ao fogo, conforme o uso e ocupação da edificação, classificando esses elementos de acordo com sua capacidade de manter estabilidade, integridade e isolamento térmico, garantindo a segurança contra incêndios em edificações.

Em 2008 foi publicada a primeira edição da NBR 15575-2 (ABNT, 2013) – “Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais” que estabelece requisitos de desempenho para edificações habitacionais, abrangendo aspectos como a

segurança contra incêndio. Em relação ao concreto exposto a altas temperaturas, a norma determina que os elementos estruturais devem manter sua estabilidade, resistência e integridade por um tempo mínimo, garantindo a evacuação segura dos ocupantes. Para isso, os projetos devem atender ao TRRF, adotando medidas como o dimensionamento adequado da espessura de cobertura das armaduras e o uso de materiais ou revestimentos que aprimorem o desempenho térmico. O comportamento ao fogo pode ser avaliado por meio de ensaios laboratoriais ou simulações computacionais, assegurando que o concreto desempenhe sua função de proteção em situações de incêndio.

Atualmente, o Brasil dispõe da norma, NBR 15200 (ABNT, 2024) - “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio” para dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio. A normalização contra incêndios no Brasil e no mundo é um processo dinâmico, e as normas continuam a ser revisadas e aprimoradas para refletir avanços tecnológicos e novas descobertas no campo da segurança contra incêndios.

Além disso, de acordo com a norma, existem quatro métodos que podem ser utilizados para a verificação de estruturas em situação de incêndio, aplicados ao Estado Limite Último (ELU). Esses métodos visam assegurar que a estrutura mantenha sua integridade e resistência durante o período de exposição ao fogo. Os métodos são:

- **Método Tabular:** Este é o método mais simples e prático. Ele utiliza tabelas pré-definidas que relacionam dimensões mínimas e coberturas de armaduras com tempo de resistência ao fogo (TRF). Essas tabelas são baseadas em estudos experimentais que fornecem resultados adequados para determinadas condições estruturais. O projetista consulta a tabela e escolhe as dimensões necessárias com base no tempo de exposição ao fogo desejado.

- **Método Simplificado:** Baseia-se em procedimentos simplificados de cálculo para estimar a capacidade resistente da estrutura em situação de incêndio. Ele utiliza coeficientes de redução das propriedades mecânicas dos materiais (como resistência à compressão e ao cisalhamento) em função da temperatura alcançada. Esse método é adequado para situações onde se busca uma abordagem prática, mas com maior detalhamento do que o método tabular.

- **Método da Seção Reduzida:** Nesse método, assume-se que parte da seção transversal do elemento estrutural é "perdida" devido à ação do fogo, sendo considerada inegável para resistir às cargas. Calcula-se a nova seção resistente após a ação do incêndio, levando em conta a espessura que ainda pode suportar esforços. Ele é útil para dimensionar elementos expostos ao fogo, como vigas e pilares, considerando a deterioração de suas seções.

- **Método Avançado:** Este método envolve análises mais detalhadas e precisas,

geralmente realizadas com o auxílio de ferramentas computacionais que simulam o comportamento da estrutura sob altas temperaturas. Ele leva em conta não apenas a degradação dos materiais, mas também a transferência de calor e a redistribuição de esforços ao longo do tempo. É o método mais completo e sofisticado, utilizado para projetos mais complexos ou em situações onde os métodos simplificados não fornecem resultados suficientes.

2.1.2. Normalização Internacional

A segurança contra incêndios em edificações é assegurada por diretrizes internacionais que padronizam métodos de ensaio, critérios de desempenho e estratégias de projeto para avaliar e aprimorar a resistência ao fogo de materiais e sistemas construtivos. Essas normas abordam aspectos como estabilidade estrutural, isolamento térmico e integridade de componentes, utilizando curvas padrão de temperatura-tempo para simular condições reais. Elas também fornecem cálculos, tabelas e recomendações práticas para projetar estruturas capazes de resistir ao fogo, considerando a degradação de materiais em altas temperaturas.

- **ISO 834 - *Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction* (ISO, 1999)**

Tem como objetivo estabelecer uma padronização para ensaios de resistência ao fogo de elementos de construção, visando avaliar o comportamento estrutural de componentes como paredes e lajes em altas temperaturas, definir critérios de desempenho para estabilidade, integridade e isolamento térmico, e simular condições de incêndio por meio de uma curva padrão de temperatura-tempo. Além disso, também busca classificar materiais com base em seu tempo de resistência ao fogo, promover a segurança nas edificações e padronizar os ensaios para garantir consistência e comparabilidade nos resultados. Isso tudo contribui para uma melhor proteção em situações de incêndio.

- **ASTM E119 – *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* (2000)**

É uma norma que estabelece métodos de ensaio para testar a resistência ao fogo de materiais e sistemas de construção. Tem como o principal objetivo avaliar a integridade estrutural, o isolamento térmico e a resistência ao fogo de componentes construtivos, como paredes, lajes e pilares, durante um incêndio. A norma utiliza uma curva padrão de temperatura-tempo para simular as condições de um incêndio e determina a capacidade dos materiais de suportar cargas, resistir à passagem de chamas e gases quentes, e limitar a transferência de calor. O resultado dos ensaios é utilizado para classificar os materiais e garantir que atendam aos

requisitos de segurança em situações de incêndio.

- **ACI 216.1 – *Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies* (2020)**

Orienta a determinação da resistência ao fogo de estruturas de concreto e alvenaria. Seu principal objetivo é fornecer diretrizes para engenheiros e profissionais da construção na avaliação da capacidade das estruturas de resistir ao fogo, garantindo a segurança das edificações em caso de incêndio. A norma apresenta métodos de cálculo para a resistência ao fogo de elementos de concreto, considerando as propriedades dos materiais, a geometria e as condições de carga. Além disso, fornece tabelas e gráficos que ajudam a classificar a resistência ao fogo com base na espessura e configuração dos elementos. A ACI 216.1 também aborda a influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do concreto e do aço, orientando sobre como levar em conta essa degradação no projeto estrutural.

Embora não defina métodos de ensaio específicos, a norma recomenda que os dados de resistência ao fogo sejam obtidos através de testes de laboratório ou estudos de caso. Sua adoção é fundamental para garantir que as edificações atendam aos requisitos normativos e de segurança, promovendo a proteção de ocupantes e bens materiais. A ACI frequentemente revisa suas diretrizes para incorporar avanços na pesquisa, mantendo a relevância e a eficácia das orientações fornecidas.

- **ACI 216R – *Guide for Determining the Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies* (2020)**

É um relatório técnico do *American Concrete Institute* (ACI) que complementa a norma ACI 216.1, focando na resistência ao fogo de estruturas de concreto. O documento oferece orientações adicionais e recomendações práticas, visando auxiliar engenheiros e projetistas na aplicação eficaz dos princípios estabelecidos na norma, explicando detalhadamente os conceitos fundamentais relacionados à determinação da resistência ao fogo, abordando como a temperatura afeta as propriedades mecânicas do concreto e do aço. Além disso, fornece diretrizes práticas para a aplicação das metodologias de cálculo, facilitando avaliações precisas e consistentes em projetos. Exemplos ilustrativos de cálculos de resistência ao fogo também são incluídos, ajudando os profissionais a entender como aplicar as fórmulas e tabelas da norma.

Outro aspecto importante do relatório é a oferta de recomendações sobre a seleção de materiais e sistemas construtivos, além de considerações para o detalhamento de elementos de concreto em relação à proteção contra incêndios. Consequentemente, essa abordagem se torna uma ferramenta valiosa que contribui para a segurança e eficiência no projeto de edificações,

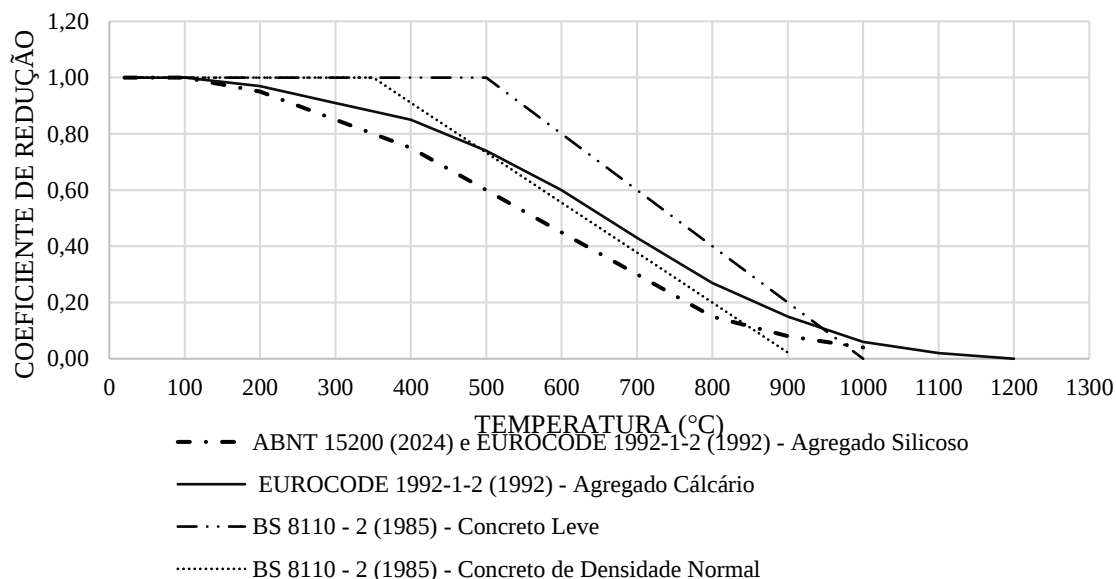
garantindo o atendimento aos requisitos de resistência ao fogo e promovendo a construção de estruturas mais seguras e resilientes.

- **BS 8110-2: *Structural use of concrete - Part 2: Code of practice for special circumstances* (1985)**

Norma britânica que orienta o uso estrutural do concreto em condições especiais, incluindo resistência ao fogo, durabilidade em ambientes agressivos, e o impacto de cargas excepcionais (como choques e explosões). Ela define requisitos para proteger o concreto sob altas temperaturas, incluindo diretrizes para espessuras e coberturas, além de abordar o comportamento térmico e métodos de resfriamento após incêndios. Essencial para projetos em locais extremos, essa norma visa garantir a segurança e durabilidade das estruturas de concreto em situações adversas.

Na Figura 3, estão ilustrados os coeficientes de redução da resistência à compressão do concreto para diferentes temperaturas, considerando diversos tipos de agregados e diferentes normas. É evidente a falta de correlação entre os dados apresentados, isso ocorre pela falta de padronização dos ensaios executados e a diversidade de composições do concreto.

Figura 3: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos apresentados por diferentes normas



Fonte: Autora (2024)

2.2. COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES DO CONCRETO

A composição do concreto influencia diretamente no comportamento do material em condições de alta temperatura. O tipo de cimento, a escolha dos agregados e a relação água/cimento determinam a intensidade dos danos e a capacidade de resposta do concreto ao calor. Componentes como a pasta de cimento e os agregados apresentam reações distintas, com

a desidratação da matriz cimentícia e a expansão térmica dos agregados contribuindo para o surgimento de tensões internas que aceleram a degradação (Coelho *et al.*, 2019; Mehta e Monteiro, 2014).

2.2.1. Água

Uma pasta de cimento Portland endurecida é composta por silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio hidratado, além de conter uma quantidade significativa de água em sua estrutura. Essa água influencia as propriedades térmicas e mecânicas do concreto durante o aquecimento, tanto em superfícies impermeáveis quanto permeáveis (Lima, 2005).

Mehta e Monteiro (2016) destacam que, em relação à resistência ao fogo, a presença de água no concreto é benéfica, pois a temperatura do material não aumentará até que toda a água evaporável seja eliminada. No entanto, quando a temperatura se eleva, a água presente nos poros tende a evaporar, gerando um aumento na pressão do vapor dentro desses poros, denominada poro-pressão. Esse fenômeno ocorre devido à expansão da água ao passar da fase líquida para a fase gasosa, o que contribui para o surgimento de deslocamentos explosivos, explicados mais detalhadamente no item 2.5.1.

Conforme Zhang (2011), o concreto possui três tipos de água: água capilar, água em gel e água quimicamente combinada. A água em gel está presente nos poros do gel da pasta de cimento, representando cerca de 28% do volume do cimento hidratado. Costa, Figueiredo e Silva (2002) destacam que, em pastas de cimento Portland saturadas, o excesso de água pode gerar gradientes de pressão nos poros do concreto durante processos como evaporação da água e liberação do ar incorporado, o que contribui para a formação de fissuras por contração.

A água capilar é aquela presente nos poros da pasta de cimento, nos agregados e nas interfaces entre eles, sendo suscetível à evaporação. Com o tempo, a quantidade de água capilar diminui, enquanto os teores de água em gel e água quimicamente combinada aumentam à medida que o cimento se hidrata. O grau de hidratação depende da composição do material e das condições de cura, como temperatura, umidade e tempo. Sob altas temperaturas, a evaporação da água capilar e em gel causa movimentação de umidade, e, em temperaturas ainda mais elevadas, ocorre a decomposição química da pasta de cimento e dos agregados, intensificando essa migração (Zhang, 2011).

Por fim, Zhang (2011) explica que a água quimicamente combinada, ou água adsorvida, não evapora facilmente devido às forças de van der Waals que a mantêm nas partículas de gel de cimento. No entanto, em temperaturas acima de 200 °C, essa água pode ser

expulsa, sendo considerada "condicionalmente evaporável". Representando cerca de 23% do peso do cimento anidro, essa água é frequentemente chamada de não evaporável, pois só se liberta em temperaturas superiores a 500 °C, quando ocorre a decomposição química da pasta de cimento e dos agregados.

2.2.2. Pasta de Cimento Portland

O tipo de cimento utilizado na composição do concreto é um fator determinante para suas propriedades mecânicas, especialmente quando submetido a altas temperaturas. O cimento atua como o principal agente de ligação no concreto, e sua escolha pode influenciar significativamente a resistência à compressão, tração, e outras propriedades essenciais do material.

Quando expostos a altas temperaturas, materiais à base de cimento sofrem alterações físico-químicas que comprometem suas propriedades mecânicas e a capacidade de dissipar calor (Matesová, Bonen e Shah, 2006). Mehta e Monteiro (2014) explicam que o grau de hidratação e o nível de umidade são fatores importantes nesses processos. A pasta de cimento Portland hidratada é formada por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio, que são diretamente afetados pelo aumento da temperatura, resultando na degradação das propriedades do cimento (Costa, Figueiredo e Silva, 2002; Mehta e Monteiro, 2014). A seguir, apresenta-se como a pasta de cimento Portland reage à elevação de temperatura:

- a) Entre 4 °C e 80 °C, a pasta de cimento Portland permanece quimicamente estável e as alterações são basicamente físicas como: porosidade, aumento de fissuras e energia de superfície;
- b) Entre 80 °C e 100 °C, a água livre nos poros do concreto evapora;
- c) Acima de 200 °C, tem-se o início de algumas reações físico-químicas, como a evaporação da água e redução das forças de Van der Waals entre as camadas de C-S-H;
- d) Acerca de 300 °C, a água interlamelar do C-S-H e uma parte da água quimicamente combinada ao C-S-H e aos sulfoaluminatos hidratados evaporam;
- e) Por volta de 500 °C, a decomposição do hidróxido de cálcio se inicia, causando uma desidratação da pasta de cimento;
- f) Ao se aproximar de 900 °C, ocorre a decomposição completa do C-S-H.

Em última análise, em decorrência do aquecimento, as pastas de cimento e agregados sofrem transformações microestruturais influenciando as propriedades macroscópicas dos elementos estruturais, fatores esses que contribuem para os deslocamentos explosivos no

concreto (Lima *et al.*, 2004). Além disso, as microfissuras geradas na zona de transição influenciam, sobretudo, na redução da resistência à flexão e do módulo de elasticidade do concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

Arioz (2007) investigou os efeitos da temperatura em concretos feitos com diferentes tipos de cimento, destacando que cimentos com adições pozolânicas, como a sílica ativa, apresentam melhor desempenho térmico. Isso se deve à formação de uma matriz cimentícia mais densa e resistente, que ajuda a mitigar a desidratação e a microfissuração em altas temperaturas. Coelho *et al.* (2019) corroboram essa visão ao observar que a incorporação de adições minerais ao cimento Portland, como escória de alto-forno e cinzas volantes, melhora a resistência térmica do concreto. Essas adições aumentam a densidade do concreto, reduzem sua porosidade e, conseqüentemente, sua suscetibilidade à formação de microfissuras induzidas por tensões térmicas. Além disso, a presença de compostos como a sílica ativa contribui para a formação de uma microestrutura mais homogênea e resistente.

Segundo Dias *et al.* (2020), a escolha do tipo de cimento também afeta a capacidade do concreto de manter suas propriedades mecânicas após a exposição a altas temperaturas. Eles argumentam que cimentos que contêm maiores quantidades de compostos hidratáveis, como o cimento Portland de alta resistência inicial, podem sofrer desidratação mais rápida, levando a uma degradação mais significativa da resistência à compressão e elasticidade. Melo e Beltrame (2018) destacam a importância de selecionar o tipo de cimento de acordo com as condições específicas de serviço a que o concreto será exposto. Em aplicações onde o concreto estará sujeito a variações extremas de temperatura, como em ambientes industriais ou em estruturas sujeitas a incêndios, a utilização de cimentos com adições pozolânicas ou de escória é recomendada para melhorar a durabilidade e a resistência térmica do material.

Franchetto (2022) explorou o comportamento de concretos refratários, que são compostos por cimentos especialmente formulados para resistir a temperaturas extremamente altas, geralmente acima de 1000 °C. Esses cimentos contêm altos teores de alumina e outros materiais resistentes ao calor, permitindo que o concreto mantenha sua integridade estrutural em condições térmicas extremas, onde cimentos Portland comuns falharam.

Em resumo, a escolha do tipo de cimento é crucial para determinar a performance do concreto sob altas temperaturas. Cimentos com adições minerais oferecem uma maior resistência térmica, ao passo que cimentos convencionais podem não fornecer a durabilidade necessária em ambientes adversos. A seleção do cimento deve, portanto, ser feita com base nas exigências específicas do projeto, levando em consideração os desafios térmicos que o concreto enfrentará durante sua vida útil.

2.2.3. Agregados

De acordo com a Norma NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados são definidos como materiais granulares, sem forma ou volume específicos, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas para a produção de concretos de cimento Portland e argamassas em geral. Para Bauer (2008), o agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de mistura de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos.

Os agregados representam de 50% a 75% do volume total do concreto, dessa forma, o seu comportamento em temperaturas elevadas é bastante influenciado pela propriedade do agregado utilizado. Para Mehta e Monteiro (2014) a porosidade e a mineralogia do agregado exercem uma influência significativa no comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas. Os autores também observam que, a depender da temperatura exercida, agregados mais porosos são mais vulneráveis a fenômenos de expansão destrutiva, causando *spalling*. Ademais, o teor de agregados na mistura e as proporções da mistura em geral também interferem no coeficiente de dilatação do concreto (Neville, 2016).

Nesse sentido, Neville (2016) observa que o tipo de material agregado usado no concreto afeta como ele responde ao calor elevado, quando o agregado não possui sílica em sua composição, como o calcário, rochas ígneas básicas, tijolos britados e escória de alto-forno, a perda de resistência do concreto é significativamente menor. Além disso, os efeitos danosos são mais evidentes quando os agregados são graníticos, visto que, eles produzem uma dilatação térmica instantânea e significativa antes de atingir 600 °C (Costa, Figueiredo e Silva, 2002).

O coeficiente de expansão térmica dos agregados é um dos fatores mais críticos a considerar. Agregados com baixo coeficiente de expansão térmica, como o basalto, minimizam a formação de tensões internas no concreto quando este é submetido a calor, reduzindo o risco de microfissuração e perda de resistência (Sancak *et al.*, 2008).

Por outro lado, agregados calcários, que são amplamente utilizados devido ao seu custo relativamente baixo, podem começar a se decompor em torno de 900 °C, liberando gases e criando porosidades adicionais no concreto. Essa decomposição térmica compromete seriamente a integridade do concreto, conforme destacado por Ergün *et al.* (2013), que observaram uma queda significativa na resistência à compressão de concretos com agregados calcários após exposição prolongada a altas temperaturas.

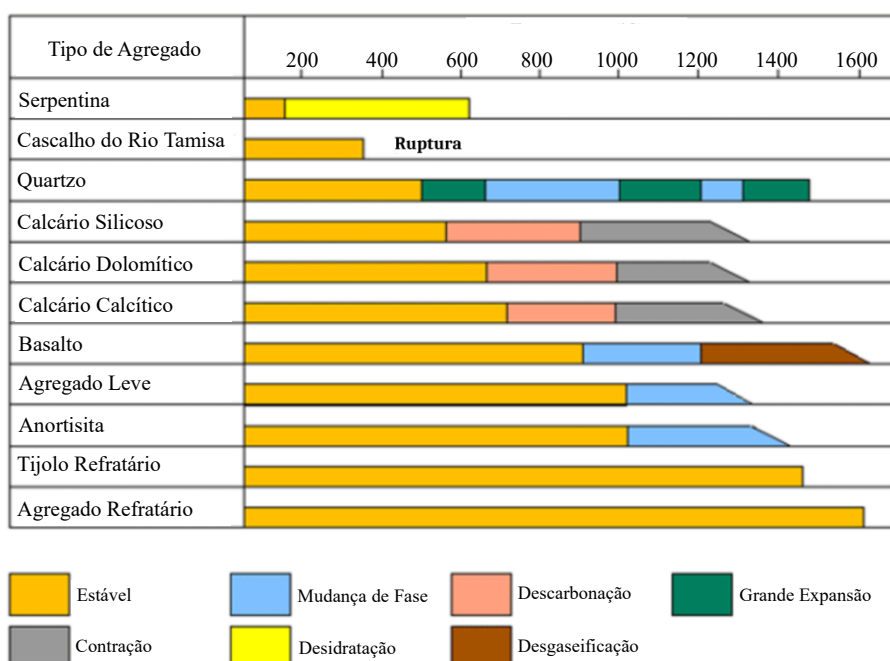
Além disso, a escolha dos agregados pode influenciar a resistência do concreto ao *spalling*. Li *et al.* (2016) discutem que concretos com agregados leves, como argila expandida, exibem uma maior resistência ao *spalling* em comparação com aqueles que utilizam agregados

normais. Isso ocorre porque os agregados leves possuem uma estrutura interna mais porosa, que permite a dissipação de vapor e alivia as tensões internas, reduzindo o risco de explosões superficiais.

Agregados naturais como o basalto oferecem vantagens significativas em termos de resistência térmica, enquanto os agregados calcários apresentam desafios devido à sua susceptibilidade à decomposição térmica. Os agregados reciclados e leves oferecem soluções sustentáveis e técnicas específicas para melhorar a resistência térmica do concreto, mas requerem considerações cuidadosas na sua aplicação. A escolha dos agregados deve ser baseada nas exigências específicas do projeto, garantindo que o concreto mantenha sua integridade estrutural e desempenho mecânico mesmo sob condições adversas.

A FIB (2007) enfatiza que, em altas temperaturas, os agregados desempenham um papel crucial no comportamento do concreto, apesar das alterações na pasta de cimento e do papel da água. Isso ocorre, pois além dos agregadores comporem boa parte do volume do concreto, suas propriedades que variam durante o aquecimento, impactam diretamente o desempenho do material. A condutividade térmica do concreto, por exemplo, é influenciada pela natureza litológica dos agregados, que reagem de maneira diferente ao calor. Além disso, a estabilidade química e física dos agregados é essencial para o comportamento do concreto aquecido, e eles também ajudam a limitar as dilatações e contrações da pasta de cimento durante o aquecimento. Essa influência da temperatura nos diversos tipos de agregados pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4: Comportamento de diferentes agregados durante o aquecimento



Fonte: Adaptado de FIB (2007)

2.3. MÉTODOS, TÉCNICAS E ENSAIOS DE AVALIAÇÃO

A realização de uma avaliação, inspeção ou perícia detalhada é essencial para garantir um diagnóstico preciso e representativo da estrutura danificada ou comprometida. Dessa maneira, diferentes técnicas, destrutivas e não-destrutivas, podem ser utilizadas nas perícias após o incêndio (Mazzuco, 2021).

Em seu artigo Fernandes *et al.* (2017) apresentam um resumo das pesquisas que empregaram técnicas microestruturais para caracterizar os danos no concreto exposto a altas temperaturas. Observa-se uma predominância de ensaios conduzidos em laboratório, com poucos casos de aplicação dessas técnicas em elementos e estruturas afetadas por incêndios. Além disso, destacam-se quatro principais métodos utilizados os quais serão explanados a seguir: microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e análises térmicas (DTA/TGA). Vale destacar que a maioria dos estudos combina múltiplos métodos de análise experimental. Apesar das técnicas relatadas serem utilizadas com predominância na caracterização da microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas, outras importantes ferramentas para a análise do material degradado podem ser feitas, como a velocidade de pulso ultrassônico (VPU).

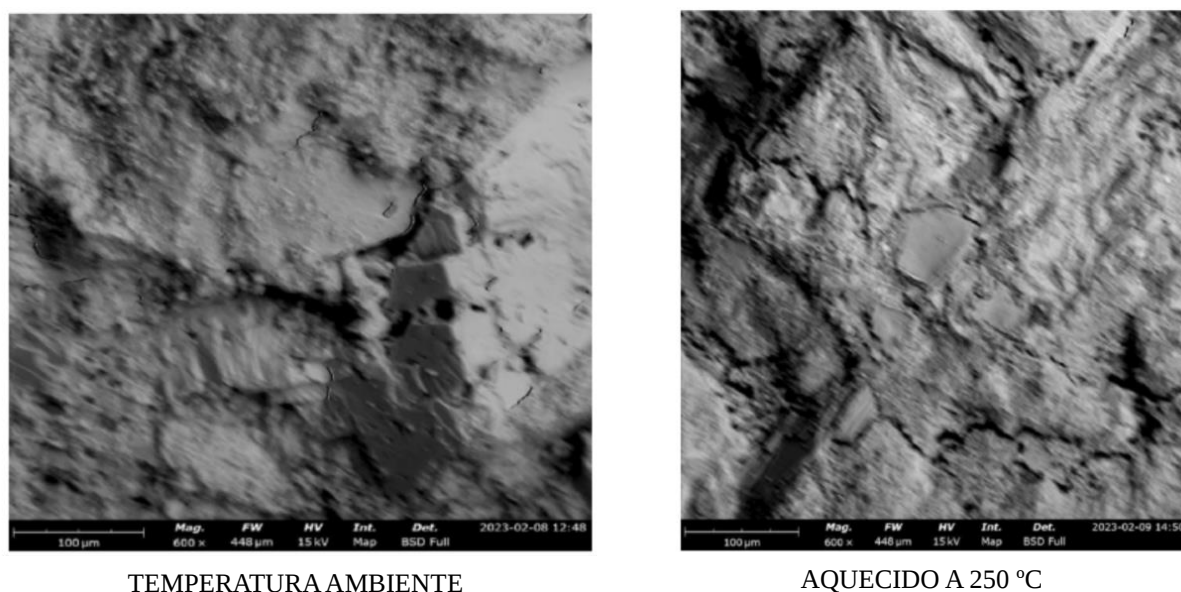
Fernandes *et al.* (2017) destacam que, entre os 35 trabalhos analisados por eles, apenas 4 investigaram o comportamento de concretos em elementos estruturais em escala real, evidenciando a escassez de pesquisas em estruturas reais. Essa limitação é significativa, especialmente devido às variações nos gradientes térmicos, que dependem das dimensões do corpo de prova ou do elemento estrutural, além de serem influenciados pelo método de aquecimento utilizado, seja ele laboratorial (com controle da taxa de aquecimento, curva térmica, faces aquecidas, entre outros) ou real (como em incêndios). Os programas experimentais analisados também não detalham os procedimentos de preparação das amostras, e muitas vezes, não indicam se normas específicas foram seguidas. Diferentemente das medições de propriedades realizadas em temperatura ambiente, onde os tamanhos das amostras seguem especificações definidas por normas, as propriedades mecânicas em altas temperaturas são frequentemente avaliadas em amostras de variados tamanhos. Essa variabilidade ocorre devido à ausência de normas padronizadas para a execução de ensaios de propriedades mecânicas em altas temperaturas (RILEM, 1995). Sendo assim, o método RILEM-129 MHT foi criado com o intuito de internacionalizar uma metodologia de avaliação da resistência mecânica residual do concreto em altas temperaturas, permitindo a comparação de resultados nacionais e internacionais. A seguir, explana-se sobre os diversos métodos de análise do

concreto exposto à altas temperaturas, formas de exposição ao calor em laboratório, bem como, método de análise dos resultados obtidos.

2.3.1. Microanálise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

De acordo com Ukpata *et al.* (2023) técnicas como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) são comumente utilizadas para estudar a microestrutura de amostras de concreto. Em seus estudos, os autores utilizaram MEV juntamente com a espectroscopia de raios X dispersiva de energia (EDX), afirmando que essa combinação é uma poderosa técnica usada para analisar a microestrutura e a composição química de materiais, incluindo concreto. Ao combinar imagens MEV com análise EDX, informações detalhadas sobre a composição elementar e distribuição dentro de amostras de concreto podem ser obtidas. Na Figura 5, é possível visualizar imagens obtidas por meio da técnica de MEV, permitindo a comparação entre uma amostra em temperatura ambiente e outra aquecida a 250 °C.

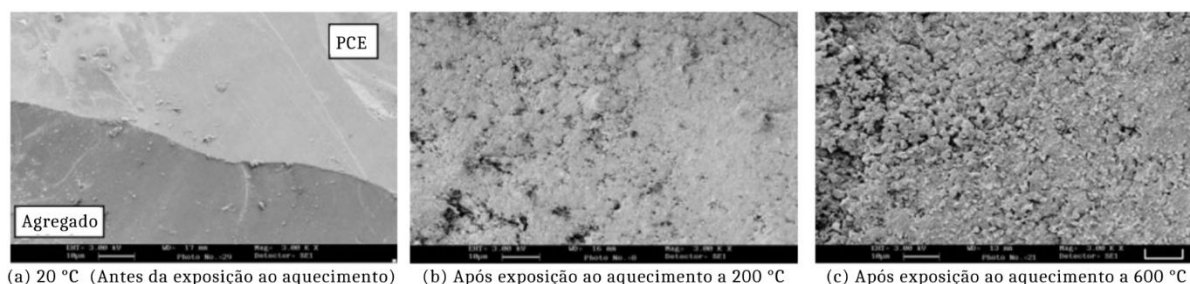
Figura 5: Imagem MEV de amostra de concreto com 90% de laterita/10% de pó de pedreira como agregado fino – Temperatura ambiente e aquecido a 250 °C



Fonte: Ukpata *et al.* (2023)

A Figura 6 fornece as imagens obtidas por meio do MEV no estudo experimental de Peng e Huang (2008), onde investigaram as mudanças na microestrutura de concreto com resistências à compressão de 70 MPa, antes da exposição a temperaturas elevadas e após a exposição a 200 °C e 600 °C, respectivamente. Os autores observaram um aumento significativo da porosidade após exposição a 600 °C na pasta de cimento endurecida, atribuído principalmente à formação de microfissuras, que estão entre as principais causas da redução da resistência do concreto.

Figura 6: MEV da pasta de cimento endurecida após aquecimento em diferentes temperaturas altas



Fonte: Adaptado de Peng e Huang (2008)

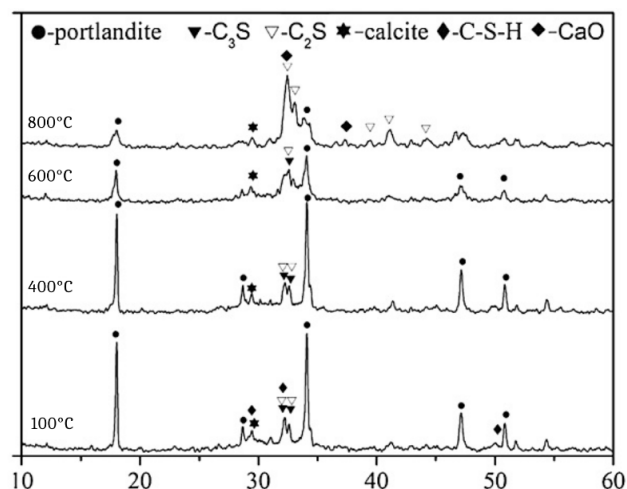
2.3.2. Difração de raios X (DRX)

A técnica de Difração de Raios X (DRX) é amplamente empregada para investigar a estrutura atômica e molecular de cristais. Nesse método, o arranjo ordenado dos átomos no cristal provoca a difração de um feixe de raios X incidente em direções específicas, permitindo a análise detalhada do material (Pasinatto, 2024).

DRX é essencial na caracterização de materiais sólidos, pois possibilita a identificação da estrutura cristalina de compostos por meio de difratogramas. A difração ocorre quando as ondas de raios X interagem com os átomos organizados em uma rede cristalina, gerando padrões característicos que refletem o espaçamento interatômico específico de cada material (Callister Jr. e Rethwisch, 2013). De acordo com Franchetto (2022), aplicando a técnica tanto ao material não aquecido quanto aos materiais expostos a diferentes níveis de aquecimento, torna-se possível identificar as alterações na quantidade ou presença dos diversos compostos químicos, conforme suas estruturas cristalinas.

Na Figura 7, pode-se visualizar os difratogramas de um determinado traço de pasta de cimento endurecida (PCE) estudado por Wang et al. (2015) em função da temperatura, cuja resistência à compressão era de 42 MPa e relação água/cimento de 0,4. Inicialmente, o pico de difração de Ca(OH)_2 é proeminente, acompanhado por picos de gel C-S-H e de compostos não hidratados (C_3S e $\beta\text{-C}_2\text{S}$). Ao aquecer a 400 °C, a intensidade dos picos de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ e C_3S reduz ligeiramente, enquanto o pico de Ca(OH)_2 aumenta, indicando que a evaporação da água promove a hidratação do cimento não hidratado, resultando no aumento da resistência. A 600 °C, ocorre uma queda drástica na intensidade de Ca(OH)_2 , aumento de $\beta\text{-C}_2\text{S}$, e desaparecimento do gel C-S-H, sugerindo decomposição significativa. Aos 800 °C, a intensidade de Ca(OH)_2 diminui ainda mais, enquanto CaO reage rapidamente com água e CO_2 durante o resfriamento, formando Ca(OH)_2 e CaCO_3 , mas com intensidades de pico não muito altas.

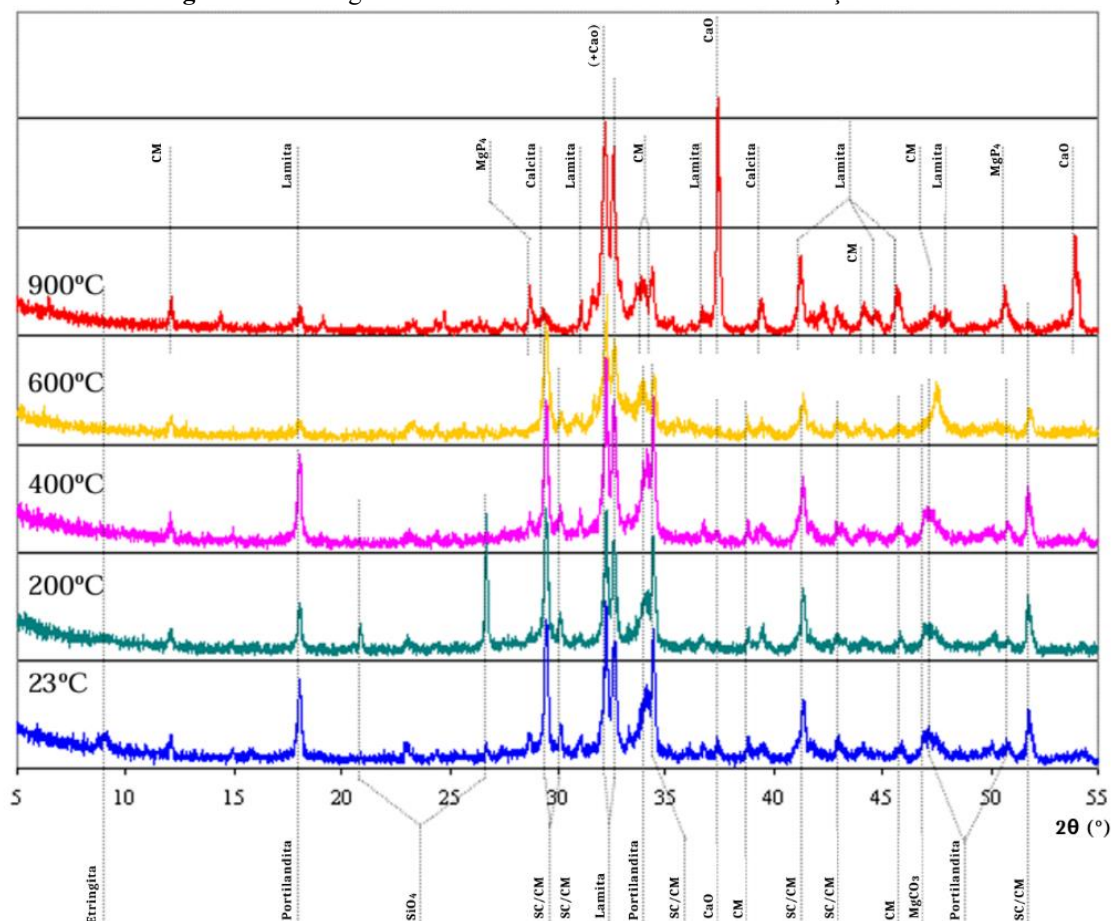
Figura 7: Difratomogramas da pasta de cimento aquecidas até 800 °C



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2015)

Um estudo realizado por Lima (2005) mostrou, por meio de difratogramas, que a etringita permaneceu estável até aproximadamente 200 °C, enquanto a portlandita se manteve estável até 400 °C, iniciando sua transformação em óxido de cálcio, com completo desaparecimento a 900 °C. A etringita, em particular, tem sido identificada em outros estudos experimentais, já que sua desidratação só começa a ocorrer por volta de 70 °C (Figura 8).

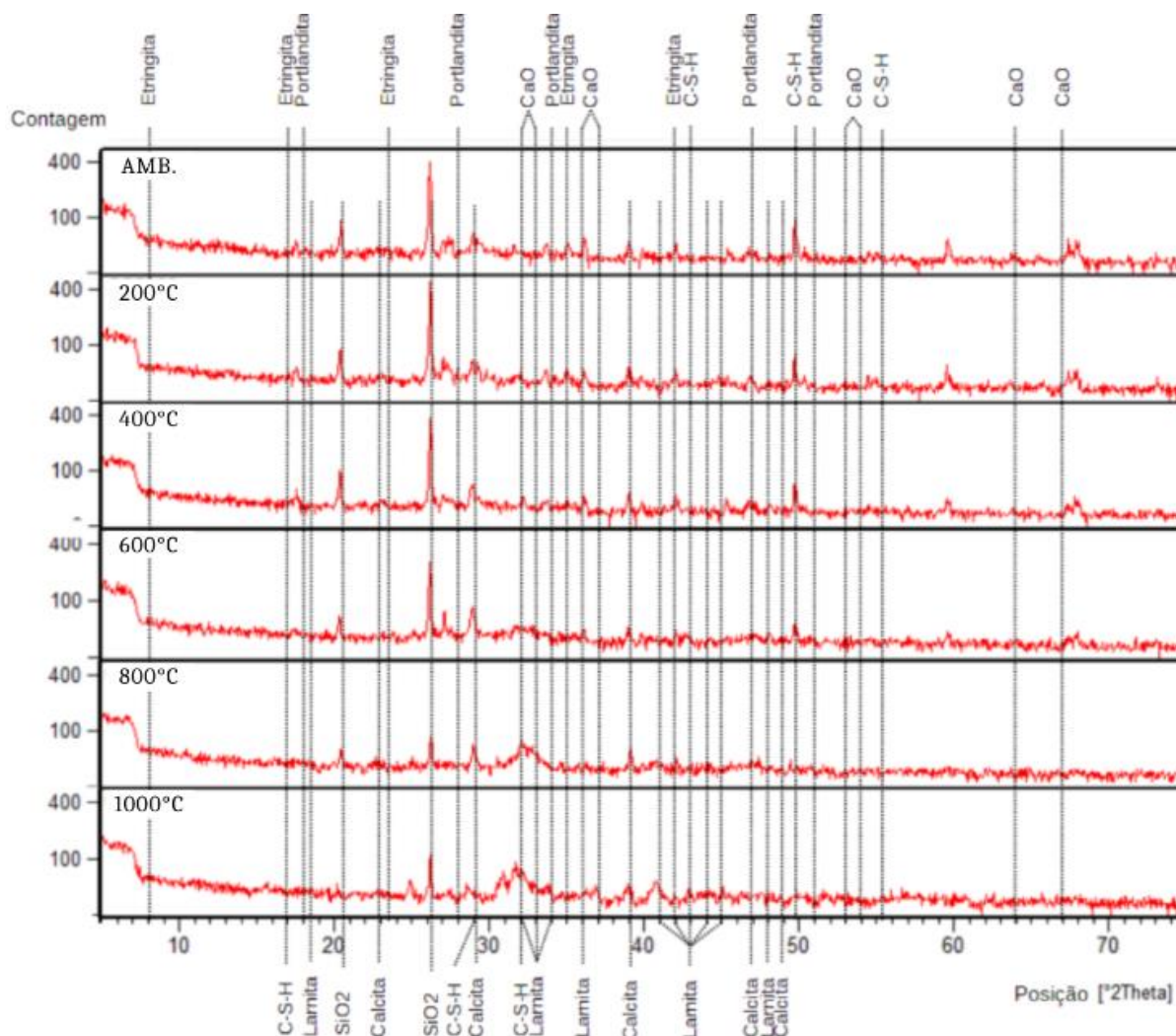
Figura 8: Difrátograma do concreto de alta resistência sem adição mineral



Fonte: Adaptado de Lima (2005)

Franchetto (2022) em sua análise experimental com concretos autoadensáveis observou que não há diferenças significativas entre os traços analisados, pois os picos nos difratogramas permanecem nas mesmas posições, indicando os mesmos compostos cristalinos. Pequenas variações de intensidade são observadas, possivelmente devido ao aumento de areia fina. Com o aumento da temperatura, ocorrem as mudanças esperadas, como redução de etringita, C-S-H e portlandita e aumento de óxido de cálcio. Também é possível relacionar as variações ocorridas nos materiais com a variação observada na resistência média à compressão após aquecimento, essas variações correspondem à diminuição da resistência à compressão, especialmente entre 400 °C e 600 °C, onde há uma queda significativa de C-S-H. Na Figura 9, é possível observar os difratogramas do concreto celular (CC) com traço 1:5 de concreto obtidos pelo autor.

Figura 9: Difratogramas do CC 1:5 em função da temperatura



Fonte: Franchetto (2022)

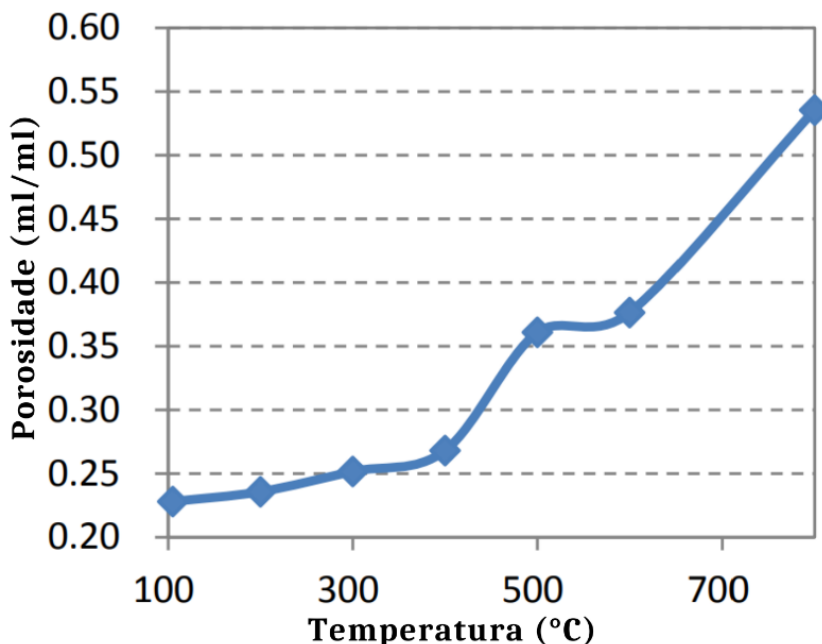
2.3.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) baseia-se na introdução de um fluido não molhante — neste caso, o mercúrio — nos poros do material. A pressão aplicada e o volume de mercúrio que penetra nos poros são utilizados para calcular o volume total de poros. O método permite a medição de poros com tamanhos que variam de 0,001 μm a 1000 μm , dependendo da pressão aplicada (Zhang, 2013).

A Figura 10 apresenta o comportamento de pastas de cimento com relação água/cimento de 0,5, analisadas por Zhang (2013), que demonstrou um aumento da porosidade total, determinada por PIM, à medida que a temperatura se elevava.

Esse aumento elevado de porosidade após 400 °C também foi verificado por Wang *et al.* (2015) ao estudarem pastas de cimento com resistência à compressão de 42 MPa e relação água/cimento de 0,4, submetidas a aquecimentos de 400 °C e 800 °C. Os autores observaram que, em temperatura ambiente, a porosidade total era de 26,9%. Esse valor aumentou para 29,8% a 400 °C e para 45,5% a 800 °C, o que justifica também o acentuado decréscimo de resistência nesse intervalo de temperatura.

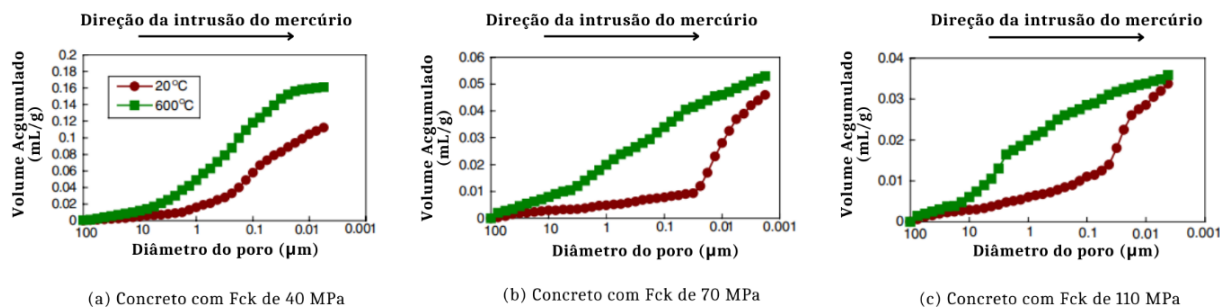
Figura 10: Porosidade total da pasta de cimento em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Zhang (2013)

Peng e Huang (2008) analisaram concreto de resistência à compressão de 40 MPa, 70 MPa e 110 MPa, aquecidas a 600 °C. O resultado corroborou com o observado por outros autores, onde ocorre o aumento elevado da porosidade em temperaturas mais elevadas, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Distribuição do tamanho dos poros da pasta de cimento endurecida em três classes de concreto antes e depois da exposição a 600 °C



Fonte: Adaptado de Peng e Huang (2008)

2.3.4. Análise Termogravimétrica (TGA)

A TGA mede a variação de massa do concreto com o aumento de temperatura. Esse método permite identificar a perda de água e a decomposição de materiais, como hidróxidos de cálcio e silicatos, que afetam a durabilidade e resistência do concreto. A técnica é valiosa para estudar as transformações químicas e físicas sofridas pelo concreto quando aquecido.

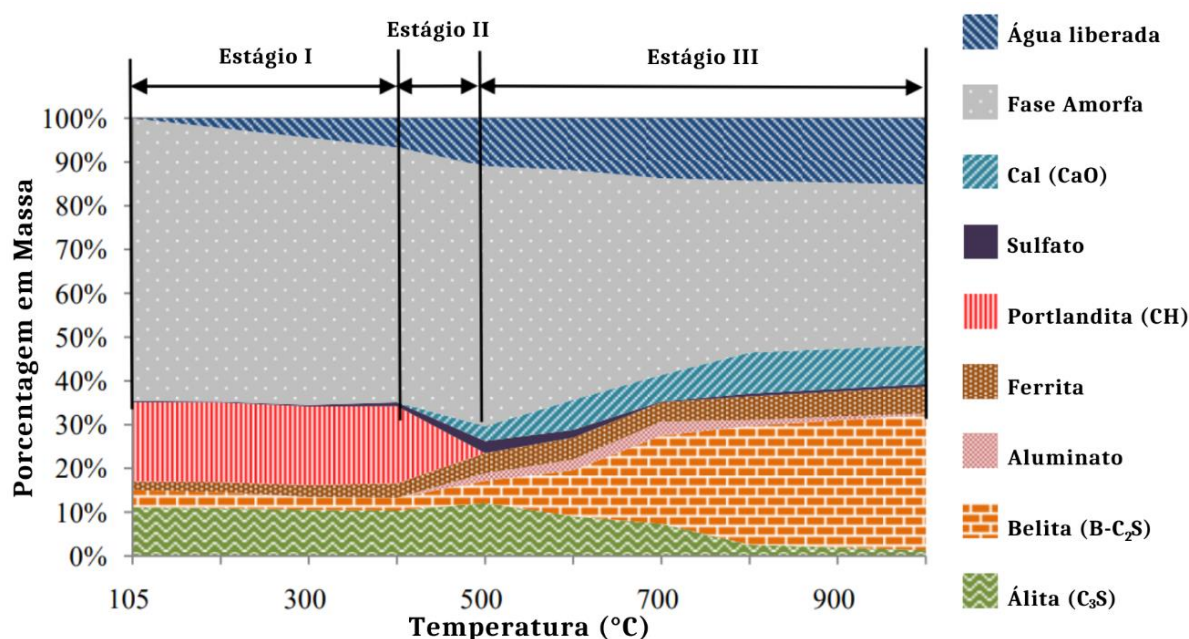
No estudo de Wang *et al.* (2014), TGA foi empregada para investigar as alterações nos produtos de hidratação do concreto endurecido submetido a altas temperaturas. Identificaram-se três principais faixas de perda de massa: entre 100 °C e 200 °C, devido à desidratação dos produtos hidratados do gel de C-S-H e à evaporação de água livre; entre 420 °C e 480 °C, causada pela decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e de outros produtos hidratados; e acima de 600 °C, associada à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). Os resultados mostraram que essas transformações, somadas à formação de poros grosseiros, contribuem para a deterioração da microestrutura e para a perda significativa das propriedades mecânicas do concreto, especialmente após 400 °C e de forma mais acentuada após 800 °C.

Zhang (2013) utilizou TGA para investigar as alterações químicas e microestruturais em pasta de cimento Portland expostos a altas temperaturas. O estudo identificou perdas de massa relacionadas à desidratação do gel de C-S-H e do hidróxido de cálcio (CH), com transformações ocorrendo entre 420 °C e 480 °C. Além disso, observou-se que essas mudanças químicas levam à recristalização e ao aumento da porosidade, resultando na deterioração da microestrutura e na redução significativa da resistência mecânica. O método forneceu parâmetros cinéticos detalhados, contribuindo para o entendimento dos mecanismos de deterioração térmica e suas implicações na resistência ao fogo do concreto.

Na Figura 12, é possível visualizar a combinação entre dois métodos de análise, TGA e DRX, realizado por Zhang (2013). O Autor destaca que a combinação, é essencial para

compreender as transformações químicas e estruturais em pastas de cimento submetidas a altas temperaturas. Visto que, enquanto a TGA fornece informações detalhadas sobre a perda de massa associada à desidratação dos produtos hidratados, como gel de C-S-H e hidróxido de cálcio (CH), a DRX complementa ao identificar e quantificar as fases cristalinas presentes durante e após o aquecimento. Juntas, essas técnicas permitem correlacionar a liberação de água quimicamente ligada com as alterações microestruturais e as mudanças nas fases mineralógicas, oferecendo uma visão abrangente dos mecanismos de deterioração térmica.

Figura 12: Avaliação da fração de fase da pasta de cimento Portland aquecida em função da temperatura determinada por DRX e TGA



Fonte: Adaptado de Zhang (2013)

2.3.5. Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é um ensaio não destrutivo, no qual é determinada indiretamente a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica no interior de um corpo, permitindo avaliar sua compacidade e homogeneidade (Franchetto, 2022).

Em seus estudos, Franchetto (2022) realizou o ensaio de VPU seguindo os procedimentos da NBR 8802 (ABNT, 2019). A pesquisa avaliou corpos de prova submetidos a altas temperaturas, tanto antes quanto após a exposição, com o objetivo de verificar o impacto térmico na qualidade residual do concreto por meio da variação da velocidade do pulso ultrassônico e da interpretação dos resultados. Espera-se que, em temperaturas mais elevadas, ocorra perda de água e aumento de microfissuras, o que leva à redução da VPU.

O guia TCS-17 (IAEA, 2002) identifica como principais aplicações do ensaio de VPU

a avaliação da qualidade do concreto por meio da medição da velocidade de pulso, conforme descrito na Tabela 1. Segundo a publicação, o método permite detectar defeitos, como vazios, falhas de concretagem, fissuras e segregação. O guia também ressalta que a técnica é eficaz na análise de concreto danificado por exposição ao fogo (Silva, 2009).

Tabela 1: Qualidade do concreto em função da VPU

Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Duvidoso
2000 a 3000	Ruim
< 2000	Muito Ruim

Fonte: Adaptado de IAEA (2002)

2.3.6. Método RILEM-129 MHT (RILEM, 1995)

De acordo com Sollero (2019), o método RILEM-129 MHT: *Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures* (1995) fornece recomendações detalhadas para o estudo das propriedades mecânicas do concreto exposto a altas temperaturas. Essas diretrizes incluem a definição das taxas de aquecimento e resfriamento, o nível de estabilização da temperatura, a aplicação de carga, a amostragem mínima, a geometria e a idade das amostras, além de outros parâmetros necessários para realizar testes padronizados com alta reprodutibilidade.

A Tabela 2 apresenta as taxas recomendadas de aquecimento e resfriamento para concretos de densidade normal pelo método, considerando o diâmetro do corpo de prova cilíndrico.

Tabela 2: Taxa de aquecimento recomendada, máxima taxa de resfriamento e máximo período entre medições de temperatura da superfície do corpo de prova

Diâmetro máximo do corpo de prova (mm)	Taxa de aquecimento ou resfriamento (°C/min)	Intervalo de medição de temperatura (min)
150	0,50	16
100	1,00	8
80	2,00	4
60	4,00	2

Fonte: Adaptado de RILEM (1995)

O método é amplamente utilizado por pesquisadores e engenheiros em projetos de reabilitação de estruturas pós-incêndio, devido à sua abordagem abrangente na análise das

mudanças no concreto exposto a altas temperaturas. Visto que, ele abrange tanto os testes durante a exposição ao fogo quanto os testes de recuperação após o resfriamento.

2.3.7. Equipamentos para exposição ao calor

- **Forno Elétrico - Mufla**

Diversos autores utilizam o forno para simular a exposição do concreto a altas temperaturas em laboratório (Altharhai *et al.*, 2024; Dia *et al.*, 2020; Ergün *et al.*, 2013). Isso ocorre, pois são controlados eletronicamente, o que permite um aquecimento gradual e preciso, seguindo perfis de temperatura pré-determinados, como os especificados em normas internacionais, como a curva da ISO 834 (ISO, 2014). Esses fornos são capazes de atingir temperaturas superiores a 1000 °C, simulando as condições de incêndio em uma estrutura.

A mufla é um forno especializado utilizado em laboratórios para testes que exigem aquecimento uniforme e controle preciso da temperatura. Projetada para suportar temperaturas elevadas de até 1650 °C, é amplamente empregada na queima de amostras e em tratamentos térmicos. Esse intervalo de temperatura é ideal para muitos testes com concreto e outros materiais. Normalmente, a mufla possui uma cavidade interna revestida com materiais isolantes e é equipada com elementos de aquecimento elétrico. A temperatura é controlada por meio de um termômetro ou de um controlador eletrônico. Esse equipamento é amplamente utilizado em laboratórios por diversos pesquisadores (Fidelis *et al.*, 2019; Franchetto, 2022; Veiga, 2022). Na Figura 13 é possível ver um modelo de Mufla.

Figura 13: Forno Elétrico - Mufla



Fonte: Franchetto (2022)

- **Simulador de *flashover***

O *flashover* é uma transição que ocorre durante o desenvolvimento de um incêndio em um compartimento fechado. Ele marca o momento em que as chamas se propagam rapidamente por toda a área, devido ao acúmulo de calor radiante e à ignição dos gases combustíveis gerados pela queima de materiais. É um evento extremamente perigoso porque transforma um incêndio localizado em um incêndio generalizado no ambiente.

O simulador de *flashover* é um equipamento utilizado em treinamentos e pesquisas relacionados à segurança contra incêndios, com o objetivo de simular e estudar o fenômeno do *flashover* em um ambiente controlado. O *flashover* é um estágio crítico em um incêndio, no qual todos os materiais combustíveis presentes em um ambiente atingem sua temperatura de ignição simultaneamente, provocando a combustão quase instantânea de toda a área. Essa simulação permite que bombeiros e especialistas em segurança observem e estudem esse fenômeno de forma segura. Além disso, pesquisadores também utilizam simuladores para avaliar a resistência de materiais, elementos de construção e técnicas de combate a incêndio em condições de *flashover*.

Sampaio (2022), em sua pesquisa, utilizou o simulador de incêndio (Figura 14) seguindo as diretrizes da Instrução Técnica de Ensino (ITE) 13 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG). Essa instrução especifica o planejamento, a organização e os detalhes de cada etapa, desde a preparação do cenário de incêndio até a execução do ensaio de simulação e a verificação das condições de segurança. Para expor os corpos de prova ao calor, foi instalada no interior do simulador, a 4,00 metros da área de queima, uma estante metálica com dimensões de 2,50 m de altura e 2,20 m de comprimento. Na última prateleira da estante, foram distribuídos 18 corpos de prova de concreto, espaçados entre si por 2,5 cm, conforme ilustrado na Figura 15.

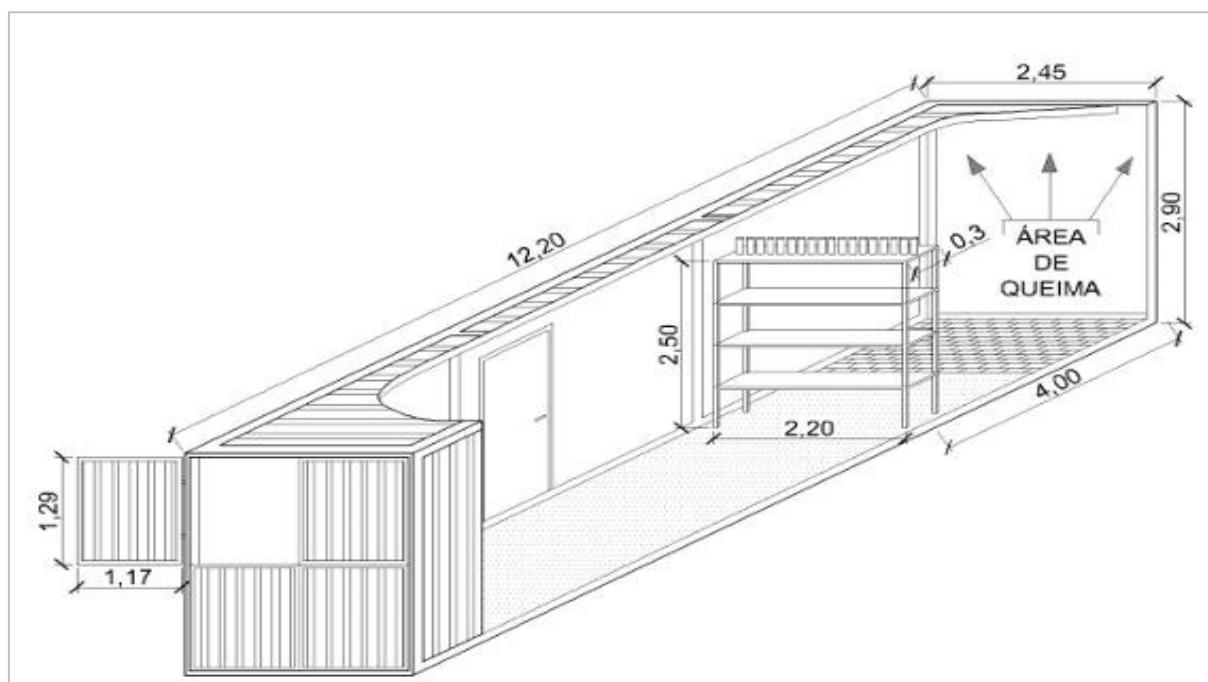
A pesquisa de Sampaio (2022) avaliou o desempenho de concretos confeccionados com cimento Portland (CPV-ARI) e com substituições parciais de 20% do cimento por Metacaulim (MET20) ou Cerâmica Vermelha (CV20). Os concretos foram moldados em diversos traços e submetidos a testes de durabilidade e propriedades mecânicas antes e após a exposição a altas temperaturas em dois cenários: um forno a gás, seguindo a curva padrão de incêndio, e um simulador de *flashover* do tipo contêiner. Os resultados evidenciam que o uso de Metacaulim como substituição parcial do cimento melhora o desempenho do concreto em condições de altas temperaturas, destacando sua eficácia na resistência e durabilidade em cenários de incêndio. O simulador de *flashover* permitiu análises mais realistas em comparação aos ensaios em forno.

Figura 14: Simulador de *flashover* tipo contêiner



Fonte: Sampaio (2022)

Figura 15: Perspectiva isométrica do contêiner com a estante metálica em seu interior



Fonte: Sampaio (2022)

2.4. INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

As propriedades mecânicas do concreto são diretamente impactadas quando ele é submetido a altas temperaturas, resultando em perda de resistência, rigidez e capacidade de

carga. Entre os principais parâmetros afetados estão a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. O impacto nas propriedades mecânicas depende não apenas da intensidade e duração da exposição, mas também da composição do concreto e das condições de resfriamento. Assim, compreender esses efeitos é essencial para avaliar a segurança de estruturas expostas a situações de calor extremo e planejar intervenções adequadas (Mehta e Monteiro, 2014; Neville, 2016; Souza e Moreno Jr., 2010a).

2.4.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto, quando exposto a altas temperaturas, é influenciada por dois fatores principais: tempo de exposição à alta temperatura e forma de aplicação do resfriamento (Viana, 2014). Alguns fatores na composição do concreto influenciam na sua resistência ao ser submetido a temperaturas elevadas, como a densidade dos agregados (Neville, 2016). Em concordância, Souza, Azerêdo e Silva (2018) destacam que o desempenho do concreto em caso de incêndio é influenciado pelas características específicas de seus componentes individuais. Portanto, essa resposta varia de acordo com fatores como o nível de hidratação, a proporção entre água/cimento, o tipo de agregados, entre outros.

A NBR 15200 (ABNT, 2024) fornece valores de coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura, que pode ser visto na Tabela 1. Os valores apresentados são para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos e massa específica normal (entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³). A resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura e pode ser obtida da Equação 1, os valores de $k_c(\theta)$ podem ser vistos na Tabela 1.

$$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta)f_{ck}$$

Equação 1

Onde:

f_{ck} = Resistência à compressão do concreto em temperatura ambiente;

$f_{ck}(\theta)$ = Resistência à compressão do concreto em temperatura elevada (θ);

$k_c(\theta)$ = Coeficiente de redução da resistência à compressão em temperatura elevada (θ).

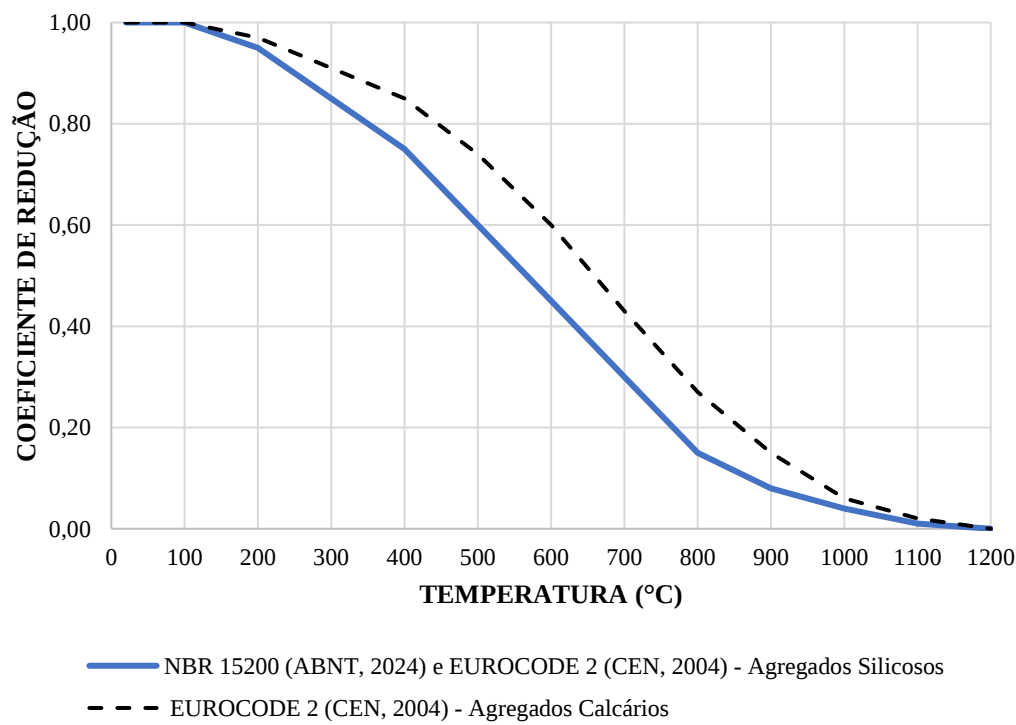
Além disso, a norma ressalta que para concretos preparados com outros agregados ou massa específica diferente da normal, deve-se consultar a Eurocode 2 (CEN, 2004). A resistência à compressão, bem como o módulo de elasticidade do concreto decresce de acordo com o aumento da temperatura como visto na Tabela 1 e é ilustrado graficamente na Figura 16.

Tabela 3: Coeficiente de redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos e massa específica normal, em função da temperatura

Temperatura do concreto (°C)	$k_{c,\theta} = E_c(\theta)/E_c$	$k_c(\theta) = f_{ck}(\theta)/f_{ck}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,95
300	0,85	0,85
400	0,75	0,75
500	0,60	0,60
600	0,45	0,45
700	0,30	0,30
800	0,15	0,15
900	0,08	0,08
1000	0,04	0,04
1100	0,01	0,01
1200	0,00	0,00

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2024)

Figura 16: Fator de redução da resistência do concreto, em função da temperatura

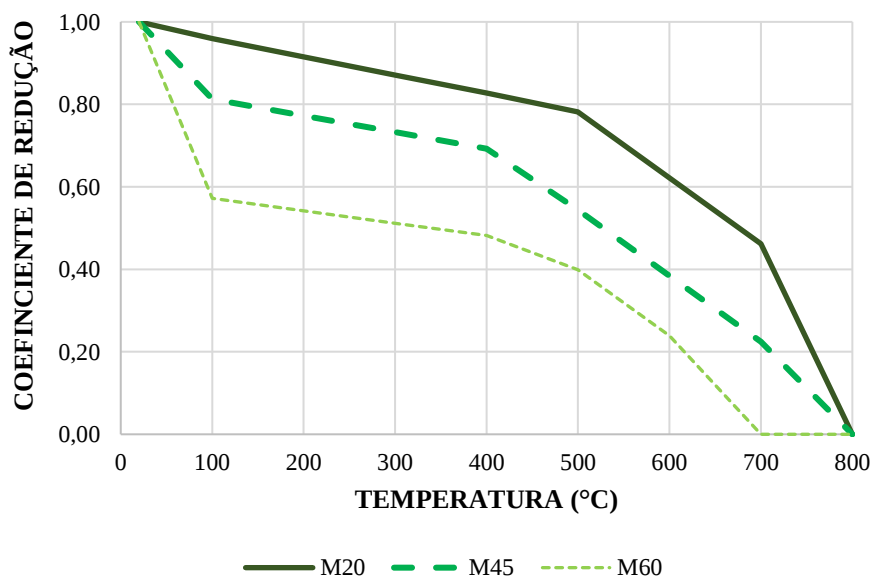


Fonte: Autora (2024)

Em seus estudos Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021) analisam concretos de 33

MPa (M20), 55 MPa (M45) e 72 MPa (M60), onde a resistência à compressão do concreto diminui gradualmente com o aumento da temperatura, mas entre 400 °C e 800 °C, a redução é mais rápida, além disso, os concretos de menor resistência, como M20 e M45, perdem toda a resistência a 800 °C, já o de maior resistência (M60), perde em 700 °C. É evidente que o efeito é mais severo em concretos de alta resistência, isso se deve à microestrutura densa impermeável do concreto de alta resistência, visto que, sob altas temperaturas, a estrutura impermeável não permite que o vapor de água escape. Isso causa pressão prolongada nos poros, levando ao desenvolvimento de microfissuras, o que leva à degradação e lascamento. As variações de resistência à compressão de concretos em função da temperatura são plotadas na Figura 17, onde é possível observar a redução mais acentuada em concreto com maior resistência.

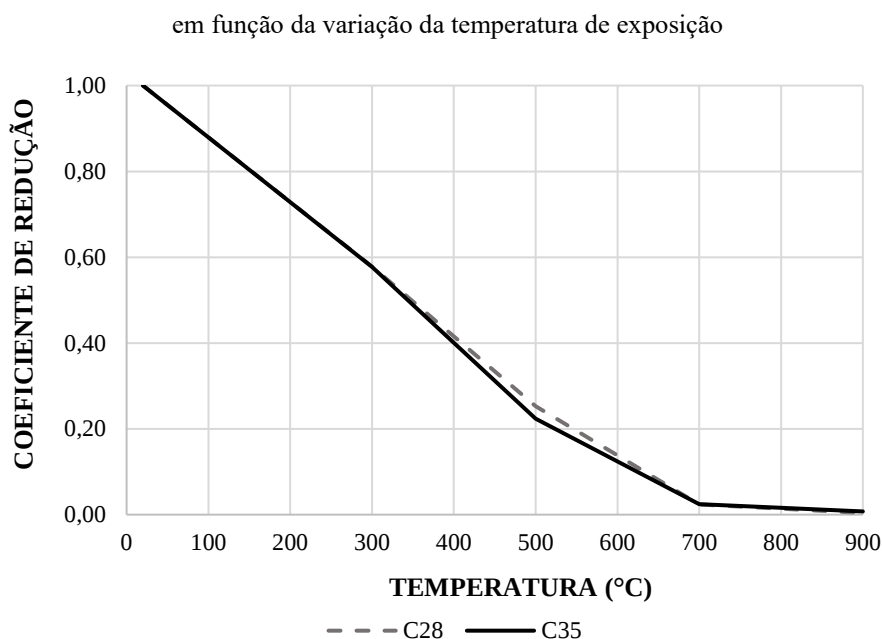
Figura 17: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021)

De forma semelhante, Silva (2009) investigou concretos de duas classes de resistência, C28 e C35, com resistência à compressão de 39,24 MPa e 48,02 MPa em temperatura ambiente, respectivamente. Sua análise demonstrou que a resistência à compressão diminui à medida que a temperatura dos corpos de prova aumenta. Para temperaturas entre 400 °C e 900 °C, a perda de resistência superou 50%. Acima de 900 °C, os concretos testados apresentaram resistência à compressão axial praticamente inexistente. De maneira geral, os corpos de prova da classe C35 sofreram uma redução de resistência mais acentuada em comparação com os da classe C28, como mostrado na Figura 18.

Figura 18: Coeficientes de redução de resistência à compressão de concretos de diferentes classes de resistência



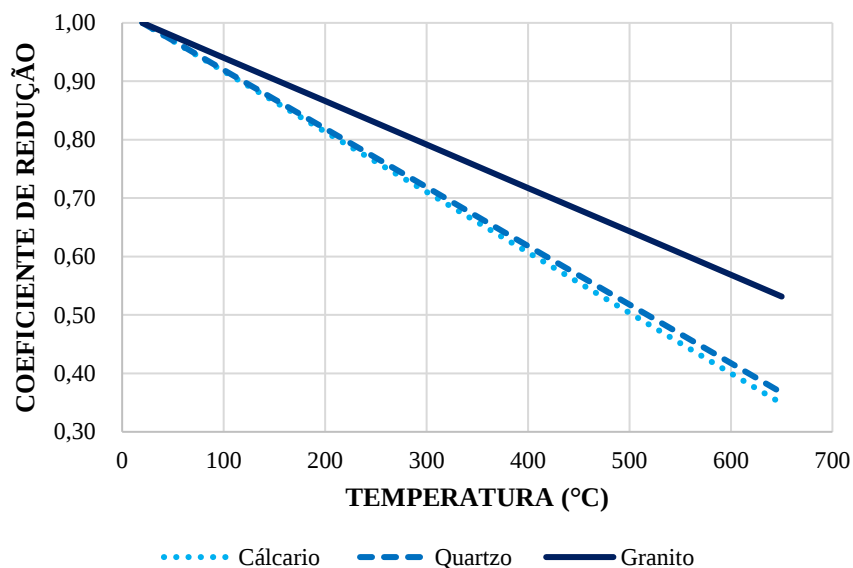
Fonte: Adaptado de Silva (2009)

Em relação ao tipo de agregado Tufail *et al.* (2017) estudaram concretos compostos por calcário, quartzito e granito. Em termos absolutos, o concreto de granito teve maior resistência à compressão em temperatura ambiente e manteve maior resistência em temperaturas crescentes em comparação ao concreto de quartzito e calcário. Em relação à taxa de redução da resistência o concreto de granito exibiu uma taxa de redução de resistência consideravelmente menor do que o concreto de quartzito e calcário, que mostraram valores de perda percentual semelhantes em relação à sua resistência original conforme a temperatura aumentou. Isso pode ser atribuído à baixa dependência da temperatura da resistência do granito e sua melhor resistência à degradação do que calcário e quartzito em todas as temperaturas de teste. A Figura 19 demonstra a percepção do autor.

Do ponto de vista de agregados leve, Passos, Moreno Jr. e Souza (2020) realizaram ensaios em concretos com substituições de 40% e 100% do agregado natural silicoso por agregado leve proveniente de resíduo cerâmico, focando no comportamento de concretos com agregados leves. Observou-se que, conforme esperado, os valores de resistência à compressão diminuem conforme aumenta a porcentagem de substituição do agregado gráudo por resíduo de cerâmica vermelha e com o aumento da temperatura de aquecimento (Figura 20). Essa redução na resistência mecânica, em temperatura ambiente, é atribuída à menor densidade e resistência do agregado reciclado de cerâmica vermelha em relação ao agregado natural. Além disso, verificou-se que a substituição do agregado gráudo por resíduo de cerâmica vermelha resulta em concretos mais resistentes ao fogo. Isso foi evidenciado pelas menores perdas de

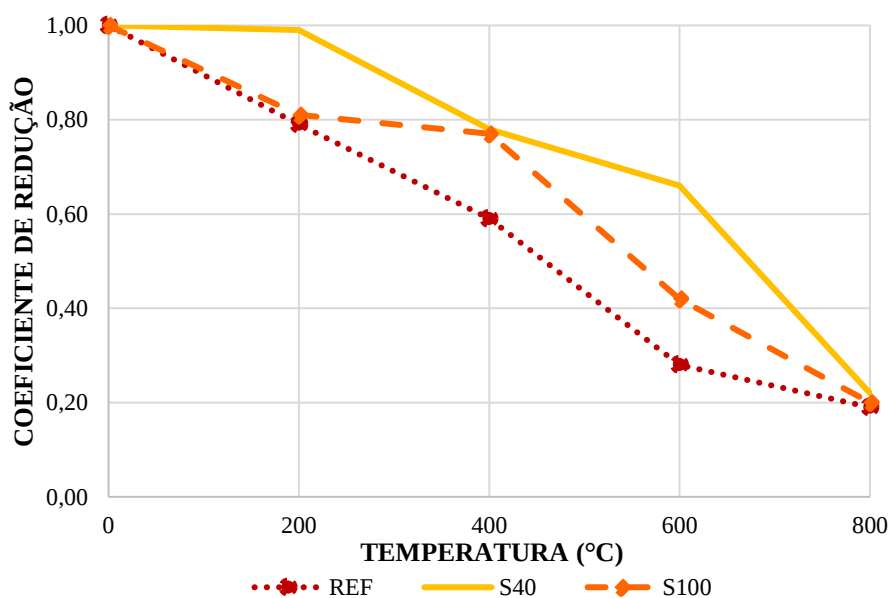
resistência observadas nos concretos com 40% e 100% de substituição, em comparação ao concreto de referência.

Figura 19: Coeficientes de redução de resistência à compressão dos concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Tufail *et al.* (2017)

Figura 20: Valores da redução da resistência a compressão das misturas de concreto com teores de substituição (0%, 40% e 100%)

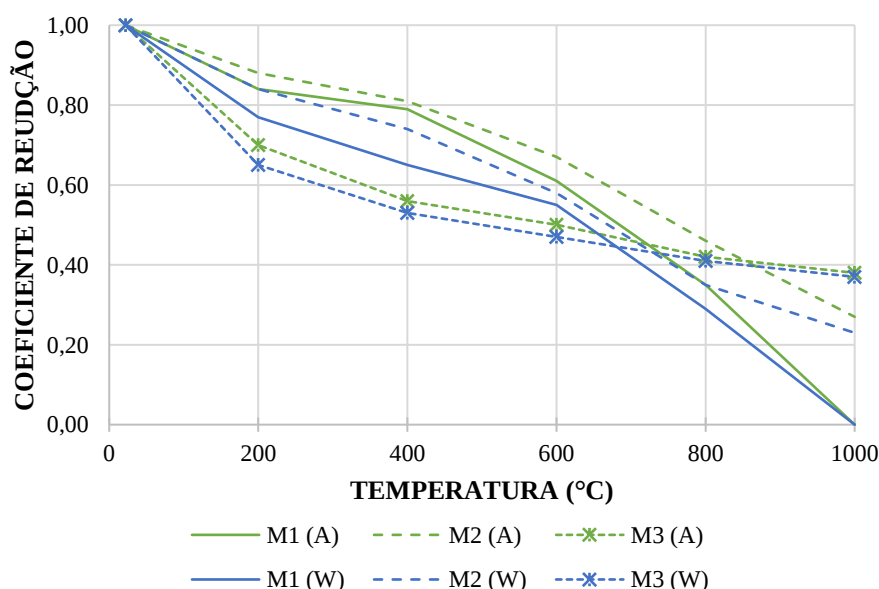


Fonte: Adaptado de Passos, Moreno Jr. e Souza (2020)

O estudo de Akçaözöğlü e Akçaözöğlü (2017) analisaram o efeito da temperatura elevada em concretos leves com agregado de argila expandida e cimento de aluminato de cálcio, comparando-os ao concreto convencional. Foram desenvolvidos três traços: M1 (referência),

M2 (com argila expandida e cimento convencional) e M3 (com argila expandida e aluminato de cálcio). De acordo com os resultados de resistência à compressão residual dos concretos resfriados de forma lenta em ar (A), houve redução da resistência com o aumento da temperatura nos três traços. O concreto M2 foi o que apresentou melhor desempenho até a temperatura de 800 °C, mantendo 46% da resistência inicial. Na temperatura de 1000 °C, o traço M3 do concreto com aluminato de cálcio apresentou o melhor desempenho, tendo um menor percentual de redução da resistência quando comparado com o traço M2 para mesma condição. Nesta temperatura, o concreto padrão perdeu totalmente a resistência e se desintegrou. Além disso, é possível observar que a perda de resistência foi mais acentuada no resfriamento rápido, isso ocorre devido à decomposição do hidróxido de cálcio em temperaturas acima de 400 °C, formando óxido de cálcio (CaO). Quando o CaO entra em contato com a água, ocorre a reidratação, resultando na formação de compostos expansivos que danificam a matriz do concreto. Além disso, o choque térmico causado pelo resfriamento rápido gera fissuras no material, contribuindo para a degradação da resistência. As variações de resistência à compressão de concretos M1, M2 e M3 resfriados rapidamente (W) e lentamente (A) em função da temperatura são plotadas na Figura 21, onde é possível observar a redução mais acentuada em concreto com resfriamento lento, bem como o desempenho dos três traços.

Figura 21: Coeficientes de redução de resistência à compressão dos concretos de diferentes classes e resfriamento em função da variação da temperatura de exposição

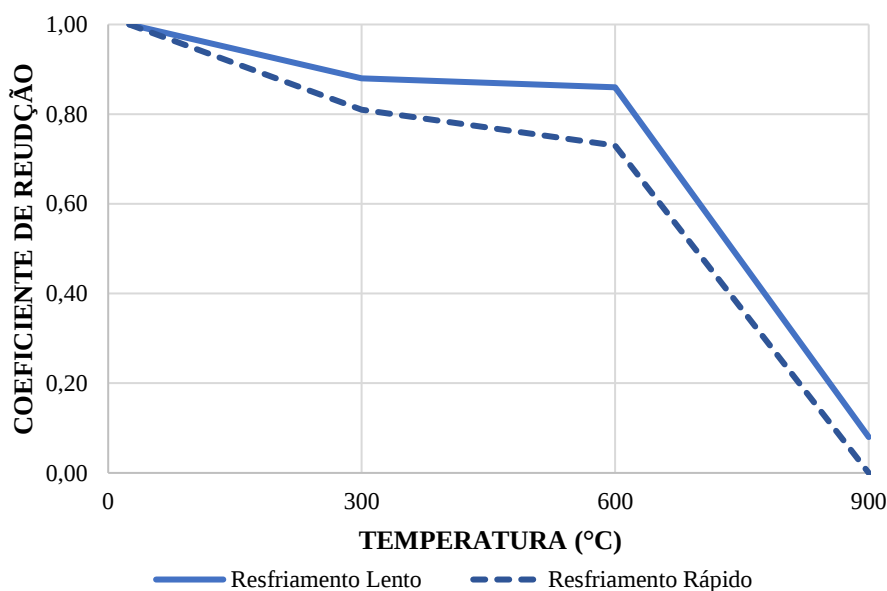


Fonte: Adaptado de Akçaözoglu & Akçaözoglu (2017)

Tendência semelhante também pode ser observado na Figura 22, que mostra coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura, nota-

se maior redução quando resfriado bruscamente, em concreto analisado por Souza e Moreno Jr. (2010b), reforçando que a forma de resfriamento é um fator importante, pois simula a resposta de uma estrutura durante a extinção de um incêndio.

Figura 22: Coeficientes de redução de resistência à compressão do concreto resfriado rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição



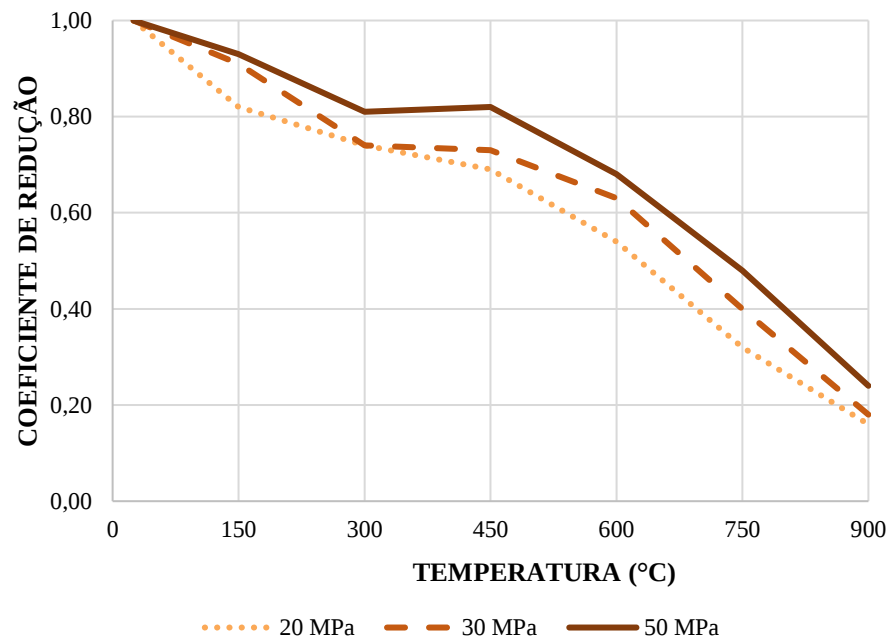
Fonte: Adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010b)

Esse mesmo comportamento foi estudado por Forigo, Lopes e Vanalli (2021), onde foram analisadas as variações nos valores de resistência à compressão conforme o aumento da temperatura e o tipo de resfriamento aplicado aos corpos de prova, em concreto de três classes diferentes, foram elas, de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa. Verifica-se um decréscimo acentuado na resistência à compressão entre a temperatura ambiente e 300 °C para todas as classes de concreto. No entanto, para o concreto com resistência à compressão de 50 MPa, a resistência residual percentual é 7% superior em comparação com os outros concretos, que mantiveram 74% de sua resistência inicial. Entre 300 °C e 450 °C, observa-se pouca redução, ou até um leve aumento na resistência, sem variações significativas entre essas duas temperaturas. A partir de 450 °C, ocorre novo e acentuado decréscimo, com a resistência residual variando entre 69% e 82%, até atingir 900 °C, quando essa variação é reduzida para 16% a 24%, correspondendo a uma redução média de 55%, esse comportamento pode ser visto na Figura 23.

Além disso, observa-se que concretos que passaram por resfriamento brusco, com imersão em água imediatamente após a exposição às temperaturas, exibiram maior perda de resistência à compressão, especialmente na faixa de 300 °C a 600 °C. Com o resfriamento lento, entre 300 °C e 450 °C, houve um aumento na resistência à compressão. tem-se os resultados

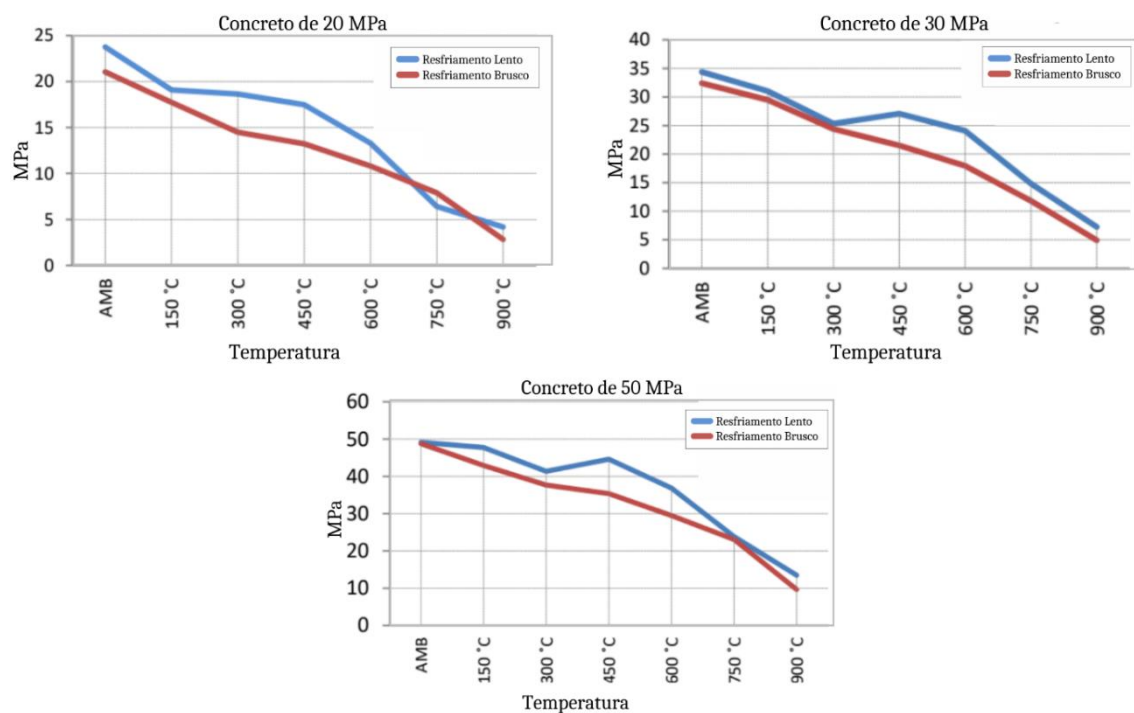
apresentados na Figura 24.

Figura 23: Coeficiente de redução das resistências à compressão por classe de concreto



Fonte: Adaptado de Forigo, Lopes e Vanalli (2021)

Figura 24: Variação da resistência a compressão, conforme tipo de resfriamento, para concretos de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa

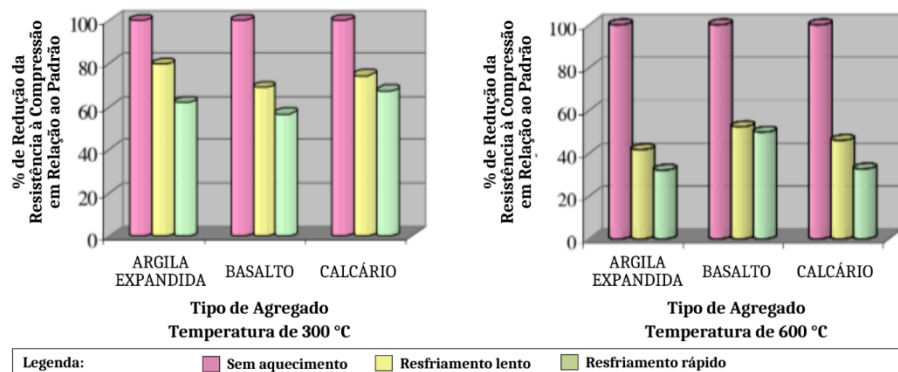


Fonte: Adaptado de Forigo, Lopes e Vanalli (2021)

O estudo de Souza (2005) analisou como os agregados influenciam o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas e os efeitos de diferentes métodos de resfriamento

lento e rápido. Observou-se que a resistência à compressão sofreu maiores reduções quando foi aplicado o resfriamento rápido por imersão em água, um método comum em situações de combate a incêndios. Para melhor interpretação os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 25.

Figura 25: % de Resistência à compressão em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento



Fonte: Adaptado de Souza (2005)

2.4.2. Resistência à tração

Quando se trata de resistência ao calor, a resistência à tração é fundamental, tendo em vista que é a principal causa de fissuração no concreto (Krishna; Priyadarsini; Narayanan, 2021). No entanto, na perspectiva de Kodur (2014), devido à resistência à tração do concreto ser insignificante em relação à de compressão, ela é muitas vezes menosprezada nos cálculos de resistência em temperaturas. Em contrapartida, Souza (2014) destaca que a resistência à tração é mais prejudicada pela ação térmica do que a resistência à compressão, indicando que os danos internos causados pelo aumento da temperatura afetam significativamente a capacidade do concreto de resistir a esforços de tração. Assim, a relação entre resistência à tração e resistência à compressão do concreto se altera conforme a temperatura aumenta.

Conforme a Eurocode 2 (CEN, 2004), a resistência à tração do concreto deve normalmente ser ignorada. Mas, se for necessário levar em conta a resistência à tração, ela pode ser considerada equivalente à resistência em temperatura ambiente, desde que a temperatura não ultrapasse 100 °C. Para temperaturas superiores, a resistência à tração pode ser estimada pela Equação 2.

$$f_{ct}(\theta) = k_{c,t}(\theta)f_{ck,t}$$

Equação 2

Na ausência de informações mais precisas, os seguintes valores $k_{c,t}(\theta)$ devem ser utilizadas as Equações 3 e 4.

$$k_{c,t}(\theta) = 1 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

Equação 3

$$k_{c,t}(\theta) = 1 - \frac{(\theta - 100)}{500} \text{ para } 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$$

Equação 4

Onde:

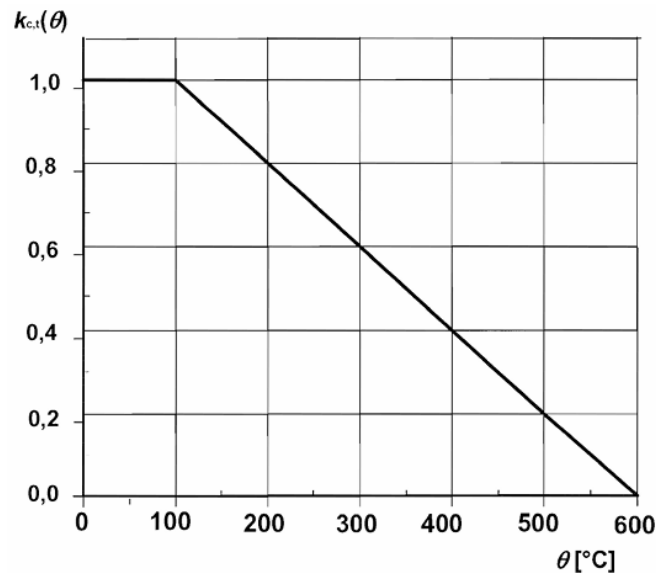
$f_{ck,t}$ = resistência à tração do concreto em temperatura ambiente;

$f_{ct}(\theta)$ = resistência à tração do concreto em temperatura elevada (θ);

$k_{c,t}(\theta)$ = Coeficiente de redução da resistência à tração em temperatura elevada (θ).

Na Figura 26 é possível visualizar graficamente o coeficiente obtido nas equações.

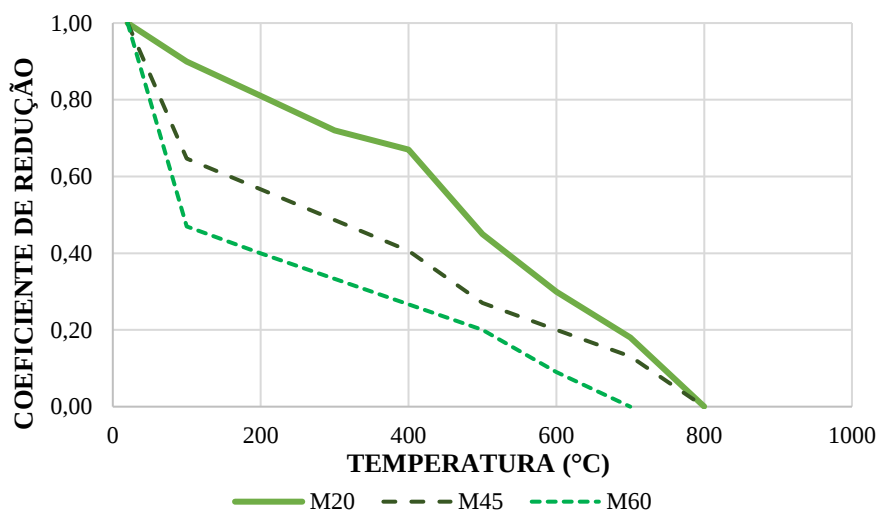
Figura 26: Coeficiente de redução $k_{c,t}(\theta)$ da resistência à tração ($f_{ck,t}$) do concreto em temperaturas elevadas



Fonte: Eurocode 2 (CEN, 2004)

Em seus estudos Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021), analisam concretos de três classes resistências à compressão diferentes (M20, M45 e M60), nota-se que quanto maior a resistência à compressão do concreto maior sua redução da resistência à tração quando submetido a altas temperaturas. A taxa de redução na resistência à tração é mais acentuada após 400 °C, o concreto mais resistente à tração se torna insignificante, enquanto que para os outros concretos isso ocorre após 800 °C. Devido à expansão de microfissuras quando expostas a temperaturas elevadas, ocorre a fragmentação. Portanto, é recomendável considerar a resistência à tração em temperaturas elevadas. Na Figura 27 é possível verificar a redução mais acentuada para o concreto mais resistente, seguido do concreto de resistência média e, por último, o de menor resistência.

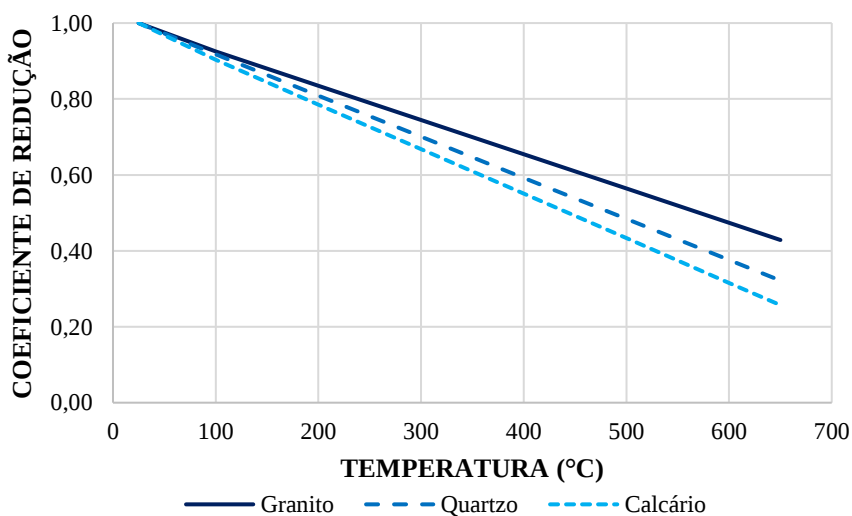
Figura 27: Coeficientes de redução de resistência à tração de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021)

Tufail *et al.* (2017) analisam concreto composto por três tipos de agregados, onde demonstram que o concreto de calcário em temperatura ambiente forneceu uma resistência à tração de 2,47 MPa, enquanto o mesmo para concretos de quartzito e granito foi de 3,14 e 3,99 MPa (27 e 62% maior), respectivamente. Como esperado, a resistência à tração dos concretos independente da composição é reduzida à medida que a temperatura aumenta. A 650 °C, a resistência à tração dos concretos de calcário, quartzito e granito reduziu 76%, 70% e 56% e diminuiu em 0,36, 0,34 e 0,29 MPa, respectivamente, para cada aumento de 100 °C na temperatura. Reforçando os dados expostos, na Figura 28 é possível verificar a redução mais acentuada para concreto de calcário, seguida do de quartzito e granito.

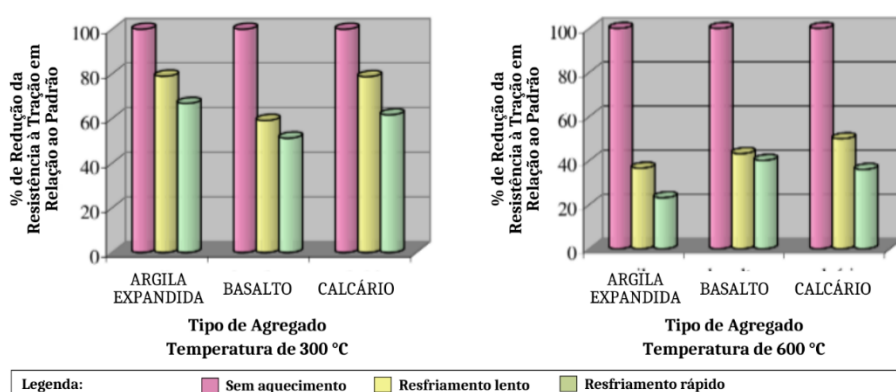
Figura 28: Coeficientes de redução de resistência à tração dos concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Tufail *et al.* (2013)

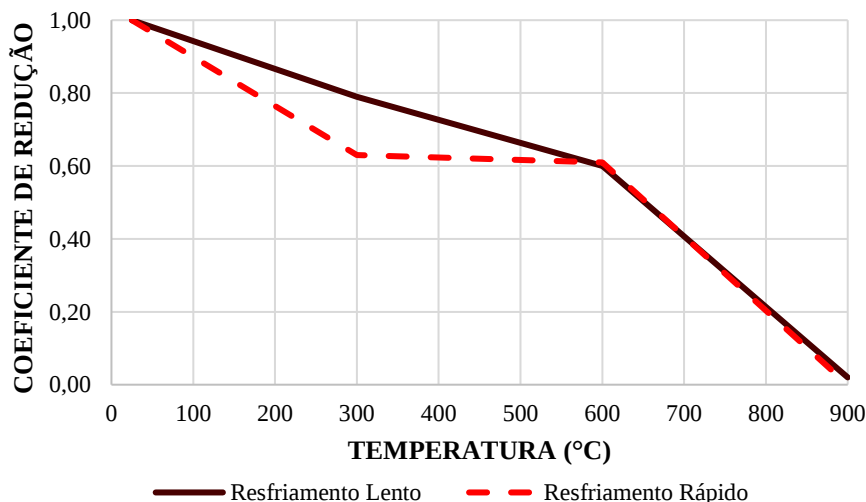
Ainda relacionando tipos de agregados, semelhante à resistência à compressão, Souza (2005) observou que a mistura que utilizou o basalto como agregado graúdo foi a que apresentou maior redução. Em 300 °C a mistura utilizando a argila expandida apresentou redução semelhante à mistura utilizando calcário, mas em 600 °C a o comportamento é deficiente em relação às outras misturas. A autora também avaliou a influência do tipo de resfriamento, seja ele, rápido ou lento, onde notou-se que a resistência à tração sofreu maiores reduções quando foi aplicado o resfriamento rápido por imersão em água como é possível observar na Figura 29.

Figura 29: % de Resistência à tração em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento



Uma tendência semelhante em relação ao tipo de resfriamento foi identificada por Souza e Moreno Jr. (2010b), conforme ilustrado na Figura 30. Esta figura apresenta o coeficiente de redução da resistência à tração do concreto em função da temperatura. Observa-se que, ao resfriar rapidamente, há uma redução significativa na resistência entre 25 °C e 300 °C. No entanto, entre 300 °C e 600 °C, a redução torna-se praticamente insignificante, se aproximando dos resultados obtidos com o resfriamento lento.

Figura 30: Coeficientes de redução de resistência à tração do concreto resfriado rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010b)

2.4.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é um parâmetro essencial no dimensionamento de estruturas de concreto, pois está diretamente relacionado à análise das deformações que o material sofrerá sob carga. Sua consideração é crucial para garantir um comportamento estrutural adequado em termos de resistência e segurança (Dias, 2020). Em condições normais de temperatura, o módulo de elasticidade do concreto geralmente aumenta conforme a resistência do material aumenta (Sollero, 2018).

Segundo Neville (2016), esse módulo é reduzido progressivamente com o aumento da temperatura, e essa diminuição depende do tipo de agregado utilizado. Comparado à resistência à compressão, o módulo de elasticidade é mais afetado pela elevação da temperatura, pois sofre maior influência das fissurações na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados (Mehta e Monteiro, 2014).

Conforme o Eurocode 2 (CEN, 2004), à medida que a temperatura aumenta, o módulo de elasticidade do concreto diminui. Essa diminuição é estimada pelo coeficiente k_{cE} , (θ) que é o mesmo fornecido para resistência à compressão citado anteriormente. O módulo de elasticidade do concreto exposto à altas temperaturas pode ser calculado pela Equação 5.

$$E_c(\theta) = k_{cE}(\theta)E_c$$

Equação 5

Onde:

$E_c(\theta)$ = Módulo de elasticidade do concreto em temperatura elevada (θ);

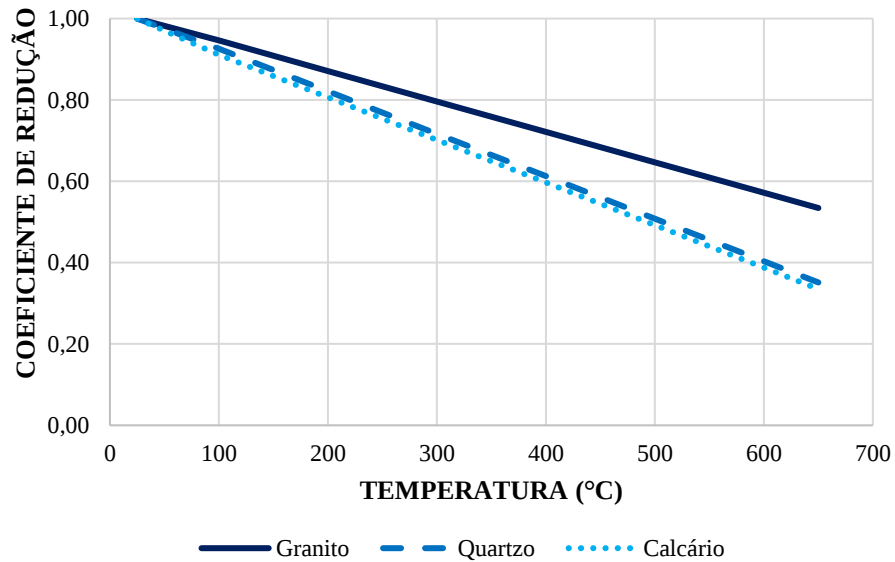
$k_{cE}(\theta)$ = Coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura θ , sendo $k_{cE}(\theta) = k_c^2(\theta)$;

E_c = Módulo de elasticidade do concreto à temperatura ambiente.

Tufail *et al.* (2017) realizaram uma análise de concretos compostos por diferentes tipos de agregados e observaram que o concreto com granito e quartzito apresentou módulos de elasticidade 36% e 66% maiores, respectivamente, em comparação ao concreto com calcário. No entanto, sob altas temperaturas, foi registrada uma redução do módulo de elasticidade de 2,41 MPa para o concreto com calcário, 2,86 MPa para o com granito e 3,26 MPa para o com quartzito a cada aumento de 100 °C. Esse fenômeno ocorre porque a degradação dos agregados grãos é uma das principais causas da diminuição das propriedades mecânicas dos concretos a altas temperaturas. Agregados como o basalto, que possuem um baixo coeficiente de expansão térmica, ajudam a manter a rigidez do concreto, enquanto agregados calcários, que se decompõem a altas temperaturas, aceleram a perda de rigidez. A Figura 31, ilustra o estudo dos

autores.

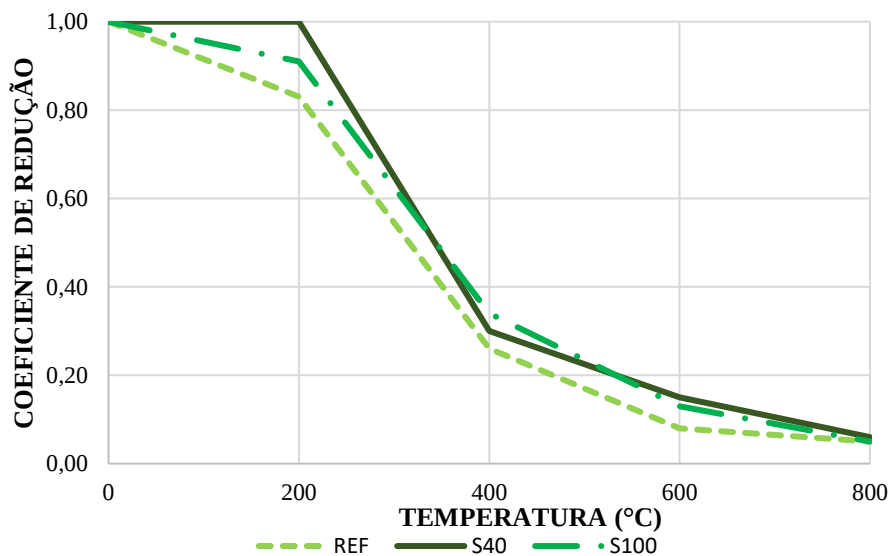
Figura 31: Coeficientes de redução do módulo de elasticidade de concretos de diferentes agregados em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Tufail *et al.* (2017)

Se tratando do concreto composto por agregados leves, os pesquisadores Passos, Moreno Jr. e Souza (2020) em seu estudo já citado anteriormente, também analisaram o módulo de elasticidade desses concretos quando exposto a temperaturas elevadas, os resultados apresentam uma queda mais acentuada no módulo de elasticidade em temperaturas elevadas, isso ocorre, devido à menor densidade e resistência desses agregados, que contribuem para uma estrutura menos rígida ao aquecimento (Figura 32).

Figura 32: Valores da redução dos módulos de elasticidade das misturas de concreto com teores de substituição (0%, 40% e 100%)

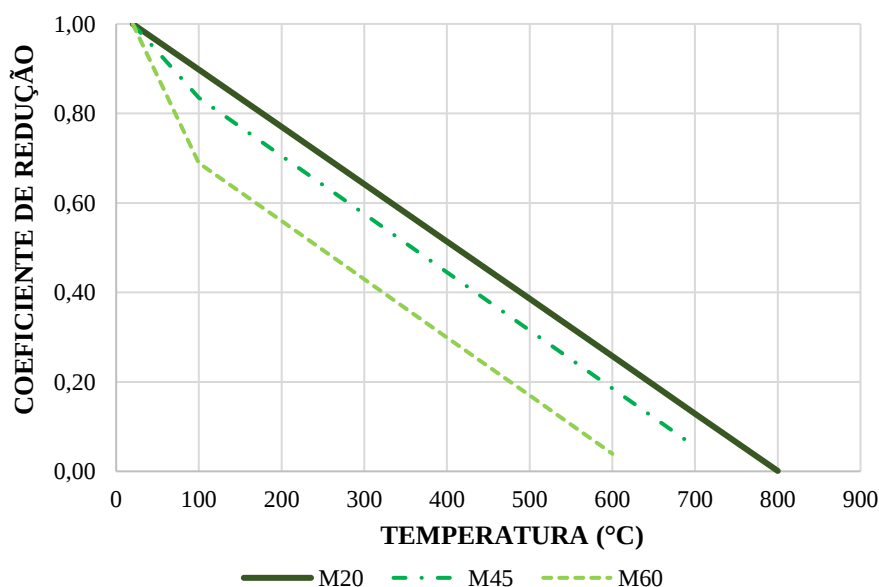


Fonte: Passos, Moreno Jr. e Souza (2020)

De acordo com Dias *et al.* (2020), o módulo de elasticidade é uma das propriedades mais afetadas pelo aumento da temperatura. Eles notaram que, embora não haja redução significativa do módulo de elasticidade para concretos aquecidos a 200 °C, a partir de 400 °C a redução foi de 27%. Em temperaturas superiores, como 600 °C e 800 °C, a redução do módulo de elasticidade chegou a 75% e 92%, respectivamente. Franchetto (2022) também constatou uma perda significativa do módulo de elasticidade já a partir de 200 °C, com uma redução de até 32%, sendo que o módulo residual é menor do que o recomendado pela NBR 15200 (ABNT, 2024) até 600 °C. Acima de 800 °C, os valores se tornam praticamente insignificantes.

Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021), ao analisar o comportamento de três diferentes graus de concreto M20, M45 e M60 ao ser exposto a altas temperaturas, observam que a taxa de diminuição do módulo de elasticidade é maior para concretos de alta resistência. Independentemente do grau do concreto, o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura. Além disso, o estudo analisou o impacto do tempo de permanência em alta temperatura e o tipo de resfriamento (água ou ar), revelando que amostras resfriadas em água possuem 30% menos resistência residual comparadas às resfriadas a ar, independentemente do tipo de concreto e do tempo de exposição à temperatura. Na Figura 33, é possível observar o comportamento dos concretos estudados.

Figura 33: Coeficientes de redução de módulo de elasticidade de concretos de diferentes classes em função da variação da temperatura de exposição

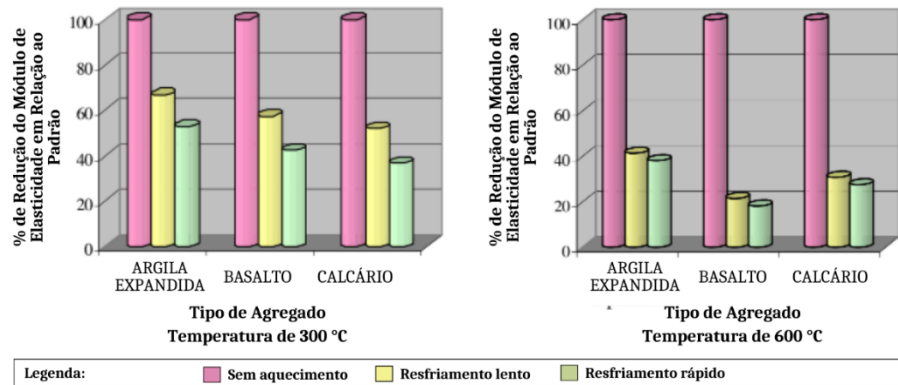


Fonte: Adaptado de Krishna, Priyadarsini e Narayanan (2021)

Semelhante à resistência à compressão e à tração, Souza (2005) observou que a mistura que utilizou o basalto como agregado graúdo foi a que apresentou maior redução. O módulo de elasticidade é a propriedade do concreto, submetido ao calor, que sofreu maiores reduções. Em

300 °C a mistura utilizando o calcário apresentou maior redução, mas em 600 °C o agregado basalto apresentou menores valores comparado aos outros. Em relação ao tipo de resfriamento, notou-se que o módulo de elasticidade apresentou maiores reduções quando foi resfriado rapidamente, por imersão em água como observa-se na Figura 34.

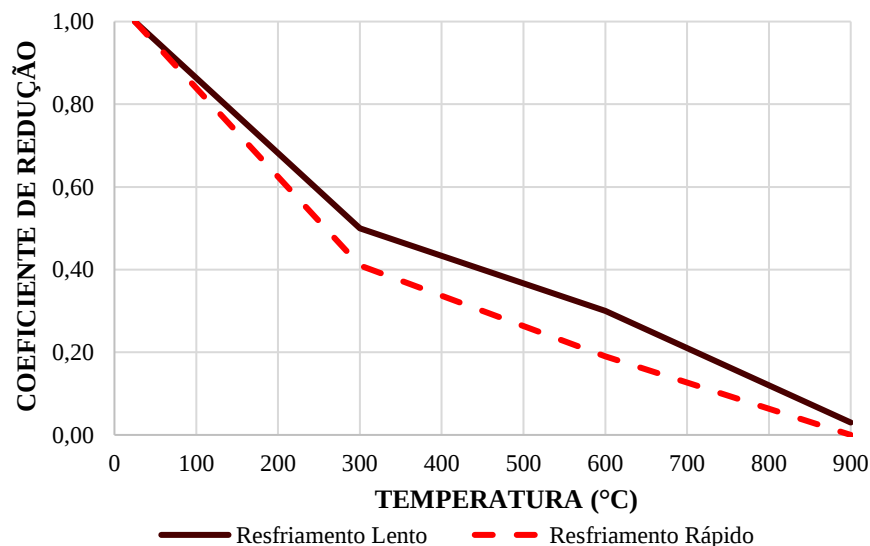
Figura 34: % de Módulo de Elasticidade em função do tipo de agregado, temperatura máxima e tipo de resfriamento



Fonte: Adaptado de Souza (2005)

Em relação ao tipo de resfriamento Souza e Moreno Jr. (2010b), também identificaram maior redução do módulo de elasticidade do concreto quando resfriado rapidamente, como pode ser visto na Figura 35.

Figura 35: Coeficientes do módulo de elasticidade do concreto resfriado rapidamente e lentamente em função da variação da temperatura de exposição



Fonte: Adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010b)

Em resumo, o módulo de elasticidade do concreto é um parâmetro que deve ser cuidadosamente considerado no projeto estrutural, especialmente em condições de altas temperaturas, onde sua redução pode comprometer a segurança e o desempenho das estruturas.

A escolha do tipo de agregado e a consideração dos efeitos térmicos são fundamentais para garantir a integridade e a eficácia das estruturas de concreto.

2.5. ALTERAÇÕES VISUAIS NO CONCRETO

Altas temperaturas são amplamente reconhecidas por causar danos significativos à micro e mesoestrutura do concreto, resultando em uma deterioração mecânica generalizada. Esse processo pode gerar efeitos prejudiciais em nível estrutural, como o lascamento e fissuração do concreto e a consequente exposição das armaduras ao fogo, especialmente em situações de incêndio (Ma *et al.*, 2015). Isso ocorre, pois a evaporação da água, a desintegração dos produtos de hidratação e o aumento da porosidade, são os principais responsáveis pelas modificações no comportamento mecânico.

Arioz (2007) ressalta que os danos ao concreto devido a altas temperaturas podem ser detectados visualmente, observando mudanças de cor, rachaduras e lascas na sua superfície. A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002) destaca que a inspeção visual é um dos ensaios não destrutivos mais importantes, permitindo identificar sinais como rachaduras, saliências, fragmentação, manchas, desintegração, falta de uniformidade e mudanças de cor, que indicam a condição da estrutura.

2.5.1. Fenômeno de *Spalling*

O fenômeno de lascamento, internacionalmente conhecido como *spalling*, ocorre devido à perda das camadas superficiais de elementos de concreto quando estes são submetidos a uma elevação rápida de temperatura, como em situações de incêndio (Gil *et al.*, 2018). Conforme Costa *et al.* (2002), esse fenômeno se caracteriza pelo desprendimento de porções consideráveis do concreto endurecido na superfície dos elementos estruturais.

Esse processo é particularmente crítico em incêndios, pois, além de reduzir a espessura e a resistência do concreto, expõe as armaduras à corrosão, afetando a durabilidade e a segurança das estruturas. Para engenheiros e projetistas, compreender o comportamento do concreto sob altas temperaturas é essencial para evitar danos estruturais e melhorar as práticas de proteção contra incêndios em construções e infraestruturas (Mehta e Monteiro, 2014).

De acordo com Costa e Silva (2002), o *spalling* explosivo é comum em concretos de alta resistência, já que em poucos experimentos os corpos de prova aquecidos não apresentam lascamentos instantâneos. Tal ocorrência é evitada apenas com taxas de aquecimento extremamente baixas, entre 1 °C/min e 5 °C/min, inferiores ao padrão de incêndio. O Eurocode 2 (CEN, 2004) limita o teor de umidade livre a 3% em concretos convencionais para reduzir o

risco de *spalling* explosivo, protegendo as estruturas de concreto, pois a perda de material expõe diretamente as armaduras ao fogo, facilitando o aquecimento progressivo das camadas internas devido à remoção da superfície protetora.

O concreto, composto por materiais com diferentes coeficientes de expansão, como cimento e agregados, sofre dilatação térmica desigual em altas temperaturas, o que gera tensões internas, microfissuras e fragmentação superficial (Neville, 2016). Em incêndios, essas tensões podem resultar no descolamento abrupto da camada externa, fenômeno chamado de *spalling* térmico. Souza e Moreno Jr. (2010a) destacam que o tipo de agregado graúdo é um dos fatores mais relevantes que influenciam o lascamento e que concretos leves são mais suscetíveis ao fenômeno em comparação com concretos de densidade convencional.

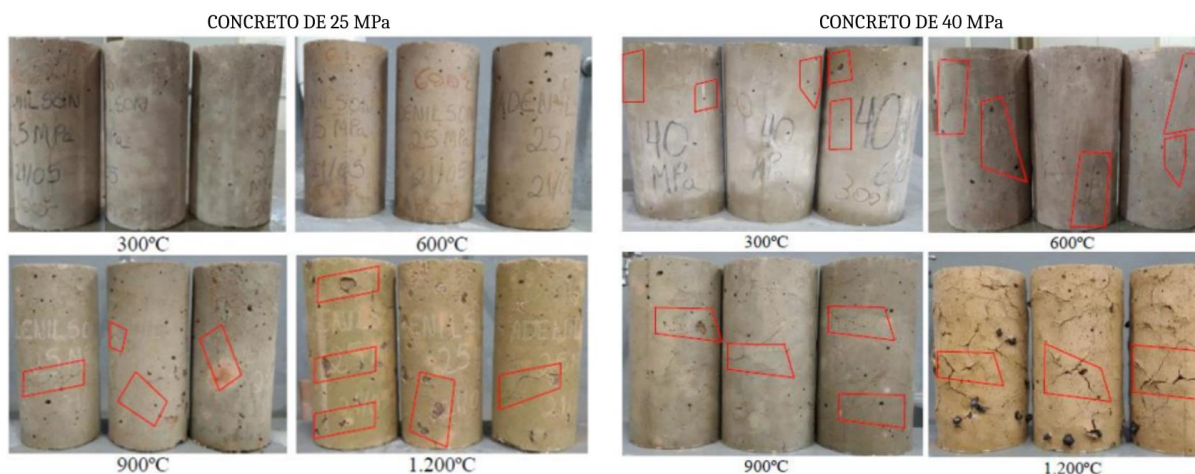
Souza e Moreno Jr. (2010a) observam ainda que não há um procedimento de ensaio normatizado para avaliar a tendência ao lascamento explosivo do concreto em laboratório. Não estão estabelecidos padrões quanto ao tamanho e preparo das amostras, tempo de exposição ao calor, evolução da temperatura ou quantificação do fenômeno.

Britez e Costa (2011) apontam que a intensidade do deslocamento no concreto é influenciada por fatores como idade do concreto, materiais usados na composição, teor de umidade, permeabilidade e presença de fibras. A adição de fibras de polipropileno, por exemplo, pode reduzir o *spalling* em altas temperaturas, pois essas fibras, ao derreterem e se transformarem em cinzas, criam vazios no concreto. Esses vazios permitem a saída do vapor d'água, diminuindo a pressão interna e reduzindo o risco de deslocamento.

Pressões internas e a desidratação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) causam microfissuras que contribuem para o surgimento do *spalling*. Agregados ricos em sílica, como granito, arenito e gnaiss, ao serem aquecidos, causam danos ao concreto devido à sua expansão térmica. Outro fator significativo é o método de resfriamento: o resfriamento brusco altera as propriedades da pasta de cimento Portland, levando à reidratação e formação de novos componentes cristalizados que se expandem, causam microfissuras e geram *spalling* na zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento (Coelho *et al.*, 2019).

Em seus estudos Coelho *et al.* (2019), analisaram concretos com duas classes de resistência distintas (25 MPa e 40 MPa), observou-se que o lascamento ocorre de forma mais acentuada em temperaturas acima de 600 °C, especialmente no concreto de 40 MPa (Figura 36). Esse comportamento é atribuído ao aumento da fragilidade em concretos de maior resistência, que apresentam uma tendência maior a fissuras e rupturas, uma vez que as pressões internas nos poros superam a capacidade de resistência do material, resultando em fissuras na zona de transição entre o cimento e o agregado.

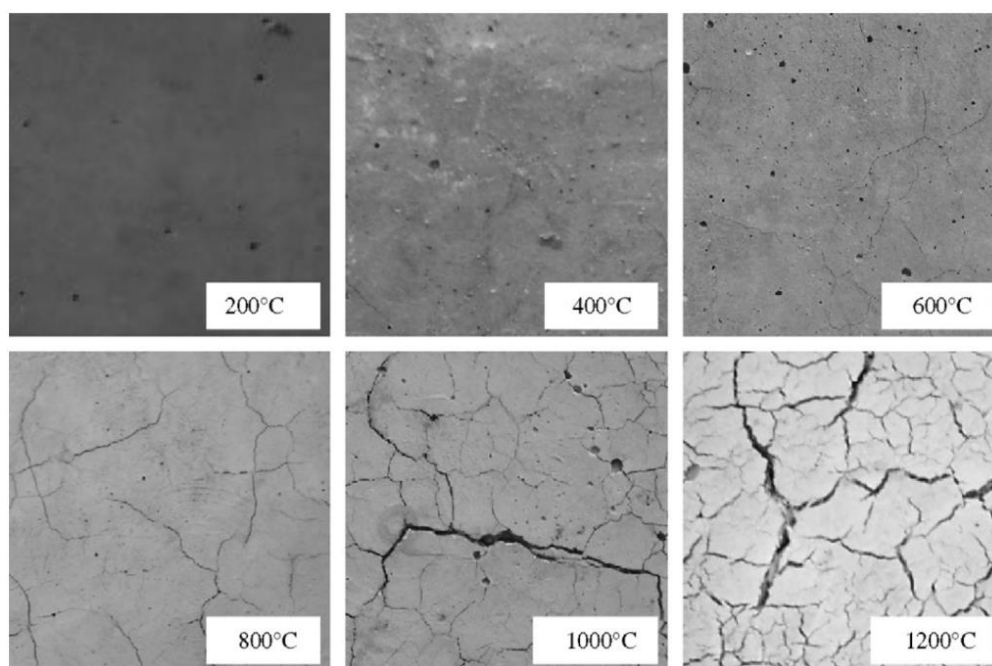
Figura 36: *Spalling* no concreto com Fck de 25 MPa e 40MPa



Fonte: Coelho *et al.* (2019)

Arioz (2007) destaca que o *spalling* pode reduzir consideravelmente a capacidade de carga de uma estrutura, e o *spalling* térmico explosivo pode fragmentar o concreto em pedaços de forma repentina. No concreto analisado por ele, até 400 °C não há efeitos visíveis. A 600 °C, o concreto começa a rachar de maneira sutil, a 800 °C as rachaduras se tornam mais evidentes, a 1000 °C elas se intensificam ainda mais, e a 1200 °C o concreto se decompõe completamente, perdendo suas propriedades de aderência, com lascas visíveis devido à formação contínua de fissuras (Figura 37). Essa falha ocorre devido à formação de fissuras paralelas, à degradação da resistência e à pressurização dos poros.

Figura 37: Textura superficial das amostras de concreto expostas a temperaturas elevadas.



Fonte: Arioz (2007)

Passos, Moreno Jr. e Souza (2020) investigaram o possível lascamento de misturas de

concreto leve, produzidas com substituição de 40% e 100% do agregado natural silicoso por agregado leve proveniente de resíduo cerâmico, ao serem submetidas a temperaturas de até 925 °C. Para isso, utilizaram a Curva Padrão da ISO 834 (2014), com exposição de 60 minutos. Dado que não existem procedimentos normatizados, seja nacional ou internacional, para esse tipo de avaliação, os autores adotaram o método proposto por Souza e Moreno Jr. (2010b). Esse método consiste em aquecer uma das faces de uma amostra prismática de 150 x 150 mm de seção transversal e 100 mm de espessura. O aquecimento foi realizado aos 100 dias de idade das amostras. Antes da exposição térmica, as amostras foram colocadas em estufa a 100 °C até atingirem a constância de massa, e, após esse estágio, uma das faces foi saturada com água e aquecida. Os autores concluíram que, em relação à tendência ao lascamento, os concretos produzidos com resíduos de cerâmica vermelha se mostraram estáveis, não apresentando lascamento mesmo quando expostos a temperaturas superiores a 800 °C.

2.5.2. Fissuração

A fissuração do concreto é um dos principais efeitos causados pela exposição a altas temperaturas, ocorrendo quando o material é submetido a aquecimento intenso, como em situações de incêndio. Esse fenômeno está relacionado ao desenvolvimento de tensões internas que excedem a capacidade de resistência do concreto, resultando em fissuras e microfissuras na sua estrutura. A presença dessas fissuras compromete tanto a durabilidade quanto a integridade estrutural e expõe as armaduras à corrosão, reduzindo a vida útil das edificações (Mehta e Monteiro, 2014; Neville, 2016).

Conforme Mehta e Monteiro (2014), as diferenças de expansão térmica entre os componentes do concreto aumentam o risco de fissuração em temperaturas superiores a 300 °C, pois os componentes se expandem de maneira desigual, gerando tensões internas. Essa dilatação térmica diferencial entre a pasta de cimento e os agregados cria microfissuras que, ao se propagarem, comprometem a integridade estrutural do concreto.

À medida que a temperatura aumenta, a água presente nos poros do concreto evapora, reduzindo a coesão da estrutura. A partir de aproximadamente 100 °C, a água livre começa a evaporar, gerando microfissuras que se expandem com o aumento da temperatura. Em níveis ainda mais altos (acima de 400 °C), ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio na matriz cimentícia, resultando em uma significativa perda de resistência e aumento da fragilidade do concreto, o que leva ao surgimento de fissuras maiores e fragiliza toda a estrutura (Neville, 2016).

Em temperaturas superiores a 600 °C, as fissuras podem se tornar visíveis, muitas

vezes comprometendo a funcionalidade da estrutura. Mehta e Monteiro (2014) observam que, em incêndios, a fissuração no concreto pode progredir rapidamente, especialmente em elementos de suporte de carga, como pilares e vigas, o que pode levar a colapsos parciais ou totais.

Costa, Figueiredo e Silva (2002) sugerem que a incorporação de ar pode melhorar a resistência do concreto a tensões térmicas, ampliando o espaço interno disponível para o vapor, o que, durante o aquecimento, alivia as tensões, reduzindo o risco de fissuras térmicas. Eles explicam que o colapso dos vazios durante o aquecimento aumenta o volume de poros, o que ajuda a aliviar essas tensões internas.

No estudo de Passos, Moreno Jr. e Souza (2020), não foi observado *spalling* nas amostras de concreto analisadas. No entanto, a mistura de concreto com 100% de substituição de agregado natural silicoso pelo agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou uma fissuração menos agressiva em comparação com a amostra de referência (Figura 38).

Figura 38: Corpos de prova, apresentando fissuras após ensaio de lascamento explosivo (temperatura: 925 °C).



Fonte: Passos, Moreno Jr. (2020)

2.5.3. Mudança na coloração

Segundo a IAEA (2002), a mudança de cor do concreto é um indicador amplamente reconhecido da extensão dos danos causados pelo fogo, embora deva ser analisada com cautela. Silva (2013) reforça que a avaliação de estruturas afetadas por incêndio geralmente começa com uma inspeção visual, que busca identificar alterações de cor no concreto, uma vez que o aumento de temperatura ocasiona mudanças gradativas na coloração do material. Lima (2005) destaca que, embora a mudança de cor possa ser usada como um parâmetro para indicar a temperatura máxima atingida, a análise deve ser cuidadosa, pois a alteração depende também do tipo de agregado utilizado.

De acordo com Neville (2016) e Lima (2005), essa alteração de cor se deve à presença

de componentes ferrosos na mistura de concreto e pode servir como um parâmetro indicativo da temperatura máxima alcançada e da duração da exposição ao fogo. Essas informações são essenciais para avaliar possíveis perdas de componentes químicos que desempenham papel fundamental nas propriedades mecânicas do concreto.

A mudança de coloração é uma das manifestações visíveis no concreto quando submetido a altas temperaturas, especialmente em incêndios ou outras fontes intensas de calor. Essas alterações não são apenas estéticas, mas indicam modificações internas na microestrutura do concreto, relacionadas à decomposição de compostos, oxidação de materiais e outras reações químicas provocadas pelo calor. A cor resultante varia de acordo com a intensidade e duração da exposição térmica, oferecendo um indicativo visual das temperaturas atingidas e dos danos sofridos pelo concreto. Esse fenômeno é essencial para a avaliação estrutural pós-incêndio, pois a coloração do concreto fornece pistas sobre sua integridade e possível perda de resistência (Mehta e Monteiro, 2014; Neville, 2016).

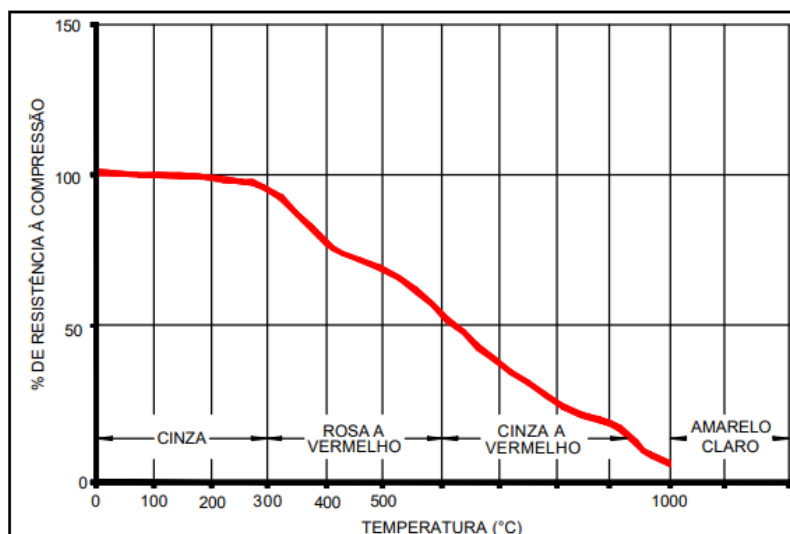
Em temperaturas próximas a 200 °C, o concreto adquire uma tonalidade acinzentada; embora a resistência à compressão ainda não sofra reduções significativas, a partir desse ponto ela começa a diminuir gradativamente. Em temperaturas acima de 300 °C, o processo acelera e, até 600 °C, a coloração do concreto pode variar de rosa a vermelho (Lima, 2005).

Neville (2016) explica que essas mudanças de cor ocorrem devido à decomposição dos compostos hidratados do cimento, como o hidróxido de cálcio, cuja desidratação resulta em uma tonalidade acinzentada. Em temperaturas superiores a 600 °C, a coloração pode escurecer ainda mais conforme os materiais se deterioram e perdem suas propriedades ligantes.

A presença de cores avermelhadas ou alaranjadas indica temperaturas suficientemente elevadas para oxidar os agregados e enfraquecer a pasta de cimento, sinalizando uma potencial perda de resistência (Mehta e Monteiro, 2014). Mudanças de coloração para tons escuros ou negros indicam também danos à coesão microestrutural e à proteção das armaduras. Esses sinais visuais ajudam os engenheiros na decisão sobre reparos ou substituições de componentes afetados, sendo uma ferramenta útil na inspeção pós-incêndio para avaliar se a estrutura ainda mantém sua capacidade de carga (Neville, 2016).

Em relação à alteração na cor, Georgali e Tsakiridis (2005) ressaltam que quando aquecido o concreto pode apresentar uma mudança de cor gradual: entre 300 °C e 600 °C, passa de sua tonalidade normal para rosa; entre 600 °C e 900 °C, adquire um tom cinza-esbranquiçado; e, acima de 900 °C, pode assumir uma coloração amarelo-claro. Cánovas (1988) apresenta graficamente a perda de resistência à compressão do concreto em função de sua coloração e temperatura de exposição, conforme ilustrado na Figura 39.

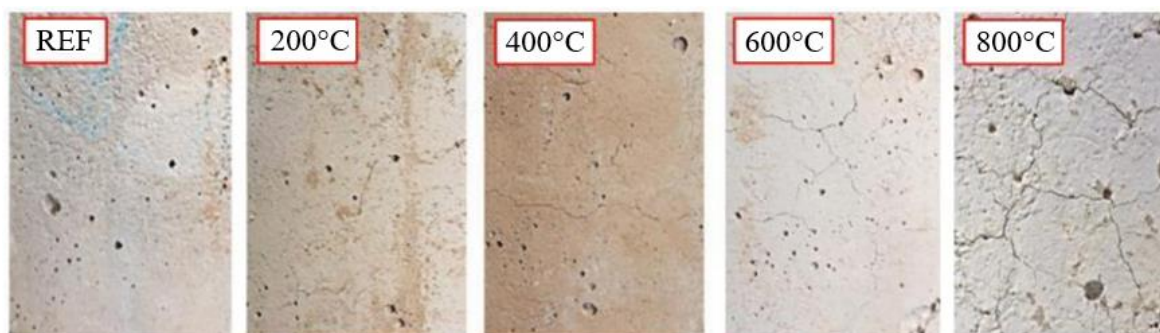
Figura 39: Alteração na resistência à compressão e coloração do concreto.



Fonte: Cánovas (1988)

A coloração da superfície externa dos concretos estudados por Dias *et al.* (2020) é apresentada na Figura 40, apresentando coloração informada por Cánovas (1988) e Georgali e Tsakiridis (2005).

Figura 40: Variação da coloração da superfície externa dos corpos de prova de concreto após exposição a determinadas



Fonte: Dias *et al.* (2020)

2.6. MEDIDAS DE PREVENÇÃO E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO

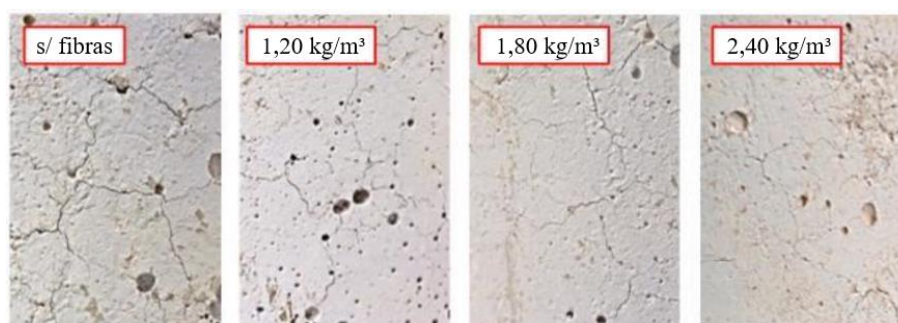
2.6.1. Medidas de prevenção - Adição de fibra

Lima (2005) afirma que para melhorar o desempenho do concreto quanto à ocorrência de lascamentos, pode-se incorporar fibras de polipropileno ou “coquetel de fibras” (fibras poliméricas associadas às fibras de aço) na mistura. Com o aquecimento, estas fibras irão se decompor, gerando assim, espaços vazios dentro do concreto (porosidade) e possibilitando assim que o vapor gerado pelo aumento de temperatura encontre um caminho para escapar para o ambiente, evitando, dessa forma, a ocorrência de lascamentos explosivos.

Em seus estudos, Dias *et al.* (2020) investigaram a adição de fibra de polipropileno em

diferentes teores e concluíram que a adição de fibras ajudou a prevenir o fenômeno de *spalling* no concreto. Foi observado que, até 600 °C, não houve *spalling* em nenhum dos concretos com fibras, enquanto o concreto de referência já apresentava lascamento, especialmente nos concretos de 50 MPa, que possuem menor permeabilidade e estrutura mais densa. Aos 800 °C, o *spalling* ocorreu em todos os concretos com fibras de polipropileno, mas foi menos intenso no concreto com maior teor de adição (2,40 kg/m³). A Figura 41 ilustra as imagens da superfície dos corpos de prova logo após a exposição a 800 °C, destacando a região mais crítica com maior presença de *spalling*, em uma área de 3,5 cm de largura por 5,0 cm de altura.

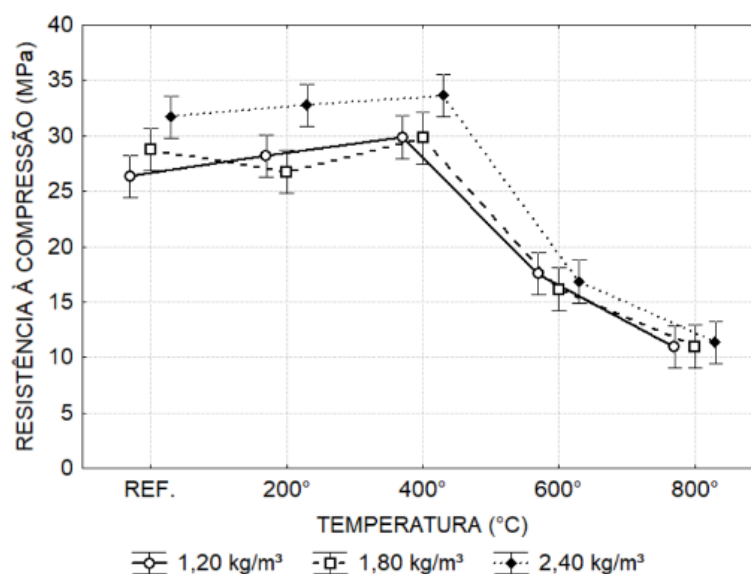
Figura 41: Diminuição da ocorrência do *spalling* no concreto à medida que se aumenta o teor de fibra de polipropileno



Fonte: Dias *et al.* (2020)

Em relação à resistência à compressão, verificou-se que o teor de fibra de polipropileno tem uma influência significativa na resistência do concreto após a exposição a altas temperaturas. A Figura 42 apresenta o comportamento dos concretos com os três teores de fibra quando aquecidos.

Figura 42: Influência da temperatura na resistência à compressão para traços contendo diferentes teores de fibra.



Fonte: Dias *et al.* (2020)

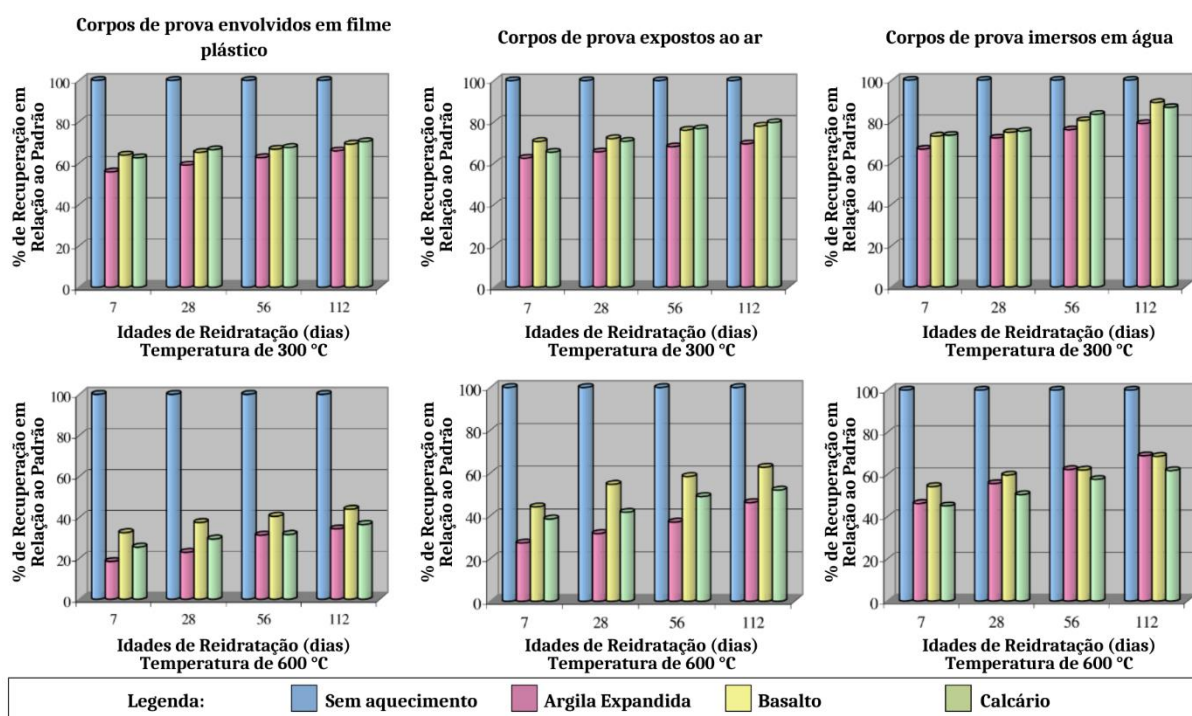
2.6.2. Recuperação por meio da reidratação do concreto

De acordo com Cánovas (1988), se o concreto for exposto a temperaturas de até 500 °C, este pode sofrer uma reidratação posterior que pode fazê-lo recuperar até 90% de sua resistência inicial após um ano.

Em seus estudos Souza (2005), avalia a recuperação da resistência à compressão de concretos com diferentes agregados, considerando o tipo de reidratação. Os resultados mostram que a recuperação é principalmente influenciada pelo método de reidratação, e não pelo tipo de agregado. Por exemplo, ao reidratar concretos por imersão em água por 112 dias, a resistência à compressão recupera cerca de 82%, a resistência à tração atinge 90%, e o módulo de elasticidade pode superar 80%. Os resultados confirmam a possibilidade de recuperação significativa da resistência mecânica de concretos após incêndios, mesmo com reidratação ao ambiente. Na Figura 43, 44 e 45 é possível visualizar graficamente os resultados dos ensaios.

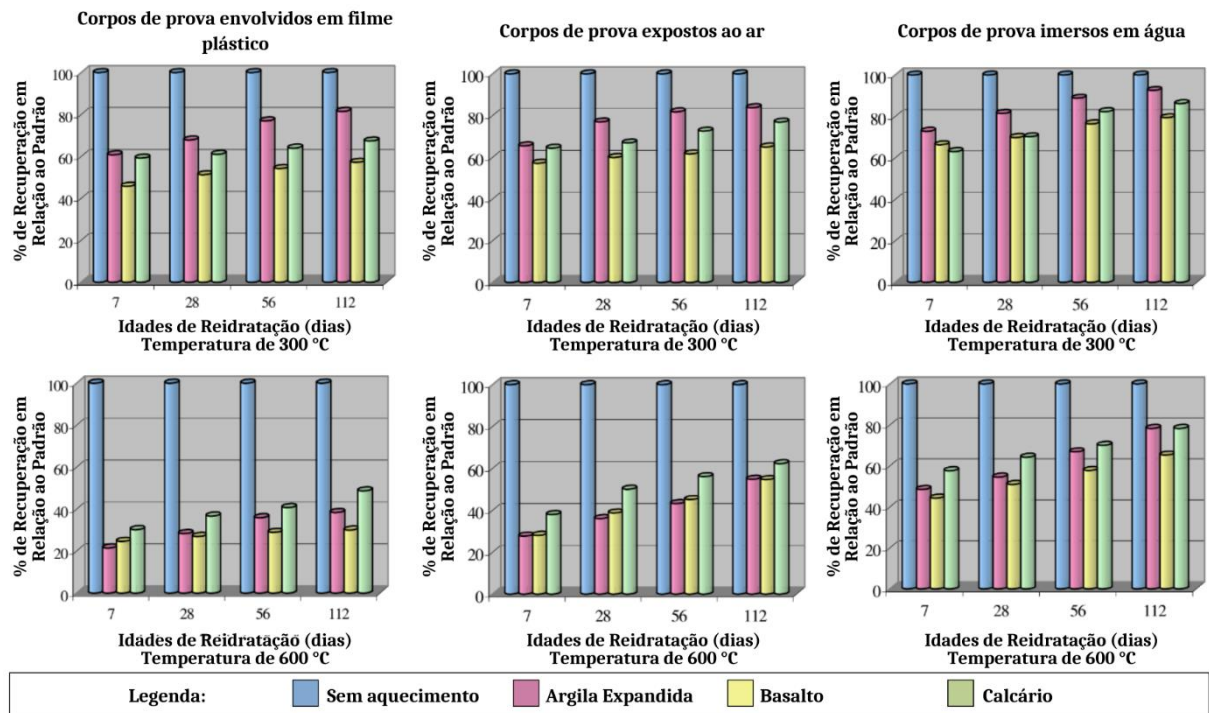
Os resultados de Souza (2005) mostram que a recuperação é principalmente influenciada pelo método de reidratação, e não pelo tipo de agregado. Uma vez que, a reidratar concretos por imersão em água por 112 dias, a resistência à compressão recupera cerca de 82%, a resistência à tração atinge 90%, e o módulo de elasticidade pode superar 80%. Os resultados confirmam a possibilidade de recuperação significativa da resistência mecânica de concretos após incêndios, mesmo com reidratação ao ambiente.

Figura 43: Evolução da recuperação da resistência à compressão do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.



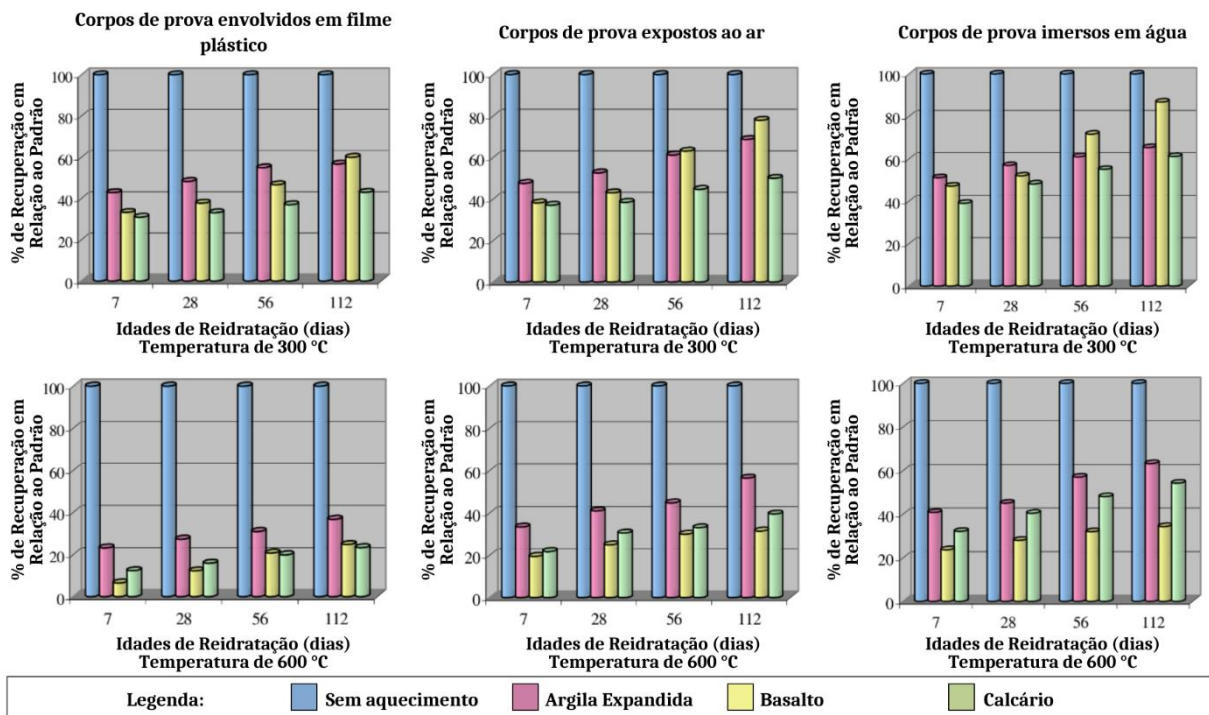
Fonte: Souza (2005)

Figura 44: Evolução da recuperação da resistência à tração do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.



Fonte: Souza (2005)

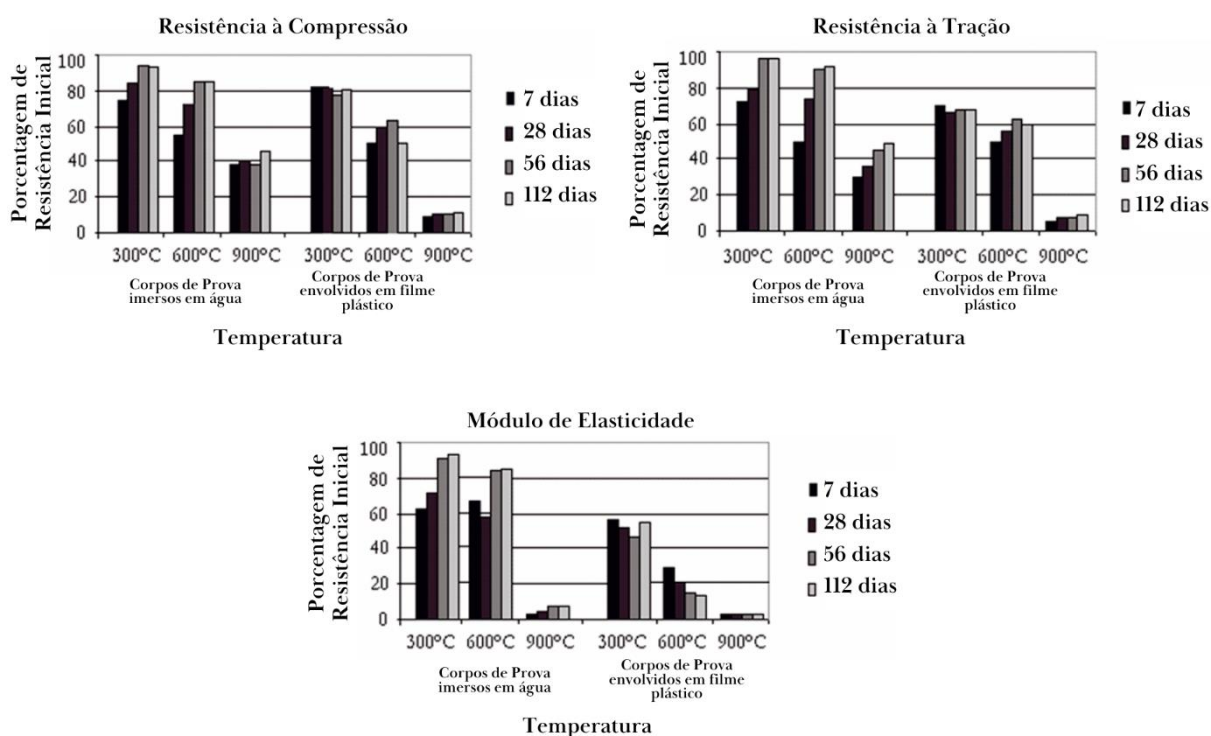
Figura 45: Evolução da recuperação do módulo de elasticidade do concreto em relação ao padrão em função do tipo de agregado, da temperatura submetida, da idade e do procedimento de reidratação.



Fonte: Souza (2005)

Essa recuperação pode ser comprovada nos estudos de Souza e Moreno Jr. (2010b), que analisaram dois métodos de reidratação: imersão em água e envolvimento em filme plástico. Após o concreto ser exposto a temperaturas elevadas, ele foi resfriado lentamente e, por fim, submetido ao método de reidratação. O método de imersão permitiu uma reidratação mais completa, levando a uma recuperação significativa, especialmente para amostras expostas a até 600 °C. Após 112 dias, o concreto imerso em água recuperou 85% da resistência à compressão, 94% da resistência à tração, e mais de 82% do módulo de elasticidade. Esse método se mostrou ideal para restaurar o desempenho estrutural de concretos aquecidos. Já o método de envolvimento em filme plástico teve a menor eficácia na recuperação das propriedades mecânicas, isso ocorre, pois ele restringe a absorção de umidade, limitando a reidratação. Com isso, as amostras envolvidas em plástico apresentaram uma recuperação de cerca de 51% da resistência à compressão, 6% de resistência à tração e 13% de módulo de elasticidade após exposição a 600 °C. Esses resultados indicam que a imersão em água é muito mais eficaz para a recuperação das propriedades do concreto submetido a altas temperaturas, enquanto o envolvimento em filme plástico apresenta limitações relevantes nesse aspecto. Os resultados obtidos na pesquisa podem ser vistos na Figura 46.

Figura 46: Recuperação das propriedades mecânicas, em relação à resistência inicial do concreto em função do tipo de reidratação



Fonte: Adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010b)

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento do concreto exposto a altas temperaturas evidenciou que esse tipo de exposição afeta significativamente as propriedades mecânicas do material, como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração. Esses impactos estão diretamente ligados à composição do concreto, incluindo fatores como o tipo de cimento, agregados utilizados, relação água/cimento e densidade do material. A desidratação da pasta de cimento, a expansão térmica desigual dos agregados e o colapso de estruturas internas contribuem para a perda de coesão e para o comprometimento da integridade estrutural.

Além disso, foi evidenciada uma lacuna crítica nas normas e métodos de análise utilizados para avaliar os efeitos da alta temperatura no concreto. Normas nacionais e internacionais, embora relevantes, não contemplam completamente as variações de composição do concreto, os diferentes tipos de exposição térmica e os métodos de recuperação pós-incêndio. A ausência de padronização global e a insuficiência de parâmetros específicos tornam difícil a aplicação universal dos resultados, além de limitarem as possibilidades de comparações precisas entre estudos.

Para mitigar os danos e recuperar as propriedades mecânicas do concreto, diversas técnicas de melhoria foram destacadas. Medidas preventivas, como a incorporação de fibras de polipropileno, são eficazes para reduzir o risco de *spalling* explosivo, ao criar canais que facilitam a liberação do vapor durante a exposição ao calor. Já as técnicas de recuperação incluem métodos de reidratação, capazes de restaurar parcialmente a resistência do material, e a substituição de partes severamente danificadas por concretos de alta performance, o que aumenta a durabilidade e a segurança das estruturas.

Conclui-se que o avanço em normas técnicas, métodos de análise e estratégias de melhoria é essencial para aumentar a resiliência do concreto e atender às exigências de segurança e durabilidade das edificações. Estudos futuros devem explorar novas composições de concretos resistentes ao calor, bem como o desenvolvimento de metodologias mais eficazes e padronizadas para avaliar e recuperar estruturas expostas a condições extremas. Essas inovações são fundamentais para garantir a integridade estrutural e a sustentabilidade da construção civil no enfrentamento de eventos críticos como incêndios.

REFERÊNCIAS

- AKÇAÖZOĞLU, K.; AKÇAÖZOĞLU, S. **The effect of elevated temperature on the lightweight concrete produced by expanded clay aggregate and calcium aluminate cement.** Bilge International Journal of Science and Technology Research, v. 1, n. 2, p. 59-70, 2017.
- ALHARTAI, M.; *et al.* **Evaluating deterioration of the properties of lightweight foamed concrete at elevated temperatures.** Journal of Building Engineering, v. 84, p. 108515, 2024.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (ACI). **Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements.** ACI 216R-89. ACI. New York, 1996.
- ARIOZ, O. **Effect of elevated temperatures on properties of concrete.** Fire Safety Journal, Amsterdam, v. 42, p. 516-522, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14323: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14432: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9077: Saídas de emergência em edifícios.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.** Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.
- BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- BRITEZ, C. A. e COSTA, C. N. **Ações do fogo nas estruturas de concreto.** Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Ipsis gráfica e editora, p. 1029-1068, 2011.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8110-2: Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances.** Reprinted in 1985. London: BSI, 1985.
- CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado.** Pini, 1988.

CARMONA FILHO; A., CARMONA, T. G. **Fissuração nas estruturas de concreto.** ALCONPAT, 2013.

COELHO, A. R. *et al.* **Comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas de incêndio e o posterior choque térmico por resfriamento brusco.** Trabalho apresentado no Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, Palmas/TO, Brasil, 17 a 19 de setembro de 2019.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D. DE; SILVA, V. P. e. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas.** São Paulo: Universidade de São Paulo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Tecnologia da Arquitetura, 2002.

DIAS, A. R. O. *et al.* **Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 2, e-12290, 2020.

ERGÜN, A. *et al.* **The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures.** Fire safety journal, v. 55, p. 160-167, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.** CEN, Bruxelas, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – State-of-art report.** Lausanne: FIB, 2007. 97 p. (Bulletin d’information; 38).

FORIGO, LOPES e VANALLI. **Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.** HOLOS, v. 7, 2021.

FRANCHETTO, A. S. **Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. **Microstructure of fire-damaged concrete. A case study.** Cement and concrete composites, v. 27, n. 2, p. 255-259, 2005.

GIL *et al.* **Análise experimental do fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, p. 856-875, 2018.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA-TCS-17: Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures.** Viena: 2002. 231 p. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/6347/guidebook-on-non-destructive-testing-of-concrete-structures>. Acesso em: 12 mar. 2022.

ISO 834: Fire-resistance tests — Elements of building construction. International Organization for Standardization, 2014.

KODUR, Venkatesh. **Fire resistance design guidelines for high strength concrete columns.** Internal report, n. 46116. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, 2003. p. 1–11.

KRISHNA, D. A; PRIYADARSINI, R. S.; NARAYANAN, S. **High temperature effects on different grades of concrete**. Sādhanā, v. 46, p. 31, 2021.

LI, Z. *et al.* **Avaliação experimental e analítica de juntas RC com detalhamento de reforço variável sob carga push-down antes e depois de incêndios**. Engineering Structures , v. 189, p. 550-564, 2019.

LIMA, R. C. A. *et al.* **Efeito de altas temperaturas no concreto**. II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2004, Porto Alegre, 2004. v. 1, p. 1 - 15.

MATESOVÁ, D.; BONEN, D.; SHAH, S. P. **Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium heating rates**. Materials and Structures 39, n. 9, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PASINATTO, V. **Avaliação da influência da mineralogia do agregado graúdo no comportamento do concreto submetido a altas temperaturas**. 2024. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

PASSOS, L.; MORENO JR, A. L.; SOUZA, A. A. A. **Concreto leve com agregado graúdo proveniente de resíduo cerâmico sob elevadas temperaturas**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, p. 433-454, 2020.

PENG, G. F.; HUANG, Z. S. **Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures**. Construction and building materials, v. 22, n. 4, p. 593-599, 2008.

RILEM – RESEARCH INSTITUTE OF LONDON FOR EXPERIMENTAL MECHANICS. **RILEM-129 MHT: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures**. Paris, 1995.

Rilem Technical Committees 129-MHT. **Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, part 1: introduction, Part 2: Stress–strain relation, part 3: compressive strength for service and accident conditions**, Mater Struct vol. 28 no. 181;1995. p. 410–4.

SAMPAIO, G. B. **Análise do desempenho do concreto de cimento Portland com e sem substituição parcial do cimento por cerâmica vermelha ou metacaulim submetido a altas temperaturas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SANCAK, Y. *et al.* **The Rag GTPases bind raptor and mediate amino acid signaling to mTORC1**. Science, v. 320, n. 5882, p. 1496-1501, 2008.

SÃO PAULO. **Decreto Municipal nº 10878**, de 07 de fevereiro de 1974. Prefeitura Municipal de São Paulo. São Paulo, 1974.

SILVA, L. C.; GOMES, R. S. **Durabilidade e Resistência de Estruturas de Concreto em Situações de Incêndio**. São Paulo: Pini, 2020.

SOLLERO, M. B. de S. **Propriedades mecânicas residuais do concreto em situação de incêndio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

SOUZA, A. A. A. de; MORENO JR, A. L. **Avaliação do tipo de agregado e da reidratação Do concreto submetido à elevadas temperaturas**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 3, n. 4, p. 477-493, 2010a.

SOUZA, A. A. A. de; 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, n. 4, p. 432-448, 2010b.

SOUZA, L. D. P. de; AZERÊDO, G. A. de; SILVA, F. de A. **Comportamento do concreto sob altas temperaturas via planejamento experimental fatorial com configuração estrela**. Ambiente Construído, v. 18, n. 1, p. 327–344, jan. 2018.

TÁCITO. Anais. Tradução de José Liberato Freire de Carvalho. Lisboa: Edições Colibri, 2022.

TUFAIL, M. *et al.* **Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete**. Int J Concr Struct Mater, v. 11, p. 17-28, 2017.

UKPATA, J. O. *et al.* **Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of laterized concrete**. Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 18358, 2023.

VEIGA, B. P. **Influência dos agregados graúdos na resistência à compressão do concreto quando submetido a temperaturas elevadas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

VIANA, A. C. C. **Concreto pré-fabricado: alteração da resistência à compressão quando exposto a altas temperaturas**. Cascavel, 2014.

WANG, G. *et al.* **Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste**. Fire and Materials, v. 39, 2014.

ZHANG, B. **Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures**. Fire Safety Journal, v. 46, n. 8, p. 543-549, 2011.

ZHANG, Q. **Microstructure and deterioration mechanisms of portland cement paste at elevated temperature**. 2013. Tese de Doutorado. Tese (PhD)-Technische Universiteit Delft, Delf, 2013.