

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Glayson Barbosa Sampaio

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONCRETO DE CIMENTO
PORTLAND COM E SEM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR METACAULIM OU CERÂMICA VERMELHA
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Belo Horizonte

2022

Glaysen Barbosa Sampaio

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONCRETO DE CIMENTO
PORTLAND COM E SEM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR CERÂMICA VERMELHA OU METACAULIM
SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Construção Civil como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Construção Civil.
Área de concentração: Tecnologia na Construção
Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção
Civil

Orientador:
Prof.º Dr.º Eduardo Chahud

Coorientadora:
Prof.ª Dr.ª Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

2022

S192a

Sampaio, Glayson Barbosa.

Análise do desempenho do concreto de cimento Portland com e sem substituição parcial do cimento por cerâmica vermelha ou metacaulim submetido a altas temperaturas [recurso eletrônico] / Glayson Barbosa Sampaio. – 2022.

1 recurso online (76 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo Chahud.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 71-76.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Concreto - Durabilidade - Teses. 4. Altas temperaturas - Teses. 5. Metacaulim - Teses. 6. Cerâmica - Teses. 7. Resiliência - Teses. 8. Incêndios - Teses. I. Chahud, Eduardo. II. Aguilár, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL Nº 236 DO ALUNO GLAYSON SAMPAIO BARBOSA.

Às quatorze horas do dia seis de abril de dois mil e vinte e dois, reuniu-se, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real (plataforma virtual) a Comissão Examinadora de Dissertação de Mestrado, aprovada *ad referendum* pelo Coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil - EE.UFMG, Prof. Dr. Eduardo Chahud, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM E SEM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR METACAULIM OU CERÂMICA VERMELHA SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS", requisito final para a obtenção do Grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL na área de: TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Eduardo Chahud, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação do seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, sem a participação do candidato na transmissão, houve o julgamento e expedição do resultado pela Comissão. Foram atribuídas as seguintes indicações:

PROF. EDUARDO CHAHUD	(X) APROVADO () REPROVADO
PROFA. MARIA TERESA PAULINO AGUILAR	(X) APROVADO () REPROVADO
PROF. AUGUSTO CÉSAR DA SILVA BEZERRA	(X) APROVADO () REPROVADO
PROF. ANDRÉ LUÍS CHRISTOFORO	(X) APROVADO () REPROVADO
PROF. FRANCISCO ANTÔNIO ROCCO LAHR	(X) APROVADO () REPROVADO

Pelas indicações dos membros acima, o candidato foi considerado **APROVADO**. Caso tenham sido sugeridas correções no trabalho, conforme pareceres anexos, o candidato terá o prazo máximo de 60 (sessenta) dias para efetuar-las e entregar a versão final da dissertação à Secretaria do Curso de Mestrado em Construção Civil. O resultado foi comunicado ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a transmissão e lavrou a presente ATA, que será assinada eletronicamente por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, seis de abril de dois mil e vinte e dois.

Assinaturas da Comissão:

Eduardo
Chahud

Francisco Antonio Rocco Lahr

Andre Luis Christoforo

Prof. Dr. Eduardo Chahud / Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar
Coordenação do Curso de Mestrado em Construção Civil
ESCOLA DE ENGENHARIA/UFMG

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Chahud, pela orientação durante a realização da pesquisa e pela contribuição na minha formação como pessoa, pesquisador e acadêmico.

A minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilár que me guiou e inspirou na realização do mestrado.

Ao Prof. Dr. Augusto Bezerra pela importante contribuição em disponibilizar o forno para realizar o ensaio final.

Aos membros da banca pela disponibilidade e colaboração.

À Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio. A todos os professores e funcionários do Departamento de Materiais e Construção Civil.

À Academia de Bombeiros Militar do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais pelo apoio. A todos os militares que me apoiaram nesse projeto, em especial ao Sgt Magalhães que prontamente se disponibilizou para ajudar na execução do ensaio no contêiner.

Aos laboratórios da UFMG e aos técnicos que auxiliaram na realização das análises. Principalmente ao Augusto, Dedé e Ricardo.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais (LMPM) do Departamento de Engenharia de Transporte (DET), do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – Campus I/ Belo Horizonte.

Aos colegas do Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica que certamente colaboraram direta e indiretamente na minha evolução como pesquisador. Principalmente ao Leonardo.

À Supermix pelo apoio integral à pesquisa, cedendo o laboratório, equipe e ensaios necessários.

À Metacaulim do Brasil pela disponibilização do metacaulim utilizado.

À Cimento Nacional pela disponibilização do cimento e apoio em realização de análises.

A minha companheira, amiga de jornada, Josiane, pelo apoio incondicional na realização dos meus sonhos, desde a época da graduação.

Aos meus companheiros de farda, que sempre me incentivaram e apoiaram a desenvolver um bom trabalho. Em especial aos militares do Centro de Atividades Técnicas (CAT) e da Diretoria de Atividades Técnicas (DAT) do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que a realização dessa pesquisa fosse possível.

RESUMO

A exposição a altas temperaturas, como em situação de incêndio, contribui para a degradação das estruturas de concreto, o que compromete a durabilidade da edificação. Portanto, sob altas temperaturas, a capacidade de suporte de uma edificação poderá ser comprometida, podendo levar a um colapso estrutural. A substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS) no concreto pode colaborar para um melhor desempenho numa situação de incêndio. Desse modo, é pertinente entender o comportamento do concreto após situações de incêndios, a fim de investigar o seu desempenho e a resiliência das edificações. E assim, contribuir para a análise da segurança e durabilidade de uma estrutura de concreto quando submetido a uma situação de incêndio. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência do uso de Metacaulim (MET) e Cerâmica Vermelha (CV) como materiais cimentícios suplementares no desempenho do concreto submetido a altas temperaturas. Para tanto, foi adotada uma dosagem de concreto referência (REF) utilizada em obras de infraestrutura. A partir dessa, confeccionou-se seis concretos com substituições de 5%, 10% e 20% do cimento Portland por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. A caracterização mecânica dos corpos de prova ocorreu por meio dos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade por frequência ressonante. Os parâmetros de durabilidade foram avaliados por meio da resistividade elétrica volumétrica, absorção e índice de vazios. Além do concreto referência, os concretos com substituição de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha foram submetidos a altas temperaturas em um forno, o qual seguiu a curva de incêndio padrão da ISO 834:1975, e, também, em um contêiner que desenvolveu a curva de incêndio natural. Os resultados mostram que a substituição parcial do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha contribuiu na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos. A exposição a altas temperaturas promoveu a degradação das propriedades dos concretos. O concreto com 20% de Metacaulim foi o que apresentou maior resiliência a simulações de incêndio.

Palavras-chaves: Concreto. Altas temperaturas. Resiliência. Durabilidade. Incêndio.

ABSTRACT

Exposure to high temperatures, such as in a fire situation, contributes to the degradation of concrete structures, which compromises the durability of the building. Therefore, under high temperatures the carrying capacity of a building may be compromised, which may lead to structural collapse. The partial replacement of Portland cement by supplementary cementitious materials (SCM) in concrete can contribute to better performance in a fire situation. Thus, it is pertinent to understand the behavior of concrete after fire situations, in order to investigate its performance and the resilience of buildings. And thus, contribute to the analysis of the safety and durability of a concrete structure when subjected to a fire situation. The objective of this work was to analyze the influence of the use of Metakaolin and Red Clay as supplementary cementitious materials on the performance of concrete subjected to high temperatures from natural and fire pattern simulations. To this end, a reference dosage of usual concrete for infrastructure works will be developed. From this, six more concretes were made with partial replacement of Portland cement by 5%, 10% and 20% of Metakaolin or Red Clay. The mechanical characterization of the specimens occurred through tests of compressive strength and dynamic elastic modulus. Durability parameters were evaluated through bulk electrical resistivity, absorption and void ratio. The concretes REF, MET20 and CV20 were subjected to high temperatures in the oven, ISO 834:1975 standard curve, and in the container, natural fire curve. The results shows that the partial replacement of cement by Metakaolin or Red Clay contributed to improve the mechanical properties and durability of the concrete produced. Exposure to high temperatures promoted the degradation of concrete properties. The MET20 concrete was the one that showed greater resilience to fire simulations.

Keywords: Concrete. High temperatures. Resilience. Durability. Fire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases do incêndio confinado para uma curva temperatura-tempo.....	19
Figura 2: Curva de incêndio padrão definida pela ISO 834:1975	20
Figura 3: Fluxograma das etapas do trabalho experimental	29
Figura 4: Gráfico da curva granulométrica da Areia Natural	31
Figura 5: Gráfico da curva granulométrica da Areia Artificial	31
Figura 6: Curva granulométrica da brita 0.....	32
Figura 7: Curva granulométrica da brita 1.....	32
Figura 8: Materiais Cimentícios Suplementares: (A) Cerâmica Vermelha (B) Metacaulim	33
Figura 9: Equipamento de medição da frequência ressonante	38
Figura 10: Sistema do equipamento de resistividade elétrica volumétrica	40
Figura 11: Equipamentos para aferição da resistividade elétrica volumétrica	40
Figura 12: Simulador de <i>flashover</i> tipo contêiner	43
Figura 13: Perspectiva isométrica do contêiner com a estante metálica em seu interior	44
Figura 14: Evolução da temperatura no simulador <i>flashover</i> tipo contêiner.....	46
Figura 15: Forno a Gás Grion.....	47
Figura 16: Corpos de Prova na câmara de combustão do Forno Grion.....	48
Figura 17: Espectros de DRX do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha	51
Figura 18: Curvas de Termogravimetria (TGA) das pastas de cimento referência (REF) e com 10% de substituição por Metacaulim e Cerâmica Vermelha.....	54
Figura 19: Curvas de derivada Primeira da Termogravimetria (DTG) das pastas de cimento da referência com 10% de substituição por Metacaulim e Cerâmica Vermelha	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de incêndio padrão desenvolvida pelo Forno Grion.....	49
Gráfico 2: Resistência à Compressão do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim	56
Gráfico 3: Resistência à Compressão do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha	57
Gráfico 4: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim	58
Gráfico 5: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha	59
Gráfico 6: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim	60
Gráfico 7: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha.....	60
Gráfico 8: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas.....	63
Gráfico 9: Resistividade Elétrica Volumétrica dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas	64
Gráfico 10: Resistência à Compressão dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas	65
Gráfico 11: Variação de Massa dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização do cimento CPV - ARI.....	30
Tabela 2: Caracterização da Areia Natural.....	31
Tabela 3: Caracterização da Areia Artificial	31
Tabela 4: Caracterização da Brita 0.....	32
Tabela 5:Caracterização da Brita 1.....	32
Tabela 6: Dosagem Unitária kg/m ³	36
Tabela 7: Descrição da dosagem referência, das siglas e das substituições do cimento por MCS.....	36
Tabela 8: Relação dos corpos de prova expostos a altas temperaturas no contêiner.....	44
Tabela 9: Relação dos corpos de prova expostos a altas temperaturas no Forno Grion.	48
Tabela 10: Descrição dos concretos produzidos e suas respectivas siglas adotadas	50
Tabela 11: Composição química do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha.....	51
Tabela 12: Superfície específica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha	52
Tabela 13: Massa específica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha	52
Tabela 14: Distribuição granulométrica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha	52
Tabela 15: Índices de pozolanicidade IABNT e INF e a razão entre sesses valores (IABNT/INF).....	53

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABM – Academia de Bombeiros Militar
ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ASTM – American Society for Testing and Materials
BET – Brunauer, Emmett e Teller
BS – British Standard
CBMMG – Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica
CINDS – Centro Integrado de Informações de Defesa Social
CP – Cimento Portland
CSH – Silicato de Cálcio Hidratado
FRX – Espectometria de Fluorescência de Raios-X
DTA – Análise Térmica Diferencial
DRX – Difração de Raios-X
DTG – Derivada Primeira da Termogravimetria
ISO – International Organization for Standardization
IT – Instrução Técnica
ITE – Instrução Técnica de Ensino
ITZ – Zona de Transição Interfascial
MCS – Materiais Cimentícios Suplementares
NBR – Norma Técnica Brasileira
TGA – Termogravimetria
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Geral	17
2.2 Específico	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Situações de incêndio	18
3.2 Influência da alta temperatura na durabilidade do concreto.....	20
3.2.1 Efeito da alta temperatura nas propriedades mecânicas	21
3.2.2 Efeito da alta temperatura nas mudanças físicas e químicas	22
3.2.3 <i>Spalling</i>	24
3.3 Materiais cimentícios suplementares.....	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Materiais	30
4.2 Métodos	34
4.2.1 Caracterização da Cerâmica Vermelha e do Metacaulim.....	34
4.2.2 Elaboração da dosagem	35
4.2.3 Confeção, moldagem e cura dos concretos.....	36
4.2.4 Determinação das propriedades mecânicas e avaliação da durabilidade	37
4.2.4.1 Ensaio de resistência à compressão	37
4.2.4.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante.....	38
4.2.4.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica	38
4.2.4.4 Absorção por imersão.....	41
4.2.5 Escolha do teor de adição e confeção do concreto	41
4.2.6 Determinação das propriedades mecânicas e avaliação da durabilidade	41
4.2.6.1 Ensaio de resistência à compressão	42
4.2.6.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante.....	42
4.2.6.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica	42
4.2.7 Exposição a altas temperaturas.....	42
4.2.7.1 Simulador de <i>flashover</i> tipo contêiner.....	42
4.2.7.2 Forno a gás Grion	47
5 RESULTADOS	50
5.1 Caracterização dos Materiais Cimentícios Suplementares.....	50
5.1.1 Composição química	50
5.1.2 Superfície específica e massa específica	52
5.1.3 Granulometria a <i>laser</i>	52

5.1.4 Pozolanicidade.....	53
5.1.4.1 Chappelle Modificado	53
5.1.4.2 Termogravimetria	54
5.2 Caracterização mecânica e avaliação da durabilidade.....	55
5.2.1 Resistência à compressão	56
5.2.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante.....	58
5.2.3 Resistividade Elétrica Volumétrica	59
5.2.4 Absorção por imersão e índice de vazios	61
5.3 Exposição a altas temperaturas.....	62
5.3.1 Módulo de elasticidade por frequência ressonante.....	62
5.3.2 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica	64
5.3.3 Resistência à compressão	65
5.3.4 Variação da massa	66
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

A exposição a altas temperaturas, como em situação de incêndio, contribui para a degradação das estruturas de concreto, o que compromete a durabilidade da edificação (TUFAIL *et al.*, 2017). Dados do *Center of Fire Statistics* (2020), apurados em 24 países, indicam que 37,4% dos incêndios ocorridos em 2018 foram em edificações. Segundo o *Statistics Canada* (2014), o Canadá apresentou 31% dos incêndios em residências em 2014. Em Minas Gerais, cerca de 33% dos incêndios ocorridos em 2020 foram em edificações (casa/apartamentos) segundo as informações publicadas pelo Centro Integrado de Informações de Defesa Social – CINDS do Corpo de Bombeiros de Militar de Minas Gerais – CBMMG.

Diante desses desastres, são muitos os estudos que analisam os efeitos da exposição do concreto a alta temperatura (POON *et al.*, 2001; STEVEN *et al.*, 2002; BIOLZI *et al.*, 2008; PENG *et al.*, 2008; JANOTKA *et al.*, 2009; NETINGER *et al.*, 2011; MA *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017; HWANG *et al.*, 2018) e atestam a importância de se compreender o comportamento do concreto nessa situação (MA *et al.*, 2015). Esses estudos avaliaram as alterações impostas durante o incêndio e a fase de resfriamento.

Segundo LI *et al.*,(2012), o concreto é um material incombustível e apresenta boa resistência aos efeitos do calor. Embora o concreto, em geral, tenha alta resistência ao calor, em altas temperaturas, vários fenômenos físicos e químicos ocorrem no concreto (expansão de fase, condensação, evaporação e difusão de vapor, desidratação fragmentação e rachaduras) o que resulta na deterioração de suas propriedades (ERGÜN *et al.*, 2013; HWANG *et al.*, 2018; KRZEMIENÍ; HAGER, 2015 e TUFAIL *et al.*, 2017).

Em especial, suas propriedades mecânicas podem ser bruscamente afetadas pela exposição prolongada a altas temperaturas devido às mudanças da microestrutura, (KODUR; KHALIQ, 2010; NADEEM *et al.*, 2014; KRZEMIENÍ; HAGER, 2015; DRZYMAŁA *et al.*, 2017; GUPTA *et al.*, 2017; WAHEED *et al.*, 2018). A desintegração dos produtos hidratados reduz o módulo elástico do concreto, devido ao aumento de vazios e das microfissuras na zona de transição, que não permitem a transferência de tensão para a matriz de argamassa e dos agregados (METHA e MONTEIRO, 2014). Também, a resistência à compressão do concreto diminui mais rapidamente devido à degradação dos silicatos de cálcio hidratado (WAHEED *et al.*, 2018).

São vários os fatores que podem influenciar diretamente no desempenho do concreto submetido a altas temperaturas (HWANG *et al.*, 2018; MA *et al.*, 2015). Dentre esses pode-se citar o fator água/cimento (DRZYMAŁA *et al.*, 2017; POON *et al.*, 2001), a litologia do agregado empregado (TUFAIL *et al.*, 2017; XING *et al.*, 2011) e a porosidade (FELICETTI *et al.*, 2017). As características intrínsecas de cada material constituinte do concreto são relevantes quando se analisa o efeito da temperatura, visto que estão sujeitos à expansão térmica, o que pode resultar em tensões térmicas e movimentos estruturais que podem levar a rachaduras e lascamentos (*spalling*) do concreto (MA *et al.*, 2015; TUFAIL *et al.*, 2017). Vários estudos mostram que o uso de materiais cimentícios suplementares e de fibras podem afetar o comportamento do concreto submetido a incêndio (NADEEM *et al.*, 2014; GUPTA *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017; BUI *et al.*, 2018; WAHEED *et al.*, 2018). No entanto, a submissão a altas temperaturas nesses trabalhos ocorreu em fornos elétricos automatizados com patamares pré-estabelecidos de temperaturas.

Neste contexto, este trabalho analisa a influência do uso de Metacaulim e Cerâmica Vermelha como materiais cimentícios suplementares no desempenho do concreto de cimento Portland submetido a altas temperaturas provenientes de um forno a gás e também de um simulador *flashover* tipo contêiner. Desse modo, pode-se observar o comportamento em duas situações de incêndio, uma parametrizada por uma curva de incêndio padrão e outra numa situação mais próxima da realidade de um incêndio compartimentado.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar o desempenho do concreto de cimento Portland com e sem substituição parcial do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha submetido a altas temperaturas.

2.2 Específico

Identificar o mecanismo de atuação do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha como material cimentício suplementar;

Identificar o efeito da temperatura nas propriedades físicas do concreto Referência em relação aos concretos com substituição de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha;

Avaliar o efeito das substituições de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha no desempenho mecânico e na resistividade elétrica após a exposição a altas temperaturas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

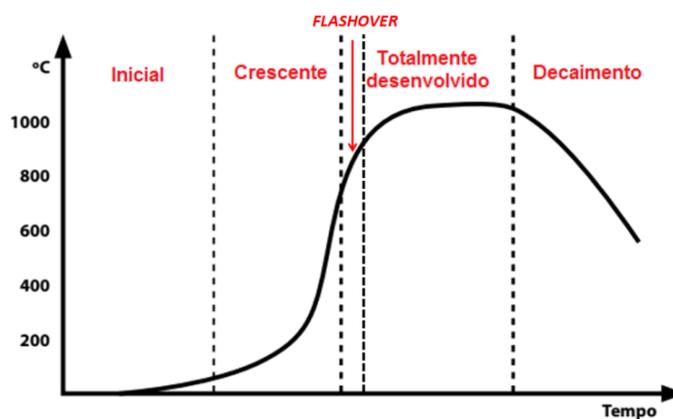
Segundo METHA e MONTEIRO, (2014), a vida útil do concreto está relacionada à durabilidade, ou seja, a resistir às ações dos intempéries, dos ataques físicos e químicos ou qualquer outra situação que cause degradação estrutural e comprometa a eficiência da edificação. Nesse sentido, torna-se necessário que as estruturas de concreto possuam resiliência para suportar as condições para as quais foram projetadas (NEVILLE, 2015). De acordo com POON *et al.*, (2001) e P. ZHANG *et al.*, (2020) as altas temperaturas comprometem a durabilidade de uma matriz cimentícia

3.1 Situações de incêndio

De acordo com a ISO 8.421:200, o incêndio será uma combustão rápida que dissemina de forma descontrolada no tempo e no espaço. Segundo SILVA *et al.*, (2008) em um incêndio existem três fluxos de calor, a saber: condução, convecção e radiação, originados pela diferença de temperatura entre os gases aquecidos do ambiente em chamas e os componentes estruturais. Para HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, (2016) a condução é o fluxo de calor devido a vibrações, colisões e transferência de energia entre átomos e moléculas de uma substância ou material, a convecção é o fluxo de calor devido ao movimento de parte de uma substância em uma região quente para uma região fria, esse processo ocorre tipicamente em fluídos e pode continuar indefinidamente. Por fim, na radiação não existe a necessidade de um meio material para a transferência de calor, ocorre por meio de ondas eletromagnéticas.

O incêndio pode ser caracterizado por uma curva que apresenta a temperatura dos gases em função do tempo decorrido (SILVA *et al.*, 2008). Na curva temperatura *versus* tempo, o MABOM CIURB (2020) informa que o incêndio em um ambiente confinado possuirá quatro fases distintas: inicial, crescimento, totalmente desenvolvido e decaimento, Figura 1.

Figura 1: Fases do incêndio confinado para uma curva temperatura-tempo



Fonte: MABOM CIURB (2020) adaptado

Na fase inicial ocorre um pequeno foco isolado com chama e uma escassa fumaça, na fase crescimento a concentração de comburente permite uma rápida evolução do incêndio. Na fase do incêndio totalmente desenvolvido, ocorre o consumo de todo o combustível disponível, com o ápice de produção de energia e, por fim, na fase decaimento, o ambiente entra em uma fase de liberação da energia em excesso com diminuição da temperatura. Vale destacar que, segundo SEITO *et al.*, (2008) são mínimas as chances de ocorrerem dois incêndios naturais com comportamentos idênticos.

A curva temperatura versus tempo representada na Figura 1 possui um ramo ascendente e um ramo descendente. Esse comportamento representa as características de uma curva de incêndio natural (SEITO *et al.*, 2008 e SILVA *et al.*, 2008)

A curva de incêndio natural, segundo a NBR 14432:2000, simula uma situação de incêndio real com uma variação da temperatura em função dos seguintes fatores: geometria, ventilação, características térmicas dos elementos de vedação e da carga incêndio específica. Devido as inúmeras variáveis, SILVA *et al.*, (2008) relatam dificuldade em determinar uma exata curva de incêndio natural. Os autores informam que devido a essa dificuldade, uma situação de incêndio geralmente é modelada por curvas padronizadas que serão inseridas na programação dos fornos nos institutos de pesquisas.

A curva de incêndio padronizada utilizada internacionalmente é a estabelecida pela ISO 834:1975, sendo empregada para incêndio em ambientes tendo como combustível materiais celulósicos. A curva padrão da ISO 834:1975 obtida pela Equação 1 e representada por meio da Figura 2, possui apenas o ramo ascendente que representa a temperatura em função do tempo. Inclusive, a NBR 14432:2000 também adota essa curva para determinar o incêndio

padrão como uma evolução padronizada da temperatura em função do tempo. Segundo SILVA *et al.*, (2008), embora a curva-padrão da ISO 834:1975 seja de fácil aplicação, quaisquer conclusões com base nessa curva devem ser analisadas com cuidado, uma vez que o incêndio-padrão não corresponde ao incêndio natural.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log (8t + 1) \quad (1)$$

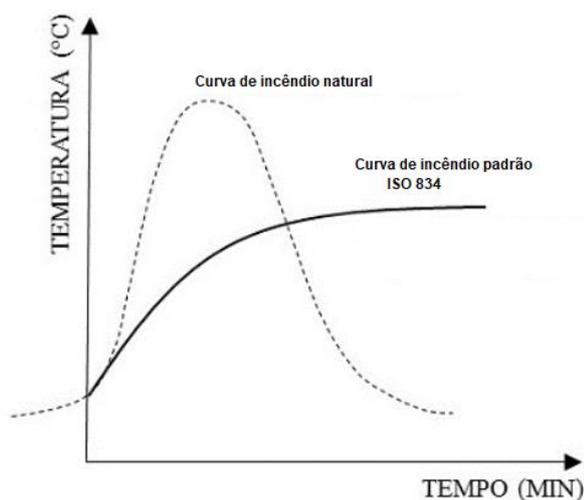
Onde:

t = tempo, em minutos;

θ_g = temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20° C; e,

θ_0 = temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

Figura 2: Curva de incêndio padrão definida pela ISO 834:1975



Fonte: SILVA *et al* (2001) adaptado

3.2 Influência da alta temperatura na durabilidade do concreto

Estudos mostram a importância de compreender o comportamento do concreto quando submetido a altas temperaturas (MA *et al.*, 2015). Segundo LI *et al.*, (2012) o concreto é um material incombustível e apresenta boa resistência aos efeitos do calor. No entanto, as suas propriedades mecânicas podem ser bruscamente afetadas pela exposição prolongada a altas temperaturas (DEXING *et al.*, 2018).

As altas temperaturas promovem alterações físicas e químicas nos materiais que constituem o concreto proporcionando uma degradação nas suas características mecânicas e de durabilidade (HWANG *et al.*, 2018). Segundo MA *et al.*, (2015) essas alterações são

significativas e podem alterar a estrutura interna do concreto promovendo uma redução na resistência à compressão e no módulo de elasticidade por frequência ressonante do concreto.

3.2.1 Efeito da alta temperatura nas propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do concreto são afetadas pela exposição a altas temperaturas (DEXING *et al.*, 2018). Segundo GUPTA *et al.*, (2017), o aumento da temperatura até cerca de 150° C proporciona um ligeiro aumento na resistência a compressão do concreto devido a algumas reações de hidratação que ainda ocorrem na pasta da matriz cimentícia. Comportamento semelhante foi relatado pelos autores KODUR, (2014) e TUFAIL *et al.*, (2017). Entretanto MA *et al.*, (2015) relatam que essa elevação na resistência à compressão se manteve até a temperatura de 300° C.

A partir de 300°C diversos autores relatam uma expressiva redução na resistência à compressão. LI *et al.*, (2012), KODUR, (2014) e MA *et al.*, (2015) descrevem que a temperatura crítica, para essa mudança de comportamento, é após os 400° C. XIE *et al.*, (2018) evidenciam que a partir desse patamar o concreto apresenta um aumento na ductilidade em detrimento da diminuição da tenacidade.

Entretanto, MA *et al.*, (2015) relatam que elevações de temperatura a patamares superiores a 800° C proporcionam a perda de praticamente toda a resistência a compressão do concreto. Segundo FARES *et al.*, (2010) e TUFAIL *et al.*, (2017) esse fato ocorre devido a transformações químicas que proporcionam a deterioração da microestrutura do concreto.

TUFAIL *et al.*, (2017) analisaram o comportamento de concretos submetidos a altas temperaturas com agregados graúdos distintos: granito, quartzito e calcário. A faixa de temperatura empregada foi de 95° C e 650° C. Em todos os patamares de temperatura o concreto com granito apresentou os maiores valores na resistência à compressão e tração e módulo de elasticidade quando comparado com os demais concretos. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos com agregados de calcário, quartzito e granito, respectivamente, diminuíram 2,16, 2,94 e 2,65 MPa (resistência à compressão) e 2,41, 3,26 e 2,86 GPa (módulo de elasticidade) para cada aumento de 100°C na temperatura. Os autores concluíram que o fator de influência na redução das propriedades mecânicas dos concretos sob temperatura elevada foi a degradação dos agregados graúdos.

O comportamento do concreto com o agregado graúdo reciclado sob altas temperaturas foi estudado no trabalho de XIE *et al.*, (2018). Os resíduos de pavimentos de concreto foram reciclados e empregados como agregado graúdo. As temperaturas ensaiadas foram de 200° C, 400° C, 600° C e 800° C. Os resultados mostram que o aumento progressivo da temperatura diminui o desempenho compressivo dos concretos com agregados reciclados. À medida que a temperatura aumenta, a resistência à compressão diminui em 20,4%, 20,3%, 27,9% e 38,0% para temperaturas a 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, respectivamente. O módulo de elasticidade do concreto tem pouca diferença entre 600°C e 800°C. O processo de fratura iniciou a partir dos 600°C e o módulo de elasticidade do concreto pouco reduziu aos 800°C.

KODUR (2014) demonstrou que a resistência à flexão, resistência à tração e módulo de elasticidade são afetadas pelo aumento de temperatura. Porém, GUO *et al.*, (2014) destaca que o módulo de elasticidade do concreto é a propriedade mecânica mais afetada pela elevação de temperatura. GUPTA *et al.*, (2017) enfatizam que o módulo reduz consideravelmente quando o concreto for submetido a altas temperaturas. XIE *et al.*, (2018) complementam que a taxa de redução no valor do módulo de elasticidade é superior ao observado para a resistência à compressão do concreto.

GUPTA *et al.*, (2017) relatou em seu trabalho o comportamento mecânico do concreto contendo resíduos de fibra de borracha submetido a altas temperaturas. A porcentagem dos resíduos de fibras de borracha empregada foi de 0% a 25%. Todos os espécimes foram expostos a seis níveis de temperatura, variando de 27° C a 750° C, e três diferentes durações de exposição, 30, 60 e 120 min. Os resultados mostram que, a substituição parcial do agregado miúdo por 10% de fibra de borracha pouco influência nas propriedades mecânicas residuais do concreto exposto a 150° C. Nos patamares acima de 150° C, a decomposição da fibra de borracha leva a um rápido declínio das propriedades do concreto de borracha principalmente para substituições superiores a 5%.

3.2.2 Efeito da alta temperatura nas mudanças físicas e químicas

Segundo FARES *et al.*, (2010), as alterações nas propriedades mecânicas do concreto submetido a altas temperaturas podem ser esclarecidas por meio da análise microestrutural e das características físico-químicas. NOVÁK; KOHOUTKOVÁ, (2017), relata que as altas temperaturas comprometem bruscamente a microestrutura dos compósitos cimentícios. MA *et al.*, (2015) complementa que a evaporação da água, a desintegração dos produtos de hidratação

e o aumento da porosidade, são os principais responsáveis pelas modificações no comportamento mecânico.

De acordo com ZHANG (2011), fazem parte da estrutura interna do concreto três diferentes tipos de água: água capilar, água fisicamente adsorvida e água quimicamente combinada. O aumento gradual da temperatura proporciona a mudança de fases, o que resulta na saída da água capilar e da fisicamente adsorvida presentes na matriz do concreto (XIE *et al.*, 2018). Os resultados imediatos dessa evaporação são a perda de massa e aumento da porosidade (ERGÜN *et al.*, 2013). O que contribuirá consideravelmente para a formação de trincas na estrutura do concreto (XIE *et al.*, 2018).

MA *et al.*, (2015) afirmam que nas temperaturas inferiores a 300° C os vapores de água promovem a hidratação dos grãos de clínquer anidro. Entretanto, XIE *et al.*, (2018) relatam que a partir dos 200°C inicia-se a decomposição do silicato de cálcio hidratado (CSH) devido a evaporação da água quimicamente ligada. As primeiras trincas na estrutura do concreto surgem devido à essa desidratação (FARES *et al.*, 2010). A 900°C ocorre a decomposição completa do gel CSH, o qual se trata de um processo irreversível que ocasiona a redução de 70% da resistência à compressão residual do concreto (ERGÜN *et al.*, 2013; TUFAIL *et al.*, 2017).

Os efeitos químicos e físicos da elevação da temperatura são relatados por XIE *et al.*, (2018). Os resultados indicaram que a água livre, a água adsorvida e a água quimicamente combinada vaporizaram nas temperaturas de 25° C a 400° C. A decomposição dos silicatos de cálcio hidratado ocorreu na faixa de 400° C a 800° C. Os autores verificaram que a evaporação das águas e a decomposição de hidroquímicos no concreto são as principais razões para a redução do desempenho compressivo dos concretos com agregados reciclados

O aumento da porosidade no concreto submetido a altas temperaturas resulta da evaporação da água quimicamente ligada presente na estrutura do gel silicato de cálcio hidratado (FARES *et al.*, 2010; HUO *et al.*, 2016; WAHEED *et al.*, 2018). A estrutura dos poros dos materiais cimentícios é influenciada pela temperatura de exposição, após serem aquecidas a temperaturas de até 1000° C as amostras desses materiais apresentam poros com diâmetro na faixa de 1µm, e a partir de 1200° C constatou-se que o diâmetro superou os 5 µm. (HUO *et al.*, 2016; VYŠVAŘIL *et al.*, 2014).

De acordo com FARES *et al.*, (2010), o micro fissuramento devido à diferença de comportamento entre a pasta cimentícia e os agregados também influenciam no aumento da porosidade. O concreto é um material compósito, no qual os seus elementos constituintes

comportam-se de maneira diferente com o aumento da temperatura. A pasta cimentícia expande em função da elevação da temperatura, entretanto, após perder água ocorrerá a sua retração, já os agregados mantem a taxa de expansão (ERGÜN *et al.*, 2013; TUFAIL *et al.*, 2017). Essa diferença de comportamento pasta/agregado da origem a tensões térmicas que contribuem para formação das microfissuras na zona de transição interfacial (ITZ) (MA *et al.*, 2015).

A microestrutura do concreto deteriora devido à evaporação da água, à desintegração dos produtos de hidratação e ao aumento da porosidade MA *et al.*, (2015). O que influenciará abruptamente na redução de todas as propriedades mecânicas do concreto exposto a altas temperaturas (FARES *et al.*, 2010; ZHANG, 2011; ERGÜN *et al.*, 2013; VYŠVAŘIL *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2015; HUO *et al.*, 2016; NOVÁK; KOHOUTKOVÁ, 2017; TUFAIL *et al.*, 2017; WAHEED *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2018)

3.2.3 Spalling

O *spalling* é um dos fenômenos que ocorre no concreto quando exposto a altas temperaturas (FARES *et al.*, 2010; NOVAK & KOHOUTKOVA, 2018). Segundo METHA e MONTEIRO (2014), o *spalling* ocorre quando a pressão de vapor no interior do concreto cresce mais rápido do que a sua liberação para a atmosfera. Esse fenômeno, também citado como lascamento, promove a fragmentação da superfície do concreto e coloca as camadas mais internas em contato direto com o incêndio. Assim, o *spalling* contribui para o aumento da taxa de transmissão de calor nos elementos estruturais colaborando para a deterioração das estrutura de concreto (ERGÜN *et al.*, 2013).

Para MA *et al.*, (2015), o aumento de temperatura faz com que vapores de água movimentem em direção à parte mais interna concreto e formem uma camada saturada que restringirá as novas movimentações de vapor, e numa tentativa de escapar para atmosfera essa camada se movimenta em direção a região seca do concreto. Nos concretos com baixa porosidade e expostos a alta taxas de aquecimento, a tentativa de escape do vapor de água proporciona um aumento de pressão nos poros do concreto (BANGI & HORIGUCHI, 2011). Caso a tensão de tração do concreto não resistir a essa pressão, ocorrerá a fragmentação do concreto (PHAN, 2008; FELICETTI *et al.*, 2017).

Diversos pesquisadores demonstram que o *spalling* contribui na redução das propriedades mecânicas concreto submetido a alta temperatura (PENG *et al.*, 2008; PHAN,

2008; KODUR; KHALIQ, 2010; MA *et al.*, 2015; FELICETTI *et al.*, 2017; OZAWA *et al.*, 2017). Essa deterioração no concreto contribui para o colapso estrutural.

3.3 Materiais cimentícios suplementares

Classificam-se como materiais cimentícios suplementares (MCS) os materiais cimentantes e os materiais pozolânicos (PARIS *et al.*, 2016). Os cimentantes se comportam semelhante ao cimento comum endurecendo em contato com água, ou seja, como um aglomerante hidráulico. Os pozolânicos são materiais que advém de uma fonte original que seja rica em silício (Si) e alumínio (Al) (APRIANTI *et al.*, 2015). De acordo XIE e VISINTIN, (2018), a atividade pozolânica trata-se da reação de SiO_2 e Al_2O_3 em materiais pozolânicos com hidróxido de cálcio formado durante o processo de hidratação do cimento Portland.

O emprego de MCS, de acordo com LUDWIG; ZHANG (2015), é a alternativa mais viável para a produção de materiais cimentícios com menor emissão de CO_2 . Além de menor impacto ambiental, a inserção de MCS contribui significativamente na melhoria de propriedades do concreto relacionado a maior resistência à compressão a longo prazo e maior durabilidade (JUENGER & SIDDIQUE, 2015). Essa melhoria ocorre em função da presença do silicato de cálcio hidratado (CSH) presente na pasta cimentícia, formado pela interação vítrea da pozolana com o hidróxido de cálcio (LI *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2018). Pode-se citar como MCS o Metacaulim, a Cerâmica Vermelha, a cinza volante, a escória de alto forno, a cinza de casca de arroz, a argila calcinada entre outros (APRIANTIS, 2017).

WANG *et al.*, (2017), mostraram que a adição de cinza volante proporciona uma menor redução na resistência à compressão aos 550°C do que o concreto sem adição. Os resultados apurados por NADEEM *et al.*, (2014) mostram que o concreto com adição de Metacaulim apresenta maior perda de massa do que o concreto com cinza volante. Quanto ao módulo de elasticidade, o concreto com adição de Metacaulim e cinza volante apresentam maiores resultados que o concreto com adição de cinza de casca de arroz avaliadas (KODUR; KHALIQ, 2010; BUI *et al.*, 2018). Nos concretos com adição de escória de alto-forno a elevação da temperatura acarretou aumento nos índices de permeabilidade e de porosidade (KARAHAN, 2017).

A adição de cinzas volantes e escória no cimento Portland contribuem no aumento das propriedades mecânicas do concreto após o aquecimento a altas temperaturas de até 900°C e 1050°C . Comparado com o cimento Portland, a resistência à compressão residual, a carga de

ruptura, a resistência a flexão e o módulo de elasticidade do cimento misturado com cinzas volantes e escória aumentaram significativamente (XIE *et al.*, 2018). Em pesquisa publicada por P. ZHANG *et al.*, (2020), verificou-se que o uso de escória como substituição parcial do cimento Portland, contribuiu para uma melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento, exposto a temperaturas acima de 400°C. Segundo MA *et al.*, (2015), a adição da sílica ativa melhora as propriedades mecânicas e propriedades entre a pasta de cimento e o agregado.

Estudos indicam que o uso de fibras metálicas no concreto pode retardar a formação e a propagação de fissuras em caso de incêndio (XIE *et al.*, 2018). A elevação da temperatura reduz a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, uma alternativa para combater essa redução é adicionar fibras de aço no traço de concreto com agregado reciclado (XIE *et al.*, 2018).

A fusão das fibras de polipropileno reduz danos microestruturais no concreto ao permitir a dissipação da pressão do vapor (WAHEED *et al.*, 2018). Os vazios formados após a decomposição das fibras poliméricas colaboram para a redução da resistência à compressão (GUPTA *et al.*, 2017). Segundo NOVAK; KOHOUTKA, (2018), o risco de colapso da estrutural de uma edificação pode ser reduzido com o uso de fibras de polipropileno.

Em sua pesquisa, SCHACKOW *et al.*, (2015) apresentaram uma análise da resistência à compressão em argamassas com o emprego de resíduo de cerâmica vermelha finamente moído substituindo parcialmente o cimento. O resíduo empregado foi de tijolos cerâmicos em uma granulometria inferior a 45 µm. Os percentuais de substituição foram de 10, 25 e 40% em peso do cimento. Os resultados encontrados mostram que a porosidade e a absorção de água das argamassas contendo o resíduo de cerâmica vermelha permaneceram inferiores as da argamassa sem resíduo. Entretanto, a resistência à compressão apresentou melhor desempenho para a substituição de 40%.

Nesse estudo foi utilizado como MCS o Metacaulim e a Cerâmica Vermelha. Por ser um material comprovadamente pozolânico, o uso do Metacaulim se tornou relevante na construção civil. O que o classifica como altamente reativo é a presença de alumino silicatos em partículas extremamente finas. Sendo obtido por meio da calcinação das argilas caulínicas. O processo de calcinação, em torno de 600°C a 900°C, promove a redução das hidroxilas e destrói a estrutura cristalina, tornando o composto altamente amorfo (FABBRI *et al.*, 2013).

De acordo com HUANG *et al.*, (2018), das reservas mundiais de caulim, 53% concentram-se nos Estados Unidos da América, 28% no Brasil, 7% na Ucrânia e 7% na Índia, isso equivale a 15 bilhões de toneladas. Embora o quantitativo seja relevante, trata-se de um recurso mineral não renovável. E, ainda, o processo de produção é de alto custo por não ser em larga escala.

Ao comparar a fabricação do Metacaulim com a do clínquer, vale ressaltar que a sua produção envolve menor consumo energético e menor emissão de gases tóxicos. Isso ocorre porque as temperaturas necessárias para o processamento são menores (ANDREW, 2018 e XU *et al.*, 2015). ANDREW, (2018) afirma, ainda, que o Metacaulim é eficiente ambientalmente e tecnologicamente quando comparado com a escória de alto forno e a cinza volante. Esses são provenientes de processos industriais com alto consumo energético.

A Cerâmica Vermelha é proveniente do cozimento de argilas vermelhas. Trata-se de um tratamento térmico das argilas vermelhas com temperaturas em torno de 800°C (ANDREOLA *et al.*, 2021). O tratamento térmico promove a desidroxilação de minerais de argila e forma fases amorfas reativas (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016), o que pode resultar em um material com atividade pozolânica.

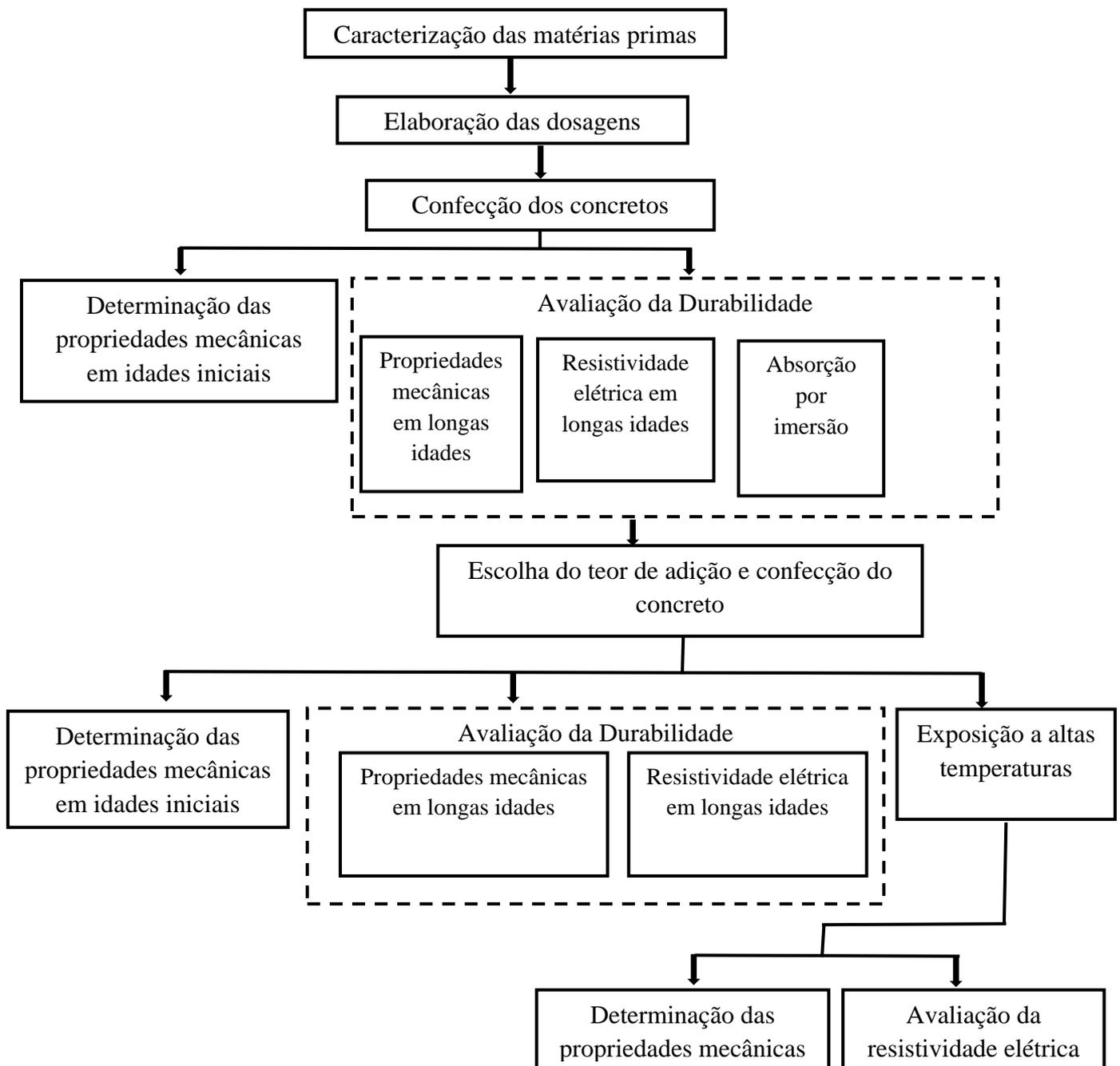
Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), no cenário mundial, a cerâmica vermelha é largamente utilizada, principalmente na Europa, pelo seu desempenho e beleza. Países como Itália, Espanha, Alemanha, França, Portugal e até a Dinamarca tem amplo uso da cerâmica vermelha na construção civil. Em virtude dos climas extremamente frios, esses países possuem uma avançada tecnologia na produção da cerâmica vermelha com intuito de atender os padrões de isolamento térmico, acústico e resistência. No Brasil, estima que na cadeia de produção de cerâmica vermelha há um consumo médio anual de 140 mil toneladas de argila, dados de 2020.

Para aplicar em materiais cimentícios, o resíduo de cerâmica vermelha, que pode ser proveniente de telhas ou bloco cerâmicos, deve apresentar grãos mais fino do que o próprio cimento. Essa condição granulométrica se aplica, de um modo geral, a todos os materiais cimentícios suplementares que possam vir a substituir parcialmente o cimento (JUENGER, SIDDIQUE, 2015; SCHACKOW *et al.*, 2015 e SCHULZE, RICKERT, 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consistiu na avaliação experimental do desempenho, antes e após exposição a altas temperaturas, de um concreto confeccionado com e sem substituição do cimento Portland por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. A Figura 3, descreve, esquematicamente, o fluxograma das etapas do trabalho experimental. As atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Construção Civil e Mecânica, da Escola de Engenharia da UFMG, no Centro Tecnológico de Minas Gerais, Unidade Olhos D'água da Supermix em Belo Horizonte, na Academia de Bombeiros Militar (ABM), Unidade II/ Contagem, do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) e no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais (LMPM) do Departamento de Engenharia de Transporte (DET), do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – Campus I/ Belo Horizonte.

Figura 3: Fluxograma das etapas do trabalho experimental



4.1 Materiais

As matérias primas utilizadas na confecção dos concretos estudados foram selecionadas em função da disponibilidade e do emprego delas na indústria da construção civil em Belo Horizonte. Foram elas: cimento Portland do tipo CPV-ARI, agregado miúdo natural e artificial, agregado graúdo de gnaiss, água potável, aditivos plastificantes e poli funcional, Metacaulim e Cerâmica Vermelha.

A água utilizada foi a fornecida pela concessionária de abastecimento local. Os aditivos utilizados foram o PolykenTM 790 da Novaken, aditivo polifuncional redutor de água, e o RecoverTM da Grace Constrution destinado a controlar o processo de hidratação do cimento. Ambos os aditivos são usuais em concretos usinados.

Nessa pesquisa empregou-se o cimento CPV-ARI da NACIONAL BRENNAND, trata-se de um cimento sem adição de materiais pozolânicos. O uso desse cimento se justifica em função de ser o cimento disponível no mercado mineiro com o menor percentual de adições. Assim, possibilitou uma melhor análise dos efeitos da inserção de Metacaulim ou Cerâmica Vermelha na dosagem de referência. Os resultados da caracterização do cimento estão de acordo com as exigências normativas, e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do cimento CPV - ARI

ENSAIOS FÍSICOS CPV-ARI		Valores	Limite da NBR 16697:2018
FINURA	BLAINE (cm ² /g)	458	≥ 300
	# 200 %	0,2	≤ 6,0
	# 300 %	2,40	-
Tempo de pega	Início de pega (min)	130	≥ 60
	Fim de Pega (min)	205	≥ 60
Resistência à compressão (NBR 7215:2014)	1 dia (MPa)	22,2	≥ 14
	3 dias (MPa)	35,5	≥ 24
	7 dias (MPa)	42,4	≥ 34
	28 dias (MPa)	53,9	-

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

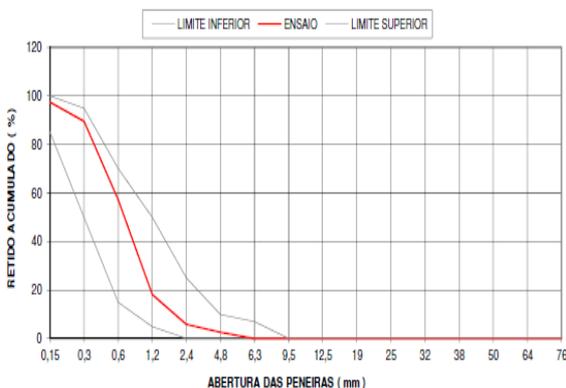
Os agregados miúdos utilizados foram areia natural silicosa e areia artificial de gnaise, na proporção de 70% para 30%. A areia natural apresentou massa específica de 2,646 kg/dm³ e diâmetro máximo de 4,8 mm. A areia artificial apresentou massa específica de 2,703 kg/dm³ e diâmetro máximo de 6,3 mm. Os resultados da caracterização dos agregados miúdos estão apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3. As Figuras 4 e 5 mostram as curvas granulométricas.

Tabela 2: Caracterização da Areia Natural

Massa Unitária NBR NM 52 (kg/dm ³)	1,418
Massa Específica NBR NM 52 (kg/dm ³)	2,646
Materiais Pulverulentos NBR NM 46	1,1%
Teor de Argila NBR NM 7218	0,04%
Módulo de Finura NBR 7211	2,709
Impurezas Orgânicas NBR 7211	< 300 ppm
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	4,8
Coefficiente de Vazios	46,39%

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Figura 4: Gráfico da curva granulométrica da Areia Natural



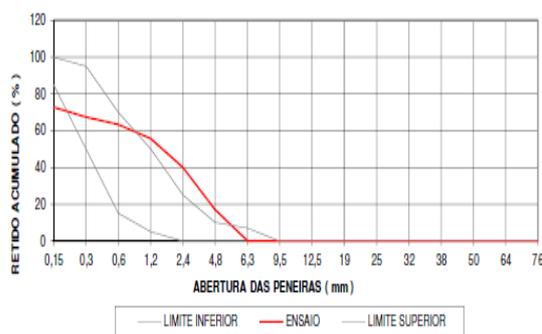
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Tabela 3: Caracterização da Areia Artificial

Massa Unitária NBR NM 52 (kg/dm ³)	1,719
Massa Específica NBR NM 52 (kg/dm ³)	2,703
Materiais Pulverulentos NBR NM 52 # 200	11,34%
Teor de Argila NBR NM 7218	-
Módulo de Finura NBR 7211	3,160
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	6,3
Coefficiente de Vazios	36,40%

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Figura 5: Gráfico da curva granulométrica da Areia Artificial



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Os agregados graúdos empregados foram brita gnaise tipo brita 0 e brita 1, na proporção de 15% para 85%. Essas proporções foram determinadas em função da prática usual nas concreteiras. A brita 0 apresentou massa específica de 2,778 kg/dm³ e diâmetro máximo de 12,5mm. A brita 1 apresentou massa específica de 2,702 kg/dm³ e diâmetro máximo de 25mm. Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados nas Tabelas 4 e 5. As Figuras 6 e 7 mostram as curvas granulométricas.

Tabela 4: Caracterização da Brita 0

Massa Unitária NBR NM 53 (kg/dm ³)	1,392
Massa Específica NBR NM 53 (kg/dm ³)	2,778
Materiais Pulverulentos	0,40%
Módulo de Finura NBR 7211	6,1
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	12,5
Coefficiente de Vazios	49,89%

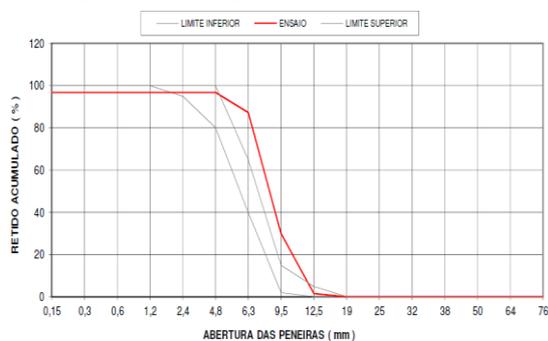
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

Tabela 5: Caracterização da Brita 1

Massa Unitária NBR NM 53 (kg/dm ³)	1,378
Massa Específica NBR NM 53 (kg/dm ³)	2,702
Materiais Pulverulentos	0,20%
Módulo de Finura NBR 7211	7,05
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	25
Coefficiente de Vazios	49,00%

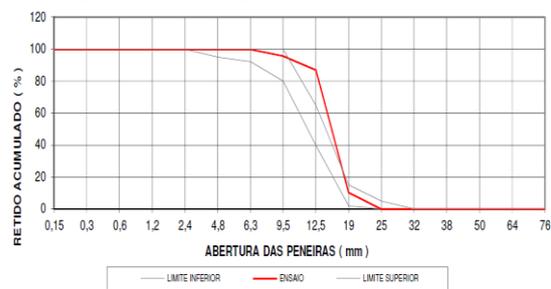
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

Figura 6: Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

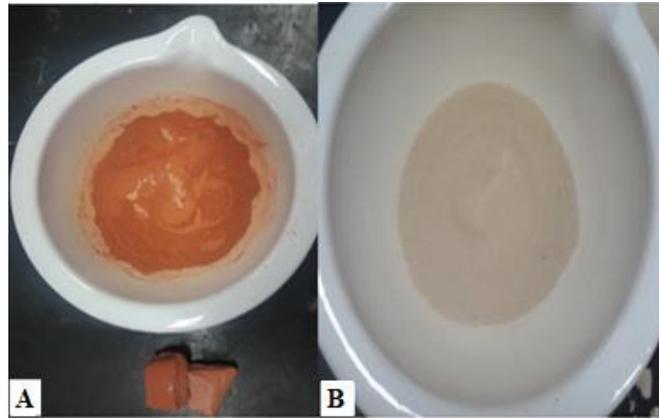
Figura 7: Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

O Metacaulim, da marca Metacaulim HP Ultra, foi disponibilizado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio LTDA. A Cerâmica Vermelha é proveniente de telhas. O preparo desse resíduo ocorreu pelo processo de cominuição mecânica, a fim de obter uma granulometria inferior a granulometria do cimento utilizado. A britagem primária das telhas de Cerâmica Vermelha, realizada apenas para desbaste, ocorreu em um britador de mandíbula em 3 etapas de processamento contínuo. Após essa redução, efetuou-se a fragmentação secundária (moagem fina) em um moinho de bolas. Nessa etapa de cominuição mecânica, a cada trinta minutos se retirava uma amostra do material para avaliação da finura obtida. Essa avaliação foi feita por meio do peneiramento a úmido até se obter a granulometria desejada, ou seja, 95% do material passante na peneira 325. A Figura 8 mostra os materiais cimentícios suplementares utilizados no trabalho.

Figura 8: Materiais Cimentícios Suplementares: (A) Cerâmica Vermelha (B) Metacaulim



Fonte: Autor

4.2 Métodos

O trabalho foi realizado em sete etapas. Na primeira etapa foi realizada a caracterização das matérias primas. A segunda etapa consistiu na elaboração da dosagem dos concretos com e sem substituição de uma porcentagem do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. Na terceira etapa ocorreu a confecção, moldagem e cura dos concretos dosados. Na quarta etapa realizou-se ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante para caracterização das propriedades mecânicas em idades iniciais. Ainda na quarta etapa, iniciou-se a avaliação da durabilidade por meio dos ensaios de absorção por imersão, avaliação da resistividade elétrica volumétrica, e nas idades avançadas realizou-se os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante. Na quinta etapa, a partir dos resultados dos ensaios realizados na quarta etapa, foi escolhida a dosagem mais relevante para a pesquisa, com a qual se confeccionou mais corpos de prova de concretos para novos ensaios. A sexta etapa, consistiu na caracterização das propriedades mecânicas e na avaliação da durabilidade dos concretos moldados na quinta etapa pelos mesmos ensaios na quarta etapa. Por fim, na sétima etapa ocorreu a exposição em altas temperaturas dos concretos confeccionados na terceira e na quinta etapa. Após essa exposição, os corpos de prova foram submetidos a avaliação da variação de massa e a ensaios de módulo de elasticidade por frequência ressonante, avaliação da resistividade elétrica e ensaio de resistência à compressão, respectivamente.

4.2.1 Caracterização da Cerâmica Vermelha e do Metacaulim

O Metacaulim e a Cerâmica Vermelha após moagem foram caracterizados quanto à composição química, granulometria, massa específica, superfície específica e pozolanicidade.

A caracterização química ocorreu por meio da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e da difração de raios-X (DRX). A espectrometria de fluorescência de raios-X foi feita por dispersão de comprimento de onda (WDS) em um espectrômetro marca Philips (Panalytical), modelo PW 2400, com tubo de anodo de ródio ($Z=45$). A

difração de raios-X foi feita no difratômetro de raios-X (DRX) da marca Philips (Panalytical), sistema 1710, com tubo de anodo de cobre ($Z=29$).

A análise granulométrica da Cerâmica Vermelha e do Metacaulim foi determinada pela técnica de espalhamento do feixe de laser com auxílio do equipamento CILAS 1064 - *Laser Particle Size Analyzer*. Para a determinação da massa específica utilizou-se o aparelho Autodensity 100 da ACP Instruments. Esse equipamento mensura a massa específica de materiais sólidos utilizando o princípio da alteração de pressão resultante do deslocamento de um fluido, nesse ensaio foi utilizado o nitrogênio gasoso (N_2).

A superfície específica da Cerâmica Vermelha e do Metacaulim foi determinada por adsorção gasosa do gás nitrogênio pelo método desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (BET multiponto) no aparelho Quantachrome Instruments (Nova Station A – 1200e Surface Area & Pore Size Analyzer) no intervalo de pressão relativa compreendido entre 0,05 e 0,30 (De LANGE *et al.*, 2014). Em cada amostra, foram obtidos, no mínimo, sete pontos para a análise da isoterma de adsorção.

A pozolanicidade da Cerâmica Vermelha e do Metacaulim foi determinada por análises térmicas e pelo ensaio Chapelle Modificado. As análises térmicas foram a termogravimetria (TGA) e a análise térmica diferencial (DTA), essas ocorreram no equipamento DTG-60H Shimadzu com atmosfera a ar e capacidade de operação até $1.200^{\circ}C$, e uma taxa de aquecimento de $10^{\circ} C/min$. O ensaio de Chapelle Modificado seguiu a metodologia proposta na NBR 15895:2010 e os resultados analisados segundo as considerações de RAVERDY *et al.*, (1980).

4.2.2 Elaboração da dosagem

A dosagem do concreto de referência desenvolvida teve como base a comumente utilizada pelas usinas de concreto em obras de infraestrutura, com resistência característica de 45 MPa aos 28 dias. Nessa dosagem adotou-se o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o qual, publicado em 1984, em um Estudo Técnico (ET-67), com o título “Parâmetros de Dosagem de Concreto”. Tal publicação consiste em uma adaptação do método sugerido na ACI 211.1-1981 para agregados brasileiros conforme NBR 7211:2009.

A elaboração da dosagem referência pelo método ABCP se iniciou pela fixação da relação água/cimento, seguida pela determinação do consumo de materiais (água, cimento e agregados) e, por fim, no estabelecimento do traço com relação ao unitário do cimento. A Tabela 6 apresenta a dosagem unitária kg/m³.

Tabela 6: Dosagem Unitária kg/m³

CPV ARI	AREIA	AREIA	BRITA	BRITA	A/C
	NATURAL	ARTIFICIAL	0	1	
1	1,425	0,61	0,42	2,381	0,55
373	531	228	157	887	205

A partir da dosagem referência confeccionou-se seis tipos de concretos substituindo em massa 5, 10 e 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. A Tabela 7 apresenta a dosagem referência e as porcentagem em massa das substituições.

Tabela 7: Descrição da dosagem referência, das siglas e das substituições do cimento por MCS

Descrição	Sigla	Metacaulim	Cerâmica Vermelha	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	a/c
Referência	REF	0	0	1,00	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 5% de MET	MET5	5	0	0,95	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 10% de MET	MET10	10	0	0,90	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 20% de MET	MET20	20	0	0,80	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 5% de CV	CV5	0	5	0,95	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 10% de CV	CV10	0	10	0,90	2,04	2,08	0,55
Substituição do cimento por 20% de CV	CV20	0	20	0,80	2,04	2,08	0,55

4.2.3 Confeção, moldagem e cura dos concretos

A confecção dos concretos seguindo as dosagens previamente determinadas ocorreu em uma betoneira intermitente de queda livre com eixo inclinado com capacidade volumétrica de 40 litros da marca CSM do laboratório do Centro Tecnológico da Supermix. O procedimento inicial consistiu em limpar a cuba da betoneira para realizar a confecção sem resíduos de concretagens anteriores. Após isso, colocou-se os agregados (miúdos e graúdos), o cimento, o Metacaulim ou a Cerâmica Vermelha na betoneira, e a

deixou funcionar por 1 minuto de forma a se obter uma mistura homogênea das matérias primas inseridas. A seguir, acrescentou-se metade da água e depois os aditivos previamente diluídos em água. Adicionou-se o restante da água aos poucos e de forma controlada. O funcionamento da betoneira ocorreu de modo intermitente: 10 minutos com uma parada após 5 minutos do início do processo para limpeza das paletas internas. Transcorrido esse tempo, realizou-se o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme determina a NBR NM 67:1998.

Realizado o *slump*, a moldagem dos corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura ocorreu conforme NBR 5738:2015, utilizando vibração manual. Os corpos de prova ficaram em cura saturada por 28 dias em ambiente de laboratório. Após este período, em função do ensaio a ser realizado, retirava-se alguns corpos de prova para serem mantidos à temperatura ambiente, os demais continuavam imersos em água até a data de um ensaio. Ao todo foram confeccionados 7 concretos distintos com um total de 280 corpos de prova.

4.2.4 Determinação das propriedades mecânicas e avaliação da durabilidade

Os corpos de prova confeccionados no item 4.2.3 após a cura foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante em idades iniciais. Para avaliação da durabilidade realizou-se os ensaios de absorção por imersão e avaliação da resistividade elétrica volumétrica, e em idades avançadas realizou-se os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante.

4.2.4.1 Ensaio de resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova, seguiu o estabelecido na NBR 5739:2018. Nesse ensaio, empregou-se uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca EMIC modelo PCE100E com capacidade máxima de 100 ton. Aplicou-se nos corpos de prova uma velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até a ruptura. Esse ensaio ocorreu após a moldagem nas idades de iniciais 7, 28, 56 e 90 dias, e em idades avançadas de 120, 180 e 365 dias. Esse ensaio também ocorreu aos 730 e 1100 dias.

4.2.4.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante

determinação do módulo de elasticidade ocorreu por meio do método da frequência ressonante no modo longitudinal, executado com base nas normas ASTM C 215, (2008) e BS 1881: Part 209 (1990). Esse ensaio consiste em vibrar a amostra por meio de uma unidade motriz eletromecânica (piezoelétrica) até atingir a sua amplitude máxima, quando a frequência de vibração se aproxima da frequência natural da amostra, sendo esse o valor da frequência ressonante.

Para a determinação da frequência natural de vibração das amostras de concreto, utilizou-se o aparelho Erudite MKII Resonancy Frequency Test System, da C.N.S. Electronics, Figura 9. A aferição da frequência ressonante ocorreu após a moldagem nas idades iniciais de 7, 14, 21, 28, 56 e 90 dias, e em idades avançadas 120, 150, 180 e 365 dias. Esse ensaio também ocorreu aos 730 e 1100 dias.

Figura 9: Equipamento de medição da frequência ressonante



Fonte: Autor

4.2.4.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica

Para avaliação da resistência ao ataque de cloretos realizou-se a avaliação da resistividade elétrica volumétrica. Esse ensaio, não destrutivo, permite avaliar indiretamente a porosidade e à microestrutura do concreto. Na avaliação da resistividade

elétrica volumétrica do concreto mensura-se a resistência à passagem de corrente elétrica, Equação 2.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Onde:

R = resistência elétrica (Ω/m);

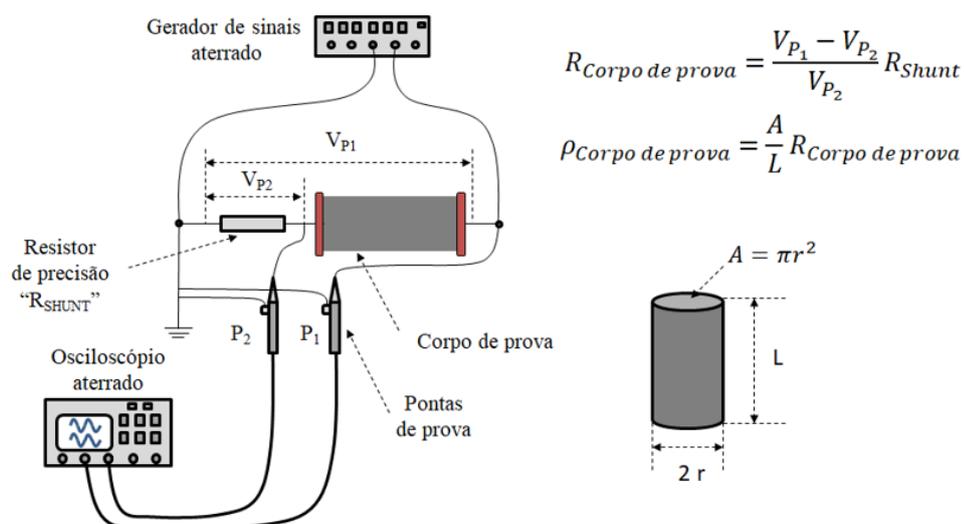
ρ = resistividade elétrica específica do material ($\Omega.m$);

L = comprimento (m);

A = área de seção transversal (m^2).

O aparelho utilizado é constituído por um gerador de sinais que aplica uma corrente alternada em um circuito instalado em série, esse circuito é constituído por um banco de resistência *shunt* e pelo corpo de prova, Figura 10. O contato no corpo de prova é feito por meio de dois eletrodos de cobre posicionados nas extremidades do corpo de prova. Para otimizar o fluxo da corrente elétrica, utiliza-se uma esponja de aço saturada em água potável nas interfaces da superfície de contato da placa de cobre com o corpo de prova. Como não existe uma variação na corrente elétrica, circuito montado em série, o valor da diferença de potencial será aferido por um osciloscópio instalado ao longo do circuito.

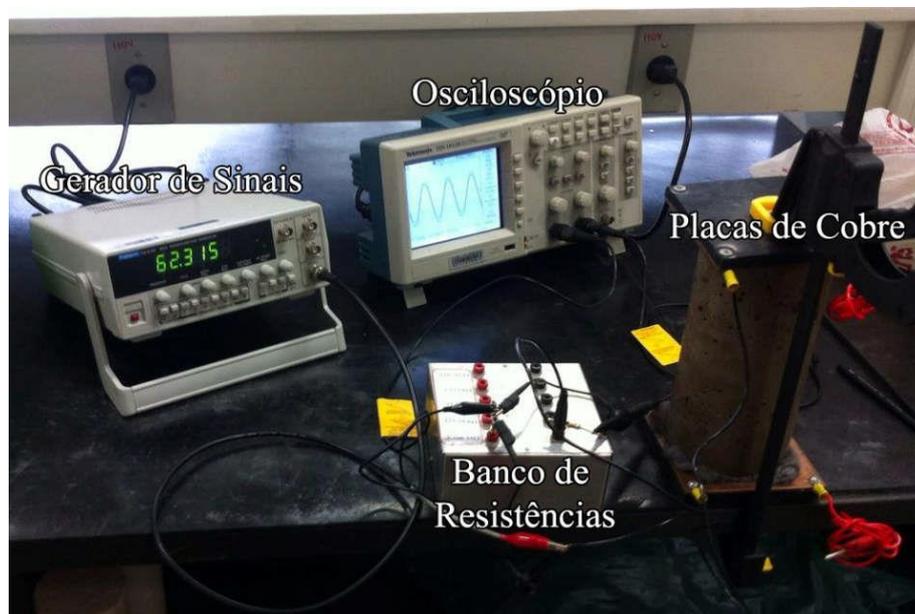
Figura 10: Sistema do equipamento de resistividade elétrica volumétrica



Fonte: Laboratório de Caracterização UFMG

O equipamento de verificação da resistividade elétrica foi desenvolvido pelos alunos do Laboratório Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânicos da UFMG, Figura 11.

Figura 11: Equipamentos para aferição da resistividade elétrica volumétrica



Fonte: Autor

A avaliação da durabilidade por meio da resistividade elétrica volumétrica ocorreu nos corpos de prova cilíndricos confeccionados no item 4.2.3 nas idades de 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 365, 730 e 1100 dias após a moldagem e saturação por 48 horas.

4.2.4.4 Absorção por imersão

A execução do ensaio de absorção de água por imersão seguiu o estabelecido na NBR 9778:2005. Para isso utilizou-se uma balança hidrostática com precisão de 0,01 grama da marca OHAUS Explorer e uma estufa da marca Linn Elektro Therm.

A absorção do concreto foi obtida através da relação entre a massa da água nela contida e a massa do corpo seco, dado pela Equação 03.

$$A(\%) = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (3)$$

Onde:

m_{sat} = massa saturada do corpo de prova (g)

m_s = massa seca do corpo de prova (g)

4.2.5 Escolha do teor de adição e confecção do concreto

Com os dados obtidos nos métodos descritos no item 4.2.4, optou-se para a avaliação da durabilidade frente a altas temperaturas apenas a dosagem que substitui 20% em massa do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. Com o objetivo de se ter maior confiabilidade nos dados apurados, seguindo a técnica de confecção, moldagem e cura descrita no item 4.2.3, confeccionou-se novos corpos de prova da dosagem referência e das substituições de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. Em seguida foram realizados todos os ensaios relacionados no item 4.2.4 para os concretos confeccionados.

4.2.6 Determinação das propriedades mecânicas e avaliação da durabilidade

Os corpos de prova confeccionados conforme descrito no item 4.2.5, passaram pelos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante para determinação das propriedades mecânicas nas idades iniciais. Para avaliação da durabilidade realizou-se o ensaio de avaliação da resistividade elétrica volumétrica e nas idades avançadas ocorreu os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante.

4.2.6.1 Ensaio de resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados no item 4.2.5, seguiu os procedimentos estabelecidos no item 4.2.4.1 nas idades de 7, 28, 365 e 730 dias após a moldagem.

4.2.6.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante

A determinação do módulo de elasticidade por frequência ressonante dos corpos de prova confeccionados no item 4.2.5, seguiu conforme os procedimentos estabelecidos no item 4.2.4.2, nas idades de 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 365 e 730 dias após a moldagem.

4.2.6.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica

A avaliação da resistividade elétrica volumétrica dos corpos de prova confeccionados no item 4.2.5, seguiu conforme os procedimentos estabelecidos no item 4.2.4.3, nas idades de 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 365 e 730 dias após a moldagem.

4.2.7 Exposição a altas temperaturas

As exposições a altas temperaturas ocorreu no simulador de *flashover* tipo contêiner da Academia de Bombeiros Militar (ABM), Unidade II/ Contagem, do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) e no forno a gás Grion do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais (LMPM) do Departamento de Engenharia de Transporte (DET), do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – Campus I/ Belo Horizonte.

4.2.7.1 Simulador de *flashover* tipo contêiner

O simulador *flashover* tipo contêiner consiste em um contêiner marítimo – *high cube*, o qual é utilizado como simulador de uma situação real de incêndio em

compartimento para treinamentos, Figura 12. As dimensões do contêiner são 12,20 m de comprimento, 2,45 m de largura e 2,90 m de altura. Possui dois acessos laterais com dimensões de 0,8 m de largura por 2,10 m de altura. A parte frontal do contêiner possui quatro portas, duas na porção superior e duas na inferior, com 1,17 m de largura por 1,29 m de altura cada uma. A Figura 13 apresenta uma perspectiva isométrica do contêiner com todas as suas dimensões e características.

Figura 12: Simulador de *flashover* tipo contêiner



Fonte: Autor

A instrução técnica de ensino (ITE) 13 do CBMMG define o protocolo de treinamento em simulador *flashover* tipo contêiner. Essa ITE 13 especifica o planejamento e organização, e detalha cada uma das fases de preparação do cenário, do ensaio de simulação e da verificação de segurança.

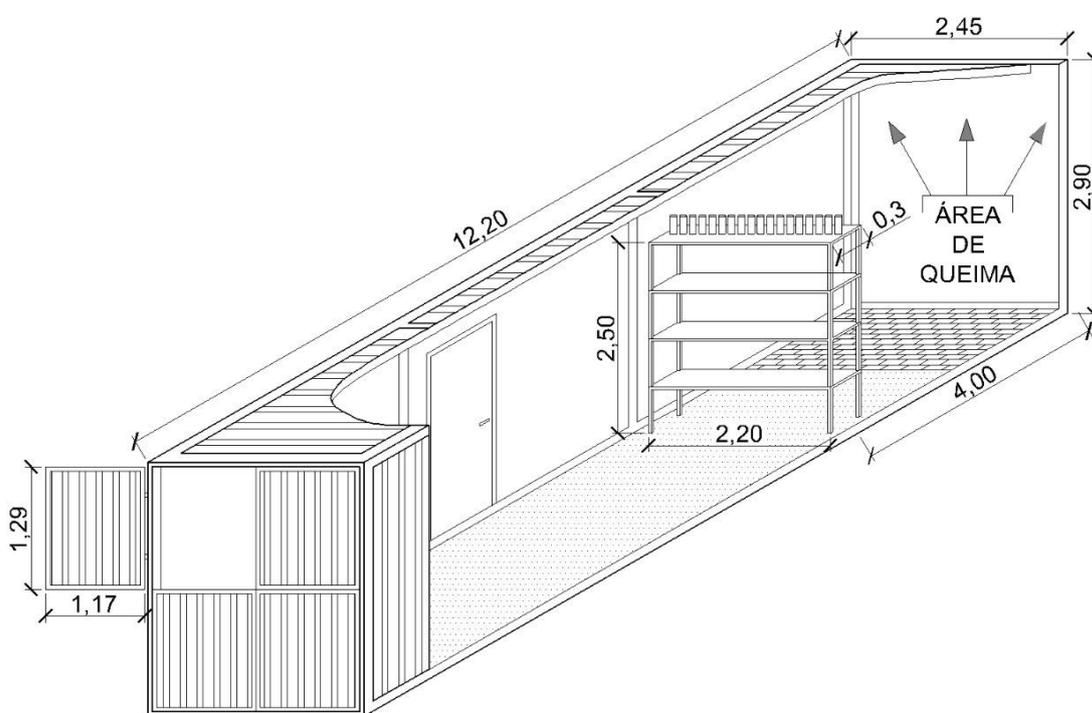
No interior do simulador de incêndio inseriu-se uma estante metálica com 2,50 m de altura e 2,20 m de comprimento, a qual foi posicionada a 4,00 metros de uma região denominada como área de queima, Figura 13. Na última prateleira dessa estante distribuiu-se um total de 18 corpos de prova de concreto com espaçamento de 2,5 cm entre si. Os corpos de prova possuíam no momento da exposição 1100 e 730 dias de idade. A Tabela 8 apresenta os concretos, as quantidades e as idades dos corpos de prova submetidos a simulação de incêndio no contêiner.

Tabela 8: Relação dos corpos de prova expostos a altas temperaturas no contêiner

Corpo de Prova	Concreto	Idade	
		1100 dias	730 dias
Cilíndrico	REF	3	3
	CV20	3	3
	MET20	3	3

Onde: REF concreto Referência, CV20 concreto com substituição de 20% em massa do cimento por Cerâmica Vermelha, MET20 concreto com substituição de 20% em massa do cimento por Metacaulim

Figura 13: Perspectiva isométrica do contêiner com a estante metálica em seu interior



Fonte: Autor

De acordo com a ITE 13, em uma simulação de incêndio utiliza-se como material combustível paletes de madeira da espécie *pinus*, os quais devem estar presos por correntes ou fixadores no fundo do contêiner numa região denominada como área de queima, a qual compreende o teto, a parede do fundo e as duas paredes laterais do contêiner. Na área de queima é necessário distribuir ao todo 11 paletes da seguinte maneira, dois paletes são fixados em cada parede lateral, três paletes são presos por correntes no teto e quatro são fixados na parede do fundo. Para iniciar a queima, torna-se

necessário retirar de cada palete uma pequena parcela de madeira e posicioná-las na vertical juntamente com algumas folhas de jornal. A ITE13 veda expressamente a utilização de qualquer líquido inflamável ou combustível para acelerar a combustão.

Utilizou-se o método determinístico previsto na Instrução Técnica (IT) 09 2ª edição do CBMMG para definir a carga de incêndio específica, Equação 4. O valor da carga de incêndio específica é obtida por meio da multiplicação do somatório da massa total do material combustível pelo seu potencial calorífico. Em seguida, divide-se pela área de armazenamento ou área de queima.

$$q_{fi} = \frac{\Sigma(M_i.H_i)}{A_f} \quad (4)$$

Onde:

q_{fi} = valor da carga de incêndio específica (MJ/m²);

M_i = massa total de cada componente i do material combustível (Kg);

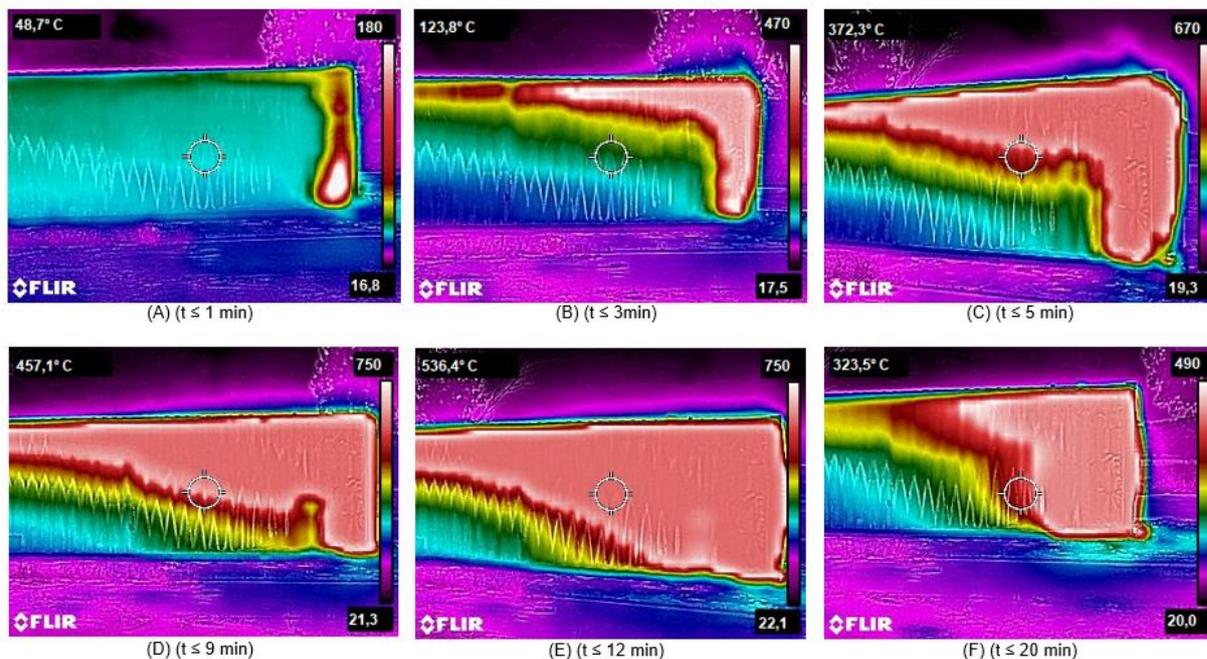
H_i = potencial calorífico de cada componente i do material combustível, (MJ/Kg);

A_f = área de armazenamento ou de queima (m²).

Na simulação de incêndio, os paletes de madeira pinus possuíam massa total de aproximadamente 210 quilogramas, a tabela C.1 da IT 09 define que o potencial de calorífico específico da madeira equivale a 19 MJ/kg. Os paletes foram distribuídos no fundo do contêiner em uma área de queima com cerca de 7,3 m². Realizando as operações matemáticas descritas na Equação 4, determina-se que a carga de incêndio específica referente a simulação de incêndio desse trabalho equivale a 548,2 MJ/m².

Aferiu-se a temperatura da queima no interior do contêiner por meio de imagens de uma câmera térmica para temperaturas entre -25° C a 1030° C da marca FLIR modelo TG 297. Também, empregou-se um termômetro infravermelho para temperaturas entre -50° C e 1050° C da marca Highmed modelo HM-88E. A simulação no contêiner teve duração de aproximadamente 25 minutos e seguiu a curva incêndio natural.

A figura 14 mostra a evolução da temperatura durante a simulação de incêndio natural no simulador *flashover* tipo contêiner.

Figura 14: Evolução da temperatura no simulador *flashover* tipo contêiner.

Fonte: Autor

Na sequência de imagens térmicas é possível observar a evolução do incêndio compartimentado no interior do contêiner. A Figura 12.A representa a fase inicial do incêndio, as Figuras 12.B e 12.C representam a fase de crescimento, as Figuras 12.D e 12.E representam do incêndio totalmente desenvolvido, alcançando patamares de temperatura em torno de 750° C. A Figura 12.F indica o decaimento do incêndio em virtude de o material combustível ter sido consumido. O termômetro infravermelho utilizado para aferir a temperatura no interior do contêiner indicou a temperatura máxima de 766°C.

Os corpos de prova permaneceram no interior do contêiner até a sua temperatura equiparar com a temperatura ambiente. Transcorrido o período de 48 horas após a simulação no contêiner, ocorreu a aferição da massa dos corpos de prova na balança hidrostática com precisão de 0,01 grama da marca OHAUS Explorer. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante de acordo com o item 4.2.4.2. A avaliação da resistividade elétrica volumétrica, segundo item 4.2.4.3, ocorreu 48 horas após último ensaio visto que era necessário saturar os corpos de prova em água. Por fim, a resistência à compressão, conforme item 4.2.4.1, ocorreu seis dias após a última avaliação.

4.2.7.2 Forno a gás Grion

O forno a gás Grion, Figura 15, fabricado pela Grion Fornos Industriais Ltda, possui a parede externa em chapa de aço de 1/8". As dimensões externas do forno são 1,2 m de comprimento por 1,2 m de largura e 1,2 m de altura. A sua parte interna possui uma câmara de combustão cilíndrica com estrutura refratária com 0,6 m de diâmetro por 0,7 m de altura. O forno é alimentado por uma bateria de dois cilindros P45 contendo gás liquefeito de petróleo. O forno Grion apresenta uma programação de operação na qual é possível alcançar uma taxa de aquecimento próximo do estabelecido na curva de incêndio padrão da ISO 834:1975:1999.

Figura 15: Forno a Gás Grion

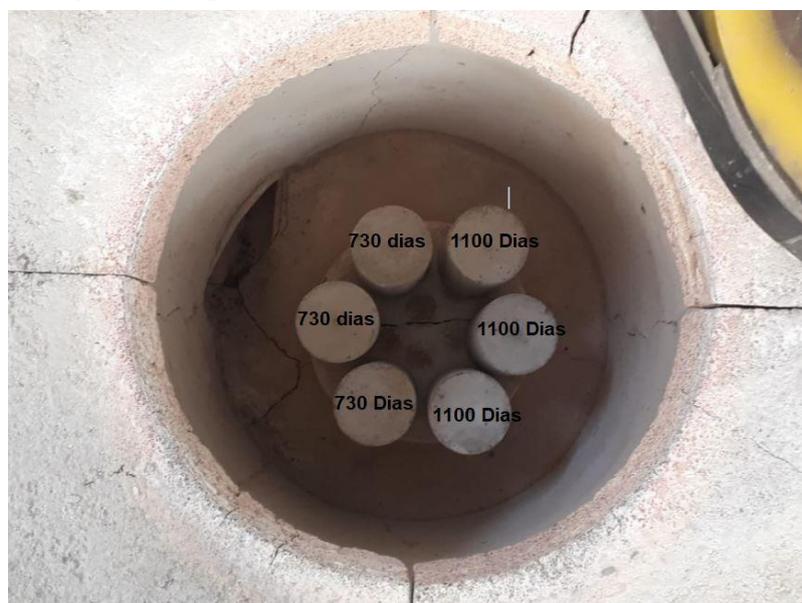


Fonte: Autor

Para a simulação de incêndio no forno Grion destinou-se 18 corpos de prova com idades de 1100 e 730 dias. Como a câmara de combustão interna do forno comportou somente seis corpos de prova, Figura 16, foi necessário realizar três simulações. Em cada simulação ensaiou-se três corpos de prova na idade de 1100 dias e três com 730 dias, em

ambas as idades se ensaiou a mesma dosagem. A tabela 9, apresenta os concretos, as quantidades e as idades dos corpos de prova ensaiados no forno.

Figura 16: Corpos de Prova na câmara de combustão do Forno Grion



Fonte: Autor

Tabela 9: Relação dos corpos de prova expostos a altas temperaturas no Forno Grion

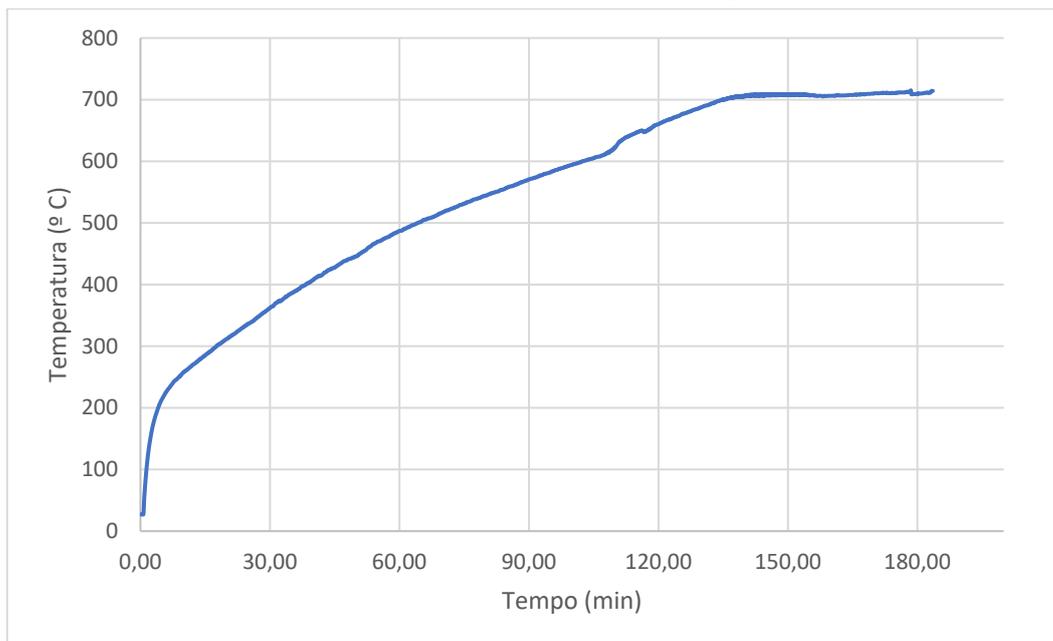
Corpo de Prova	Concreto	Idade	
		1100 dias	730 dias
Cilíndrico	REF	3	3
	CV20	3	3
	MET20	3	3

Onde: REF concreto Referência, CV20 concreto com substituição de 20% em massa do cimento por Cerâmica Vermelha, MET20 concreto com substituição de 20% em massa do cimento por Metacaulim

O objetivo do ensaio foi expor os corpos de prova a temperatura máxima de 700° C seguindo a taxa de aquecimento prevista na curva de incêndio padrão da ISO 834:1975, sendo que cada ensaio durou em média 180 minutos. A aferição da temperatura ocorreu por meio de termopar tipo K conectado na câmara de combustão interna do Forno Grion.

O Gráfico 1, representa a curva de incêndio padrão desenvolvida pelo Forno Grion durante o ensaio de exposição dos corpos de prova a altas temperaturas.

Gráfico 1: Curva de incêndio padrão desenvolvida pelo Forno Grion



O forno iniciou com a temperatura ambiente de 27,1 °C. Observa-se que para o termopar tipo K do forno aferir a temperatura de 700° C, necessitou-se em média de 130 min, mantendo-se nesse patamar por cerca de 50 min. A aproximadamente 180 min após o início do ensaio desligou-se o forno.

Os corpos de prova ficaram no interior da câmara de combustão do forno por 24 horas até a sua temperatura equiparar com a temperatura ambiente. Devido à necessidade do resfriamento total do forno para executar a próxima simulação, o período para realização dos ensaios subsequentes foi distinto para cada grupo de concreto. Os ensaios subsequentes iniciaram setes dias após a primeira simulação. Realizou-se a aferição da massa dos corpos de prova na balança hidrostática com precisão de 0,01 grama da marca OHAUS Explorer. Em seguida, determinou-se o módulo de elasticidade por frequência ressonante, de acordo com o item 4.2.4.2, 48 horas após esse ensaio avaliou-se a resistividade elétrica volumétrica, item 4.2.4.3. Por fim, a resistência à compressão, conforme item 4.2.4.1, ocorreu seis dias após a última avaliação.

5 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios e as análises realizadas serão apresentados a seguir em três partes. A primeira descreve a caracterização química e física dos materiais cimentícios suplementares. Na segunda parte apresenta-se a caracterização mecânica e a análise dos parâmetros de durabilidade, ambas em idades iniciais e idades avançadas dos concretos. E, por fim, na terceira são apresentados os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade por frequência ressonante, avaliação da resistividade elétrica volumétrica e avaliação da variação da massa após exposição a altas temperaturas.

Para otimizar a leitura dos resultados, a Tabela 10 apresenta a descrição dos concretos produzidos com suas respectivas siglas.

Tabela 10: Descrição dos concretos produzidos e suas respectivas siglas adotadas

DESCRIÇÃO	SIGLA
Concreto Referência	REF
Concreto com substituição do cimento por 5% de Metacaulim	MET5
Concreto com substituição do cimento por 10% de Metacaulim	MET10
Concreto com substituição do cimento por 20% de Metacaulim	MET20
Concreto com substituição do cimento por 5% de Cerâmica Vermelha	CV5
Concreto com substituição do cimento por 10% de Cerâmica Vermelha	CV10
Concreto com substituição do cimento por 20% de Cerâmica Vermelha	CV20

5.1 Caracterização dos Materiais Cimentícios Suplementares

5.1.1 Composição química

A composição química por meio da espectroscopia de fluorescência de raios-X do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha é apresentada na Tabela 11. Verifica-se que os materiais possuem alta concentração de alumino-silicatos. O Metacaulim possui 37,87% de SiO₂ e 55,16% de Al₂O₃, correspondendo a 93,03% em peso. A Cerâmica Vermelha possui 46,13% de SiO₂ e 31,11% de Al₂O₃, correspondendo a 77,24% em peso. Os materiais cimentícios suplementares ricos em SiO₂ + Al₂O₃, como é o caso dos materiais empregados, são considerados altamente pozolânicos. Quando empregados como

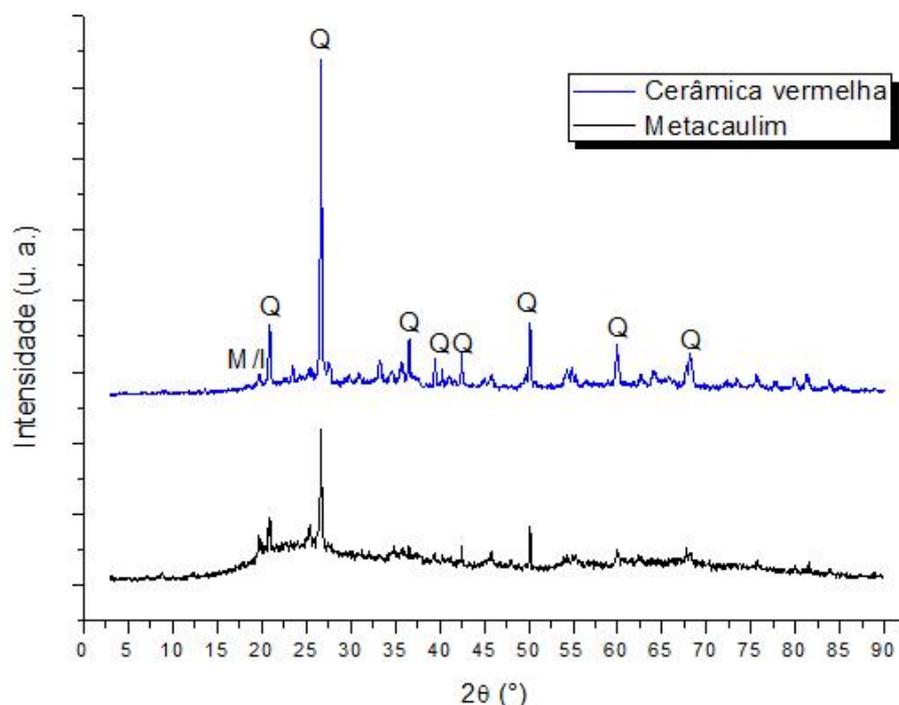
materiais cimentícios substituindo parcialmente o cimento ou como adição colaboram para melhora das características mecânicas como por exemplo a resistência à compressão (SUJJAVANICH *et al.*, 2017).

Tabela 11: Composição química do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha

(% em Peso)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Outros
Metacaulim	37,87	55,16	0,05	0,85	2,64	2,01	0,84	0,19	0,04	0,54
Cerâmica Vermelha	46,13	31,11	0,31	3,51	8,28	3,43	5,63	0,48	0,08	0,32

A Figura 17 mostra os espectros de DRX dos materiais estudados. Observa-se que as amostras de Metacaulim e Cerâmica Vermelha apresentam halos difusos, comportamentos característicos de estruturas amorfas.

Figura 17: Espectros de DRX do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha



Ao analisar os resultados da difração de raios-X pode-se observar características de estrutura amorfa dos elementos. O Metacaulim e a Cerâmica Vermelha apresentam fase amorfa que pode ser identificada na faixa de 18 – 30° 2 θ . Sendo que o Metacaulim apresenta um halo amorfo com maior amplitude em relação a Cerâmica Vermelha. Essa

característica conforme observado por (HOLLANDERS *et al.*, 2016) é um indicativo de que o Metacaulim possui teor pozolânico superior em relação ao teor da Cerâmica Vermelha. Os resultados mostram que o composto predominante no Metacaulim é o Quatzo (Q) e na Cerâmica Vermelha é a Caulinita (C).

5.1.2 Superfície específica e massa específica

Os valores da superfície específica BET são apresentados na Tabela 12. O Metacaulim apresenta 20 m²/g de superfície específica, enquanto que a Cerâmica Vermelha possui 8 m²/g. A superfície específica BET avalia a superfície externa e a área interna dos poros das partículas, isso tende a influenciar na taxa de reação pozolânica dos materiais. Segundo HUANG *et al.*, (2018) e SNELLINGS *et al.*, (2016) esse fenômeno é devido ao maior contato da pozolana com o hidróxido de cálcio.

Tabela 12: Superfície específica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha

Material	Metacaulim	Cerâmica Vermelha
Superfície Específica (m²/g)	20	8

A massa específica foi aferida no Autodensity, com nitrogênio gasoso, no qual determina o volume da amostra por meio da diferença de pressão entre as câmaras. Ambos os materiais empregados apresentaram valores semelhantes, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Massa específica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha

Material	Metacaulim	Cerâmica Vermelha
Massa Específica (g/cm³)	2,66	2,78

5.1.3 Granulometria a laser

A distribuição granulométrica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha estão apresentados na Tabela 14. Os diâmetros referentes à 10, 50 e 90% do volume de partículas e os diâmetros médios das curvas granulométricas são representados respectivamente por d₁₀, d₅₀, d₉₀ e d_{médio}.

Tabela 14: Distribuição granulométrica do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha

Material	Metacaulim	Cerâmica Vermelha
d ₁₀ (µm)	1,90	1,05
d ₅₀ (µm)	11,45	5,18

d_{90} (μm)	27,7	28,19
$d_{\text{médio}}$ (μm)	15,75	10,30

Nota: d = diâmetro característico

Quanto à distribuição granulométrica, o Metacaulim e a Cerâmica analisados apresentam 100% das partículas com tamanho inferior a 30 μm . Os diâmetros característicos desses materiais no diâmetro d_{50} e no diâmetro médio estão contidos no intervalo de 5,18 - 11,45 μm e 10,3 - 15,75 μm , respectivamente.

5.1.4 Pozolanidade

A pozolanidade do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha foi avaliada por meio do ensaio de Chapelle Modificado e da análise termogravimétrica.

5.1.4.1 Chapelle Modificado

O teor de pozolanidade do Chapelle Modificado, ou seja, índice de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixado do Metacaulim e da Cerâmica Vermelha são apresentados na Tabela 14. Os teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixados foram calculados segundo as equações da NBR 15.895:2010 e a norma francesa NF P18-513 (2010).

Tabela 15: Índices de pozolanidade IABNT e INF e a razão entre esses valores (IABNT/INF)

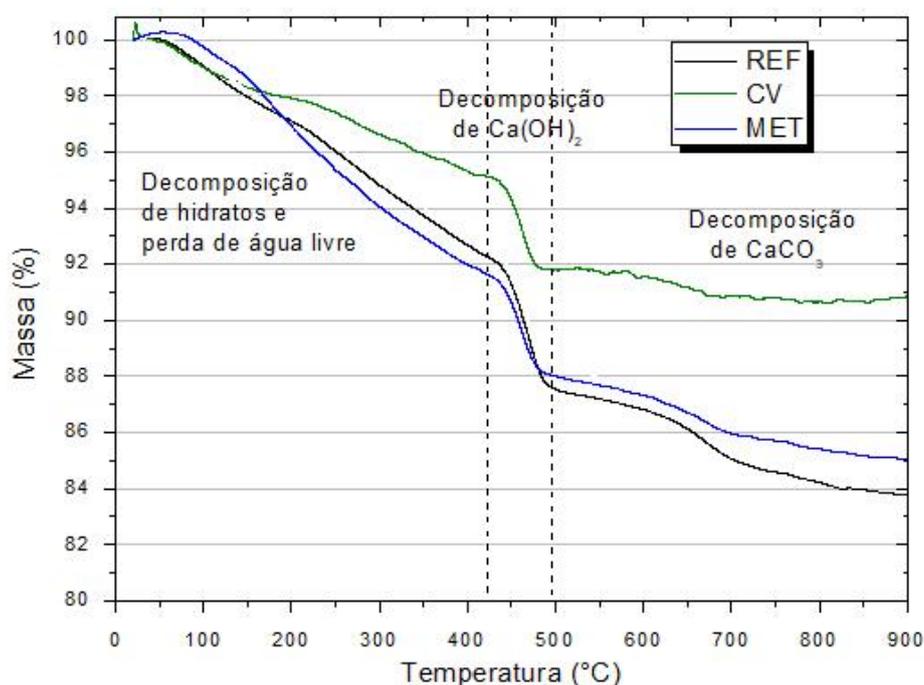
Material	Teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixado (mg/g)		
	I_{ABNT}	I_{NF}	$I_{\text{NF}}/I_{\text{ABNT}}$
Metacaulim	813	942	1,16
Cerâmica Vermelha	402	440	1,09

Segundo RAVERDY *et al.*, (1980) e HOLLANDERS *et al.*, (2016) para um material cimentício suplementar ser classificado como pozolânico é necessário possuir um teor mínimo de CaO fixado de 330 mg/g. CARNEIRO *et al.*, (2018) e FITOS *et al.*, (2015) consideram que no caso do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deverá ser no mínimo 435,6 mg/g. O Metacaulim apresentou um teor de 813 mg/g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixado, podendo ser considerado como altamente pozolânico. A Cerâmica Vermelha não se mostrou pozolânica, resultado semelhante encontrado por (BREKAILO *et al.*, 2019).

5.1.4.2 Termogravimetria

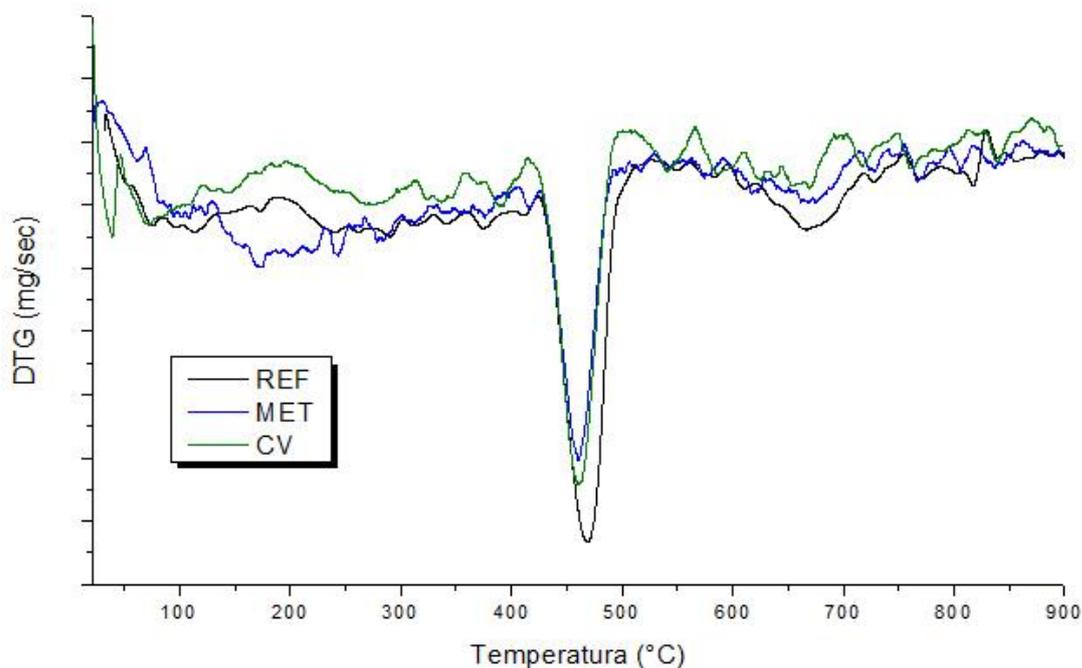
A análise por termogravimetria (TGA) foi realizada na amostra da pasta de cimento de referência, e nas variações com substituição de 10% do Metacaulim ou da Cerâmica Vermelha. Na Figura 18 e na Figura 19 são apresentadas as curvas de Termogravimetria (TGA) e a DTG, derivada primeira em relação à temperatura.

Figura 18: Curvas de Termogravimetria (TGA) das pastas de cimento referência e com 10% de substituição por Metacaulim e Cerâmica Vermelha



As curvas termogravimétricas (TG) mostram três faixas principais de perda de massa. Do início do processo até cerca de 400 °C, o fenômeno ocorre em função da perda de água quimicamente ligada nas estruturas de CSH. O pico apresentado por volta dos 400 a 500 °C indica a decomposição de Ca(OH)_2 . Por fim, a decomposição do CaCO_3 pode ser observada a partir dos 500 °C. Por meio das curvas apresentadas, pode-se dizer qualitativamente que o Metacaulim tende a ser um material altamente pozolânico e a Cerâmica Vermelha como material menos reativo.

Figura 19: Curvas de derivada Primeira da Termogravimetria (DTG) das pastas de cimento da referência com 10% de substituição por Metacaulim e Cerâmica Vermelha



Conforme a Figura 19 as curvas de derivada primeira da termogravimetria (DTG) apresentam faixas distintas de decomposição de elementos. A faixa inicial, em torno dos 0 a 140 °C, pode ser conferida à decomposição de CSH e etringita e a perda de água livre fisicamente adsorvida proveniente das próprias amostras em caso de ineficácia do processo de preparação (ZEYAD *et al.*, 2017). A faixa seguinte, dos 140 aos 250 °C, corresponde à decomposição de aluminatos de cálcio hidratados formando pelas reações pozolânicas. Observa-se uma acentuada decomposição, principalmente, para a amostra com Metacaulim, o que corrobora para o que indica os resultados encontrados na análise pozolânica realizada por meio do ensaio de Chappelle Modificado, Tabela 15.

5.2 Caracterização mecânica e avaliação da durabilidade

A caracterização mecânica dos concretos confeccionados ocorreu por meio dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade por frequência ressonante. A avaliação dos parâmetros de durabilidade foi realizada pela avaliação da resistividade

elétrica volumétrica, absorção por imersão e índice de vazios. A leitura das siglas dos concretos analisados, REF, MET5, MET10, MET20, CV5, CV10 e CV20 se dá como apresentado na Tabela 10.

5.2.1 Resistência à compressão

A caracterização mecânica por meio do ensaio de resistência à compressão ocorreu nas idades iniciais aos 7, 28 e 56 dias, e em idades avançadas aos 90, 120, 180 e 365 dias, ensaiou-se 3 corpos de prova por dosagem. Os Gráficos 2 e 3 mostram a média dos resultados da resistência à compressão do concreto Referência em relação ao Metacaulim e em relação a Cerâmica Vermelha, respectivamente.

Gráfico 2: Resistência à Compressão do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim

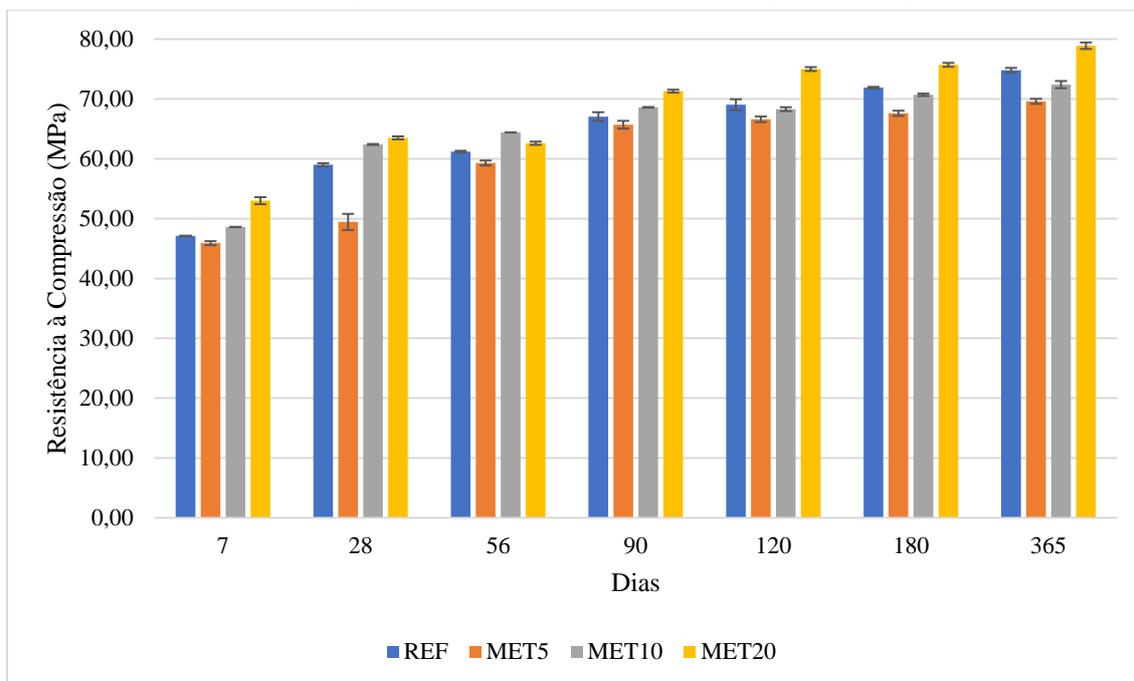
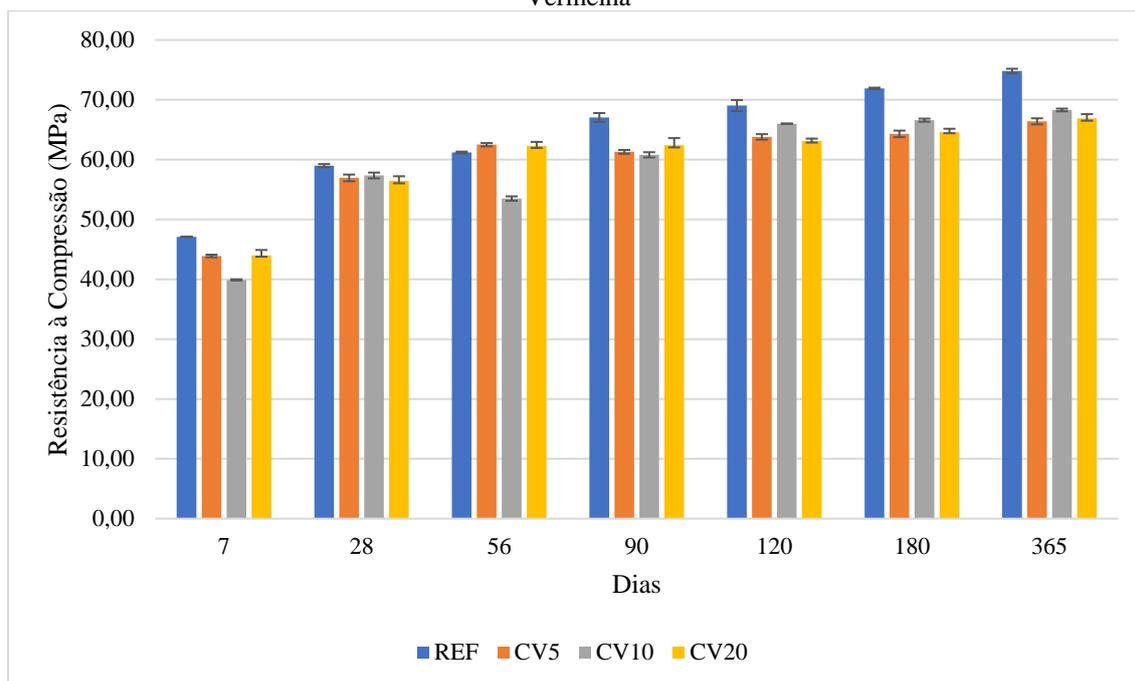


Gráfico 3: Resistência à Compressão do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha



Ao longo das idades, pode-se observar a evolução dos valores da resistência à compressão dos concretos produzidos. Todos os concretos apresentaram resistência à compressão superior a 40 MPa aos 7 dias e 45 MPa aos 28 dias, sendo que a dosagem característica foi para um concreto com resistência de 45 MPa.

O concreto com substituição do cimento por 20% de Metacaulim apresentou valores de resistência à compressão superior aos demais concretos. Aos 28 dias, o concreto com substituição do cimento por 20% de Metacaulim apresentou o valor de resistência à compressão em torno de 8% superior ao concreto Referência e 12% superior ao concreto com substituição do cimento por 20% de Cerâmica Vermelha. Nas idades avançadas, o concreto MET20 mostrou-se mais eficiente em relação aos valores de resistência à compressão do que os concretos MET5 e MET10, e ainda, superior ao REF.

Quanto aos concretos com substituição por Cerâmica Vermelha, apresentaram uma evolução da resistência à compressão ao longo das idades, exceto para o concreto com substituição do cimento por 10% de Cerâmica Vermelha aos 56 dias. Aos 28 dias, todos os concretos com substituições por Cerâmica Vermelha apresentaram valores de resistência à compressão próximos ao concreto Referência, em torno de 56 MPa. Sendo esse valor 24% superior ao esperado para a resistência característica, 45 MPa. Nas idades avançadas, o concreto Referência apresentou resistências à compressão superior aos concretos com Cerâmica Vermelha.

5.2.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante

A caracterização mecânica por meio do ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante ocorreu nas idades iniciais aos 7, 14, 21, 28 e 56 dias, e em idades avançadas aos 90, 120, 150 e 180 e 365 dias, ensaiou-se 6 corpos de prova por dosagem. Os Gráficos 4 e 5 mostram a média dos resultados do módulo de elasticidade por frequência ressonante do concreto Referência em relação ao Metacaulim e em relação a Cerâmica Vermelha, respectivamente.

Gráfico 4: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim

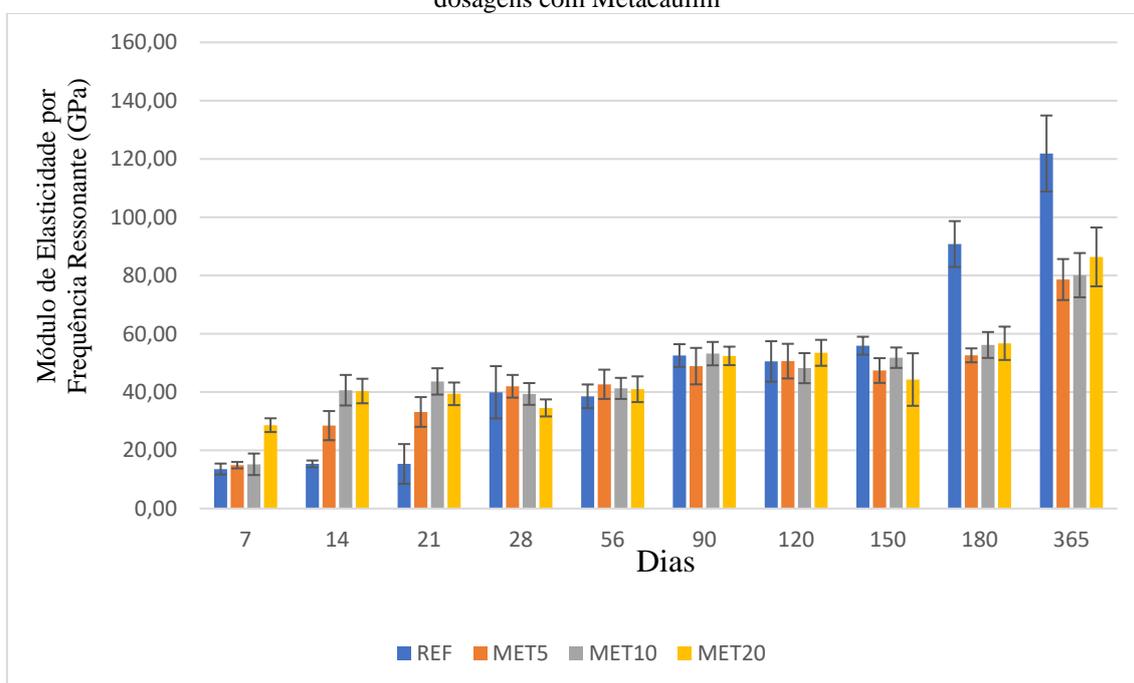
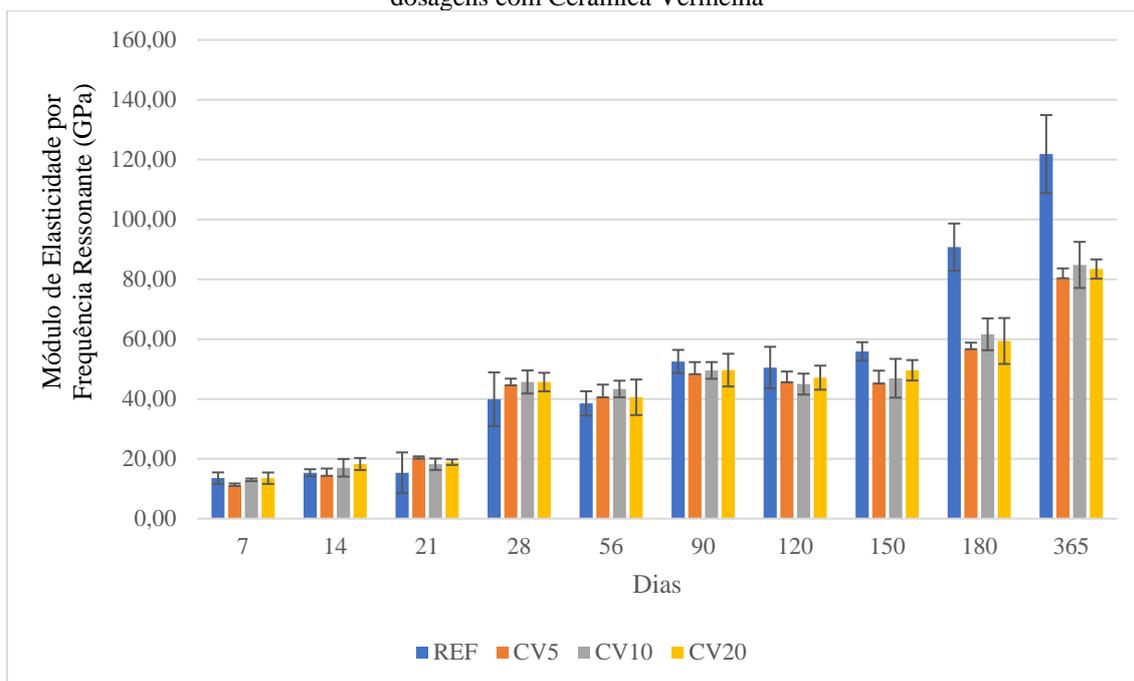


Gráfico 5: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha



Os resultados mostram que ao longo dos dias houve um aumento no módulo de elasticidade por frequência ressonante em todos os concretos. Nas idades iniciais, os concretos com substituições do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha apresentaram valores do módulo de elasticidade superiores ao concreto Referência. Observa-se que, os concretos com Metacaulim mostraram valores superiores ao concreto REF aos 56 dias, 6%, 7% e 8% para o MET20, MET10 e MET5, respectivamente. Enquanto os concretos com Cerâmica Vermelha apresentaram essa condição aos 28 dias, 12% para o CV5 e 14% para o CV10 e CV20. No entanto, o concreto Referência começou a mostrar valores superiores no módulo de elasticidade a partir dos 150 dias em relação aos concretos com Metacaulim e 90 dias em relação aos concretos com Cerâmica Vermelha.

5.2.3 Resistividade Elétrica Volumétrica

A avaliação da resistividade elétrica volumétrica ocorreu nas idades iniciais aos 7, 14, 21, 28 e 56, e em idades avançadas aos 90, 120, 150, 180 e 365 dias, ensaiou-se 8 corpos de prova por dosagem. Os Gráficos 6 e 7 mostram a médias dos resultados da resistividade elétrica volumétrica do concreto Referência em relação ao Metacaulim e em relação a Cerâmica Vermelha, respectivamente.

Gráfico 6: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto Referência em função das dosagens com Metacaulim

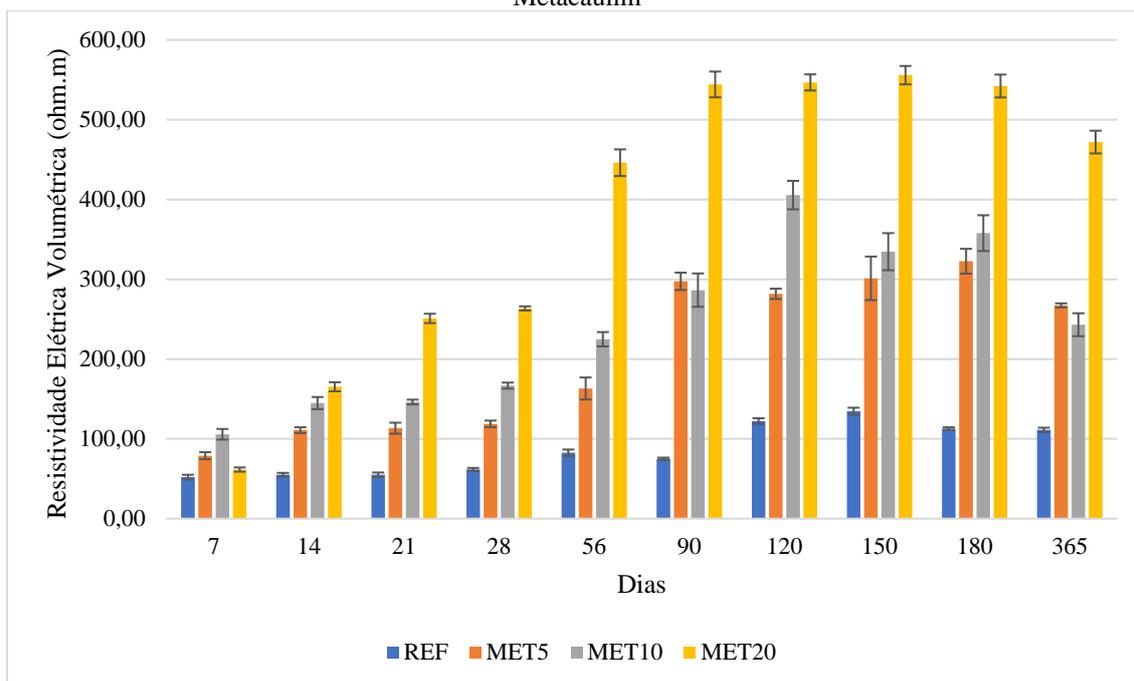
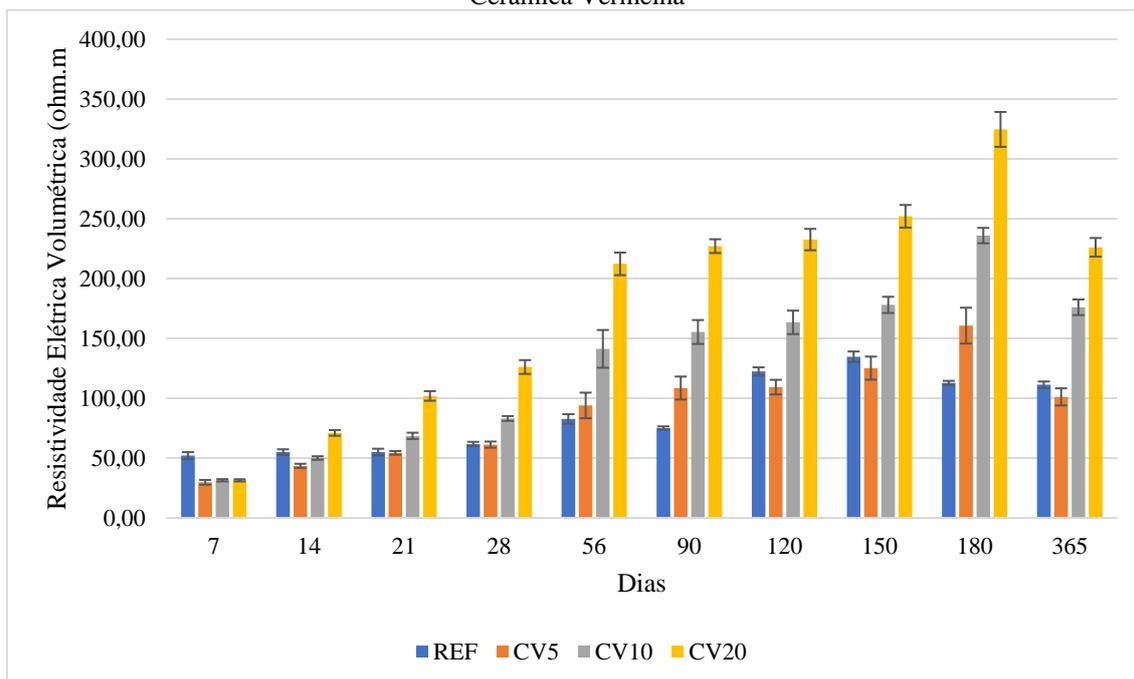


Gráfico 7: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto Referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha



No geral, os concretos com substituições do cimento por Metacaulim apresentam valores de resistividade elétrica volumétrica superiores ao concreto Referência em todas as idades. Quanto maior percentual de substituição empregado mais eficiente se mostrou a evolução dos valores de resistividade elétrica. Destaca-se que o concreto com 20% de Metacaulim apresentou os maiores valores em relação aos demais concretos. Aos 28 dias,

O MET20 apresentou resistividade elétrica em torno 400% superior ao concreto Referência.

A partir dos 28 dias, os concretos com substituições do cimento por 10% ou 20% de Cerâmica Vermelha apresentaram valores de resistividade elétrica volumétrica superiores ao concreto Referência. Sendo que, o concreto CV20 apresentou resistividade elétrica volumétrica 200% superior ao concreto Referência. O percentual de 5% de substituição do cimento por Cerâmica Vermelha foi o menos eficiente para a melhora da propriedade.

5.2.4 Absorção por imersão e índice de vazios

A avaliação dos parâmetros de durabilidade por meio da absorção de água por imersão e o índice de vazios foram avaliados aos 56 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 11. O intuito foi observar a influência dos distintos teores de substituição do cimento pelo MCS na porosidade da matriz cimentícia. Uma vez que, quanto menor o fator de água absorvida por um concreto maior resistência à penetração de substâncias nocivas à estrutura, conferido maior durabilidade e qualidade à estrutura.

Tabela 11 Absorção por imersão, índice de vazios e massas específicas

Dosagem	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Massa Específica Saturada (g/cm ³)	Massa Específica Real (g/cm ³)
REF	5,13	11,77	3,67	3,86	2,30
MET5	2,54	6,09	3,74	3,83	2,40
MET10	5,01	11,57	3,63	3,82	2,31
MET20	4,87	11,22	3,67	3,85	2,31
CV5	5,76	13,31	3,56	3,77	2,31
CV10	2,29	5,45	3,70	3,79	2,38
CV20	4,80	14,18	3,68	3,78	2,37

Os resultados demonstram que a substituição do cimento por Metacaulim e Cerâmica Vermelha contribuem para modificar a estrutura porosa do concreto. Nas dosagens com inserção de Metacaulim, os resultados mostram que a absorção de água e o índice de vazios foram reduzidos quando comparado ao concreto Referência. O concreto MET5 apresentou 2,54% e o concreto REF 5,13% de absorção de água. Assim

como nos resultados apresentados por GILL e SIDDIQUE (2018), a absorção de água aumentou com o acréscimo do percentual de substituição do cimento por Metacaulim. A Cerâmica Vermelha apresentou menor absorção de água para a dosagem com 10% de substituição, 2,29%, enquanto o percentual menos eficiente foi a de 5% de substituição, 5,76%. As dosagens MET10, MET20 e CV20 não apresentaram redução relevante no teor de índice de vazios, 5,01% - 4,87% - 4,8%, respectivamente.

5.3 Exposição a altas temperaturas

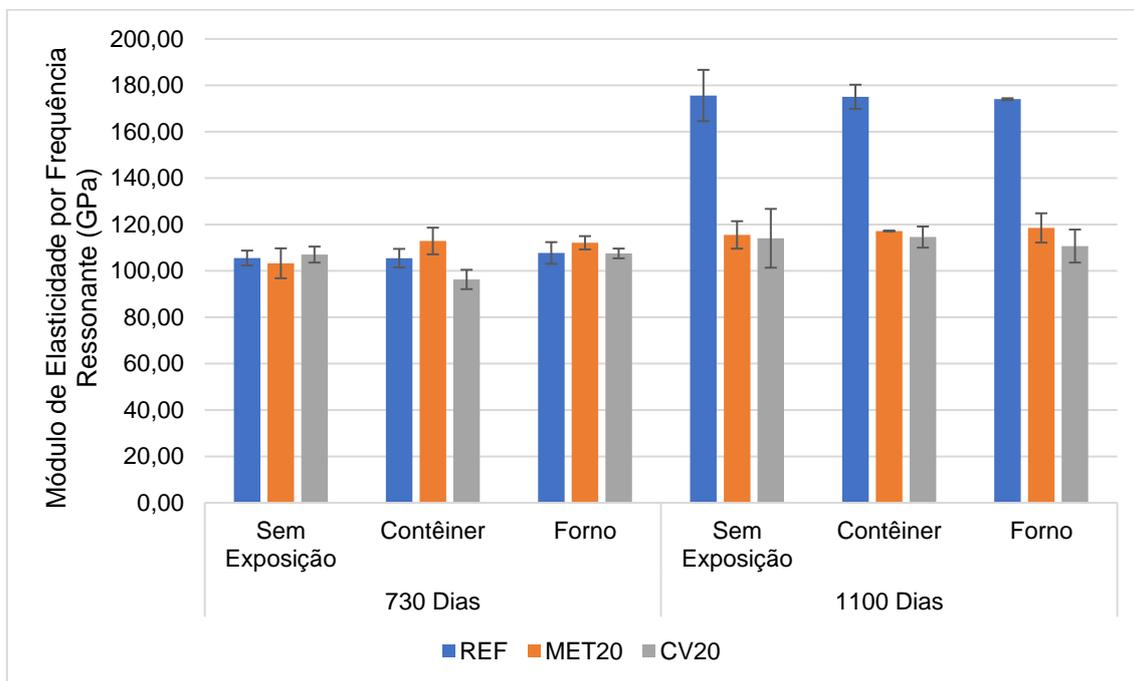
De um modo geral, os concretos com substituições de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha apresentaram os melhores resultados nos ensaios de caracterização mecânica e nos parâmetros de durabilidade. Diante disso, o concreto Referência e os concretos com substituições de 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha foram expostos a altas temperaturas no simulador de *flashover* tipo contêiner e no forno a gás Grion. Em seguida, determinou-se o ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante, avaliação da resistividade elétrica volumétrica e o ensaio de resistência à compressão. Além disso, ocorreu a aferição da massa dos corpos de prova antes e após a exposição a altas temperaturas.

A leitura das siglas dos concretos analisados, REF, MET20 e CV20 se dá como apresentado na Tabela 10. Foram ensaios dois grupos de corpos de prova, um com 730 dias e outro com 1100 dias.

5.3.1 Módulo de elasticidade por frequência ressonante

O ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante ocorreu em 3 corpos de prova de cada concreto. O Gráfico 8 mostra a média dos resultados de módulo de elasticidade por frequência ressonante do concreto REF em relação ao MET20 e ao CV20, com e sem exposição a altas temperaturas.

Gráfico 8: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas



Ao analisar os resultados, pode-se observar que a exposição a altas temperaturas não afetou bruscamente o parâmetro de rigidez do concreto.

Em relação ao concreto REF, não se observou variação significativa do módulo de elasticidade, tanto aos 730 dias quanto aos 1100 dias. Os resultados indicam variação menor que 2% do concreto REF exposto a situações de altas temperaturas quando comparado ao sem exposição.

Quanto ao concreto MET20 submetido ao contêiner e ao forno, os resultados mostram que o módulo de elasticidade aumentou cerca de 9% em relação ao MET20 sem exposição, aos 730 dias. Pode-se observar o mesmo comportamento aos 1100 dias, sendo esse aumento cerca de 3%.

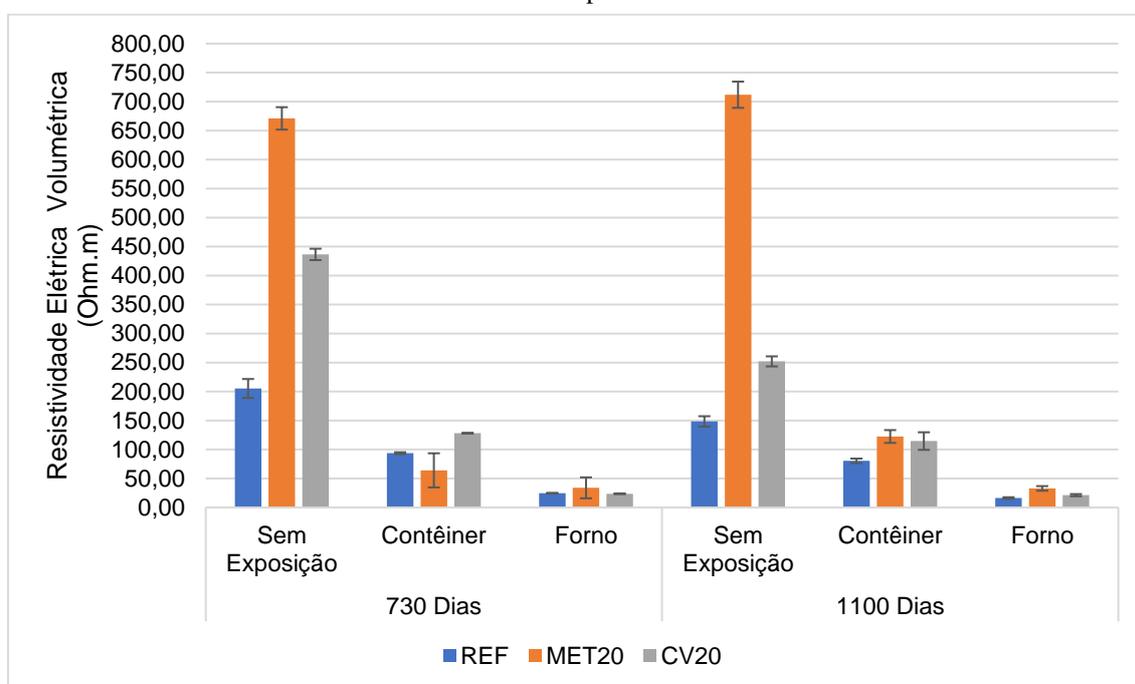
Os resultados mostram uma discrepância de comportamento dos concretos CV20 em relação aos 730 e aos 100 dias. Aos 730 dias, o CV20 submetido ao contêiner apresentou redução de aproximadamente 10% no módulo de elasticidade em relação ao sem exposição. Enquanto, aos 1100 dias, o CV20 submetido ao forno foi o que apresentou uma redução de cerca de 4%.

No quesito concreto com substituições, a substituição parcial do cimento por Metacaulim foi a que apresentou o concreto com menor alteração no ensaio de módulo de elasticidade em ambas as situações, contêiner ou forno, e idades analisadas.

5.3.2 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica

A avaliação da resistividade elétrica volumétrica ocorreu em 3 corpos de prova de cada concreto. O Gráfico 9 mostra a média dos resultados da avaliação da resistividade elétrica volumétrica do concreto REF em relação ao MET20 e a CV20, com e sem exposição a altas temperaturas.

Gráfico 9: Resistividade Elétrica Volumétrica dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas



Os resultados mostram que a exposição a altas temperaturas, tanto no contêiner quanto no forno, reduziu a resistividade elétrica de todos os concretos analisados.

De acordo com os resultados, a resistividade elétrica volumétrica do concreto REF, em ambas as idades, foi bruscamente afetada pela exposição a altas temperaturas em relação aos concretos sem exposição. Pelo gráfico é possível observar que a resistividade elétrica volumétrica do REF reduziu 119% no contêiner e 732% no forno, na idade de 730 dias. Aos 1100 dias, a exposição ao forno também foi o que contribuiu para maior redução da resistividade elétrica volumétrica. Houve 85% de redução no contêiner e 807% de redução no forno.

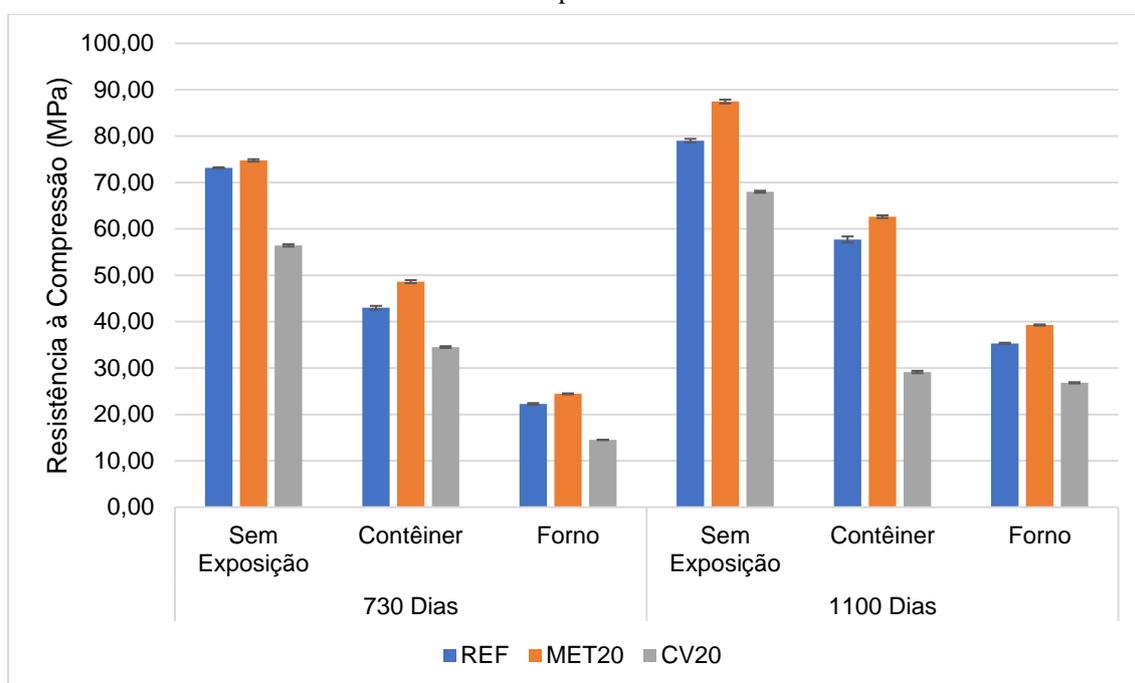
O concreto MET20, conforme os resultados, apresentou uma redução na resistividade elétrica volumétrica de 947% no contêiner e 1877% no forno, na idade de 730 dias. Enquanto, na idade de 1100 dias a redução foi de 481% no contêiner e de 2061% no forno. Ambas as situações comparadas aos concretos sem exposição a altas temperaturas.

Para o concreto CV20, os resultados indicam uma redução da resistividade elétrica volumétrica nas duas situações de exposição. Sendo redução de 241% no contêiner e 1744% no forno aos 730 dias. E, na idade de 1100 dias uma redução de 120% no contêiner e 1084% no forno.

5.3.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão ocorreu em 3 corpos de prova de cada concreto. O Gráfico 10 ilustra a média dos resultados da resistência à compressão do concreto REF em relação ao MET20 e ao CV20, com e sem exposição a altas temperaturas.

Gráfico 10: Resistência à Compressão dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas



De um modo geral, pode-se verificar que a exposição a altas temperaturas no contêiner e no forno afetou os valores da resistência a compressão dos concretos em

ambas as idades, quando comparado com o concreto que não foi exposto a altas temperaturas.

Os resultados demonstram que a resistência à compressão do concreto REF, na idade de 730 dias, reduziu 70% quando exposto no contêiner e 229% quando exposto no forno. Enquanto, na idade de 1100 a resistência à compressão reduziu 37% no contêiner e 124% no forno.

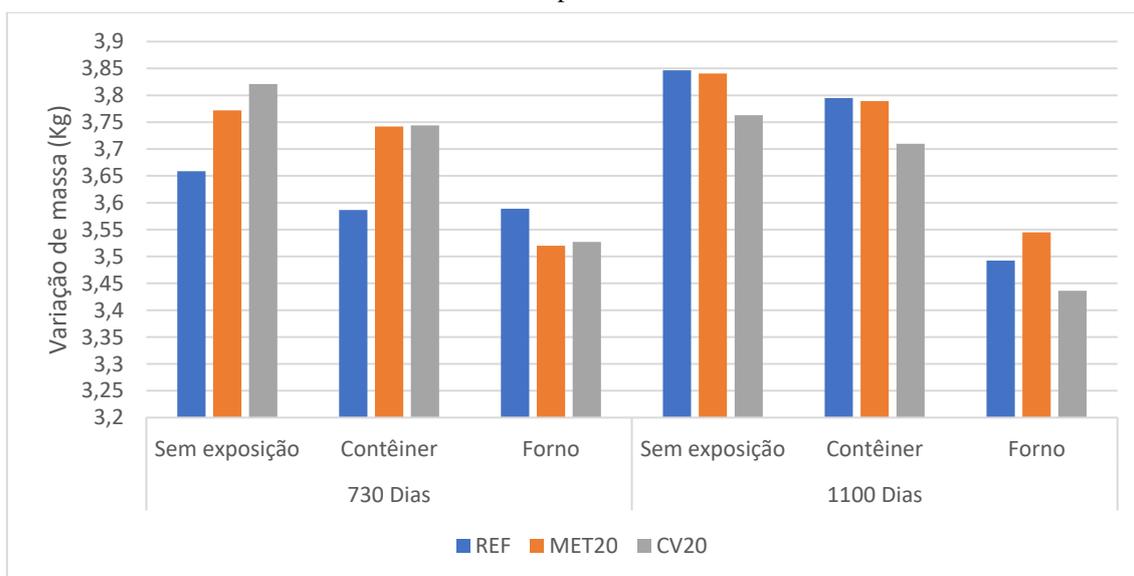
Para o concreto MET20, os resultados indicam que a resistência à compressão reduziu 54% quando submetido ao contêiner e 206% quando submetido ao forno na idade de 730 dias. E aos 1100 dias, a redução na resistência à compressão foi de 40% no contêiner e 123% no forno.

De acordo com os resultados, a resistência à compressão do concreto CV20 exposto no contêiner apresentou uma redução de 63% e quando exposto no forno a redução foi de 289%, na idade de 730 dias. A redução da resistência à compressão do concreto CV20 com idade de 1100 dias foi de 133% no contêiner e 154% no forno.

5.3.4 Variação da massa

A mensuração da variação da massa ocorreu antes e após a exposição dos corpos de prova a altas temperaturas. O Gráfico 11 mostra a média dos resultados da variação de massa do concreto REF em relação ao MET20 e ao CV20, com e sem exposição a altas temperaturas.

Gráfico 11: Variação de Massa dos concretos REF, MET20 e CV20 com e sem exposição a altas temperaturas



De um modo geral, os concretos apresentam perda de massa quando expostos as altas temperaturas. Os resultados indicam que as maiores reduções de massa foram observadas nos concretos ensaiados no forno. No contêiner, os concretos apresentaram uma perda de massa inferior a 2%, em ambas as idades. Enquanto, no forno houve uma redução de 8 a 10% de massa para todos os concretos, aos 1100 dias. Na idade de 730 dias, a redução foi de 2% para REF e de 7 a 8% para o MET20 e CV20, respectivamente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise do desempenho do concreto de cimento Portland com e sem substituição parcial do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha submetido a altas temperaturas, pode-se chegar as seguintes considerações finais:

Os materiais cimentícios suplementares empregados, Metacaulim e Cerâmica Vermelha, com base nas características químicas são ricos em alumino silicatos. Ambos apresentam somatório de teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior a 70%, característica comum de possíveis materiais pozolânicos. Entretanto, as análises de pozolanicidade realizadas por meio do Chapelle Modificado e Termogravimetria mostraram somente o Metacaulim como reativo. Os espectros de DRX mostraram teor de estrutura amorfa mais acentuada no Metacaulim do que na Cerâmica Vermelha, o que corrobora com os resultados apresentados nas análises de pozolanicidade. Por meio do BET, pode-se observar que os valores de superfície específica do Metacaulim, $20 \text{ m}^2/\text{g}$, é superior ao da Cerâmica Vermelha, $8 \text{ m}^2/\text{g}$. Considera-se, assim, que o Metacaulim poderá ter maior contato com o hidróxido de cálcio, influenciando em uma maior taxa de reação pozolânica. A distribuição granulométrica média mostra que as partículas de Metacaulim e Cerâmica Vermelha possuem diâmetro inferior a $30 \mu\text{m}$.

Quanto à análise das propriedades mecânicas, os resultados mostram a evolução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade por frequência ressonante com o decorrer das idades. A resistência característica de 45 MPa foi alcançada em todos os concretos aos 28 dias. Aos 28 dias, o concreto MET20 apresentou o valor de resistência à compressão em torno de 8% superior ao concreto REF e 12% superior ao concreto CV20. Embora os concretos com substituição parcial do cimento por Cerâmica Vermelha não tenham superado os valores de resistência à compressão do concreto REF, o CV5, o CV10 e o CV20 apresentaram valores de resistência à compressão próximos ao concreto REF, em torno de 56 MPa. Sendo esse valor 24% superior ao esperado para a resistência característica, 45 MPa. Nas idades iniciais, o módulo de elasticidade por frequência ressonante dos concretos com Metacaulim apresentou resultados superiores ao concreto REF aos 56 dias, enquanto os concretos com Cerâmica Vermelha apresentaram valores superiores aos 28 dias. E, nas longas idades, o concreto REF apresentou valores superiores aos concretos com adições.

Quanto aos parâmetros de durabilidade, a inserção de materiais cimentícios suplementares contribuiu para a melhora dos quesitos de durabilidade de todos os concretos em todas as idades. Nos concretos com Metacaulim, a resistividade elétrica volumétrica mostrou-se expressivamente superior ao concreto REF desde os 14 dias, sendo o MET20 o concreto mais resistivo. Esse comportamento foi observado a partir dos 28 dias nos concretos CV10 e CV20. Esses resultados indicam que, concretos com maiores percentuais de inserção de Metacaulim ou Cerâmica Vermelha serão menos suscetíveis a ataques de agentes agressivos do meio externo. Essa aplicação, ainda, colabora para o refinamento dos poros da pasta cimentícia, ou seja, para menor índice de vazios. O teor de porosidade está diretamente relacionado com a resistividade elétrica.

Considerando a relevância dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica e de avaliação da durabilidade, optou-se por utilizar, além do concreto REF, nas exposições a altas temperaturas os concretos que substituem 20% do cimento por Metacaulim ou Cerâmica Vermelha. A análise do comportamento dos concretos submetidos a altas temperaturas é relevante no âmbito de avaliar a resiliência dos compostos cimentícios. Uma vez que, não sendo apenas um interesse científico, é, também, interesse social e econômico que se tenha estruturas de concreto com maior durabilidade e mais resistente às intempéries e desastres.

De um modo geral, a exposição a altas temperaturas no forno, aplicando a curva de incêndio padrão estabelecida pela ISO 834:1975, foi o ambiente que mais reduziu as propriedades mecânicas e os parâmetros de durabilidade dos concretos. O contêiner proporcionou uma exposição coerente com uma situação próxima da realidade de um incêndio, a curva de incêndio apresentou um ramo ascendente e outro descendente, situação característica de uma curva de incêndio natural.

Quanto à perda de massa, o forno colaborou para uma redução de 7 a 10% de massa dos concretos com substituição. Enquanto, no contêiner a perda de massa foi inferior a 2% para todos os concretos. Em relação à resistência à compressão, a exposição a altas temperaturas, em ambos os cenários, contribuíram para reduzir a resistência dos concretos. É possível observar a correlação de redução de massa com a propriedade de resistência.

Verifica-se que o concreto MET20 reduziu 7 a 8% de massa, nas idades 730 e 1100 dias, respectivamente, apresentou os melhores resultados de resistência à compressão após exposição ao forno. Esse comportamento mecânico corrobora com a

característica pozolânica do Metacaulim, apresentada nos resultados de Termogravimetria e Chappelle Modificado, que possibilita formar mais silicatos de cálcio hidrato em idades avançadas. Essa característica não foi observada na cerâmica vermelha, que, inclusive, apresentou resultados de resistência à compressão inferiores ao concreto REF. Entretanto, não se verificou alteração na propriedade de rigidez em todos os concretos expostos a altas temperaturas, em ambas as idades.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLA, F. *et al.*, Comparison of three manufacturing techniques for sustainable porous clay ceramics. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 1–18, 2021.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195–217, 2018.

APRIANTI, E. *et al.*, Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176–187, 2015.

APRIANTI S, E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4178–4194, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432:2001:

Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos, 2018.

BANGI, M. R.; HORIGUCHI, T. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1150–1156, 2011.

BIOLZI, L.; CATTANEO, S.; ROSATI, G. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 907–916, 2008.

BREKAILO, F. *et al.*, Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 351–358, 2019.

BRUSHLINSKY, Nikolai *et al* (Ed.). **World Fire Statistics: International Association of Fire and Rescue Services**. 25. ed. Persian: Center Of Fire Statistics, 2020.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Effect of mineral admixtures on properties of recycled aggregate concrete at high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 361–373, 2018.

CARNEIRO, L. R. S. *et al.*, Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 252–257, 2018.

CORPO DE BOMBEIROS (Minas Gerais). MABOM CIURB *et al*, (ed.). **Manual de Bombeiros Militar - MABOM: Combate a Incêndio Urbano - CIURB**. 1. ed. Belo Horizonte: [s. n.], 2020. 540 p. v. 1. ISBN CDD 363.37.

CORPO DE BOMBEIROS (Minas Gerais). Sistema Integrado de Defesa Social. **Anuário estatístico**. 2020. ed. Belo Horizonte: CINDS, 2021. 116 p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. CBMMG IT- 09 2ª edição. Carga de Incêndio nas Edificações e Área de Risco. Belo Horizonte. 2006.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. CBMMG ITE- 13. Protocolo de treinamento em simulador de flashover tipo contêiner - ataque ofensivo

DEXING, L. *et al.*, Mechanical properties and electromagnetic radiation characteristics of concrete specimens after exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 381–390, 2018.

DRZYMAŁA, T. *et al.*, Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC). **Procedia Engineering**, v. 172, p. 256–263, 2017.

- 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.
- FABBRI, B.; GUALTIERI, S.; LEONARDI, C. Modifications induced by the thermal treatment of kaolin and determination of reactivity of metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 73, n. 1, p. 2–10, 2013.
- FARES, H. *et al.*, High temperature behaviour of self-consolidating concrete. Microstructure and physicochemical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 488–496, 2010.
- FELICETTI, R.; LO MONTE, F.; PIMIENTA, P. A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating. **Cement and Concrete Research**, v. 94, p. 13–23, 2017.
- FITOS, M. *et al.*, Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 182–192, 2015.
- GILL, A. S.; SIDDIQUE, R. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 323–332, 2018.
- GUO, Y. C. *et al.*, Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 193–203, 2014.
- GUPTA, T. *et al.*, Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 35–45, 2017.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2**. [s.l.: s.n.].
- HOLLANDERS, S. *et al.*, Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 552–560, 2016.
- HUANG, Y. *et al.*, Preliminary investigation of pozzolanic properties of calcined waste kaolin. **Medziagotyra**, v. 24, n. 2, p. 177–184, 2018.
- HUO, J. *et al.*, Effect of microstructure variation on damage evolution of concrete at high temperatures. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 5, p. 547–558, 2016.
- HWANG, E. *et al.*, Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 511–520, 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834: **Fire resistance tests: elements of building construction: part 1.1: general requirements for fire resistance testing**. Revisão da 1. ed. ISO 834:1975. Genova: ISO, 2014.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8421: **General terms and phenomena of fire**. Parte 1. ISO 8421-1. Genova: ISO/ Switzerland, 2000.
- JANOTKA, I.; NÜRNBERGEROVÁ, T.; NAD, L. Behaviour of high-strength concrete with dolomitic aggregate at high temperatures. **Magazine of Concrete Research**, v. 52, n. 6, p. 399–409, 2009.

- JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.
- KARAHAN, O. Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 898–906, 2017.
- KODUR, V. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. **ISRN Civil Engineering**, v. 2014, p. 1–15, 2014.
- KODUR, V.; KHALIQ, W. Effect of Temperature on Thermal Properties of Different Types of High-Strength Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 6, p. 793–801, 2010.
- KRZEMIENŃ, K.; HAGER, I. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 155–163, 2015.
- LI, X. *et al.*, A comparative study on the influence of supplementary cementitious materials on marine concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, n. 3, p. 1777–1787, 2019.
- LI, Z.; XU, J.; BAI, E. Static and dynamic mechanical properties of concrete after high temperature exposure. **Materials Science and Engineering A**, v. 544, p. 27–32, 2012.
- LUDWIG, H. M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 24–37, 2015.
- MA, Q. *et al.*, Mechanical properties of concrete at high temperature-A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 371–383, 2015.
- NADEEM, A.; MEMON, S. A.; LO, T. Y. The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 67–76, 2014.
- NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530–539, 2016.
- NETINGER, I.; KESEGIC, I.; GULJAS, I. The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 7, p. 425–430, 2011.
- NEVILLE, Adam Matthew. *Propriedades do concreto*. Editora Bookman. 5a. ed. Sao Paulo: Pini, 2015. Português. 912 p.
- NOVAK, J.; KOHOUTKOVA, A. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. **Fire Safety Journal**, v. 95, n. October 2017, p. 66–76, 2018.
- NOVÁK, J.; KOHOUTKOVÁ, A. Fire response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete to High Temperature. **Procedia Engineering**, v. 172, n. December, p. 784–790, 2017.
- METHA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. *Concreto. Microestrutura, Propriedade e Materiais*. Sao Paulo: Ibracon, 2014.
- OZAWA, M. *et al.*, Estimation of chloride diffusion coefficients of high-strength concrete with synthetic fibres after fire exposure. **Construction and Building Materials**,

v. 143, p. 322–329, 2017.

P. KUMAR MEHTA ; PAULO J. MONTEIRO. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. [s.l: s.n.].

PARIS, J. M. *et al.*, A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1–18, 2016.

PENG, G. F. *et al.*, Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 948–955, 2008.

PHAN, L. T. Pore pressure and explosive spalling in concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 10, p. 1623–1632, 2008.

POON, C. S. *et al.*, Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 9, p. 1291–1300, 2001.

RAVERDY, M. *et al.*, **STRUCTURE OF POZZOLANA AND FLY-ASH AND THE HYDRATATION OF POZZOLANIC AND FLY-ASH CEMENTS - APPRECIATION OF POZZOLANIC REACTIVITY OF MINOR COMPONENTS**. 1980

SCHACKOW, A. *et al.*, Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 82–89, 2015.

SCHULZE, S. E.; RICKERT, J. Suitability of natural calcined clays as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. May 2017, p. 92–97, 2019.

SEITO, Alexandre Itiu. Fundamentos de fogo e incêndio. *In: A SEGURANÇA contra incêndio no Brasil*. 1. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008. v. 1, cap. IV, p. 35-54. ISBN 978-85-61295-00-4.

SILVA, Valdir Pignata e *et al.*, Segurança das estruturas em situação de incêndio. *In: A SEGURANÇA contra incêndio no Brasil*. 1. ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008. v. 1, cap. X, p. 135-167. ISBN 978-85-61295-00-4.

SNELLINGS, R. *et al.*, Properties and pozzolanic reactivity of flash calcined dredging sediments. **Applied Clay Science**, v. 129, p. 35–39, 2016.

STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, AND W. C. P. **Design and Control Design and Control of**. [s.l: s.n.].

SUJJAVANICH, S. *et al.*, Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 830–837, 2017.

TUFAIL, M. *et al.*, Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 1, p. 17–28, 2017.

VYŠVAŘIL, M. *et al.*, Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 413–420, 2014.

WAHEED, F.; KHALIQ, W.; KHUSHNOOD, R. A. High-temperature residual strength and microstructure in air-entrained high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v.

115, n. 3, p. 425–436, 2018.

WANG, W. *et al.*, An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 148–154, 2017a.

WANG, W. *et al.*, Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 486–495, 2017b.

WU, M. *et al.*, Experimental study on the performance of lime-based low carbon cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 780–793, 2018.

XIE, J. *et al.*, Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 752–764, 2018.

XIE, T.; VISINTIN, P. A unified approach for mix design of concrete containing supplementary cementitious materials based on reactivity moduli. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 68–82, 2018.

XING, Z. *et al.*, Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 4, p. 392–402, 2011.

XU, D. *et al.*, On the future of Chinese cement industry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 2–13, 2015.

ZEYAD, A. M. *et al.*, Pozzolanic reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 511–522, 2017.

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, P. *et al.*, Mechanical properties and explosive spalling behavior of steel-fiber-reinforced concrete exposed to high temperature-A review. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2020.