

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Beatriz Leite Sefair de Barros

**Estudo do efeito pozolânico da cerâmica vermelha nas propriedades de concretos
submetidos a temperaturas elevadas**

Juiz de Fora

2022

Beatriz Leite Sefair de Barros

Estudo do efeito pozolânico da cerâmica vermelha nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Thaís Mayra de Oliveira

Juiz de Fora

2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barros, Beatriz Leite Sefair de.

Estudo do efeito pozolânico da cerâmica vermelha nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas / Beatriz Leite Sefair de Barros. -- 2022.

158 f. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Concreto. 2. Cerâmica vermelha. 3. Materiais pozolânicos. 4. Temperaturas elevadas. I. Oliveira, Thaís Mayra de , orient. II. Título.

Beatriz Leite Sefair de Barros**Estudo do efeito pozolânico da cerâmica vermelha nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 29 de abril de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof.ª Dr.ª Thaís Mayra de Oliveira - Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.ª Dr.ª Adriana Guerra Gumieri
Universidade Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 18/04/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Thais Mayra de Oliveira, Professor(a)**, em 29/04/2022, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Goliatt da Fonseca, Professor(a)**, em 29/04/2022, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guerra Gumieri, Usuário Externo**, em 03/05/2022, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0746963** e o código CRC **6F77C034**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu chegar até aqui, sempre me mostrando o caminho e iluminando as minhas escolhas.

Aos meus pais, Claudete e Ricardo, por todo apoio, incentivo, dedicação e suporte que possibilitaram mais uma conquista.

Às minhas irmãs, Clara e Lara, pelo apoio e cumplicidade e por sempre iluminarem a minha vida.

Aos meus amigos por sempre se fazerem presentes, pelo companheirismo, apoio, pelos momentos compartilhados e por sempre torcerem pelo meu sucesso.

Ao Sebastião, sempre muito solícito, atencioso e gentil, pela ajuda durante toda a fase experimental da pesquisa.

Aos colegas Arthur e Gilber e à laboratorista Romilda pelo auxílio na fase experimental.

Ao Vitor, sempre muito prestativo, pela disponibilidade em ajudar com a moagem do material utilizado.

À ABCP, em especial ao geólogo Marcelo Pecchio, pela realização dos ensaios de granulometria a laser e análise termodiferencial e termogravimétrica.

Às empresas Petra Agregados e Sika pela disponibilização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À CAPES pela bolsa a mim concedida.

À Professora Thaís por ter se disponibilizado a me orientar na elaboração desta pesquisa.

Aos Professores Leonardo Goliatt e Adriana Gumieri por aceitarem o convite para participar da banca examinadora.

À UFJF e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais é crescente atualmente. O setor da construção civil é um dos que mais gera impactos ambientais devido ao consumo de recursos, geração de resíduos e emissão de gases poluentes. A indústria de cimento Portland é responsável pela extração de grandes quantidades de argila e calcário e pela elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera. Outro problema relevante do setor é a deposição inadequada de resíduos, dentre eles os resíduos de cerâmica vermelha. Uma das vantagens do concreto, comparado aos demais materiais estruturais, é a resistência a temperaturas elevadas. O conhecimento acerca do comportamento de concretos com utilização de cerâmica vermelha como pozolana já é difundido. No entanto, o comportamento desse material quando exposto a temperaturas elevadas ainda não foi explorado. Dentro desse contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do uso da cerâmica vermelha como pozolana em substituição parcial do cimento Portland, nos teores de 10% e 25%, no comportamento físico e mecânico de concretos, na temperatura ambiente e após exposição a 200°C, 400°C e 600°C. Com essa finalidade realizou-se ensaios de massa específica, absorção, índice de vazios, determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa, análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD/TG) e análise visual. Os resultados de massa específica e módulo de elasticidade não apresentaram diferenças significativas entre os traços para todas as temperaturas estudadas. Quanto ao índice de vazios e à absorção, os traços T10 e T25 apresentaram os menores valores para a temperatura ambiente e o T10 o menor valor para 200°C. Já para as temperaturas de 400°C e 600°C não houve diferença entre os traços. O traço T10 apresentou menores perdas de massa, considerando as três temperaturas, e maior resistência à compressão para as temperaturas de 400°C e 600°C. Os resultados mostraram que a substituição parcial do cimento pela cerâmica vermelha é tecnicamente viável para concretos expostos a temperaturas elevadas, sendo que, de um modo geral, o teor de substituição de 10% é o mais adequado. Dessa forma, a utilização da cerâmica vermelha em concretos expostos a temperaturas elevadas se constitui em uma maneira de diminuir a deposição inadequada de resíduos, a exploração de recursos não renováveis e os impactos ambientais causados pela fabricação do cimento Portland, melhorando o desempenho do concreto após o aquecimento.

Palavras-chave: concreto, cerâmica vermelha, materiais pozolânicos, temperaturas elevadas.

ABSTRACT

Concern about the environment and the scarcity of natural resources is currently growing. The civil construction industry is one of the industries that generates the most environmental impacts due to the consumption of resources, waste generation and emission of polluting gases. The Portland cement industry is responsible for extracting large amounts of clay and limestone and for the high rate of emission of carbon dioxide into the atmosphere. Another relevant problem in the industry is the inadequate disposal of waste, including red ceramic waste. One of the advantages of concrete, compared to other structural materials, is its resistance to high temperatures. Knowledge about the behavior of concrete with the use of red ceramic as pozzolan is already widespread. However, the behavior of this material when exposed to high temperatures has not yet been explored. Within this context, the objective of this research is to evaluate the influence of the use of red ceramic as a pozzolan in partial replacement of Portland cement, at levels of 10% and 25%, on the physical and mechanical behavior of concrete, at room temperature and after exposure to 200°C, 400°C and 600°C. For this purpose, specific mass, absorption, void ratio, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, elastic modulus, weight loss, thermodifferential and thermogravimetric analysis (TDA/TGA) and visual analysis were carried out. The results of specific mass and modulus of elasticity did not show significant differences between the mixtures for all temperatures studied. As for the void ratio and absorption, the mixtures T10 and T25 showed the lowest values for room temperature and T10 the lowest value for 200°C. As for the temperatures of 400°C and 600°C, there was no difference between the mixtures. Mixture T10 showed lower weight losses, considering the three temperatures, and higher compressive strength for temperatures of 400°C and 600°C. The results showed that the partial replacement of cement by red ceramic is technically feasible for concrete exposed to high temperatures. In general, the replacement content of 10% is the most appropriate. In this way, the use of red ceramic in concrete exposed to high temperatures constitutes a way to reduce inadequate waste deposition, exploitation of non-renewable resources and environmental impacts caused by the manufacture of Portland cement, improving concrete performance after heating.

Keywords: concrete, red ceramic, pozzolanic materials, high temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a morfologia da fase C-S-H.....	22
Figura 2 – Cristais de hidróxido de cálcio	24
Figura 3 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais de monossulfato e etringita	26
Figura 4 – Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado.....	28
Figura 5 - Micrografia eletrônica de varredura de cinzas volantes	31
Figura 6 - Micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa	32
Figura 7 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz.....	34
Figura 8 – Microestrutura da caulinita	36
Figura 9 – Micrografia eletrônica de varredura do metacaulim	36
Figura 10 - As partículas submicrônicas de cinzas volantes adsorvem e dispersam partículas de cimento Portland	39
Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura da zona de transição do concreto aos 28 dias	42
Figura 12 - Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados	59
Figura 13 - Formação da barreira impermeável e da pressão de vapor nos poros do concreto aquecido.....	62
Figura 14 - Cerâmica vermelha	70
Figura 15 - Aparelho de Abrasão Los Angeles	71
Figura 16 - Peneirador	71
Figura 17 - Ensaio de massa específica da cerâmica.....	78
Figura 18 - Ensaio de perda ao fogo.....	79
Figura 19 - Corpos de prova das argamassas A e B	80
Figura 20 - Corpos de prova para a determinação da atividade pozolânica com cal	81
Figura 21 - Mistura dos materiais na betoneira	84
Figura 22 - Cura inicial dos corpos de prova	85
Figura 23 - Corpos de prova imersos	85
Figura 24 - Corpos de prova dentro da mufla.....	86
Figura 25 - Ensaio de medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica	88
Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão	89
Figura 27 - Corpo de prova instrumentado posicionado na máquina.....	90
Figura 28 - Corpos de prova em temperatura ambiente	120

Figura 29 - Corpos de prova após a exposição a 200°C.....	122
Figura 30 - Corpos de prova após a exposição a 400°C.....	123
Figura 31 - Corpos de prova após a exposição a 600°C.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Desenvolvimento da resistência dos compostos puros	23
Gráfico 2 - Taxas de hidratação dos principais constituintes do cimento Portland.....	24
Gráfico 3 - Efeito da idade de cura no teor de hidróxido de cálcio de uma argamassa de cimento e areia preparada com um cimento Portland pozolânico	27
Gráfico 4 - Comparação da distribuição granulométrica de cimento Portland, cinzas volantes e sílica ativa.....	33
Gráfico 5 - Efeito da finura das cinzas volantes na demanda de água de concretos com o mesmo abatimento.....	38
Gráfico 6 - Exsudação do concreto de referência e do concreto com adição de cinzas volantes	41
Gráfico 7 - Efeito da substituição do cimento por material pozolânico na resistência à compressão de argamassas	43
Gráfico 8 - Desenvolvimento da resistência à compressão para concretos com diferentes materiais cimentícios	44
Gráfico 9 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com cinza de casca de arroz e sílica ativa.....	45
Gráfico 10 - Efeito da adição de cinza volante na distribuição do tamanho dos poros aos 28 dias e 1 ano	47
Gráfico 11 - Influência do aumento da temperatura na resistência à compressão	64
Gráfico 12 - Influência do aumento da temperatura no módulo de elasticidade.....	65
Gráfico 13 - Porcentagem de perda de massa em função da temperatura.....	66
Gráfico 14 – Alterações na resistência e coloração do concreto submetido ao aquecimento ..	66
Gráfico 15 - Curva granulométrica da areia natural	72
Gráfico 16 - Curva granulométrica da areia artificial.....	74
Gráfico 17 - Curva granulométrica da brita 0.....	75
Gráfico 18 - Curva granulométrica da brita 1.....	77
Gráfico 19 - Curva granulométrica da cerâmica vermelha.....	94
Gráfico 20 - Comparação dos resultados de massa específica da amostra seca.....	97
Gráfico 21 - Comparação dos resultados de índice de vazios	98
Gráfico 22 - Comparação dos resultados de absorção.....	98
Gráfico 23 - Relação entre índice de vazios e temperatura	99
Gráfico 24 - Relação entre massa específica da amostra seca e índice de vazios	99

Gráfico 25 - Relação entre absorção e índice de vazios	100
Gráfico 26 - Comparação entre os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica	102
Gráfico 27 – Comparação dos resultados de resistência à compressão para as diferentes idades	103
Gráfico 28 - Relação entre idade e resistência à compressão para os diferentes traços	104
Gráfico 29 – Comparação entre os resultados de resistência à compressão.....	106
Gráfico 30 - Relação entre resistência à compressão e temperatura	106
Gráfico 31 - Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade	108
Gráfico 32 - Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	109
Gráfico 33 - Comparação entre módulo de elasticidade residual e resistência à compressão residual	110
Gráfico 34 - Comparação entre os resultados de perda de massa	112
Gráfico 35 - Relação entre temperatura e perda de massa	112
Gráfico 36 - Relação entre índice de vazios e perda de massa.....	113
Gráfico 37 - ATD/TG TR temperatura ambiente	114
Gráfico 38 - ATD/TG TR após exposição a 200°C	115
Gráfico 39 - ATD/TG TR após exposição a 400°C	115
Gráfico 40 - ATD/TG TR após exposição a 600°C	116
Gráfico 41 - ATD/TG T10 temperatura ambiente.....	116
Gráfico 42 - ATD/TG T10 após exposição a 200°C	117
Gráfico 43 - ATD/TG T10 após exposição a 400°C	117
Gráfico 44 - ATD/TG T10 após exposição a 600°C	118
Gráfico 45 - ATD/TG T25 temperatura ambiente.....	118
Gráfico 46 - ATD/TG T25 após exposição a 200°C	119
Gráfico 47 - ATD/TG T25 após exposição a 400°C	119
Gráfico 48 - ATD/TG T25 após exposição a 600°C	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos químicos.....	19
Tabela 2 – Requisitos físicos.....	20
Tabela 3 - Principais compostos do cimento Portland e suas características.....	21
Tabela 4 - Efeito da adição de cinzas volantes na permeabilidade do concreto.....	47
Tabela 5 - Efeito da adição de sílica ativa na permeabilidade à água.....	48
Tabela 6 - Percentual de perdas das indústrias de cerâmica vermelha.....	54
Tabela 7 - Porcentagem de cerâmica vermelha nos resíduos de construção e demolição.....	55
Tabela 8 - Transformações durante o aquecimento do concreto.....	61
Tabela 9 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP V-ARI.....	69
Tabela 10 - Caracterização da areia natural.....	72
Tabela 11 - Caracterização da areia artificial.....	73
Tabela 12 – Caracterização da brita 0.....	75
Tabela 13 – Caracterização da brita 1.....	76
Tabela 14 - Principais características dos aditivos.....	77
Tabela 15 - Traços utilizados na pesquisa.....	82
Tabela 16 - Propriedades da cerâmica vermelha.....	93
Tabela 17 - Resultados do abatimento de tronco de cone.....	94
Tabela 18 - Resultados de massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios.....	95
Tabela 19 - Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	101
Tabela 20 - Resultados de resistência à compressão para as diferentes idades.....	103
Tabela 21 - Resultados de resistência à compressão para as diferentes temperaturas.....	105
Tabela 22 - Resistências à compressão residuais relativas.....	107
Tabela 23 - Resultados de módulo de elasticidade.....	108
Tabela 24 - Módulos de elasticidade residuais relativos.....	109
Tabela 25 - Resultados de perda de massa.....	111
Tabela A-1 – Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção.....	139
Tabela A-2 – Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	140
Tabela A-3 – Resultados de resistência à compressão.....	141
Tabela A-4 – Resultados de módulo de elasticidade.....	142
Tabela A-5 – Resultados de perda de massa.....	143
Tabela B-1 - Massa específica, índice de vazios e absorção – temperatura ambiente.....	144
Tabela B-2 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 200°C.....	145

Tabela B-3 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 400°C.....	146
Tabela B-4 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 600°C.....	147
Tabela B-5 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – temperatura ambiente.....	147
Tabela B-6 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 200°C.....	148
Tabela B-7 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 400°C.....	149
Tabela B-8 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 600°C.....	149
Tabela B-9 – Resistência à compressão – temperatura ambiente.....	150
Tabela B-10 – Resistência à compressão – 200°C.....	150
Tabela B-11 – Resistência à compressão – 400°C.....	151
Tabela B-12 – Resistência à compressão – 600°C.....	152
Tabela B-13 – Resistência à compressão – 28 dias.....	153
Tabela B-14 – Resistência à compressão – 63 dias.....	153
Tabela B-15 – Resistência à compressão – 91 dias.....	154
Tabela B-16 – Módulo de elasticidade – temperatura ambiente.....	154
Tabela B-17 – Módulo de elasticidade – 200°C.....	155
Tabela B-18 – Módulo de elasticidade – 400°C.....	155
Tabela B-19 – Módulo de elasticidade – 600°C.....	156
Tabela B-20 – Perda de massa – 200°C.....	156
Tabela B-21 – Perda de massa – 400°C.....	157
Tabela B-22 – Perda de massa – 600°C.....	157

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	17
2	MATERIAIS POZOLÂNICOS	18
2.1	CLASSIFICAÇÃO	18
2.2	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	20
2.3	REAÇÕES POZOLÂNICAS	26
2.4	PRINCIPAIS POZOLANAS	29
2.4.1	Pozolanas naturais	29
2.4.2	Cinza Volante	30
2.4.3	Sílica Ativa	31
2.4.4	Cinza de casca de arroz	34
2.4.5	Metacaulim	35
2.5	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POZOLANAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	37
2.5.1	Demanda de água e trabalhabilidade	37
2.5.2	Segregação e exsudação	40
2.5.3	Resistência à compressão	42
2.5.4	Permeabilidade e porosidade	45
2.5.5	Módulo de elasticidade	48
3	CERÂMICA VERMELHA	50
3.1	RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA	53
3.2	UTILIZAÇÃO DA CERÂMICA VERMELHA COMO POZOLANA	55
4	CONCRETO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS	58
4.1	EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	63

4.2	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POZOLANAS.....	67
5	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO.....	69
5.1	MATERIAIS	69
5.1.1	Cimento Portland.....	69
5.1.2	Cerâmica vermelha.....	70
5.1.3	Agregado miúdo.....	71
5.1.4	Agregados graúdos	74
5.1.5	Água	77
5.1.6	Aditivos	77
5.2	MÉTODOS DE ENSAIO.....	78
5.2.1	Caracterização da cerâmica.....	78
5.2.1.1	<i>Massa específica.....</i>	78
5.2.1.2	<i>Granulometria a laser</i>	79
5.2.1.3	<i>Perda ao fogo.....</i>	79
5.2.1.4	<i>Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias</i>	80
5.2.1.5	<i>Índice de atividade pozolânica com cal.....</i>	81
5.2.2	Dosagem do concreto	81
5.2.3	Planejamento experimental	82
5.2.4	Mistura dos materiais.....	83
5.2.5	Determinação da consistência.....	84
5.2.6	Moldagem, cura e retificação dos corpos de prova.....	84
5.2.7	Exposição térmica	85
5.2.8	Determinação da massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios	86
5.2.9	Ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	87
5.2.10	Determinação da resistência à compressão	88
5.2.11	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático.....	89

5.2.12	Perda de massa.....	91
5.2.13	Análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD/TG)	91
5.2.14	Análise visual.....	91
5.2.15	Análise estatística	91
6	RESULTADOS E ANÁLISES	93
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA	93
6.2	CONSISTÊNCIA	94
6.3	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO	95
6.4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA.....	100
6.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	102
6.6	MÓDULO DE ELASTICIDADE	107
6.7	PERDA DE MASSA	110
6.8	ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (ATD/TG) ...	113
6.9	ANÁLISE VISUAL	120
7	CONCLUSÃO	127
7.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	129
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA	139
	APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	144

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado mundialmente, em razão de suas indiscutíveis vantagens quando comparado a outros materiais. A ampla utilização desse material exige a produção de grandes quantidades de Cimento Portland. Estima-se que em 2019 a produção mundial de cimento foi de 4,1 bilhões de toneladas (CEMBUREAU, 2021). Os principais impactos ambientais ocasionados pela produção do cimento são a extração de calcário e argila, suas principais matérias-primas, o alto consumo energético e a elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

O clínquer é obtido a partir da queima de uma mistura de rocha calcária e argila moídas em um forno rotativo a temperatura de 1450°C. Posteriormente, o clínquer é reduzido a um pó fino e misturado com gesso e outras adições dando origem aos diversos tipos de cimento. Para alcançar as altas temperaturas na etapa de queima, são necessárias quantidades substanciais de energia, obtidas, na maior parte das vezes, pela combustão de combustíveis de fontes não renováveis, como o coque de petróleo e o carvão. O processo de combustão é responsável por 35% a 40% das emissões de gás carbônico durante a fabricação do cimento. O restante das emissões (de 60% a 65%) advém da reação química de calcinação do calcário, que ocorre durante o aquecimento das matérias-primas. Nessa reação a rocha calcária (CaCO_3) é transformada em óxido de cálcio (CaO), liberando grandes quantidades de gás carbônico (CO_2) (SONEBI *et al.*, 2016).

A indústria do cimento é responsável por 5% a 8% da emissão global de dióxido de carbono (SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2008 *apud* SONEBI *et al.*, 2016). A quantidade emitida varia de acordo com os tipos de equipamentos, eficiência energética do processo e composições químicas do cimento de cada fábrica. Estima-se que a indústria do cimento emita em média 0,92 tonelada de dióxido de carbono para cada tonelada de cimento produzida (MARCEAU *et al.*, 2006 *apud* KOSMATKA e WILSON, 2011).

O aumento da população mundial gera um aumento na demanda de cimento para a construção. A expectativa é de que em 2050 a produção de cimento seja de aproximadamente 6 bilhões de toneladas. No entanto, isso implicaria em um aumento inaceitável nas emissões de dióxido de carbono, contribuindo para as mudanças climáticas. Diante dessa realidade, a indústria cimenteira busca alternativas sustentáveis que diminuam as emissões. Dentre as opções estão o aumento da eficiência energética das fábricas, a utilização de combustíveis alternativos e a substituição do clínquer (UNEP, 2017).

Outro problema causado pelo setor da construção civil é a quantidade de resíduos gerada, que vem aumentando de maneira significativa, principalmente nos grandes municípios. Na maioria das vezes os resíduos não são dispostos de maneira adequada, gerando problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública.

1.1 JUSTIFICATIVA

O clínquer pode ser substituído por materiais cimentícios suplementares, como os materiais pozolânicos. Alguns subprodutos industriais, como cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz são amplamente utilizados como pozolanas e causam melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos e argamassas. Os resíduos de cerâmica vermelha também apresentam atividade pozolânica e têm potencial para serem utilizados como adição em compósitos à base de cimento, diminuindo a exploração de recursos naturais e a emissão de dióxido de carbono e atenuando os impactos causados pela deposição inadequada desse material.

Uma das vantagens do concreto, comparado aos demais materiais estruturais, é a resistência a temperaturas elevadas. Durante o aquecimento o concreto sofre várias alterações microestruturais que resultam em modificações nas suas propriedades. A resistência ao calor depende de diversos fatores, como taxa de aquecimento, duração da exposição, teor de umidade e composição do concreto. Em relação a este último fator, há pesquisas que apontam resultados favoráveis quando concretos com adição de pozolana são submetidos a temperaturas elevadas (KHURRAM *et al.*, 2018).

O conhecimento acerca do comportamento de concretos com utilização de cerâmica vermelha como pozolana já é difundido. No entanto, até o presente momento, o comportamento desse material quando exposto a temperaturas elevadas ainda não foi muito explorado. Nesse contexto, busca-se com esta pesquisa contribuir com o entendimento do desempenho do concreto com adição de cerâmica nessas situações, além de fomentar o meio técnico e científico.

1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da adição de cerâmica vermelha, como substituição parcial do cimento Portland, nas propriedades físicas e mecânicas de concretos, na temperatura ambiente e após a exposição a temperaturas elevadas.

Os objetivos específicos são:

- Determinar as propriedades e atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído.
- Avaliar a influência da substituição nos teores de 10% e 25% nas propriedades de massa específica, índice de vazios, absorção, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto em temperatura ambiente.
- Estudar o efeito da substituição do cimento nos teores de 10% e 25% nas propriedades de massa específica, índice de vazios, absorção, resistência à compressão residual, módulo de elasticidade residual e perda de massa após exposição a 200°C, 400°C e 600°C.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está estruturada em sete capítulos, sendo este primeiro a introdução, abordando a contextualização do tema, a justificativa para a realização da pesquisa e os objetivos.

Nos três capítulos seguintes desenvolveu-se uma revisão bibliográfica acerca dos temas pertinentes. O segundo capítulo, especificamente, trata dos materiais pozolânicos, expondo a definição e classificação, o processo das reações pozolânicas, as características das principais pozolanas e a influência da adição desse material nas propriedades do concreto.

O terceiro capítulo discorre sobre a cerâmica vermelha, abordando as principais características, o processo de geração de resíduos e a utilização desse material como pozolana.

O quarto capítulo aborda o efeito da exposição do concreto a temperaturas elevadas na microestrutura e nas propriedades, bem como a influência da adição de pozolanas na resistência ao aquecimento.

O quinto capítulo apresenta o estudo experimental, trazendo a descrição dos materiais utilizados na pesquisa e das metodologias dos ensaios realizados.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos e as análises pertinentes.

Por fim, o último capítulo traz as conclusões desta pesquisa, assim como sugestões para pesquisas futuras que possam complementar o entendimento acerca do tema.

2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Desde a Antiguidade certos materiais vulcânicos eram conhecidos por originarem, quando finamente moídos e adicionados à cal hidratada e à areia, argamassas mais duráveis, com melhor desempenho mecânico e que, adicionalmente, apresentavam a propriedade de endurecer mesmo quando submersas em água. Visto que os materiais de melhor qualidade eram obtidos na cidade de Pozzuoli, na Itália, atribuiu-se a eles a denominação de pozolanas. Com o transcorrer do tempo, o termo pozolana passou a ser utilizado de maneira mais ampla para denominar materiais de origens diversas que não apresentam capacidade de reagir com a água sozinhos, mas na presença de hidróxido de cálcio se comportam como aglomerantes hidráulicos e produzem compostos com propriedades cimentícias (ZAMPIERI, 1993; BLACK, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), materiais pozolânicos são:

materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes (NBR 12653, 2014, p. 2).

2.1 CLASSIFICAÇÃO

Os materiais pozolânicos são classificados em dois grupos, de acordo com sua origem (NBR 12653, 2014):

- Naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (maior que 65 % de SiO_2) ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica, tais como rochas vulcânicas ácidas e terra diatomácea.
- Artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica.

As pozolanas artificiais podem ainda ser subdivididas em:

- Argilas calcinadas: materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500 °C e 900 °C.
- Cinzas volantes: resíduos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado.

- Outros materiais: materiais que não estão contemplados nas definições anteriores, mas que apresentam atividade pozolânica, tais como microssílica, rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral.

Vale ressaltar que há divergência quanto à classificação das argilas calcinadas. A *ASTM International* e o *American Concrete Institute*, por exemplo, definem pozolanas naturais como materiais naturais que apresentam propriedades pozolânicas da forma em que são encontrados na natureza ou após processo de calcinação, portanto englobam as argilas calcinadas (ASTM, 2013; ACI, 2018).

A NBR 12653 (2014), que estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, divide o material em três classes:

- Classe N: pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- Classe E: quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

Os materiais devem atender aos requisitos químicos e físicos constantes na norma, de acordo com as Tabelas 1 e 2, respectivamente. Essa norma não se aplica à sílica ativa, ao metacaulim e a materiais pozolânicos empregados como adição durante a fabricação do cimento Portland.

Tabela 1 – Requisitos químicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$	ABNT NBR NM 22
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$	ABNT NBR NM 18
Álcali disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: NBR 12653 (2014).

Tabela 2 – Requisitos físicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	ABNT NBR 5751

(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

Fonte: NBR 12653 (2014).

2.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Na produção do Cimento Portland as matérias primas utilizadas são, essencialmente, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Esses compostos reagem durante a queima e formam uma série de produtos mais complexos. Quatro compostos são considerados os principais constituintes desse aglomerante. Esses compostos bem como suas principais características encontram-se discriminados na Tabela 3. Além desses constituintes, estão também presentes a gipsita (C_5H_2), os álcalis (Na_2O , K_2O), que se apresentam na forma de sulfatos, o óxido de magnésio (MgO), a cal livre (CaO), entre outros.

Tabela 3 - Principais compostos do cimento Portland e suas características

Nome do Composto	Silicato tricálcico	Silicato bicálcico	Aluminato tricálcico	Ferroaluminato tetracálcico
Composição em óxidos	3CaO.SiO ₂	2CaO.SiO ₂	3CaO.Al ₂ O ₃	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Fórmula abreviada	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Nome comum	Alita	Belita	-	Fase Ferrita, F _{ss}
Impurezas principais	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	SiO ₂ , MgO, álcalis	SiO ₂ , MgO
Formas cristalinas comuns	Monoclínica	Monoclínica	Cúbica, Ortorrômbica	Ortorrômbica
Proporção de compostos presentes (%)				
Intervalo de variação	35-65	10-40	0-15	5-15
Média em cimentos comuns	55	20	8	8
Velocidade de reação com água	Rápida	Lenta	Rápida	Moderada
Contribuição para a resistência				
Nas primeiras idades	Boa	Pequena	Boa	Boa
Em idades avançadas	Boa	Excelente	Média	Média
Calor de hidratação	Médio	Baixo	Alto	Médio
Típico (cal/g)	120	60	320	100

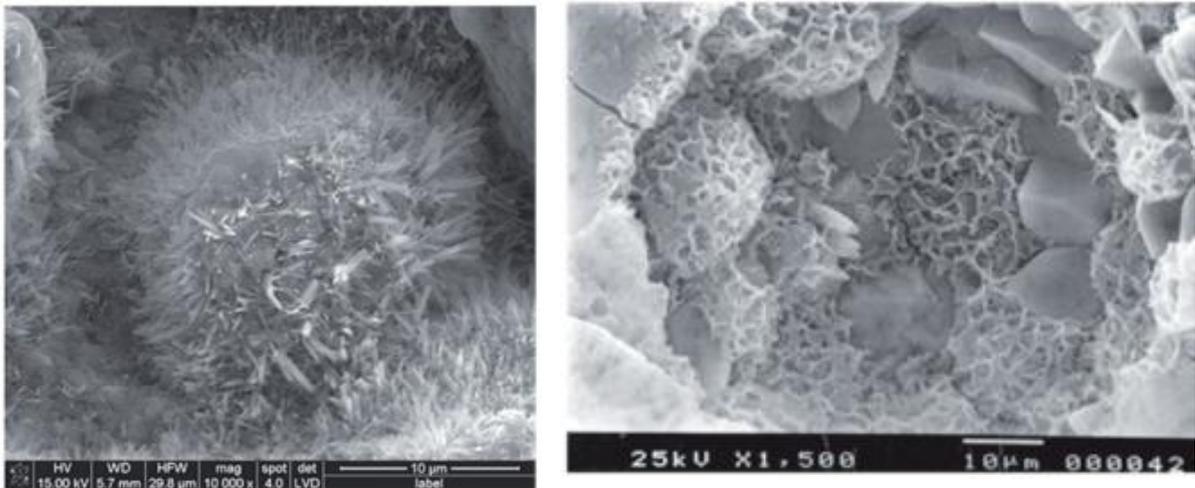
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

À medida que se adiciona água ao cimento Portland, os silicatos e aluminatos listados anteriormente formam produtos hidratados que, com o tempo, adquirem elevada resistência mecânica.

A hidratação do C₃S e do C₂S produz hidróxido de cálcio e uma família de silicatos de cálcio hidratados que são estruturalmente similares, mas apresentam variação na relação cálcio/sílica e no teor de água quimicamente combinada. Porém, como as propriedades são determinadas pelas estruturas dos compostos, essa diferença de composição tem pouco efeito em suas características físicas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os silicatos de cálcio hidratados constituem de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada e, por isso, são os produtos mais importantes, determinando as propriedades da pasta. A morfologia do C-S-H, mostrada na Figura 1, varia de fibras pouco cristalinas a redes reticulares, dependendo especialmente do tipo de cimento e da idade (SHETTY, 2005).

Figura 1 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a morfologia da fase C-S-H
a) Fibras pouco cristalinas b) Redes reticulares



Fonte: Kurdowski (2014).

A composição química dos silicatos de cálcio hidratados varia com a relação água/cimento, temperatura e idade dos compostos cimentícios. Por isso é comum referir-se a esses hidratos simplesmente como C-S-H, notação que não implica uma composição química fixa. Na hidratação completa a composição aproximada do material é $C_3S_2H_3$, essa composição é, portanto, usada para cálculos estequiométricos.

As reações estequiométricas para pastas completamente hidratadas podem ser expressas conforme Equações 1 e 2, sendo H a notação abreviada da água e CH do hidróxido de cálcio (NEVILLE, 2013):

C_3S :



As massas correspondentes são:

$$100 + 24 \rightarrow 75 + 49$$

C_2S :



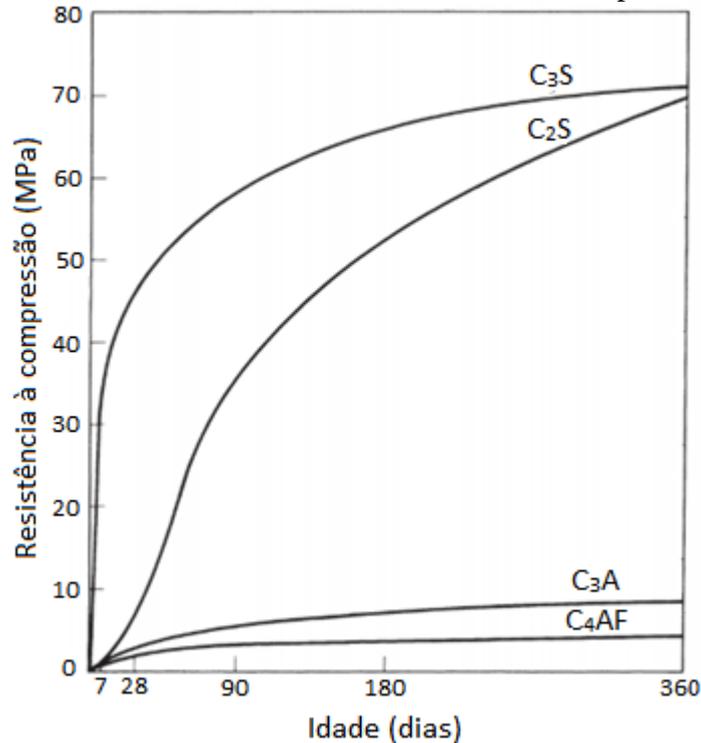
As massas correspondentes são:

$$100 + 21 \rightarrow 99 + 22$$

Além do fato de serem formados produtos semelhantes nas reações de hidratação do silicato tricálcico e do silicato bicálcico presentes no cimento Portland, pode-se observar que, em termos de massa, ambos os silicatos requerem aproximadamente a mesma quantidade de água para a hidratação, mas o C_3S produz 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de CH, enquanto a hidratação do C_2S produz 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de CH.

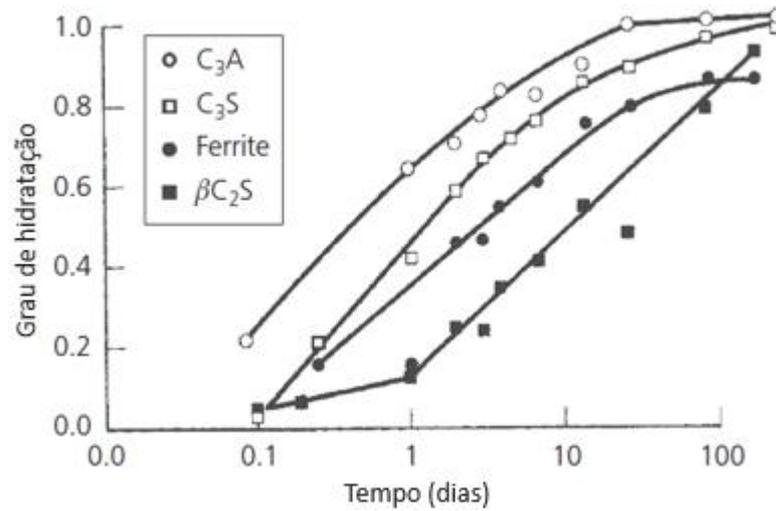
Os silicatos de cálcio hidratados são os responsáveis pela resistência mecânica da pasta, conforme observa-se no Gráfico 1, que mostra a resistência à compressão dos compostos puros. O C_3S apresenta uma taxa de hidratação bastante elevada já nas primeiras idades, quando comparado ao C_2S , conforme Gráfico 2, sendo, por isso, o principal constituinte responsável pelas resistências iniciais do concreto.

Gráfico 1 - Desenvolvimento da resistência dos compostos puros



Fonte: Neville (2013).

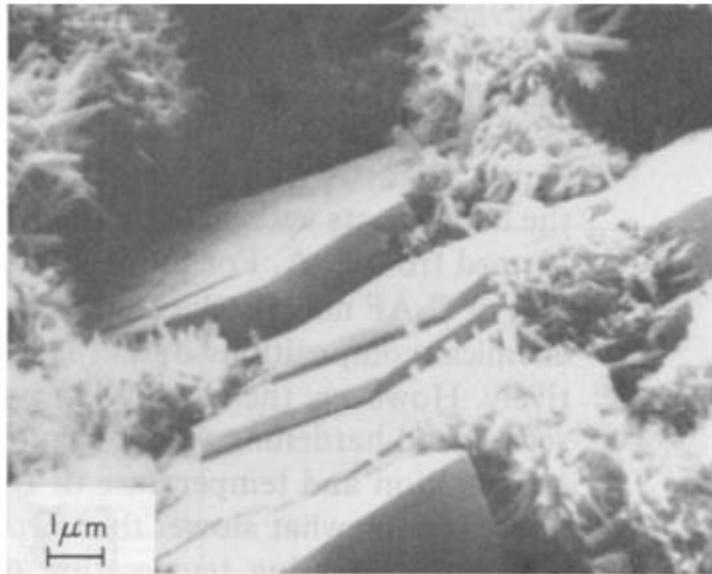
Gráfico 2 - Taxas de hidratação dos principais constituintes do cimento Portland



Fonte: Bye (2011).

Os cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), também chamados portlandita, constituem de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada. Tendem a formar grandes cristais com uma morfologia prismática hexagonal, conforme Figura 2 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 2 – Cristais de hidróxido de cálcio



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

O hidróxido de cálcio é um dos constituintes das pastas de cimento Portland hidratadas que, devido à sua alta solubilidade, está mais suscetível à hidrólise. Esse processo ocorre até que a maior parte desse composto seja eliminada por lixiviação, o que expõe os constituintes cimentícios da pasta de cimento endurecida à decomposição química. Quando o concreto é exposto a ambientes agressivos com presença de soluções ácidas, ocorrem reações entre essas

soluções e o hidróxido de cálcio, produzindo sais solúveis de cálcio que também são removidos por lixiviação. Consequentemente, ocorre a diminuição da resistência e o aumento da permeabilidade do concreto, logo produz um efeito negativo do ponto de vista da durabilidade. Além disso, a lixiviação pode ocasionar o fenômeno da eflorescência, no qual o lixiviado reage com o CO_2 presente no ar e forma uma crosta esbranquiçada de carbonato de cálcio na superfície (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

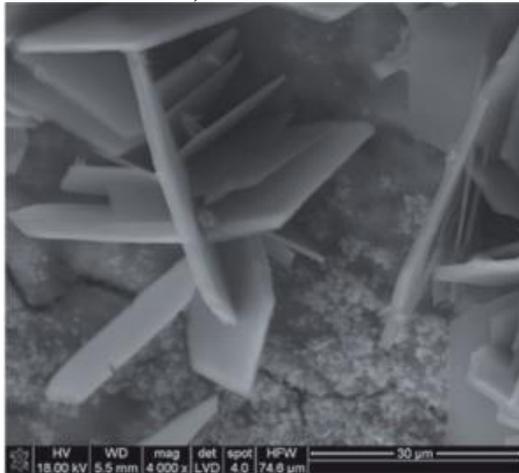
Outra forma de deterioração do concreto é o ataque por sulfatos, que ocorre quando a estrutura está em contato com águas ou solos com a presença de íons sulfato (SO_4^{2-}). Os sulfatos reagem com o hidróxido de cálcio formando gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Posteriormente a gipsita reage com os aluminatos resultando em compostos expansivos como a etringita ($\text{C}_6\text{A} \overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$), que ocasionam dilatações que desagregam e fissuram o concreto.

A única vantagem é que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de natureza alcalina, mantém o valor do pH do concreto em torno de 13, impedindo a ocorrência de corrosão de armadura (SHETTY, 2005).

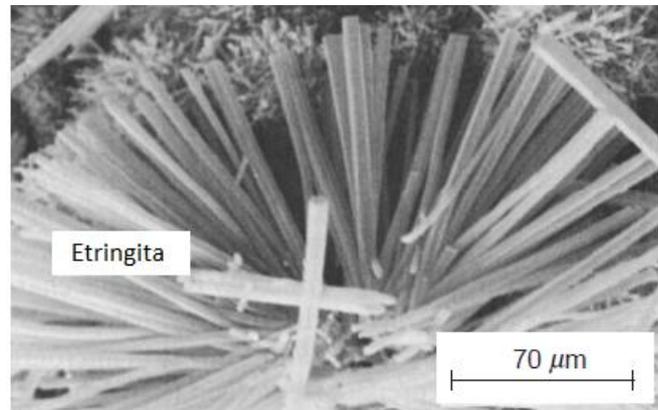
Os aluminatos de cálcio hidratados ocupam de 15 a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada e, por isso, possuem um papel secundário nas relações microestrutura-propriedade.

A reação do aluminato tricálcico com a água é imediata e produz hidratos cristalinos como C_3AH_6 , C_4AH_{19} e C_2AH_8 com a liberação de uma grande quantidade de calor. Com o objetivo de retardar a hidratação desse composto, viabilizando o uso do cimento Portland na construção, a gipsita é adicionada ao clínquer no processo de moagem. De acordo com a concentração de aluminato e íons sulfato na solução, o produto cristalino da precipitação é o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também chamado etringita ($\text{C}_6\text{A} \overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) ou monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($\text{C}_4\text{A} \overline{\text{S}}\text{H}_{18}$). Nas soluções saturadas com íons cálcio e hidroxila, a etringita se cristaliza como pequenas agulhas prismáticas e o monossulfato como finas placas hexagonais, conforme Figura 3 (SHETTY, 2005).

Figura 3 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais de monossulfato e etringita
 a) monossulfato b) etringita



Fonte: Kurdowski (2014).



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

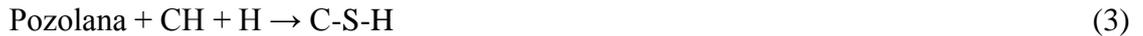
A etringita é, geralmente, o primeiro hidrato a se cristalizar devido à alta relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação. A precipitação da etringita contribui para o enrijecimento, a pega e o desenvolvimento da resistência inicial, no entanto, sua contribuição para a resistência final é muito pequena, como visto anteriormente no Gráfico 1. Quando o sulfato na solução se esgota, a concentração de aluminato aumenta devido à nova hidratação de C_3A e C_4AF . Nesse estágio, a etringita se torna instável e é gradualmente convertida em monossulfato, que é o produto final da hidratação de cimentos Portland contendo mais de 5% de C_3A (SHETTY, 2005).

Os produtos formados na reação de hidratação do C_4AF na presença de sulfato são estruturalmente similares àqueles formados na hidratação do C_3A . Geralmente, a hidratação da fase ferrita é mais lenta do que a de C_3A .

2.3 REAÇÕES POZOLÂNICAS

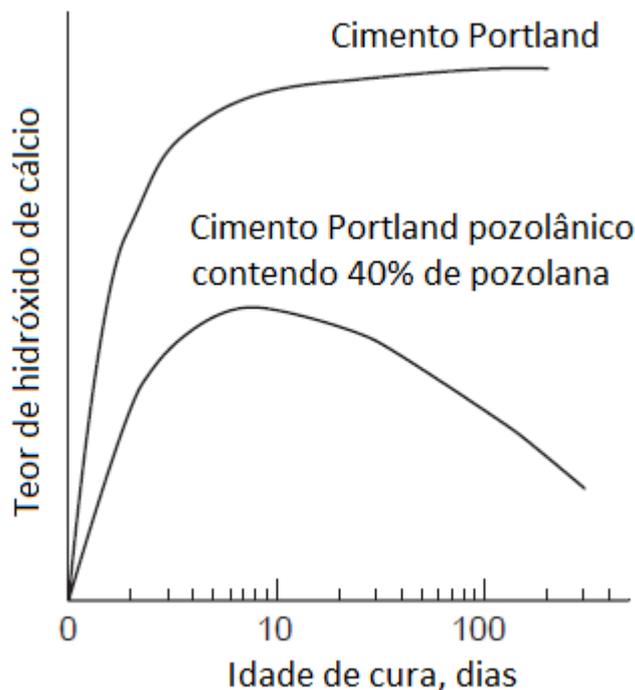
Como mencionado anteriormente, a presença do hidróxido de cálcio reduz a resistência química da pasta de cimento endurecida em meios ácidos e sulfatados, com consequências negativas para a durabilidade. Logo, reduzir a quantidade de $Ca(OH)_2$ no concreto, convertendo-o em produto cimentício, gera benefícios ao composto.

A pozolana, quando introduzida na mistura, reage com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação dos silicatos de cálcio e produz silicato de cálcio hidratado, composto responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento. Essa reação, apresentada na Equação 3, é denominada reação pozolânica.



O Gráfico 3 mostra o efeito da adição de pozolana no teor de hidróxido de cálcio de uma argamassa em função do tempo. Inicialmente, com a cura, o teor de hidróxido de cálcio aumenta devido à hidratação do cimento Portland. No entanto, mais tarde começa a diminuir com o progresso da reação pozolânica.

Gráfico 3 - Efeito da idade de cura no teor de hidróxido de cálcio de uma argamassa de cimento e areia preparada com um cimento Portland pozolânico



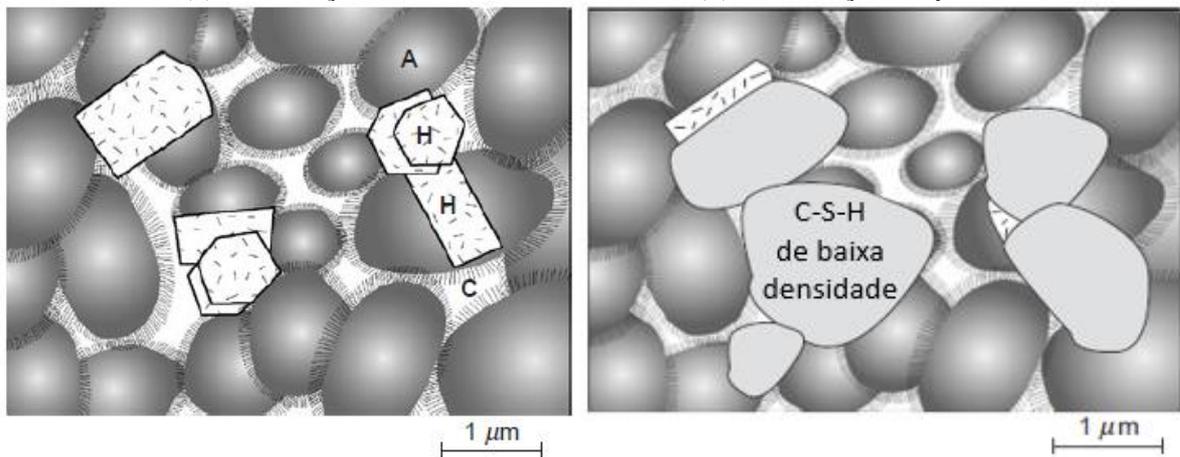
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

A capacidade das pozolanas de reagirem com o hidróxido de cálcio originando compostos com propriedades aglomerantes é devida ao fato de o silício e o alumínio presentes na composição desses materiais se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômica e molecularmente. A princípio, quanto maiores forem o desarranjo estrutural e a instabilidade em meio básico do material, mais intensa será a reação pozolânica. No entanto, a cinética da reação pozolânica depende, além das características mineralógicas do material, da finura, da temperatura e da concentração dos reagentes (ZAMPIERI, 1989).

As reações pozolânicas ocorrem lentamente, portanto as taxas de liberação de calor e o desenvolvimento de resistência também são lentos. Visto que as reações consomem hidróxido de cálcio, elas são responsáveis por melhorar a durabilidade da pasta hidratada em ambientes ácidos e com presença de sulfato. Além disso, os produtos da reação pozolânica são muito eficientes no preenchimento de espaços capilares, melhorando assim a resistência e a

impermeabilidade do sistema. Uma representação esquemática do processo de refinamento de poros associado à reação pozolânica é mostrada na Figura 4, em que "A" representa agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas que possuem pelo menos uma dimensão coloidal (1 a 100 nm), "H" representa produtos cristalinos hexagonais, "C" representa cavidades capilares ou vazios que existem quando os espaços originalmente ocupados com água não ficam completamente preenchidos com os produtos de hidratação do cimento. Pode-se observar que, como resultado da reação pozolânica, os vazios capilares são eliminados ou reduzidos em tamanho e os cristais de hidróxido de cálcio são substituídos por C-S-H adicional de baixa densidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 4 – Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado
(a) sem adições (b) com adição de pozolana



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Existem dois efeitos físicos da reação química entre as partículas pozolânicas e o hidróxido de cálcio: o refinamento do tamanho dos poros e o refinamento do tamanho do grão. O primeiro refere-se à formação de produtos de hidratação secundários, principalmente silicatos de cálcio hidratados, ao redor das partículas de pozolana, o que tende a preencher os grandes vazios capilares com um material microporoso e de baixa densidade. O segundo refere-se à nucleação do hidróxido de cálcio em torno das partículas finas e bem distribuídas da pozolana, que tem o efeito de substituir os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados por numerosos cristais pequenos e menos orientados. Ambos os efeitos contribuem para o aumento da resistência da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Além dos benefícios provenientes da reação pozolânica, existem também os decorrentes do efeito secundário de preenchimento de vazios. A pozolana residual (que não reage com os produtos de hidratação do cimento), por ser um material com elevada finura, promove o efeito

filler, que produz benefícios em algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração (AÏTCIN, 1998; NEVILLE, 2016).

2.4 PRINCIPAIS POZOLANAS

Alguns materiais pozolânicos são muito conhecidos devido às suas propriedades. Dentre eles estão as pozolanas naturais, a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

2.4.1 Pozolanas naturais

As pozolanas naturais são derivadas de materiais vulcânicos ou sedimentares. Esses materiais apresentam composição e propriedades variadas de acordo com sua origem e processo de formação.

As pozolanas de origem vulcânica são formadas devido ao rápido resfriamento do magma, composto principalmente de aluminossilicatos, durante uma erupção vulcânica. Esse processo resulta na formação de fases vítreas com estrutura desordenada ou minerais pouco cristalinos. A rápida diminuição da pressão que ocorre durante a erupção faz com que os gases originalmente dissolvidos no magma sejam liberados. Como consequência, a matéria solidificada adquire uma textura porosa e uma alta área superficial. Uma combinação de estrutura vítrea ou pouco cristalina e área superficial elevada é a causa da reatividade das fases de aluminossilicato presentes nas cinzas vulcânicas com hidróxido de cálcio. Dentre as pozolanas de origem vulcânica mais conhecidas no mundo destacam-se os vidros vulcânicos encontrados em Bacoli (Itália), na ilha de Santorini (Grécia) e em Shirasu (Japão) (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

As alterações hidrotermais do vidro vulcânico resultam na formação de minerais de zeólitas, que são compostos do tipo $(\text{Na}_2\text{Ca})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Esse produto, denominado tufo vulcânico, quando finamente moído é capaz de reagir com a cal formando produtos cimentícios. Tufos vulcânicos são encontrados em muitos países, incluindo Alemanha, Itália, China e Rússia (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

As pozolanas de origem sedimentar incluem certas argilas e as chamadas terras diatomáceas. As argilas originam-se da alteração de rochas ígneas e as terras diatomáceas são formadas por sílica amorfa hidratada, denominada opala, proveniente de restos de esqueletos siliciosos de plantas aquáticas microscópicas chamadas diatomáceas. Apesar do

comportamento fortemente pozolânico, o uso de diatomáceas em concretos é dificultado por sua elevada área superficial específica, o que faz com que a demanda de água aumente. O maior depósito conhecido é na Califórnia. Outros grandes depósitos são relatados na Argélia, Canadá, Alemanha e Dinamarca (MCCARTHY e DYER, 2019).

2.4.2 Cinza Volante

As cinzas volantes são geradas durante a combustão do carvão pulverizado nas usinas termelétricas. À medida que o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maioria das impurezas minerais, como argilas, quartzo e feldspato são fundidas e permanecem suspensas no gás de combustão. Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundida são resfriadas rapidamente e solidificam como partículas vítreas esféricas. Uma parte dos minerais se aglomera formando a cinza de grelha, enquanto a maioria das partículas finas é carregada pelo fluxo de gás de combustão e por isso são chamadas cinzas volantes. Essa cinza é subsequentemente removida do gás por uma série de separadores mecânicos e precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

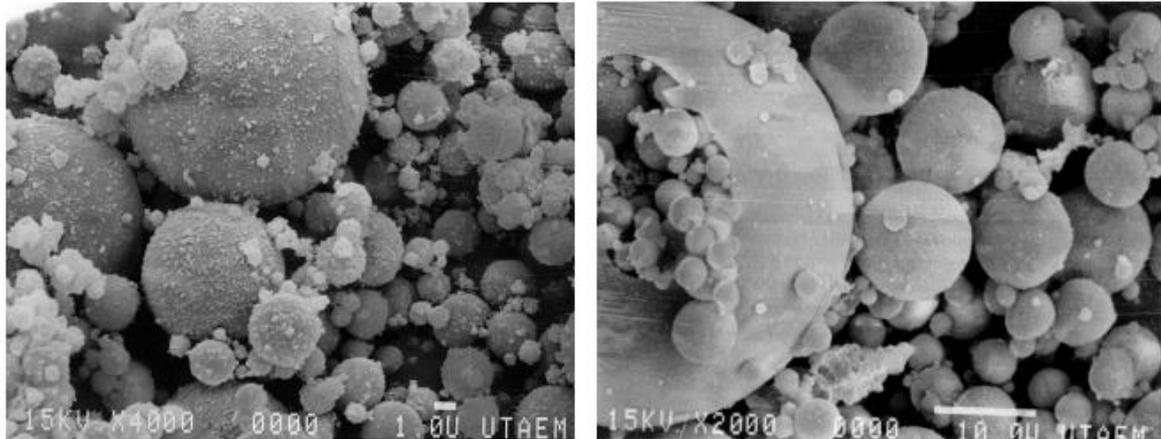
As propriedades físicas, mineralógicas e químicas das cinzas volantes podem variar consideravelmente. Essas diferenças devem-se, entre outros fatores, ao tipo e composição mineralógica do carvão utilizado na queima, ao tipo de forno e procedimento empregado na combustão e ao modo como as cinzas são coletadas, manuseadas e armazenadas antes do uso (SIDDIQUE e KHAN, 2011).

As cinzas volantes podem ser divididas em duas categorias levando-se em consideração a composição e as propriedades mineralógicas, que se diferem principalmente pelo teor de cálcio. As cinzas com alto teor de vidro, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e baixo teor de cálcio (menos de 10 % de CaO) são, geralmente, produtos da combustão de carvão antracito e betuminoso. As cinzas com alto teor de cálcio contêm mais de 20% de CaO e geralmente são produtos da combustão de lignito e carvão sub-betuminoso. A *ASTM International* divide as cinzas volantes em Classe F e Classe C, embora baseadas em conteúdo de $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ acima e abaixo de 70%, respectivamente, correspondem aproximadamente às cinzas de baixo e alto teor de CaO (TAYLOR, 1997; ACI 232.2R-03, 2003).

A maioria das partículas de cinzas volantes possuem forma de esferas sólidas. Também pode haver esferas ocas, chamadas cenosferas, quando completamente vazias ou plerosferas,

quando contêm esferas reduzidas. A Figura 5 mostra a morfologia das partículas de cinza volante (TAYLOR, 1997).

Figura 5 - Micrografia eletrônica de varredura de cinzas volantes
a) partículas vítreas esféricas b) plerosfera



Fonte: ACI 232.2R-03 (2003).

O material possui elevada finura e distribuição granulométrica semelhante à do cimento. As partículas podem variar de menos que 1 μm a quase 100 μm de diâmetro. Porém, a maior parte dessas partículas, cerca de 50% em massa, é inferior a 20 μm . A massa específica geralmente varia entre 1,9 g/cm^3 e 2,8 g/cm^3 e a superfície específica de 300 m^2/kg a 500 m^2/kg . Os principais componentes das cinzas volantes são cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO). Em quantidades substancialmente inferiores, existem outros componentes como MgO , SO_3 , Na_2O e K_2O . As cinzas volantes contêm também partículas de carbono não consumidas na combustão (MEHTA e MONTEIRO, 2008; KOSMATKA e WILSON, 2011; ACI 232.2R-03, 2003).

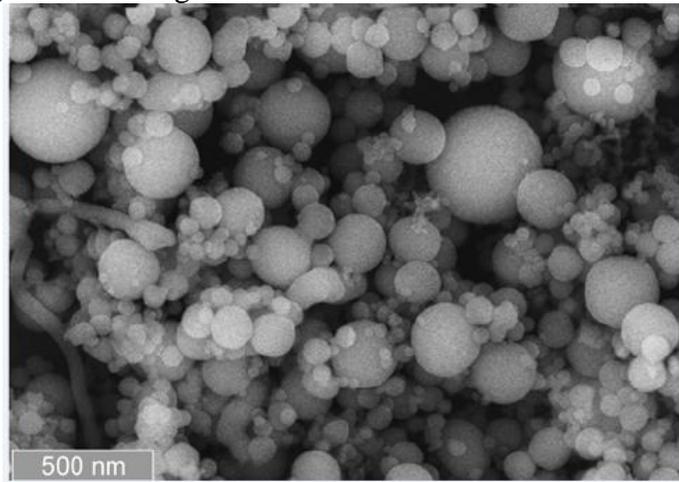
As cinzas volantes, quando incorporadas ao concreto, ocasionam melhorias na trabalhabilidade do concreto fresco, redução da temperatura durante a hidratação inicial, aumento da resistência aos sulfatos, redução da expansão devido à reação álcali-sílica e aumento da durabilidade e resistência do concreto endurecido (ACI 232.2R-03, 2003).

2.4.3 Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como fumo de sílica condensado, sílica volatilizada ou microssílica, é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. Durante a produção, a redução do quartzo ao silício em temperaturas de até 2000 $^{\circ}\text{C}$, que ocorre em forno elétrico a arco, produz vapores de monóxido de silício

(SiO), que, na zona de baixa temperatura do forno, se oxidam e condensam na forma de pequenas partículas esféricas, conforme observa-se na Figura 6. A sílica ativa é composta principalmente de sílica vítrea, pois o resfriamento do vapor de SiO e sua oxidação em SiO₂ ocorrem tão rapidamente que os tetraedros de SiO₂ não têm tempo para se organizar de maneira ordenada, o que produziria uma forma de sílica cristalina (MCCARTHY e DYER, 2019; AİTCIN, 1998).

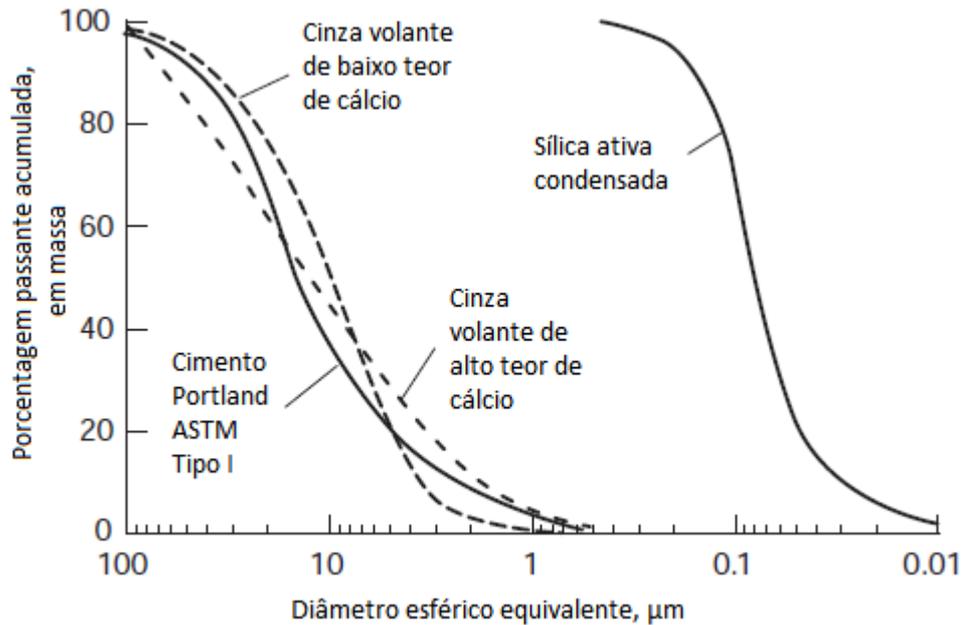
Figura 6 - Micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa



Fonte: Snellings *et al.* (2012).

As partículas de sílica ativa possuem diâmetro variando de menos de 0,1 µm a cerca de 1 ou 2 µm. Comparadas ao cimento Portland normal e às cinzas volantes típicas, as partículas de sílica ativa são cerca de cem vezes menores, como observa-se no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Comparação da distribuição granulométrica de cimento Portland, cinzas volantes e sílica ativa



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

A massa específica da sílica ativa é de cerca de $2,2 \text{ g/cm}^3$. A superfície específica não pode ser medida da mesma maneira que no cimento Portland devido à sua extrema finura, então é determinada pela adsorção de nitrogênio. Os valores típicos relatados variam de 15000 a 25000 m^2/kg . Utilizando a mesma técnica, a superfície específica de um cimento Portland comum é de aproximadamente 1500 m^2/kg (AİTCIN, 1998).

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta principalmente de sílica (SiO_2) sendo que seu teor varia dependendo do tipo de liga produzida. Quanto maior o teor de silício da liga, maior o teor de SiO_2 da sílica ativa. Geralmente, a fumaça de sílica produzida durante a fabricação de silício metálico contém mais de 90% de SiO_2 , enquanto a produzida durante a fabricação da liga Ferro Silício 75% tem um teor superior a 85% (AİTCIN, 1998).

A sílica ativa é um material pozolânico muito reativo. Comparada com outros materiais pozolânicos, as características responsáveis pela alta reatividade são o alto teor de SiO_2 , o estado amorfo e a extrema finura.

A combinação dos efeitos pozolânico e *filler* causados pela adição da sílica ativa resulta em um concreto com elevada densidade e com uma forte ligação entre agregados e pasta de cimento hidratada, o que aumenta a resistência à compressão do concreto, especialmente entre 7 e 28 dias. Além disso, como a sílica ativa reduz a porosidade da pasta de cimento em sua interface com o agregado, a permeabilidade do concreto é reduzida (AİTCIN, 1998).

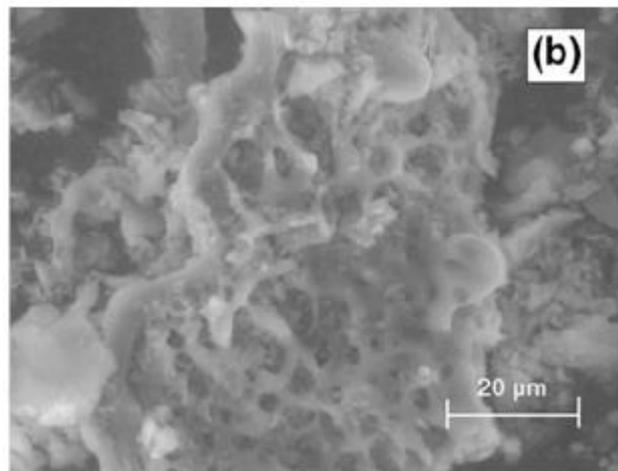
2.4.4 Cinza de casca de arroz

O principal subproduto do beneficiamento do arroz é a casca, um material fibroso que representa cerca de 30% do peso bruto da semente. A casca normalmente contém cerca de 50% de celulose, 25 a 30% de lignina e 15 a 20% de sílica. Devido ao seu caráter abrasivo, baixo valor nutritivo e baixa densidade aparente a casca de arroz apresenta baixo valor comercial. A natureza volumosa da casca gera dificuldades de transporte e armazenamento. Quando descartada de maneira inadequada, polui o meio ambiente (YE *et al.*, 2018; SANTOS, 2006).

Devido ao alto poder calorífico da casca de arroz, uma das alternativas é utilizá-la para a geração de energia. A casca de arroz começou a ser utilizada como combustível alternativo dentro das próprias indústrias de beneficiamento do grão, substituindo a lenha com custo praticamente nulo, além de eliminar volumosas quantidades do material. A casca, inicialmente empregada para geração de calor necessário para a secagem e parboilização dos grãos de arroz, passou também a ser utilizada na geração de outras formas de energia, como energia elétrica em usinas termelétricas (POUEY, 2006; SANTOS, 2006).

A partir da queima incompleta da casca de arroz para obtenção de energia, cerca de 20% da massa da casca é convertida em cinza. No processo de queima ocorre a remoção da lignina e da celulose, originando uma estrutura celular porosa com superfície específica de 60 a 100 m²/g (obtida por adsorção de nitrogênio) e diâmetro médio das partículas inferior a 45 µm. A estrutura da cinza de casca de arroz pode ser observada na Figura 7 (YE *et al.*, 2018; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 7 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz



Fonte: Nguyen *et al.*, 2011 *apud* Ye *et al.* (2018).

A análise química da cinza de casca de arroz mostra que o conteúdo de sílica varia de 90 a 95%. Os álcalis K_2O e Na_2O são as principais impurezas presentes, sendo que o conteúdo de K_2O varia entre 1 e 5%, dependendo do tipo e quantidade de fertilizante utilizado na plantação. Outras impurezas, tais como CaO , MgO e P_2O_5 , também podem ser encontradas em quantidades menores que 1% (HOUSTON, 1972 *apud* DAFICO, 2001).

A cor da cinza está relacionada à presença de impurezas, ao processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material, decorrentes da variação da temperatura de queima. Quanto mais escura maior o teor de carbono, indicando a presença de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação do material (SANTOS, 2006).

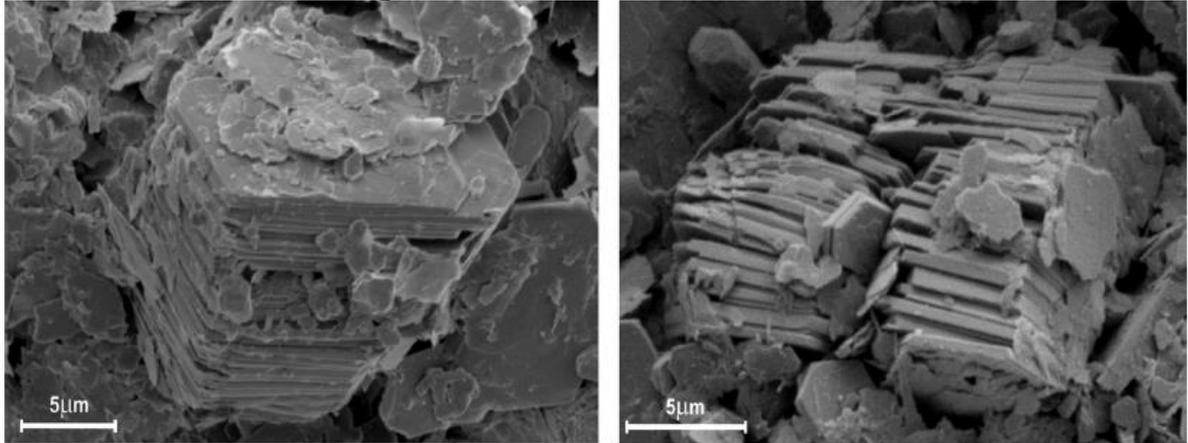
A reatividade da cinza da casca de arroz é influenciada pela temperatura de queima, pelo tempo de exposição a essa temperatura, pela superfície específica e pelo teor de sílica amorfa presente. É possível obter cinzas altamente reativas, com atividade pozolânica semelhante à da sílica ativa. Os benefícios do uso de cinzas da casca de arroz em concretos são: maior resistência à compressão, menor permeabilidade, resistência ao ataque de sulfato, resistência ao ataque de ácido, redução de fissuras, resistência à penetração de cloreto e excelente desempenho sob ciclos de congelamento e descongelamento (MCCARTHY e DYER, 2019; TAYLOR, 1997; ACI 232.1R-12, 2012).

2.4.5 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico proveniente da calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos. O termo caulim é utilizado para designar um grupo de silicatos de alumínio hidratados, incluindo principalmente os minerais caulinita e haloisita. Contém outras substâncias sob forma de impurezas como quartzo, mica, feldspato, entre outras (MURRAY, 2007).

O caulim é composto principalmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Seu principal mineral, a caulinita, tem sua fórmula estrutural definida como $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, a qual é composta por cerca de 46,3% de SiO_2 , 39,8% de Al_2O_3 e 13,9% de H_2O . A caulinita tem sua microestrutura constituída por finas placas, em formato pseudo-hexagonal, que são compostas por sílica tetraédrica e alumina octaédrica, dispostas em várias camadas empilhadas umas sobre as outras, conforme Figura 8 (MURRAY, 2007).

Figura 8 – Microestrutura da caulinita

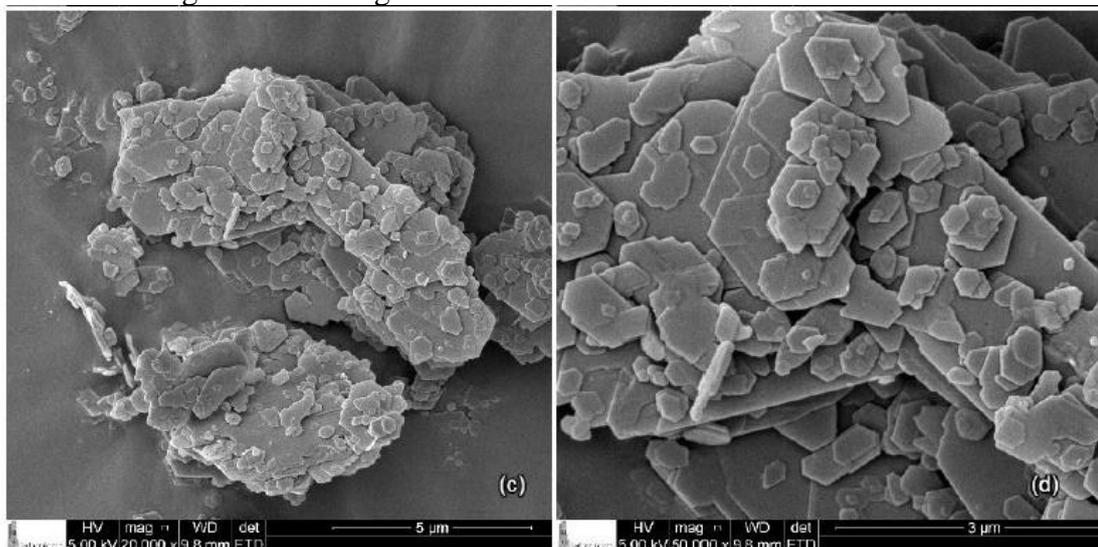


Fonte: Saad *et al.* (2019).

Quando a caulinita é aquecida a uma faixa de temperatura compreendida entre 650 °C e 750 °C, se transforma em metacaulim. No processo de calcinação os íons OH⁻ são eliminados ocorrendo a desidroxilação da caulinita, a qual passa de um estado cristalino para um estado amorfo, o metacaulim (Al₂Si₂O₅), altamente reativo. O aquecimento a temperaturas mais altas do que cerca de 750°C origina um material não muito reativo. O metacaulim é tipicamente branco, com tamanhos de partículas de cerca de 3 μm de diâmetro, massa específica de aproximadamente 2,5 g/cm³ e superfície específica de 15000 m²/kg (BLACK, 2016; SIDDIQUE e KHAN, 2011).

Após a calcinação, a geometria pseudo-hexagonal das partículas de caulinita é mantida. Porém, no metacaulim não há empilhamento de partículas como na caulinita, conforme Figura 9 (ANDRADES *et al.*, 2020).

Figura 9 – Micrografia eletrônica de varredura do metacaulim



Fonte: Andrades *et al.* (2020).

O comportamento pozolânico do metacaulim é influenciado por alguns aspectos, tais como: a composição química da argila empregada, a temperatura, o tempo de queima e o método utilizados na calcinação e fatores relacionados à moagem, como o tempo e o tipo de moinho (SOUZA e DAL MOLIN, 2002).

Devido à elevada superfície específica, o metacaulim, quando adicionado ao concreto, melhora aspectos reológicos através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo para a retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação. O efeito pozolânico aliado ao efeito *filler* conferem aos compósitos propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico, tais como: aumento da resistência à compressão, redução da porosidade e da permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, mitigação da reação álcali agregado, entre outros (MEDINA, 2011; DETWILER *et al.*, 1996; NBR 15894-1, 2010).

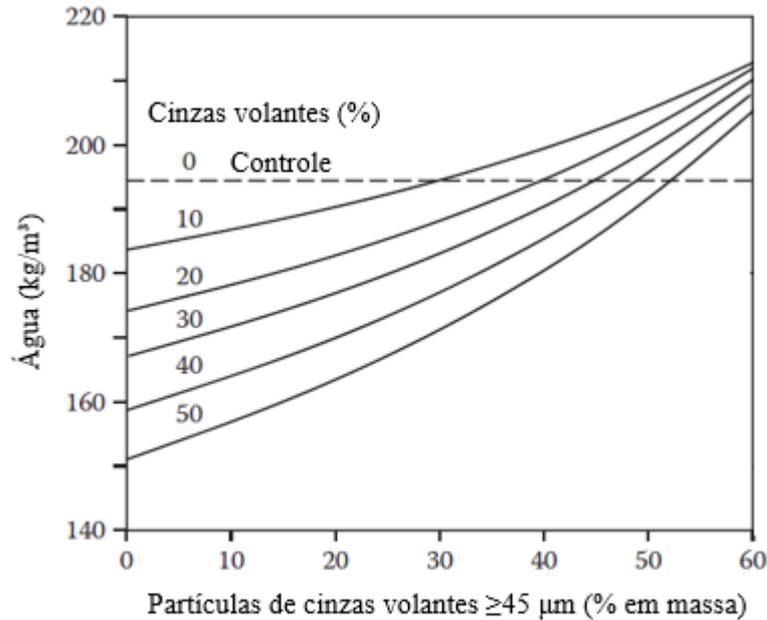
2.5 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POZOLANAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Materiais pozolânicos podem influenciar consideravelmente as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. O efeito da adição depende de fatores como o tipo e a finura do material, a forma das partículas, o nível de substituição, entre outros.

2.5.1 Demanda de água e trabalhabilidade

O uso de cinzas volantes com alta finura e baixo teor de carbono melhora a trabalhabilidade e reduz a demanda de água do concreto. No Gráfico 5 pode-se observar que quanto maior a porcentagem e finura das cinzas volantes incorporadas ao concreto, menor a quantidade de água necessária para obtenção da mesma trabalhabilidade. Além disso, observa-se que as cinzas volantes mais finas tendem a produzir reduções maiores na demanda de água e cinzas volantes com quantidade significativa de partículas maiores que 45 µm podem até aumentá-la. O efeito das partículas maiores pode ser explicado pela interferência da forma das partículas, visto que essas tendem a ser irregulares e não esféricas como as mais finas (THOMAS, 2013).

Gráfico 5 - Efeito da finura das cinzas volantes na demanda de água de concretos com o mesmo abatimento



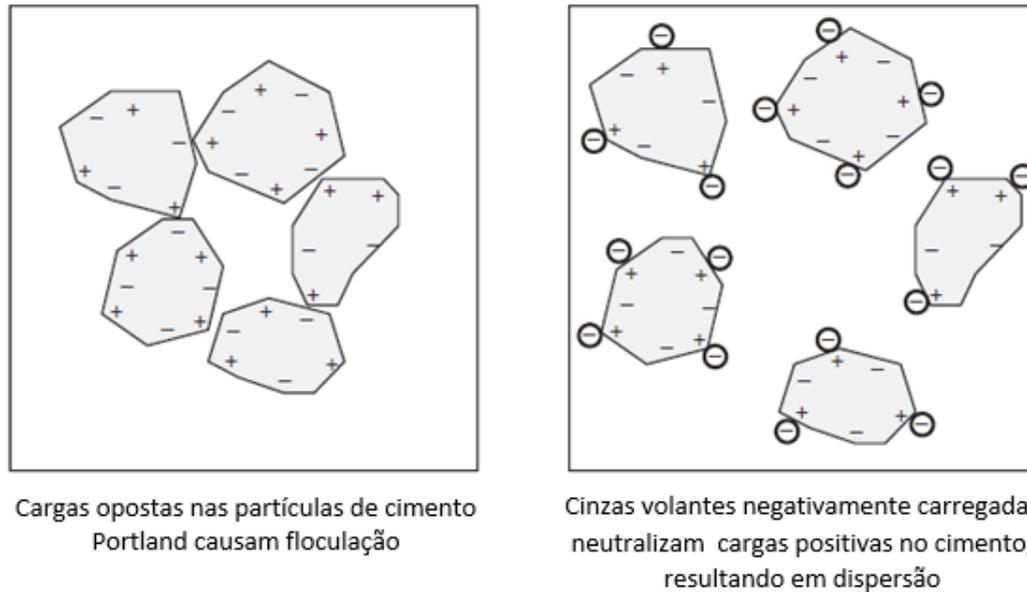
Fonte: Owens, 1979 *apud* Thomas (2013).

As cinzas volantes com alto teor de carbono tendem a ser menos eficazes na redução da demanda de água do concreto, isso ocorre devido à absorção de água por partículas de carbono porosas. Embora a quantidade exata de redução de água varie amplamente com a natureza das cinzas volantes e outros parâmetros da mistura, uma aproximação é que cada 10% de cinzas volantes possibilite uma redução de água de pelo menos 3% (SIDERIS *et al.*, 2018; MALHOTRA e MEHTA, 1996).

O efeito das cinzas volantes na trabalhabilidade do concreto é atribuído aos seguintes fenômenos (SIDERIS *et al.*, 2018; MALHOTRA e MEHTA, 1996):

- O efeito “*ball-bearing*”: a forma esférica e a superfície lisa das partículas de cinza volante atuam para lubrificar a mistura, reduzindo o atrito entre as partículas. Esse efeito explica por que a cinza volante é um redutor de água muito mais eficaz do que outras pozolanas com tamanho de partícula semelhante, mas com formato irregular.
- Dispersão por adsorção: as partículas vítreas submicrônicas da cinza volante são adsorvidas nas superfícies dos grãos de cimento com carga oposta e evitam a floculação, assim as partículas de cimento são dispersas e não retêm grandes quantidades de água, de forma semelhante ao efeito dos aditivos químicos redutores de água (Figura 10).
- O efeito do empacotamento de partículas causado pela adição das cinzas reduz os espaços vazios e, conseqüentemente, a quantidade de água necessária.

Figura 10 - As partículas submicrônicas de cinzas volantes adsorvem e dispersam partículas de cimento Portland



Fonte: Thomas (2013).

A sílica ativa pode reduzir a demanda de água do concreto em níveis relativamente baixos de substituição (menores que 4%), pois as pequenas partículas esféricas lubrificam a mistura e aumentam o empacotamento de partículas, preenchendo o espaço entre os grãos de cimento que seriam preenchidos com água. No entanto, a elevada área superficial da sílica ativa tende a aumentar a demanda de água, e esse efeito é predominante para substituições acima de cerca de 5%. Por esse motivo, os aditivos redutores de água ou superplastificantes devem sempre ser usados em concreto contendo um teor de substituição maior que 4% (em massa) para compensar o aumento da demanda de água e garantir a dispersão adequada da sílica ativa em toda a mistura de concreto (THOMAS, 2013).

O grande aumento na área superficial das partículas devido à adição de sílica gera um aumento nas forças internas de superfície resultando em um aumento na coesão e consequentemente diminuição da suscetibilidade à segregação do concreto. Esse efeito é vantajoso, mas também significa que o concreto parece ser um pouco mais rígido no lançamento, consequentemente é necessário um aumento no abatimento para manter a trabalhabilidade 'aparente'. Essa é uma razão importante pela qual a sílica ativa é usada com aditivos plastificantes ou superplastificantes. O termo trabalhabilidade 'aparente' refere-se ao efeito da sílica no abatimento de um concreto e na forma como o abatimento se relaciona com a trabalhabilidade da mistura. Um concreto com adição de sílica terá um abatimento menor do que um concreto convencional semelhante devido à coesão da mistura. No entanto, quando a energia é aplicada ao concreto, para bombeá-lo ou vibrá-lo, as partículas de sílica ativa, devido

à sua forma, atuam como esferas rolantes e lubrificam a mistura, proporcionando maior fluidez quando comparado ao concreto convencional de mesmo abatimento (LEWIS, 2018).

O metacaulim tem pouca influência sobre a demanda de água em níveis de substituição de aproximadamente 5%, mas, assim como a sílica ativa, requer o uso de aditivos redutores de água ou superplastificantes para porcentagens superiores de substituição (THOMAS, 2013).

O efeito das pozolanas naturais na trabalhabilidade e demanda de água varia muito, dependendo principalmente das propriedades físicas do material, tais como tamanho, forma e textura da superfície. Muitas pozolanas naturais são porosas e podem aumentar a demanda de água devido à absorção. No entanto, a água absorvida não aumenta a porosidade do concreto endurecido e pode posteriormente ser disponibilizada para a reação pozolânica (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

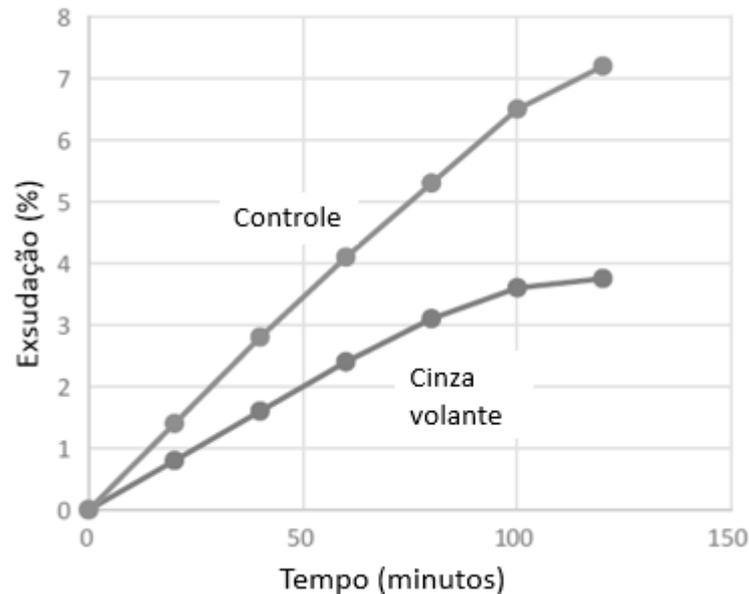
As cinzas de casca de arroz, devido à natureza hidrofílica e à alta superfície específica, aumentam a demanda de água. Os concretos com adição dessas cinzas requerem dosagens mais altas de aditivos superplastificantes para atingir um determinado abatimento, quando comparados aos concretos sem adição (YE *et al.*, 2018).

2.5.2 Segregação e exsudação

A segregação e a exsudação excessiva ocorrem principalmente em concretos com proporção inadequada que apresentam alto teor de água e deficiência em finos, devido ao baixo consumo de cimento e areia ou à utilização de areia com curva granulométrica inadequada. Também podem ser ocasionadas devido ao emprego de métodos impróprios de lançamento e adensamento. Naturalmente, uma das formas de evitá-las é aumentar o teor de finos incorporados ao concreto, o que pode ser feito com a adição de pozolanas.

A incorporação de cinzas volantes ao concreto reduz significativamente a segregação e a exsudação. Essa diminuição ocorre devido ao efeito de lubrificação das partículas esféricas de cinzas volantes e à diminuição da demanda de água que resulta no aumento da proporção de sólidos/líquidos, tornando o concreto menos propenso à segregação e facilitando o bombeamento. O Gráfico 6 mostra a taxa de exsudação do concreto com cinzas volantes em comparação à taxa do concreto de referência (SIDERIS *et al.*, 2018).

Gráfico 6 - Exsudação do concreto de referência e do concreto com adição de cinzas volantes



Fonte: Sideris *et al.* (2018).

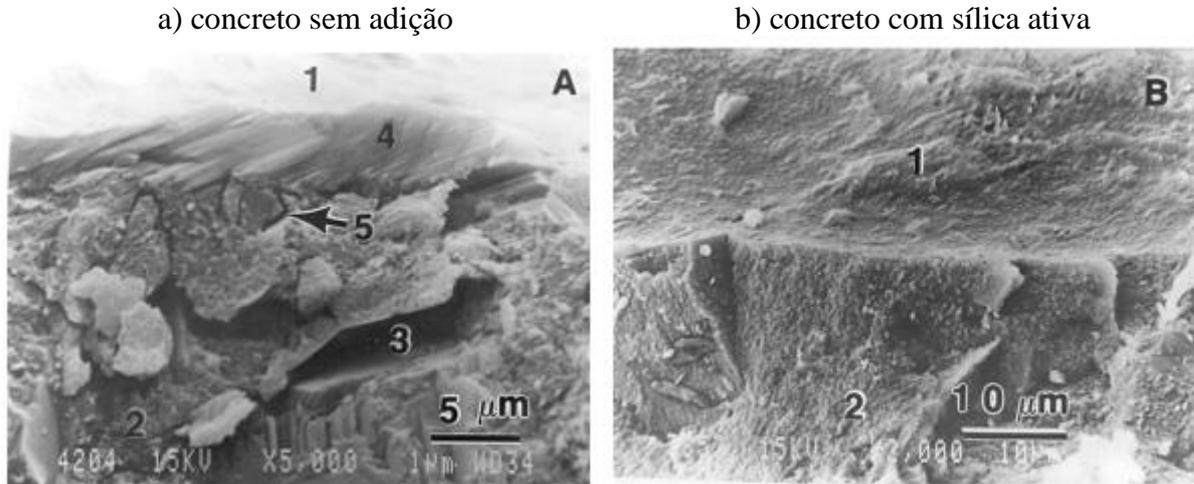
O uso de sílica ativa em concreto com relação água/materiais cimentícios baixas a moderadas ($\leq 0,45$) quase elimina a exsudação devido à redução da água livre na mistura por causa da alta área superficial das partículas e devido ao aumento do volume de partículas extremamente finas, que tendem a bloquear os canais de exsudação. O concreto fresco deve ser protegido do excesso de evaporação para evitar fissuras por retração plástica e o concreto endurecido deve ser curado de maneira adequada. A falta de água de exsudação também significa que o acabamento deve começar muito mais cedo do que em concretos convencionais (THOMAS, 2013; LEWIS, 2018).

As cinzas de casca de arroz também são eficientes no controle da exsudação. Utilizando-se essa pozolana no teor de 10% e com relação água/materiais cimentícios na ordem de 0,30 constata-se que a exsudação é insignificante (ZHANG *et al.*, 1996 *apud* SOUZA, 2003).

A redução da exsudação interna na mistura, proporcionada pela adição de pozolanas, é muito relevante pois altera as características microestruturais da ligação entre pasta de cimento e agregados. Essa região, denominada zona de transição, é caracterizada por uma maior relação água/cimento e maior porosidade devido à tendência de formação de grandes cristais de hidróxido de cálcio e etringita. Algumas pozolanas, particularmente as finamente divididas como a sílica ativa, densificam a zona de transição, melhorando o empacotamento de partículas na superfície do agregado e convertendo parte do hidróxido de cálcio em C-S-H. A Figura 11 ilustra o efeito da sílica ativa nessa região. É possível perceber que no concreto sem adição de sílica ativa há vazios, microfissuras e depósitos de CH na zona de transição, enquanto no

concreto com sílica ativa não parece existir uma zona de transição entre o agregado e o C-S-H (AÏTCIN, 1998).

Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura da zona de transição do concreto aos 28 dias



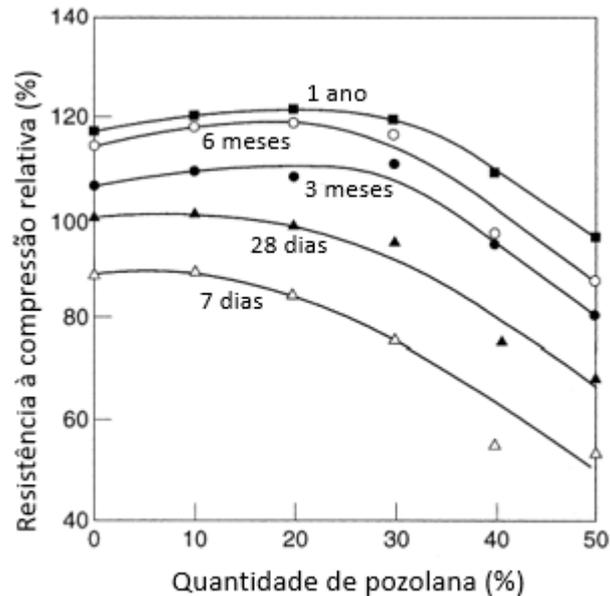
Legenda: 1 - agregado, 2 - pasta de cimento, 3 - vazios, 4 - hidróxido de cálcio, 5 - microfissuras.

Fonte: Bentur e Cohen, 1987 *apud* ACI 234R-06 (2006).

2.5.3 Resistência à compressão

O desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com adição de materiais pozolânicos é influenciado por vários fatores, tais como: composição e quantidade de material utilizado, composição do cimento, proporções de mistura (principalmente relação água/materiais cimentícios), idade e temperatura durante o lançamento e cura. Em geral, materiais pozolânicos contribuem para o ganho de resistência a longo prazo conforme evidenciado no Gráfico 7, no qual também é possível observar a influência do conteúdo de pozolana na resistência. Devido à reação pozolânica lenta de alguns materiais, a cura pode ser necessária por períodos mais longos do que o normal para garantir ganho de resistência adequado (KOSMATKA e WILSON, 2011).

Gráfico 7 - Efeito da substituição do cimento por material pozolânico na resistência à compressão de argamassas



Fonte: McCarthy e Dyer (2019).

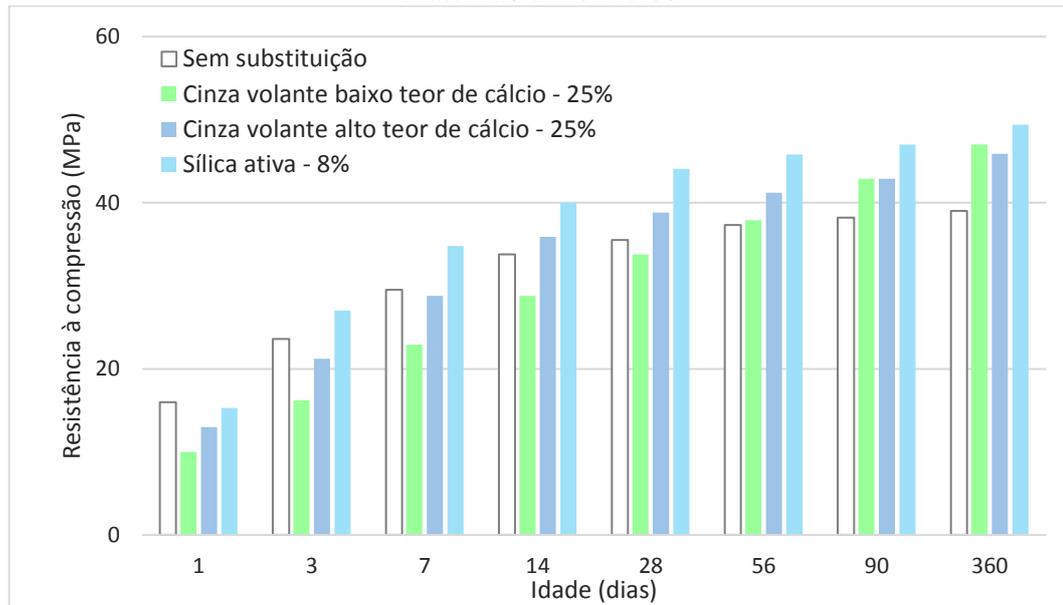
As cinzas volantes com alto teor de cálcio, por possuírem maior reatividade, contribuem mais para a resistência do concreto nas primeiras idades do que as cinzas volantes com baixo teor de cálcio. As com alto teor de cálcio geralmente atingem a mesma resistência do concreto de referência entre 3 e 7 dias, enquanto as com baixo teor de cálcio podem levar de 28 a 90 dias (SIDERIS *et al.*, 2018).

A sílica ativa, devido à finura das partículas, alta área superficial e natureza altamente amorfa, reage rapidamente e sua contribuição para a resistência é vista já nas primeiras idades. Entre 3 e 28 dias, o concreto de sílica ativa geralmente apresenta um ganho de resistência superior ao de referência, assumindo condições ambientais e de temperatura de cura semelhantes (KOSMATKA e WILSON, 2011).

O Gráfico 8 mostra relações entre resistência e idade para concretos com fator água/materiais cimentícios igual a 0,45. Nesses concretos, o cimento foi substituído por pozolana (em massa), usando níveis de substituição comuns para cada material. O teor de areia foi ajustado para manter a densidade e as dosagens do aditivo incorporador de ar e redutor de água ajustadas para manter o conteúdo de ar (5 a 8 %) e o abatimento (75 a 125 mm) desejados. Nenhuma outra alteração nas proporções da mistura foi feita. Nessas condições, o uso de 25% de cinza volante com baixo teor de cálcio reduz a resistência do concreto nas primeiras idades, mas aumenta a resistência a longo prazo, ultrapassando a do concreto sem adição entre 28 e 56 dias. O concreto com cinzas volantes com alto teor de cálcio se comporta de maneira

semelhante, mas a extensão da redução da resistência no início é menor e a ultrapassagem ocorre entre 7 e 28 dias. O concreto com sílica ativa se comporta de maneira diferente devido à reação relativamente rápida. As resistências a partir dos 3 dias são melhoradas significativamente pela presença de sílica ativa (THOMAS, 2013).

Gráfico 8 - Desenvolvimento da resistência à compressão para concretos com diferentes materiais cimentícios

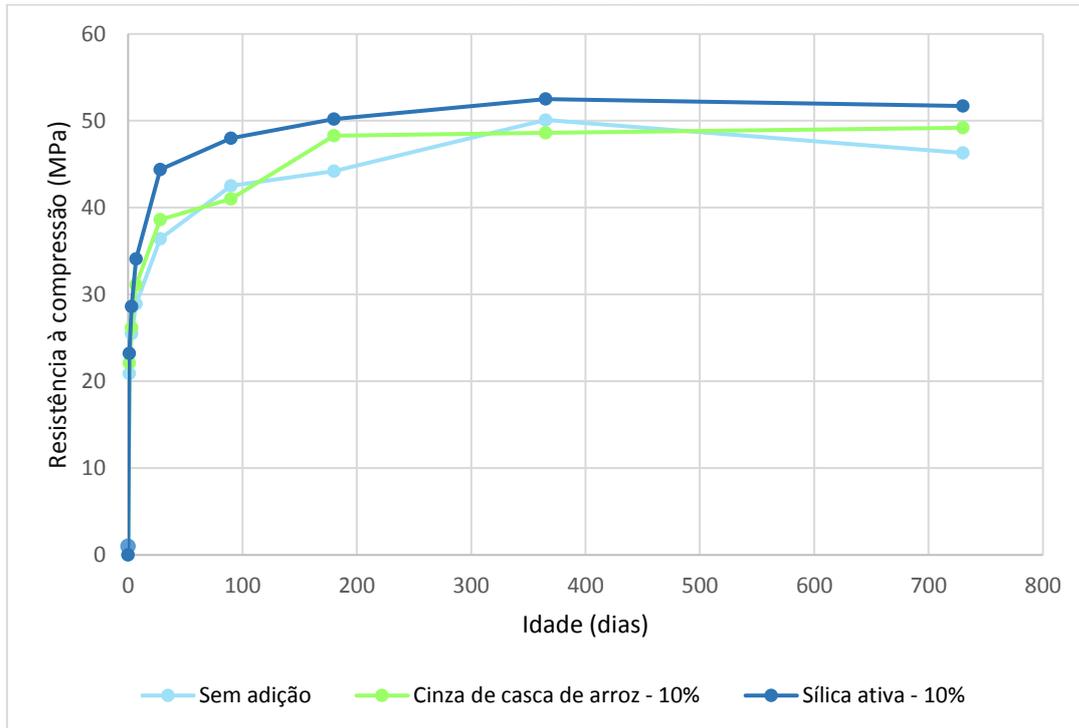


Fonte: Adaptado de Thomas (2013).

O comportamento do concreto com adição de pozolanas naturais dependerá da natureza do material. O concreto contendo pozolanas que reagem lentamente, como alguns folhelhos calcinados e cinzas vulcânicas, se comportará de maneira semelhante ao concreto com cinzas volantes com baixo teor de cálcio (THOMAS, 2013).

Zhang e Malhotra (1996) analisaram o efeito das cinzas de casca de arroz na resistência à compressão do concreto e compararam com o efeito da sílica ativa. Ambos os materiais pozolânicos foram utilizados como substituição parcial do cimento na proporção de 10% e a relação água/materiais cimentícios foi igual a 0,40. Os resultados de resistência à compressão até 730 dias são mostrados no Gráfico 9. Observou-se que, em geral, o concreto com cinza de casca de arroz alcançou maior resistência que o concreto de referência, mas menor que o concreto de sílica ativa. Aos 28 dias, o concreto com cinza de casca de arroz possuía uma resistência à compressão de 38,6 MPa em comparação com 36,4 MPa no concreto sem adição e 44,4 MPa no concreto com sílica. Aos 180 dias, o concreto com cinza de casca de arroz exibiu resistência à compressão de 48,3 MPa em comparação com 44,2 MPa para o concreto sem adição e 50,2 MPa para concreto com sílica.

Gráfico 9 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concretos com cinza de casca de arroz e sílica ativa



Fonte: Zhang e Malhotra (1996).

Concretos com adição de metacaulim também apresentam resistência à compressão mais elevada do que os concretos sem adição pozzolânica. Wild *et al.* (1996) constataram um aumento máximo de 32% na resistência aos 28 dias para um nível de substituição de 20%. Qian e Li (2001) constataram que o metacaulim tem uma influência pronunciada na resistência inicial. Aos 3 dias foi alcançado um aumento de 51% na resistência do concreto com 15% de substituição em relação ao concreto sem adição. Além disso, a resistência aos 3 dias para os níveis de substituição de 10% e 15% foram maiores que a resistência aos 28 dias do concreto sem adição.

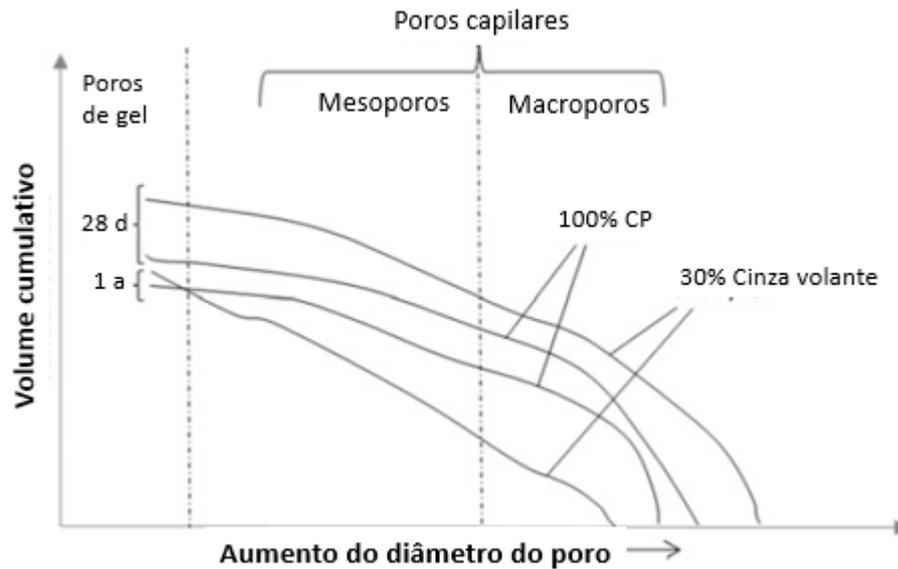
2.5.4 Permeabilidade e porosidade

A porosidade do concreto influencia a resistência e as taxas de transporte de massa, com implicações no desempenho estrutural e nos mecanismos de deterioração, tais como: lixiviação de hidróxido de cálcio, ataque ácido, corrosão de armadura e reação álcali-agregado, que estão diretamente relacionados à durabilidade. A resistência está essencialmente relacionada à porosidade total, enquanto os processos de transporte de massa dependem da estrutura e da distribuição do tamanho dos poros.

A permeabilidade depende principalmente do tamanho, distribuição e continuidade dos poros presentes na pasta de cimento hidratada. Os principais fatores que controlam a estrutura dos poros são o grau de hidratação e a relação água/cimento. No concreto convencional, o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento Portland pode ser lixiviado, criando canais para a entrada de água e soluções agressivas. No entanto, quando pozolanas são incorporadas, ocorre o processo de refinamento do tamanho dos poros no qual pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio nos canais capilares cheios de água e produzem silicatos de cálcio hidratados, compostos insolúveis em água, preenchendo os vazios capilares. Visto que a permeabilidade é diretamente proporcional ao volume de poros maiores que 10 nm na pasta hidratada, esse fenômeno reduz a permeabilidade e conseqüentemente a entrada de fluidos agressivos (SIDDIQUE e KHAN, 2011).

O efeito das cinzas volantes com baixo teor de cálcio na distribuição do tamanho dos poros nas idades de 28 dias e 1 ano para pastas com relação água/materiais cimentícios igual a 0,50 é mostrado no Gráfico 10. Observa-se que a substituição parcial do cimento por 30% de cinza volante resulta em maior porosidade e maior volume de macroporos medidos aos 28 dias e que o volume total dos poros medidos com a idade de 1 ano é reduzido em ambas as pastas, porém a diminuição é maior na pasta com adição de cinza volante. Nessa pasta, há uma redução muito significativa no diâmetro máximo dos poros entre 28 dias e 1 ano, resultando em um diâmetro máximo menor quando comparado ao concreto sem adição. Além disso, nota-se que há uma diminuição na relação entre macroporos e mesoporos para essa mistura (varia de aproximadamente 0,7 para 0,4), resultando em uma estrutura de poros mais refinada. Na idade de 1 ano o concreto com cinza volante tem aproximadamente um volume total de macroporos correspondente a 60% do volume total do concreto sem adição (MANMOHAN e MEHTA, 1981 *apud* SIDERIS *et al.*, 2018).

Gráfico 10 - Efeito da adição de cinza volante na distribuição do tamanho dos poros aos 28 dias e 1 ano



Fonte: Manmohan e Mehta, 1981 *apud* Sideris *et al.* (2018).

Um dos primeiros estudos sobre o efeito de materiais pozolânicos na permeabilidade à água foi o de Davis (1954, *apud* MALHOTRA e MEHTA, 1996), que analisou a permeabilidade de tubos de concreto e os efeitos da substituição de 30 e 60% do cimento por cinzas volantes com baixo teor de cálcio originadas de dois locais diferentes. Os resultados são mostrados na Tabela 4. Os dados indicam que o concreto com cinzas volantes é mais permeável aos 28 dias, especialmente em níveis mais altos de substituição. No entanto, aos 180 dias a tendência é revertida, com o concreto de cinzas volantes sendo significativamente menos permeável. A permeabilidade chega a ser 13 vezes menor. Esses resultados estão em consonância com o efeito da adição de cinzas volantes na distribuição do tamanho dos poros mostrado no Gráfico 10.

Tabela 4 - Efeito da adição de cinzas volantes na permeabilidade do concreto

Cinza volante		Água/materiais cimentícios	Permeabilidade relativa	
Origem	% em massa		28 dias	180 dias
-	0	0,75	100	26
Chicago	30	0,70	220	5
	60	0,65	1410	2
Cleveland	30	0,70	320	5
	60	0,65	1880	7

Fonte: Davis, 1954 *apud* Malhotra e Mehta (1996).

Hooton (1993, *apud* THOMAS, 2013) estudou a influência da adição de sílica ativa na permeabilidade de pastas de cimento. Os ensaios foram realizados para pastas de cimento com teores de substituição de 10 e 20% para diferentes idades. Os resultados são mostrados na Tabela 5. Observa-se que as pastas com sílica ativa apresentaram permeabilidade igual ou superior aos 7 dias, porém houve uma clara tendência de redução da permeabilidade com o aumento do teor de sílica ativa e aumento da idade.

Tabela 5 - Efeito da adição de sílica ativa na permeabilidade à água

Porcentagem de sílica ativa	Coeficiente de permeabilidade ($\times 10^{-13}$ m/s)			
	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
0%	6,3	3,8	1,3	0,3
10%	10,0	0,9	0,6	0,4
20%	6,3	<0,1	0,4	<0,1

Fonte: Adaptado de Hooton, 1993 *apud* Thomas (2013).

2.5.5 Módulo de elasticidade

O comportamento elástico de materiais heterogêneos como o concreto depende da fração volumétrica, da densidade e do módulo de elasticidade dos componentes e das características da zona de transição. Uma vez que a densidade é inversamente proporcional à porosidade, os fatores que influenciam a porosidade do agregado, da matriz e da zona de transição são relevantes. A relação direta entre resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto decorre do fato de que ambas as propriedades são afetadas pela porosidade das fases constituintes.

Ashik e Gomathi (2017) analisaram a influência da adição de metacaulim no módulo de elasticidade do concreto. Os autores observaram que houve um aumento no valor dessa propriedade até a porcentagem de substituição de 10%, para esse nível o aumento foi de 36,6%. Para porcentagens superiores de substituição ocorre uma diminuição do módulo de elasticidade. A redução chegou a 5,79% para a substituição de 17,5%. A variação dos valores seguiu a tendência da resistência à compressão. Resultados similares foram encontrados por Murthy *et al.* (2012).

O efeito da cinza volante no módulo de elasticidade do concreto é similar ao efeito na resistência à compressão, porém no módulo são menos significativos. O módulo de elasticidade do concreto com cinzas volantes é geralmente mais baixo em idades precoces e um pouco mais alto em idades mais avançadas, quando comparado ao concreto sem adição. As características

do cimento e do agregado tem maior influência no módulo do que a adição de cinzas volantes (Lane e Best, 1982 *apud* ACI 232.2R-03, 2003).

A adição de sílica ativa não afeta significativamente o módulo de elasticidade, sendo os valores muito próximos aos obtidos para concretos de mesma resistência sem adição (ACI 234R-06, 2006). O mesmo ocorre para a adição de cinza de casca de arroz aos 28 dias. No entanto, para idades mais avançadas ocorre uma diminuição no módulo de elasticidade. Tashima *et al.* (2005) constataram, aos 91 dias, uma redução de cerca de 11% para um concreto com substituição de 10% de cinzas de casca de arroz.

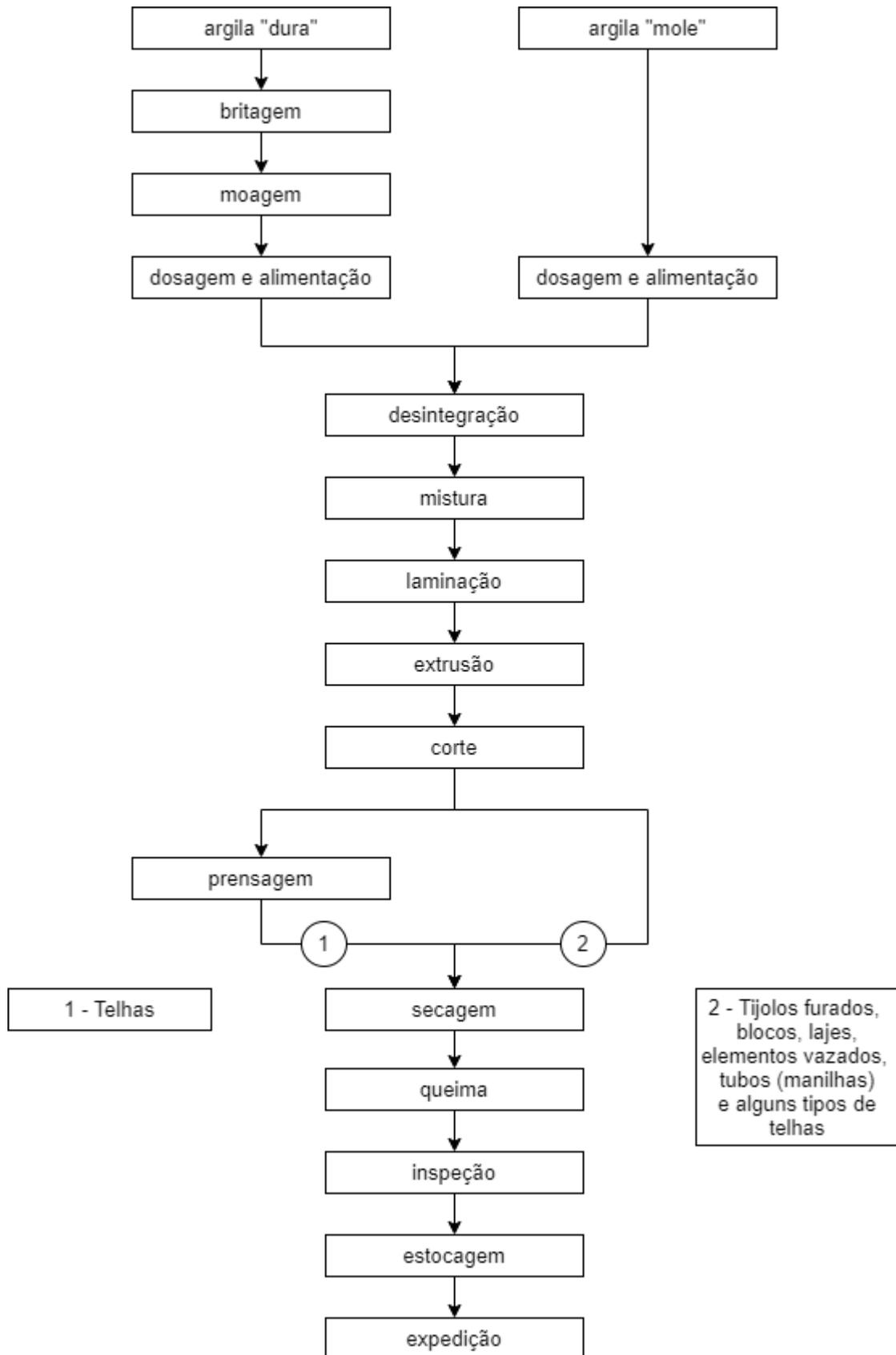
3 CERÂMICA VERMELHA

As cerâmicas são materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. O setor cerâmico é amplo e heterogêneo e por isso é dividido em segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Um dos segmentos é o de cerâmica vermelha, formado pelos produtos que após a queima possuem coloração predominantemente avermelhada. Esse segmento engloba os materiais empregados na construção civil tais como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, tubos, ladrilhos e argila expandida, além de produtos para outros fins como objetos ornamentais e utensílios domésticos.

A cerâmica vermelha é produzida a partir de argila e a cor avermelhada característica está relacionada à presença de óxido de ferro. Argila é um material natural, de textura terrosa, com partículas menores que 2 μm e que desenvolve plasticidade quando misturada com uma quantidade limitada de água. É constituída essencialmente por argilominerais, que são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo, em alguns tipos, outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. A argila pode conter também outros tipos de minerais como quartzo, mica, pirita, hematita, matéria orgânica e outras impurezas (SANTOS, 1989).

O processo de produção da cerâmica vermelha segue as etapas mostradas no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Processo de fabricação de cerâmica vermelha



Fonte: ABCERAM (2021).

Dentre as etapas do processo de produção destacam-se a dosagem dos materiais e a queima das peças pois estão diretamente relacionadas às propriedades da cerâmica, incluindo a atividade pozolânica. Na etapa de dosagem da cerâmica vermelha, dois ou mais tipos de argilas com diferentes características e composições mineralógicas são utilizadas na confecção da massa. No geral, mistura-se uma argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilominerais e uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade (MOTTA *et al.*, 2001).

A composição química das argilas é comumente apresentada na forma de óxidos, que possuem diferentes funções na massa cerâmica. A dosagem da cerâmica é ajustada de acordo com as propriedades requeridas. Os principais óxidos e seus efeitos na massa cerâmica são os seguintes (PEÇANHA JUNIOR, 2005):

- Sílica (SiO_2): é o composto presente em maior quantidade na argila. O quartzo possui grande resistência mecânica e química, dureza sete na escala de Mohs e é refratário. Um aumento da quantidade de sílica pode provocar um eventual aumento de quartzo livre e conseqüentemente diminuição da resistência mecânica a seco, aceleração da secagem, aumento da permeabilidade da peça, redução da retração na queima, melhora da resistência ao impacto e aumento a refratariedade da argila.
- Alumina (Al_2O_3): é o segundo composto mais abundante. Sua concentração é um indicador da quantidade de minerais argilosos e plasticidade da argila. Durante a sinterização, a alumina combinada com a sílica forma mulita, composto cristalino em formato de agulhas que aumenta a resistência mecânica da peça.
- Óxido de Ferro (Fe_2O_3): é o principal responsável pela coloração avermelhada das peças e é um composto refratário.
- Dióxido de Titânio (TiO_2): contribui para a coloração e está presente em percentuais de 0,1 a 0,4%.
- Óxido de Cálcio e Magnésio (MgO e CaO): encontram-se nas argilas como carbonato de cálcio e carbonato de magnésio. Atuam como fundentes, porém prejudicam a tonalidade final do produto. Durante a queima os carbonatos se decompõem liberando CO_2 , deixando na peça o óxido de cálcio ou de magnésio. O CO_2 formado nas reações acumula-se nos poros da peça, causando expansão e contribuindo para neutralização das retrações de queima e para o aumento da porosidade do produto queimado.

- Óxido de Sódio e Potássio (álcalis livres): atuam como fundentes, reduzindo a temperatura de queima e a porosidade do produto. O óxido de sódio encontra-se em concentração de cerca de 0,5%, enquanto o óxido de potássio entre 1,5 e 4%.

A queima é a principal etapa do processo produtivo da cerâmica. Nessa fase, também conhecida como sinterização, ocorrem transformações físicas e químicas no material que são responsáveis pelas características finais do produto, tais como resistência mecânica, cor e dimensões. Os principais fatores que influenciam a queima são a temperatura, a duração, a velocidade de aquecimento e resfriamento, o tipo de forno e o combustível utilizado. Para a cerâmica vermelha a temperatura de queima é da ordem de 750°C a 900°C para tijolos, de 900°C a 950°C para telhas e de 950°C a 1200°C para tubos cerâmicos. Durante a sinterização ocorre uma série de transformações, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e soldagem dos grãos (BACELLI JÚNIOR, 2010).

Os produtos finais de cerâmica vermelha são bons isolantes térmicos e elétricos, possuem alta dureza e fragilidade, apresentam boa resistência à compressão, à corrosão química e a altas temperaturas.

3.1 RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), o setor da cerâmica vermelha possuía, em 2008 (último ano em que os dados foram divulgados), cerca de 6.900 empresas, com um faturamento anual de R\$ 18 bilhões e uma representatividade em torno de 4,8% da indústria da construção civil. Foram produzidos mais de 48 bilhões de blocos de vedação e estruturais, e 15,6 bilhões de telhas, consumindo cerca de 124 milhões de toneladas de argila (ANICER, 2021).

No Plano Nacional de Mineração 2030, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), a previsão é de que a produção de cerâmica vermelha, com base nos dados de 2008, deverá chegar a 150 e 215 bilhões de peças, enquanto o consumo de argila deverá ser de 300 e 430 milhões de toneladas em 2022 e 2030, respectivamente (BRASIL, 2011).

No processo de produção das peças cerâmicas, uma parte do total de peças produzidas é perdida, pois, após a queima, passam pela etapa de inspeção na qual peças são retiradas devido a defeitos no processo de queima ou falta de integridade. Também ocorrem perdas no manuseio e transporte das peças acabadas. Quando os defeitos acontecem antes da queima os produtos extrudados podem ser reprocessados. No entanto, o mesmo não ocorre com as peças que

apresentam defeitos após a queima que, por não haver até o momento nenhum aproveitamento em larga escala, são descartadas (CASTRO *et al.*, 2017).

A quantidade de resíduos de cerâmica vermelha gerada varia de acordo com nível tecnológico de cada indústria, o tipo de matéria-prima utilizada, a qualificação da mão de obra, entre outros fatores, por isso os dados são divergentes. A Tabela 6 apresenta os percentuais de perdas encontrados em alguns estudos.

Tabela 6 - Percentual de perdas das indústrias de cerâmica vermelha

Autor	Resíduo cerâmico calcinado (%)
Dias (2004)	30
Vieira, Souza e Monteiro (2004)	10
Viera (2005)	10
Saboya (2000) <i>apud</i> Désir <i>et al.</i> (2005)	10
Gonçalves (2005)	30
Senthamarai e Monaharan (2005)	30
Sindicer/RS (2008)	15
EELA (2013)	20
Sales e Alferes Filho (2014)	1,6

Fonte: Hansen *et al.* (2015).

Além dos resíduos gerados pela indústria cerâmica, existem os resíduos de construção e demolição (RCD). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), os serviços de limpeza dos municípios coletaram, em 2020, cerca de 47 milhões de toneladas desse tipo de resíduo por dia. Destaca-se que tais dados se referem à quantidade coletada pelos municípios. Como nessa área o responsável por recolher os resíduos é o gestor da obra, os números apresentados refletem, em sua maioria, apenas aquilo que foi abandonado em vias e logradouros públicos. Logo, a quantidade de RCD gerada é ainda maior (ABRELPE, 2021).

A composição dos resíduos de construção e demolição varia muito de acordo com fatores como técnicas construtivas adotadas, qualificação da mão de obra, nível de desenvolvimento da construção civil no local, entre outros. Os resíduos são compostos por concreto, argamassa, cerâmica, areia, pedra, madeira, ferro, gesso, vidro, plástico e outros

materiais. A Tabela 7 mostra as porcentagens de cerâmica vermelha nos resíduos de construção e demolição quantificadas em alguns estudos.

Tabela 7 - Porcentagem de cerâmica vermelha nos resíduos de construção e demolição

Autor	Resíduos de cerâmica vermelha (%)
Marques <i>et al.</i> (2013)	39
Marques Neto (2003)	26
Tavares (2007)	55,7
Elias (2006)	11

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A deposição inadequada desses resíduos gera problemas ambientais e de saúde pública. Dentre os principais impactos pode-se citar: degradação de áreas de preservação ambiental, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem urbana, obstrução de vias públicas, poluição visual e multiplicação de vetores transmissores de doenças.

3.2 UTILIZAÇÃO DA CERÂMICA VERMELHA COMO POZOLANA

Os resíduos de cerâmica vermelha podem ser utilizados como material pozolânico em compósitos à base de cimento, atenuando os impactos causados pela deposição inadequada, reduzindo a exploração de recursos não renováveis e contribuindo para a diminuição das emissões de dióxido de carbono pela indústria cimenteira. Fatores como as composições químicas das argilas utilizadas como matérias-primas, a temperatura de queima, a finura do material e a quantidade utilizada influenciam as propriedades das argamassas e concretos nos quais adiciona-se esse material. Vale salientar que existe ainda a possibilidade de utilização desses resíduos como *filler* ou agregado, caso não apresentem atividade pozolânica satisfatória.

Carvalho (2016) analisou a influência da adição de resíduos de blocos e telhas cerâmicas em argamassas. Os resíduos foram adicionados em substituição ao cimento nos teores de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Constatou-se que houve uma tendência de redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de resíduos; a densidade apresentou um leve aumento ocasionado pela melhor compactação proporcionada pelo aumento dos finos nas misturas; a retenção de água aumentou proporcionalmente com os teores de adição; a resistência à compressão aos 56 dias não apresentou variações significativas, assim como o módulo de elasticidade dinâmico.

Sales e Auferes Filho (2014) estudaram o efeito da utilização de resíduos de cerâmica vermelha provenientes de uma indústria de blocos de vedação como substituição parcial do cimento Portland na produção de concretos. Os resíduos foram moídos e peneirados resultando em grãos menores que 75 μm . Os teores de substituição foram de 10%, 20% e 40%. Os ensaios de resistência à compressão mostraram que, aos 28 dias, houve um aumento de 11% para o teor de substituição de 20%, enquanto os demais teores apresentaram redução. Os valores de módulo de elasticidade, absorção, índice de vazios e massa específica não sofreram variações significativas.

Jerônimo (2014) analisou os efeitos da substituição parcial do cimento por resíduos de tijolos moídos (RTM) frente à corrosão da armadura. Foram confeccionados concretos convencionais (CCV) com teores de substituição de 10%, 20% e 30% e concretos autoadensáveis (CAA) com teores de 20%, 30% e 40%. Observou-se que houve uma diminuição na absorção e no índice de vazios para os concretos com adição. Os resultados das resistências à compressão dos CCV foram sempre melhores para os concretos de referência, já para o CAA ocorreu o contrário. Em relação aos ensaios de carbonatação, os concretos com maiores teores de resíduo tenderam a alcançar frentes de carbonatação mais profundas, fato explicado pela redução da reserva alcalina. Para a penetração de cloretos o RTM apresentou bom resultado, tanto para os CCV como para os CAA. Embora a adição de RTM tenha diminuído o teor crítico de cloretos, aumentou o tempo necessário para a ocorrência da despassivação das armaduras, fato explicado pelo refinamento dos poros e pela maior capacidade de fixação de cloretos.

Gonçalves (2007) utilizou resíduos de cerâmica vermelha provenientes de uma indústria de lajota como material pozolânico suplementar para produção de concretos. O teor de substituição foi de 20% em massa. Os resultados mostraram que houve uma redução do módulo de elasticidade, atribuída à menor rigidez dos produtos hidratados decorrentes da reação pozolânica, gerando misturas com maior capacidade de deformação sob tensão. Não foram observadas influências significativas nas resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos aos 28 dias, independentemente da relação água/cimento.

Cachepa (2017) avaliou a mitigação da reação álcali-agregado em concreto mediante o emprego de resíduos da cerâmica vermelha (RCV) e metacaulim (MK) como pozolanas. O cimento foi substituído pelas pozolanas isoladas e combinadas em teores de 20% e 30%. Os resultados dos ensaios de expansão de barras de argamassa mostraram que todas as argamassas com substituição parcial de cimento tiveram redução nas suas expansões em relação à referência

ao longo de todo o período de ensaio, indicando uma mitigação da reação álcali-agregado. A maior redução foi de 87,7%, obtida para a argamassa com 30% de RCV aos 15 dias. As argamassas confeccionadas com RCV e MK + RCV registraram maiores valores de resistência à compressão quando comparadas com argamassas de referência e MK.

Belchior (2017) analisou a influência da substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica provenientes da produção de blocos cerâmicos estruturais e lajotas nas propriedades de concretos. Os teores de substituição variaram entre 10% e 50%. Observou-se que houve uma expressiva redução do teor de hidróxido de cálcio nos concretos nos quais substituiu-se parte do cimento pela cerâmica, chegando a um valor de cerca de 80% para os teores de 40% e 50%. Com exceção do traço com 10% de pozolana houve uma tendência de diminuição de índice de vazios e absorção. Quanto à resistência à compressão aos 28 dias, apenas o traço com teor de 30% apresentou aumento (cerca de 10%). Para esse teor de substituição observou-se também que as misturas eram mais homogêneas.

4 CONCRETO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

As estruturas de concreto são submetidas a condições térmicas muito variáveis dependendo da função que desempenham. Em condições de serviço, geralmente são expostas a temperaturas menores que 200°C por longos períodos de tempo. Em caso de acidente podem ser expostas a temperaturas muito elevadas, mas normalmente por um período curto, como por exemplo em incêndios. No passado, duas áreas principais motivaram uma grande quantidade de pesquisas sobre concretos submetidos a temperaturas elevadas: a resistência ao fogo de edifícios e túneis e o comportamento das contenções de reatores nucleares em caso de acidente (RILEM TC 200-HTC, 2007).

O comportamento do concreto exposto a temperaturas elevadas é influenciado por diversos fatores que interagem simultaneamente. Dentre os fatores que devem ser levados em consideração estão a permeabilidade, a umidade, o tamanho do elemento estrutural, a taxa de aquecimento e a temperatura máxima atingida, pois controlam o desenvolvimento de pressões internas geradas pelos gases e a composição do concreto, uma vez que tanto a pasta de cimento quanto o agregado são constituídos por componentes que se decompõem com o calor (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ao aquecer o concreto, ocorrem diferentes processos físicos e reações químicas. O aumento da temperatura causa gradientes de temperatura e migração de água. Além disso, ocorrem perda de umidade, desidratação e transformações químicas. Esses fenômenos levam a alterações micro e macroestruturais significativas, como da porosidade, permeabilidade e do comportamento mecânico do concreto.

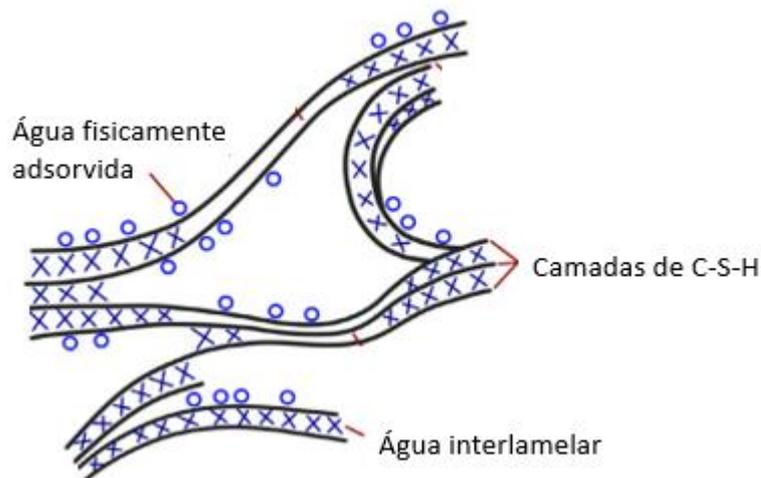
A ordem em que a água é removida do concreto aquecido depende da forma na qual se encontra. A classificação é baseada no grau de facilidade com que a água pode ser removida. Na pasta de cimento hidratada, a água está presente das seguintes formas (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- Água capilar: água que está livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Pode ser dividida em duas categorias: água em grandes vazios (maiores que 50 nm), que pode ser denominada água livre, pois sua remoção não acarreta alteração de volume, e água retida por tensão capilar em pequenos capilares (5 a 50 nm), cuja remoção pode ocasionar a retração do sistema.
- Água adsorvida: sob a influência de forças de atração, as moléculas de água são fisicamente adsorvidas na superfície de sólidos na pasta de cimento hidratada. A

água adsorvida pode ser perdida por secagem quando a umidade relativa é de 30%. A perda de água adsorvida é responsável pela retração da pasta de cimento.

- Água interlamelar: água associada à estrutura do C-S-H. Uma camada de água monomolecular entre as camadas de C-S-H é fortemente mantida por pontes de hidrogênio. Essa água é perdida apenas por forte secagem (umidade relativa abaixo de 11%). A estrutura do C-S-H retrai consideravelmente quando a água interlamelar é perdida.
- Água quimicamente combinada: é a água que é parte integrante da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento. Essa água não se perde na secagem, é liberada quando os hidratos se decompõem com o aquecimento. A Figura 12 ilustra os diferentes tipos de água associados ao C-S-H.

Figura 12 - Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados



Fonte: Beaudoin e Odler (2019).

Assim, a água livre evapora primeiro, em temperaturas de 20°C a 80°C, seguida pela água capilar e, finalmente, pela água adsorvida, ambas em temperaturas de 80°C a 200°C.

Durante o aquecimento, a etringita se decompõe primeiro, antes mesmo que a temperatura alcance 100°C. A desidratação do gel C-S-H é progressiva e ocorre desde o início do aquecimento do material, originando diferentes tipos de silicatos parcialmente desidratados, dependendo da composição mineralógica e da proporção Ca/Si. A decomposição térmica do C-S-H pode ser dividida em duas etapas: perda de água presente entre as camadas, que ocorre até 400°C, e perda de água quimicamente combinada no intervalo entre 500°C e 1000°C, o que provoca a quebra das cadeias de silicatos e a consequente cristalização do C-S-H em silicato

dicálcico. O processo de desidratação do gel C-S-H reduz seu volume, o que por sua vez aumenta a porosidade da matriz de cimento (HAGER, 2013; ZHANG e YE, 2012).

A partir de 300°C a microfissuração aumenta significativamente, primeiro em torno dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e, em seguida, em torno dos grãos de cimento não hidratados e, particularmente, dos grãos maiores (FIB, 2007).

A decomposição do hidróxido de cálcio ocorre de 400°C a 600°C, originando óxido de cálcio e liberando água. A cal livre formada pode se hidratar novamente quando o concreto é resfriado, ocasionando expansões superiores a 40% que contribuem para a fissuração do concreto (FIB, 2007).

A porosidade e a mineralogia dos agregados exercem uma importante influência no comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas. Os agregados porosos podem ser suscetíveis à expansão destrutiva. A composição mineralógica determina as transformações químicas e físicas que ocorrem durante o aquecimento. Agregados silicosos contendo quartzo sofrem uma expansão súbita de 5,7% em temperaturas próximas a 573°C, associada à transformação do quartzo da forma α para a β (a transição α - β se dá apenas por alterações dos ângulos e dos comprimentos das ligações químicas, o quartzo alfa tem uma simetria trigonal, enquanto o quartzo beta tem uma simetria hexagonal). Essa expansão leva ao surgimento de tensões internas que causam danos ao concreto. Os agregados derivados de rochas carbonáticas sofrem decomposição a 700°C, resultando em CaO e CO_2 . Durante o resfriamento o CaO se hidrata novamente apresentando uma expansão de cerca de 44%. Já os agregados leves apresentam baixo coeficiente de dilatação térmica, baixa condutividade térmica e elevada estabilidade física e química em temperaturas superiores a 800°C, resultando em um ótimo desempenho diante de elevadas temperaturas (FIB, 2007; HAGER, 2013, BARBOSA, 2012).

O aquecimento do concreto gera deformações incompatíveis nos agregados e na pasta de cimento. Conseqüentemente, ocorrem fissuras na zona de transição, que se configura como uma região frágil em concretos submetidos a elevadas temperaturas.

A Tabela 8 apresenta as transformações que ocorrem no concreto devido à exposição a elevadas temperaturas.

Tabela 8 - Transformações durante o aquecimento do concreto

Temperatura (°C)	Transformação
20 a 80	Processo de hidratação acelerado, tendo perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Aumento acentuado na permeabilidade a água
80 a 200	Aumento na taxa de perda da água capilar e fisicamente adsorvida
80 a 850	Perda da água quimicamente combinada
150	Primeiro pico de decomposição do C-S-H
300	Ponto de aumento considerável da porosidade e de microfissuras
350	Fragmentação de alguns agregados de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400 a 600	Dissociação do Ca(OH)_2 em CaO e água
573	Transformação dos agregados (quartzo e areias) da forma α para β
550 a 660	Aumento dos efeitos térmicos
700	Descarbonatação do agregado calcário (CaCO_3) em CaO e CO_2
720	Segundo pico de decomposição do C-S-H e formação de $\beta\text{-C}_2\text{-S}$ e $\beta\text{-CS}$
800	Substituição da estrutura hidráulica por uma cerâmica – modificação das ligações químicas
1060	Início da fusão de alguns constituintes

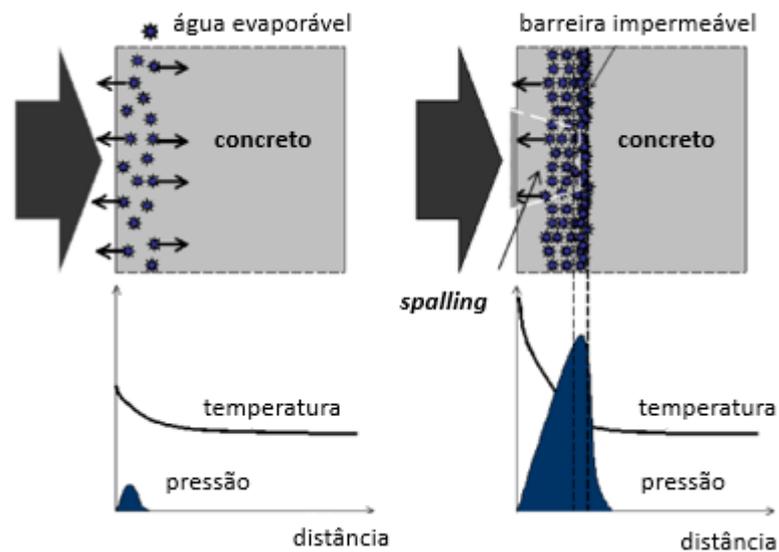
Fonte: FIB (2007).

Quando o concreto é submetido a um rápido aquecimento, principalmente os concretos que possuem elevada densidade como os de alta resistência, podem ocorrer deslocamentos explosivos. Esse fenômeno, conhecido como *spalling*, se caracteriza por um desprendimento de pedaços ou camadas da superfície do elemento. O *spalling* é explicado por dois mecanismos: pressão de vapor nos poros do concreto e tensões térmicas. Pode ainda ocorrer a combinação dos dois (FIB, 2007).

O aquecimento da superfície de concreto gera um gradiente de temperatura que faz com que a umidade migre tanto para a atmosfera quanto para o interior do material. Dessa forma, três zonas de umidade se formam: uma zona seca perto da superfície aquecida, uma zona intermediária de evaporação e uma zona saturada. Esta última atua como uma barreira

impermeável para os gases que migram para o interior do concreto, gerando uma concentração de gases nessa região e deixando apenas uma saída para todo o vapor produzido: a atmosfera. Esse acúmulo de gases gera um aumento substancial da pressão na interface barreira impermeável/zona intermediária. Quando a pressão supera a resistência à tração do concreto ocorre o deslocamento explosivo. Esse fenômeno é mostrado na Figura 13 (CONSOLAZIO *et al.*, 1997 *apud* NINCE, 2006; KHOURY e ANDERBERG, 2000).

Figura 13 - Formação da barreira impermeável e da pressão de vapor nos poros do concreto aquecido



Fonte: Hager (2013).

Quando submetido a altas taxas de aquecimento, o concreto, mesmo estando seco, pode sofrer deslocamentos explosivos, demonstrando que fatores além da pressão de vapor dos poros contribuem para a ocorrência do fenômeno. O aquecimento do concreto origina gradientes de temperatura que induzem o surgimento de tensões de compressão próximo à superfície aquecida, devido à restrição da dilatação térmica, e tensões de tração no interior do concreto (região com temperatura mais baixa). A compressão superficial pode ser aumentada pelo carregamento ou pré-tensão, que são sobrepostos às tensões térmicas. No entanto, poucas estruturas são carregadas até o nível necessário para a ruptura, isso torna a ocorrência do *spalling* desencadeado exclusivamente por tensões térmicas relativamente rara (KHOURY e ANDERBERG, 2000).

A pressão de vapor nos poros e as tensões térmicas agem isolada ou simultaneamente, dependendo do tamanho da seção, do tipo de concreto e da umidade. A combinação das duas induz o surgimento de fissuras paralelas à superfície do concreto quando a tensão resultante

excede a resistência à tração. Isso desencadeia uma repentina liberação de energia e uma violenta ruptura da superfície exposta (NINCE, 2006).

4.1 EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

As transformações físico-químicas que ocorrem na microestrutura do concreto exposto a elevadas temperaturas desencadeiam alterações nas propriedades do material. Além dos fatores mencionados anteriormente, o próprio método de teste exerce uma influência importante na avaliação das propriedades do material aquecido. Existem três metodologias principais para estudar o efeito das altas temperaturas: ensaios realizados a quente nos quais o concreto é submetido ao carregamento após o aquecimento, ensaios a quente nos quais o concreto é submetido a um carregamento correspondente a uma fração da resistência à compressão a temperatura ambiente e depois aquecido e finalmente carregado até a ruptura e ensaios realizados a frio, nos quais o concreto é aquecido depois resfriado a temperatura ambiente e então carregado, neste caso são medidas as propriedades residuais (XARGAY *et al.*, 2016).

No geral, as propriedades mecânicas medidas a quente são maiores do que as residuais. Os valores mais baixos das propriedades mecânicas residuais são atribuídos a danos suplementares devido a tensões adicionais causadas pelo resfriamento. A dimensão das tensões depende, entre outras coisas, da taxa de resfriamento. O resfriamento rápido ou a têmpera resultam em níveis mais altos de danos. A extensão dos danos causados durante a fase de resfriamento pode aumentar quando o concreto é exposto à umidade ambiente pois a reidratação do óxido de cálcio resulta em um aumento de volume de 44%, causando o desenvolvimento de trincas (HAGER, 2013).

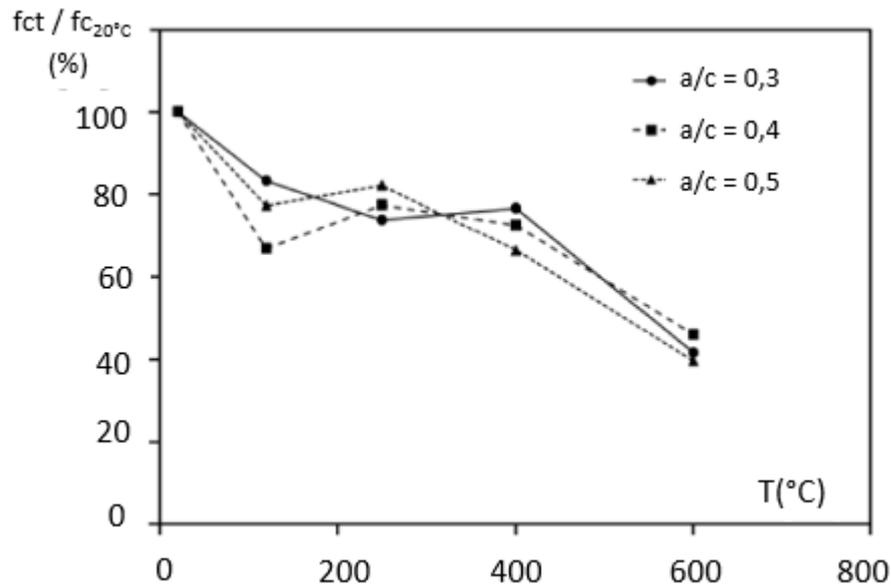
A resistência à compressão do concreto aquecido diminui com o aumento da temperatura, mas geralmente não de forma linear. O Gráfico 11 mostra a relação entre a temperatura e a resistência à compressão de concretos com mesmo traço e diferentes relações água/cimento confeccionados com agregado calcário. Os ensaios foram realizados a quente com carregamento após o aquecimento. É possível distinguir três fases na evolução da resistência à compressão. Na fase I, entre 20°C e 120°C, nota-se uma diminuição dos valores de resistência à compressão em cerca de 20-30% para os três concretos. Essa redução da resistência pode ser explicada pelo estabelecimento do gradiente higroscópico dentro da amostra aquecida, bem como pelo surgimento de tensões. Outra possível explicação é a redução das forças coesivas entre as camadas de gel C-S-H. Quando a água adsorvida nas camadas se expande, a distância entre as camadas aumenta, causando redução das forças de Van der Waals,

o que facilita a ruptura. Outra possível explicação é o aumento da pressão interna dos poros, que induz tensões significativas (HAGER, 2013).

Na fase II, entre 120°C e 250°C, observa-se valores de resistência à compressão superiores aos obtidos a 120°C. Este aumento pode ser devido à evaporação da água do material, bem como à redução do gradiente higroscópico e das pressões internas dos poros. Para o concreto com menor relação água cimento, a fase de recuperação da resistência ocorre posteriormente, apenas próximo a 400°C que um aumento na resistência é observado. Isso pode ser explicado pela menor permeabilidade desses concretos, que impede o movimento da água. Como consequência, a saída da água é retardada, resultando em um aumento atrasado da resistência.

Uma redução progressiva da resistência à compressão é observada na fase III. Este ramo descendente começa quando a temperatura de aquecimento ultrapassa 250°C, para concretos com maior relação água/cimento ($a/c = 0,4$ e $0,5$), e 400°C para concreto com relação água/cimento igual a $0,3$. A diminuição progressiva da resistência quase linear resulta da decomposição do hidróxido de cálcio, da desidratação do gel C-S-H e da incompatibilidade de deformações entre os agregados, que se expandem, e a pasta de cimento, que sofre retração.

Gráfico 11 - Influência do aumento da temperatura na resistência à compressão

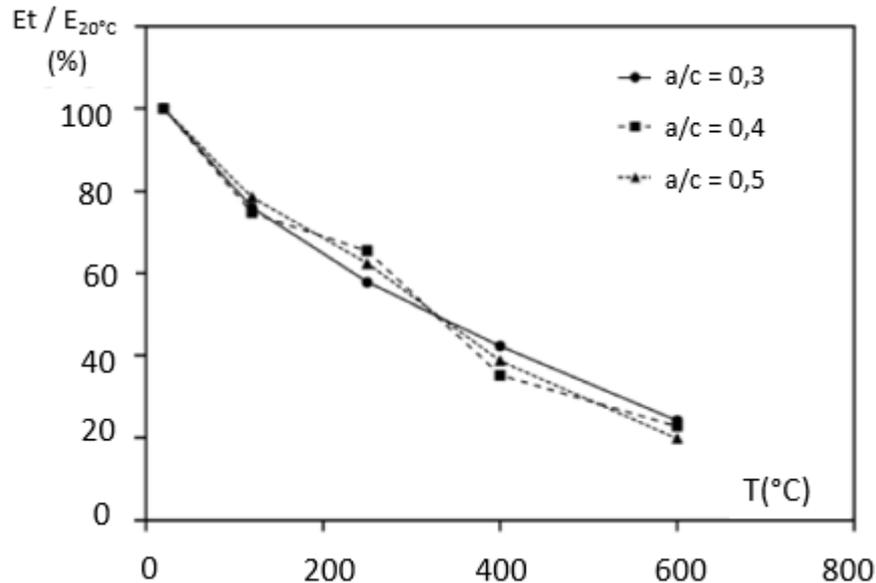


Fonte: Castillo e Durrani, 1990 *apud* Hager (2013).

Os valores do módulo de elasticidade em função da temperatura dos concretos são apresentados no Gráfico 12. O módulo de elasticidade dos concretos aquecidos diminui de forma semelhante para todas as relações água/cimento, apresentando uma queda percentual

muito próxima para os três concretos. O aumento da temperatura geralmente leva a uma queda contínua no valor do módulo de elasticidade. No entanto, os valores dependem em grande parte da aplicação de carregado durante o aquecimento. Quando o carregamento constante de 20% da resistência é aplicado durante o aquecimento, o módulo pode permanecer inalterado até 600°C (HAGER, 2013).

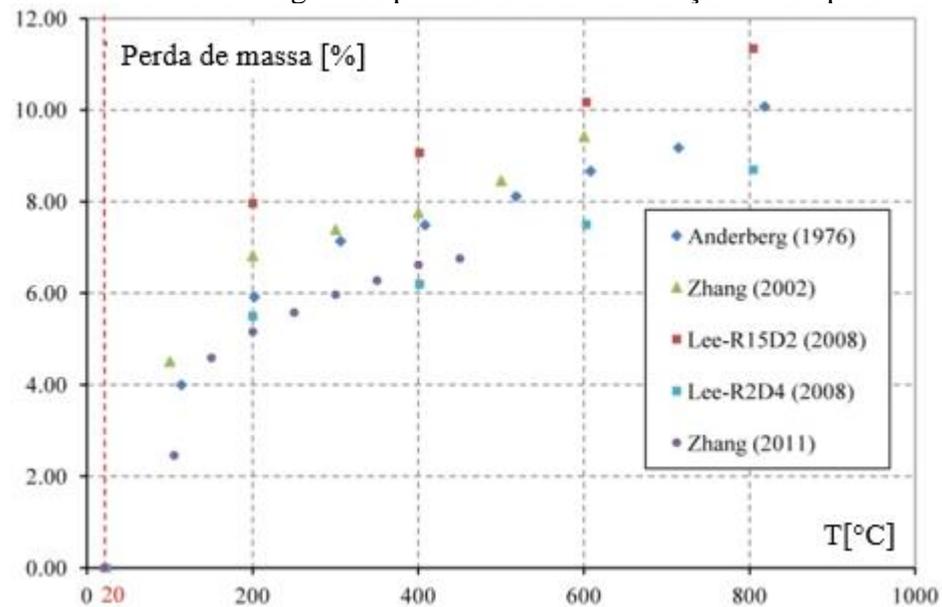
Gráfico 12 - Influência do aumento da temperatura no módulo de elasticidade



Fonte: Castillo e Durrani, 1990 *apud* Hager (2013).

Outro efeito importante das altas temperaturas no concreto é a perda de massa, que está relacionada ao aumento da porosidade devido à perda de umidade. O Gráfico 13 mostra a relação entre o aumento da temperatura e a perda de massa. Entre 20°C e 200°C, o concreto perde umidade rapidamente devido à perda de água capilar. Entre 200°C e 600°C a taxa de perda de massa diminui, pois está relacionada principalmente à desidratação da pasta de cimento, ou seja, da evaporação da água quimicamente combinada aos silicatos de cálcio hidratados. Acima de 600°C, a perda de massa pode atingir valores de até 10% e isso se deve à decomposição dos agregados. Quanto maior é o tempo de exposição a temperaturas elevadas, maior será a perda de massa (XARGAY *et al.*, 2016).

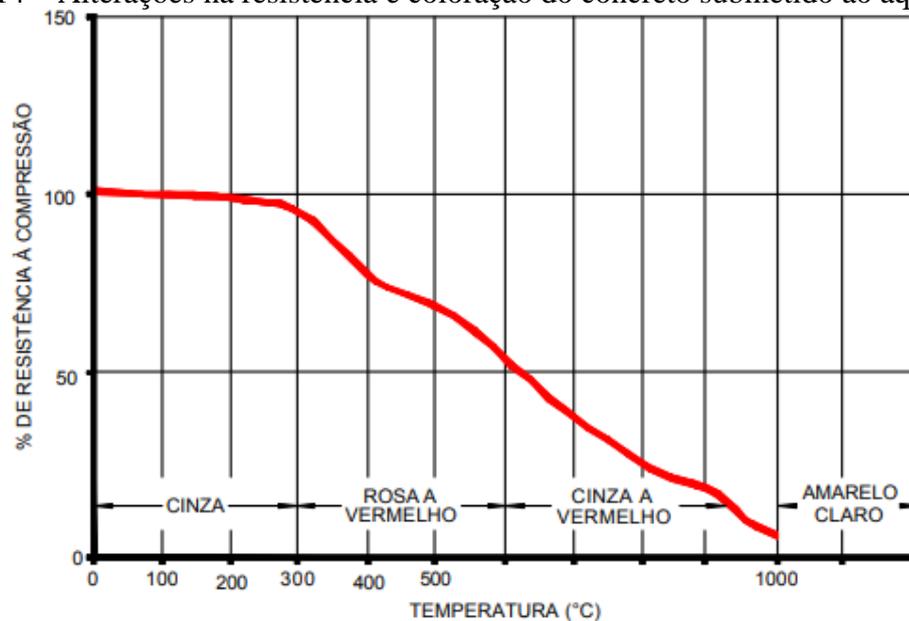
Gráfico 13 - Porcentagem de perda de massa em função da temperatura



Fonte: Xargay *et al.* (2016).

A diminuição da resistência do concreto em decorrência da elevação da temperatura pode ser associada a uma mudança gradativa na coloração do material. O Gráfico 14 apresenta a correlação entre a resistência à compressão e a coloração do concreto submetido a diferentes patamares de temperatura.

Gráfico 14 – Alterações na resistência e coloração do concreto submetido ao aquecimento



Fonte: Cánovas, 1998 *apud* Lima (2005).

Quando o agregado utilizado é rico em sílica, a uma temperatura de 200°C o concreto apresenta coloração acinzentada e não há perdas significativas de resistência à compressão. A

partir de 200°C a resistência reduz gradativamente, até que em 300°C tem-se uma perda média de cerca de 10%. Entre 300°C e 600°C o concreto apresenta coloração de rosa a vermelho e a perda de resistência é mais intensa, chegando a 50% a 600°C. O módulo de deformação pode decrescer até 20% e a resistência à tração pode atingir valores desprezíveis (CÁNOVAS, 1998 *apud* LIMA, 2005).

Entre 600°C e 950°C o concreto passa a apresentar um tom acinzentado com pontos avermelhados. Nesse intervalo o mesmo se mostra bastante friável e exibe uma alta sucção de água pelo aumento da fissuração. Isso tem fortes reflexos na resistência à compressão, que chega a cerca de 10% do valor inicial. De 950°C a 1000°C o concreto torna-se amarelo alaranjado e começa a sofrer o processo de sinterização. Entre 1000°C e 1200°C esse processo se intensifica e o material assume uma tonalidade amarelada clara. Nesse ponto a resistência residual é praticamente nula, restando apenas um material calcinado mole (CÁNOVAS, 1998 *apud* LIMA, 2005).

As alterações na cor do concreto dependem do tipo de agregado utilizado e tendem a ser mais acentuadas para agregados ricos em sílica, devido à presença de ferro, enquanto para concretos com agregados calcários as mudanças são mais sutis. Portanto, a estimativa da temperatura máxima a qual o concreto foi submetido através da cor deve ser feita com cautela (LIMA, 2005).

4.2 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POZOLANAS

As adições minerais, quando incorporadas a concretos de resistência convencional, em geral causam um acréscimo menos acentuado da porosidade decorrente do aquecimento, logo a redução na resistência à compressão é menor. No entanto, concretos de alta resistência, devido à menor relação água/aglomerante e às adições minerais empregadas, estão mais suscetíveis ao *spalling*. Isso ocorre devido ao aumento da poro-pressão por causa da menor permeabilidade alcançada (LIMA, 2005).

Morsy *et al.* (2008) estudaram o efeito da incorporação de metacaulim e sílica ativa na estabilidade térmica de pastas de cimento Portland. Foram preparadas quatro misturas variando as porcentagens de substituição do cimento pelas pozolanas: M0, sem adição; M1 com 30% de metacaulim; M2 com 25% de metacaulim e 5% de sílica ativa; M3 com 20% de metacaulim e 10% de sílica ativa e M4 com 15% de metacaulim e 15% de sílica ativa. As resistências à compressão das misturas M0, M1 e M2 aumentaram com a temperatura até 200°C e depois diminuíram até 800°C, enquanto para as misturas M3 e M4 o aumento ocorreu até 400°C. Na

temperatura de 800°C a mistura M0 apresentou a menor resistência à compressão e a M4 a maior. A resistência ao choque térmico aumentou à medida que a proporção de sílica ativa aumentou nas pastas de cimento.

Poon *et al.* (2001) analisaram a influência da adição de metacaulim em concretos submetidos a temperaturas de até 800°C. O cimento foi substituído por metacaulim nos teores de 5%, 10% e 20%. Além disso, um traço com 20% de substituição por cinza volante foi confeccionado para comparação. Os resultados de resistência residual à compressão mostraram que todos os traços com adição apresentaram maiores resistências que o concreto de referência, sendo que até 200°C o traço com 20% de metacaulim apresentou os maiores valores e para as temperaturas de 600°C e 800°C a maior resistência foi do concreto com cinza volante. Para a temperatura de 800°C a porosidade do concreto diminuiu com o aumento da quantidade de metacaulim, o concreto com adição de cinza volante apresentou uma porosidade ainda menor. O *spalling* ocorreu em 16% dos corpos de prova com adição de 20% de metacaulim e em 5% dos corpos de prova com adição de 10%. Nos demais traços não ocorreu esse fenômeno.

Tanyildizi e Coskun (2008) estudaram o efeito da sílica ativa na resistência de concreto leve exposto a temperaturas de até 800°C. As porcentagens de substituição de cimento por sílica ativa foram 10%, 20% e 30%. Todas as amostras apresentaram redução na resistência à compressão e à tração com o aumento da temperatura. Para todas as temperaturas as resistências foram maiores para o concreto contendo 20% de sílica ativa e menores para o concreto contendo 30%. Exceto a resistência à compressão a 400°C, todas as resistências do concreto com adição de 20% apresentaram reduções percentuais em relação ao valor a temperatura ambiente menores que o concreto de referência.

Demirel e Kelestemur (2010) investigaram o efeito da substituição do cimento por pedra-pomes finamente moída nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa, com e sem sílica ativa nas propriedades de concretos expostos a temperaturas elevadas. Os concretos com adição apresentaram aumento de resistência até 400°C, redução entre 400°C e 600°C, por fim, ocorreu uma redução acentuada na resistência relativa até 800°C, chegando a 80%. As perdas de massa nos traços contendo sílica ativa e pedra-pomes foram maiores do que as perdas nas amostras apenas com pedra-pomes, especialmente a 800°C.

Khurram *et al.* (2018) analisaram o comportamento de concretos com substituição do cimento por cinzas vulcânicas basálticas e cinzas volantes no teor de 20%, com e sem escória de alto forno, após a exposição a temperaturas elevadas. Os traços com cinzas vulcânicas e volantes com presença de escória mostraram melhor desempenho do que o traço de referência em termos de resistência à compressão e perda de massa.

5 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Este capítulo traz a caracterização dos materiais utilizados, bem como a descrição da metodologia dos ensaios realizados na pesquisa.

5.1 MATERIAIS

Uma vez que as propriedades dos materiais utilizados influenciam diretamente as propriedades do concreto, todos os materiais foram caracterizados de acordo com as normas vigentes.

5.1.1 Cimento Portland

Para a produção do concreto utilizou-se o cimento CP V-ARI, ligante hidráulico caracterizado pela alta resistência inicial alcançada devido à utilização de uma dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer e pela moagem mais fina do cimento. Optou-se pela utilização do CP V-ARI por causa da ausência de pozolana e presença de pequena quantidade de adições em sua composição, o que permite uma melhor avaliação da influência do material cerâmico na matriz cimentícia do concreto.

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado, bem como as exigências da NBR 16697 (2018), estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP V-ARI

ENSAIOS QUÍMICOS				
Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel – RI	ABNT NBR NM 15	%	0,73	≤ 3,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	2,45	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	3,43	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR 14656	%	1,5	≤ 4,5
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,89	não aplicável
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	ABNT NBR 14656	%	4,95	não aplicável
Dióxido de Silício - SiO ₂		%	21,07	não aplicável
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃		%	2,86	não aplicável
Óxido de Cálcio - CaO		%	63,37	não aplicável

ENSAIOS FÍSICOS

Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm ² /g	5155	não aplicável
Finura pela peneira 38 µm	ABNT NBR 9202/85	%	1,2	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	158	≥ 60
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	mm	0	≤ 5

ENSAIOS MECÂNICOS

Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Resist. à compressão - 1 dia	ABNT NBR 7215	MPa	28,9	≥ 14,0
Resist. à compressão - 3 dias	ABNT NBR 7215	MPa	38,8	≥ 24,0
Resist. à compressão - 7 dias	ABNT NBR 7215	MPa	44,6	≥ 34,0
Resist. à compressão - 28 dias	ABNT NBR 7215	MPa	51,4	não aplicável

Fonte: Holcim (2021).

5.1.2 Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha utilizada como substituição parcial do cimento, mostrada na Figura 14, é proveniente de blocos cerâmicos de vedação e foi obtida através da moagem e peneiramento.

Figura 14 - Cerâmica vermelha



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O processo de moagem foi realizado utilizando-se o aparelho de Abrasão Los Angeles (Figura 15), no qual colocou-se cerca de 5kg do material juntamente com as 12 esferas metálicas. O material foi submetido a 30000 rotações e posteriormente o material moído foi

seco em estufa a 100°C e peneirado nas peneiras de 150 μm e 75 μm (Figura 16), com o objetivo de selecionar apenas o material passante nessa última.

Vale ressaltar que esse processo de beneficiamento do material cerâmico não é o mais adequado pois mostrou-se pouco eficiente devido à demora do processo de moagem e à dificuldade no peneiramento, pois as partículas da cerâmica moída aglutinavam-se facilmente, obstruindo a malha da peneira.

Figura 15 - Aparelho de Abrasão Los Angeles



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 16 - Peneirador



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.1.3 Agregado miúdo

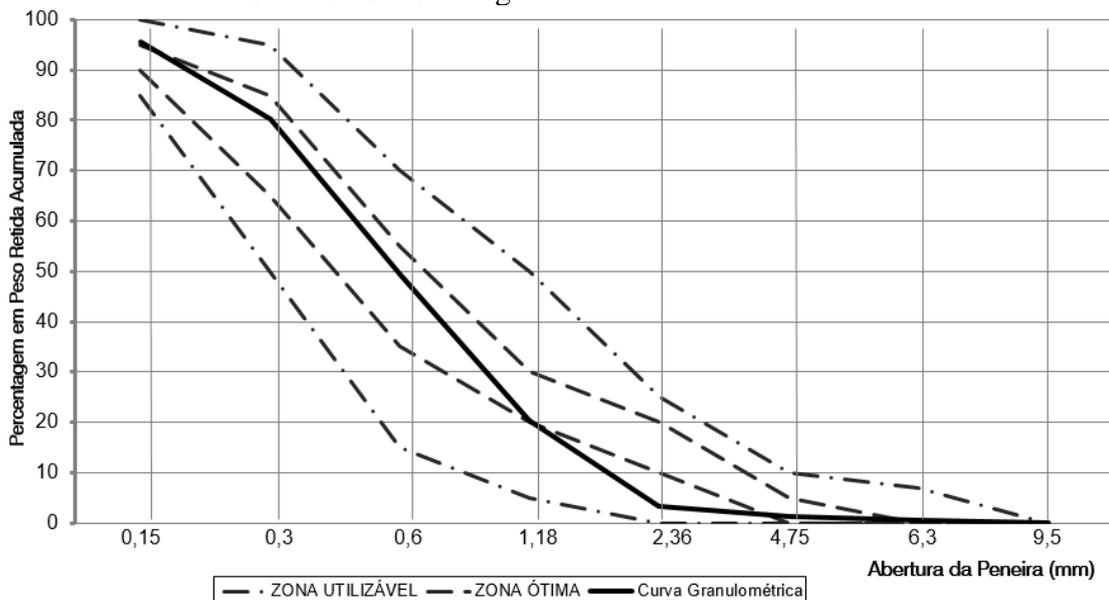
Para a confecção do concreto utilizou-se areia natural proveniente do Rio Preto, no estado de Minas Gerais e areia artificial média proveniente de rochas calcárias fornecida pela Petra Agregados. A análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios de caracterização física da areia natural estão apresentados na Tabela 10 e a curva granulométrica no Gráfico 15. Observa-se que a curva está dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (2009), com maioria das faixas granulométricas dentro da zona ótima.

Tabela 10 - Caracterização da areia natural

AREIA NATURAL		
Análise Granulométrica		
NBR NM 248 (2003)		
Peneiras (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
6,3	0,6	0,6
4,75	0,6	1,2
2,36	2,2	3,4
1,18	16,9	20,3
0,6	28,9	49,2
0,3	31,1	80,3
0,15	15,2	95,5
Fundo	4,5	100,0
Módulo de finura		2,50
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Massa específica (g/cm³) NBR NM 16916 (2021)		2,46
Massa unitária (g/cm³) NBR NM 16972 (2021)		1,41
Teor de material pulverulento (%) NBR NM 16973 (2021)		1,1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 15 - Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

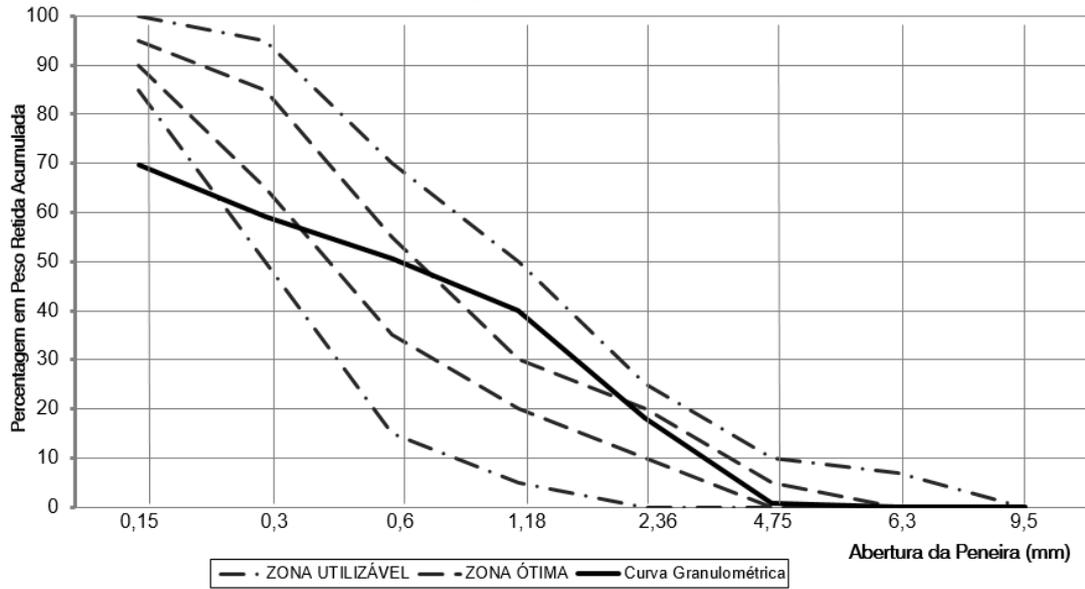
A análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios de caracterização física da areia artificial estão apresentados na Tabela 11 e a curva granulométrica no Gráfico 16. Observa-se que a curva está, na maioria das faixas granulométricas, dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (2009).

Tabela 11 - Caracterização da areia artificial

AREIA ARTIFICIAL		
Análise Granulométrica		
NBR NM 248 (2003)		
Peneiras (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
4,75	0,7	0,67
2,36	17,5	18,2
1,18	22,0	40,1
0,6	10,4	50,5
0,3	8,6	59,2
0,15	10,6	69,7
Fundo	30,3	100,0
Módulo de finura		2,38
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Massa específica (g/cm³) NBR NM 16916 (2021)		2,81
Massa unitária (g/cm³) NBR NM 16972 (2021)		1,85
Teor de material pulverulento (%) NBR NM 16973 (2021)		19,1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 16 - Curva granulométrica da areia artificial



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.1.4 Agregados graúdos

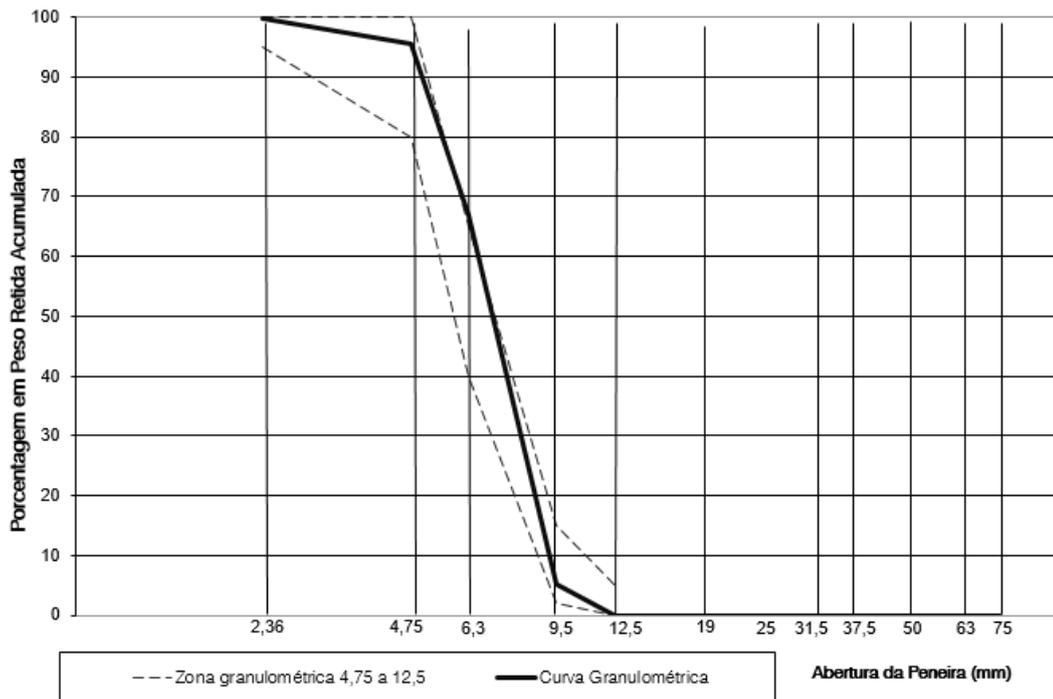
Utilizou-se brita 0 e brita 1, originadas de rochas calcárias, fornecidas pela Petra Agregados. A análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios de caracterização física da brita 0 estão apresentados na Tabela 12 e a curva granulométrica no Gráfico 17.

Tabela 12 – Caracterização da brita 0

BRITA 0		
Análise Granulométrica		
NBR NM 248 (2003)		
Peneiras (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
12,5	0,0	0,0
9,5	5,2	5,20
6,3	61,9	67,1
4,75	28,6	95,7
2,36	4,1	99,7
Fundo	0,3	100
Dimensão máxima característica (mm)		12,5
Massa específica (g/cm³) NBR NM 16917 (2021)		2,55
Massa unitária (g/cm³) NBR NM 16972 (2021)		1,58
Absorção de água (%) NBR NM 16917 (2021)		0,6
Teor de material pulverulento (%) NBR NM 16973 (2021)		0,05

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 17 - Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

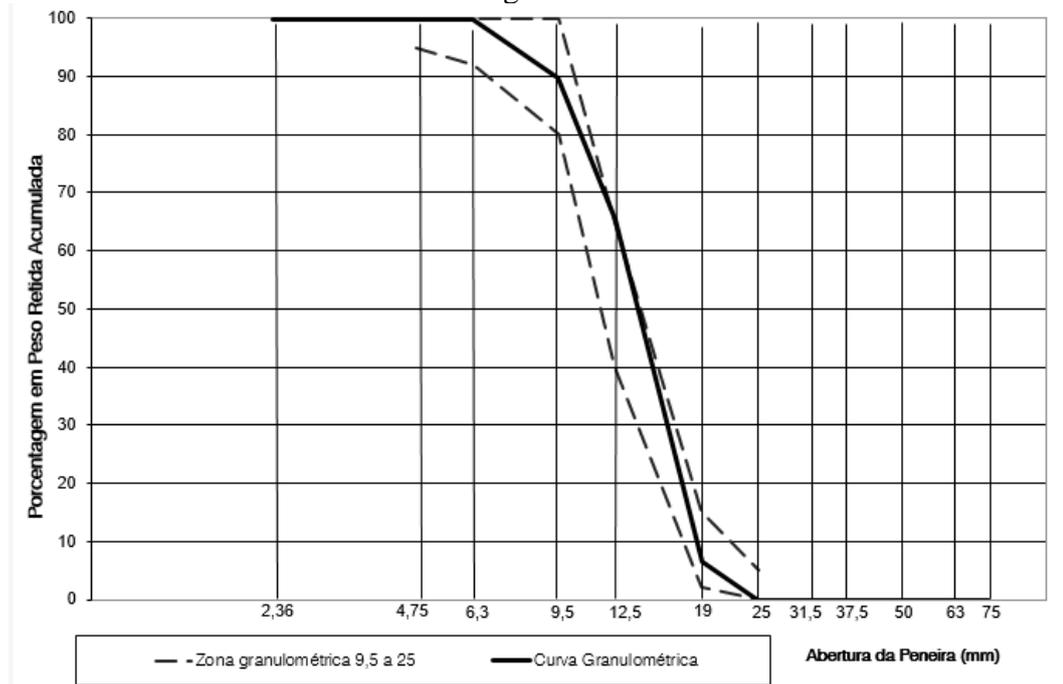
A análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios de caracterização física da brita 1 estão apresentados na Tabela 13 e a curva granulométrica no Gráfico 18.

Tabela 13 – Caracterização da brita 1

BRITA 1		
Análise Granulométrica NBR NM 248 (2003)		
Peneiras (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada
25,0	0,0	0,0
19,0	6,4	6,4
12,5	58,9	65,3
9,5	24,4	89,7
6,3	10,1	99,8
4,75	0,1	99,9
Fundo	0,1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		25,0
Massa específica (g/cm³) NBR NM 16917 (2021)		2,56
Massa unitária (g/cm³) NBR NM 16972 (2021)		1,37
Absorção de água (%) NBR NM 16917 (2021)		0,5
Teor de material pulverulento (%) NBR NM 16973 (2021)		0,02

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 18 - Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.1.5 Água

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento municipal da cidade de Juiz de Fora – MG.

5.1.6 Aditivos

Os aditivos utilizados foram o Sikament RM-300, aditivo plastificante de pega normal com alto desempenho, e Sika ViscoCrete 3535 CB, aditivo superplastificante de última geração. A Tabela 14 apresenta as principais características dos aditivos.

Tabela 14 - Principais características dos aditivos

Característica	Sikament RM-300	Sika ViscoCrete 3535 CB
Composição básica	Combinação de dispersantes orgânicos em base aquosa	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Densidade	1,18 ± 0,02 kg/L	1,08 ± 0,02 kg/L
pH	6,0 ± 1,0	5,0 ± 1,0
Dosagem recomendada	0,30% a 1,60% sobre o peso de aglomerantes	1,0% a 1,5% sobre o peso de aglomerantes

Fonte: Sika, 2019; Sika, 2014.

5.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Neste item são apresentadas as metodologias dos ensaios de caracterização da cerâmica vermelha, bem como dos ensaios de determinação das propriedades do concreto.

5.2.1 Caracterização da cerâmica

As propriedades da cerâmica vermelha utilizada foram determinadas por meio dos ensaios de massa específica, índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, índice de atividade pozolânica com cal, perda ao fogo e granulometria a laser.

5.2.1.1 Massa específica

A massa específica da cerâmica foi determinada conforme NBR 16605 (2017). O ensaio consiste em encher o frasco volumétrico de Le Chatelier com querosene até o nível compreendido entre as marcas correspondentes a zero e 1 cm^3 , secar o interior do frasco acima do nível do líquido, colocar o frasco no banho de água em temperatura ambiente para equalização das temperaturas e registrar a primeira leitura (V_1) com aproximação de $0,1 \text{ cm}^3$.

Posteriormente, introduzir uma massa conhecida do material cerâmico no frasco que provoque o deslocamento do líquido no intervalo compreendido entre as marcas de 18 e 24 cm^3 , retirar as bolhas de ar, colocar novamente no banho de água e registrar a leitura final (V_2) com aproximação de $0,1 \text{ cm}^3$ (Figura 17).

Figura 17 - Ensaio de massa específica da cerâmica



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A massa específica do material deve ser calculada pela Equação 4:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Sendo:

ρ a massa específica do material ensaiado, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

m a massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);

V o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$), expresso em centímetros cúbicos (cm³).

5.2.1.2 Granulometria a laser

A análise granulométrica da cerâmica vermelha foi realizada em um granulômetro a laser CILAS modelo 1064. Este procedimento tem a finalidade de obter dados quanto à distribuição granulométrica de materiais com diâmetro inferior a 500 μ m.

5.2.1.3 Perda ao fogo

A determinação da perda ao fogo foi realizada de acordo com a NBR NM 18 (2012). O ensaio consiste em pesar 1,000 g + 0,001 g de amostra, colocar em um cadinho de porcelana de massa conhecida (Figura 18 - a), calcinar em forno mufla à temperatura de (950 \pm 50) $^{\circ}$ C (Figura 18 - b), por um período mínimo de 50 min, esfriar e pesar. O resultado corresponde à porcentagem de material perdida após a calcinação.

Figura 18 - Ensaio de perda ao fogo

(a) Amostra dos materiais



(b) Calcinação em forno mufla



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.2.1.4 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

O índice de desempenho foi obtido conforme recomendações da norma NBR 5752 (2014). O ensaio consiste em preparar argamassas com duas dosagens diferentes:

- a argamassa A deve conter cimento CP II-F-32, areia normal e água;
- a argamassa B deve conter 25 % em massa de material pozolânico, em substituição à igual porcentagem de cimento CP II-F-32, areia normal e água.

Os corpos de prova das argamassas A e B são mostrados na Figura 19.

Figura 19 - Corpos de prova das argamassas A e B



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias é calculado pela Equação 5:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo:

$I_{cimento}$ o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

f_{cB} a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25 % de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

f_{cA} a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa).

A areia normal do IPT foi substituída pela areia natural utilizada nesta pesquisa, previamente preparada. A areia foi lavada na peneira de abertura de 75 μm a fim de eliminar o material pulverulento, posteriormente a areia foi peneirada para separação das quatro frações granulométricas correspondentes à areia normal. A massa específica da areia utilizada é 2,62 g/cm^3 .

5.2.1.5 Índice de atividade pozolânica com cal

O índice de atividade pozolânica foi obtido de acordo com a norma NBR 5751 (2015). O ensaio consiste em preparar uma argamassa que deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio (104 g), uma quantidade de material pozolânico que corresponda ao dobro do volume de hidróxido de cálcio e 234g de cada fração da areia normal (utilizou-se a mesma areia do ensaio de índice de desempenho com cimento). A quantidade de água para a mistura deve corresponder a um índice de consistência de (225 ± 5) mm, obtido no ensaio de abatimento, conforme prescreve a NBR 7215 (2019).

Os corpos de prova moldados para a determinação da atividade pozolânica com cal são mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Corpos de prova para a determinação da atividade pozolânica com cal



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A cura dos corpos de prova deve ser realizada nos próprios moldes, que devem ser mantidos vedados para evitar a perda de umidade. O tempo de cura é de sete dias, sendo que, durante as primeiras (24 ± 1) h, os corpos de prova devem permanecer em ambiente à temperatura de (23 ± 2) °C e durante as (144 ± 1) h posteriores, os corpos de prova devem ser mantidos em estufa à temperatura de (55 ± 2) °C.

O resultado do ensaio é a média da resistência à compressão dos três corpos de prova cilíndricos.

5.2.2 Dosagem do concreto

O traço do concreto foi definido adotando-se como referência concretos de classe de resistência C40 amplamente utilizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil. O cimento foi substituído pela cerâmica vermelha nos teores de 10% e 25% em massa. Também foi produzido concreto sem substituição a fim de possibilitar a comparação dos resultados. O

consumo de aglomerantes adotado foi de 450 Kg/m³. Os traços utilizados na pesquisa estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Traços utilizados na pesquisa

Traço de Referência - TR							
Cimento	Cerâmica Vermelha	Areia Artificial	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Fator água/cimento	Aditivo plastificante / superplastificante (%)
1	0	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50 / 0,25
Traço com substituição de 10% - T10							
Cimento	Cerâmica Vermelha	Areia Artificial	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Fator água/cimento	Aditivo plastificante / superplastificante (%)
0,9	0,1	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50 / 0,37
Traço com substituição de 25% - T25							
Cimento	Cerâmica Vermelha	Areia Artificial	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Fator água/cimento	Aditivo plastificante / superplastificante (%)
0,75	0,25	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50 / 0,50

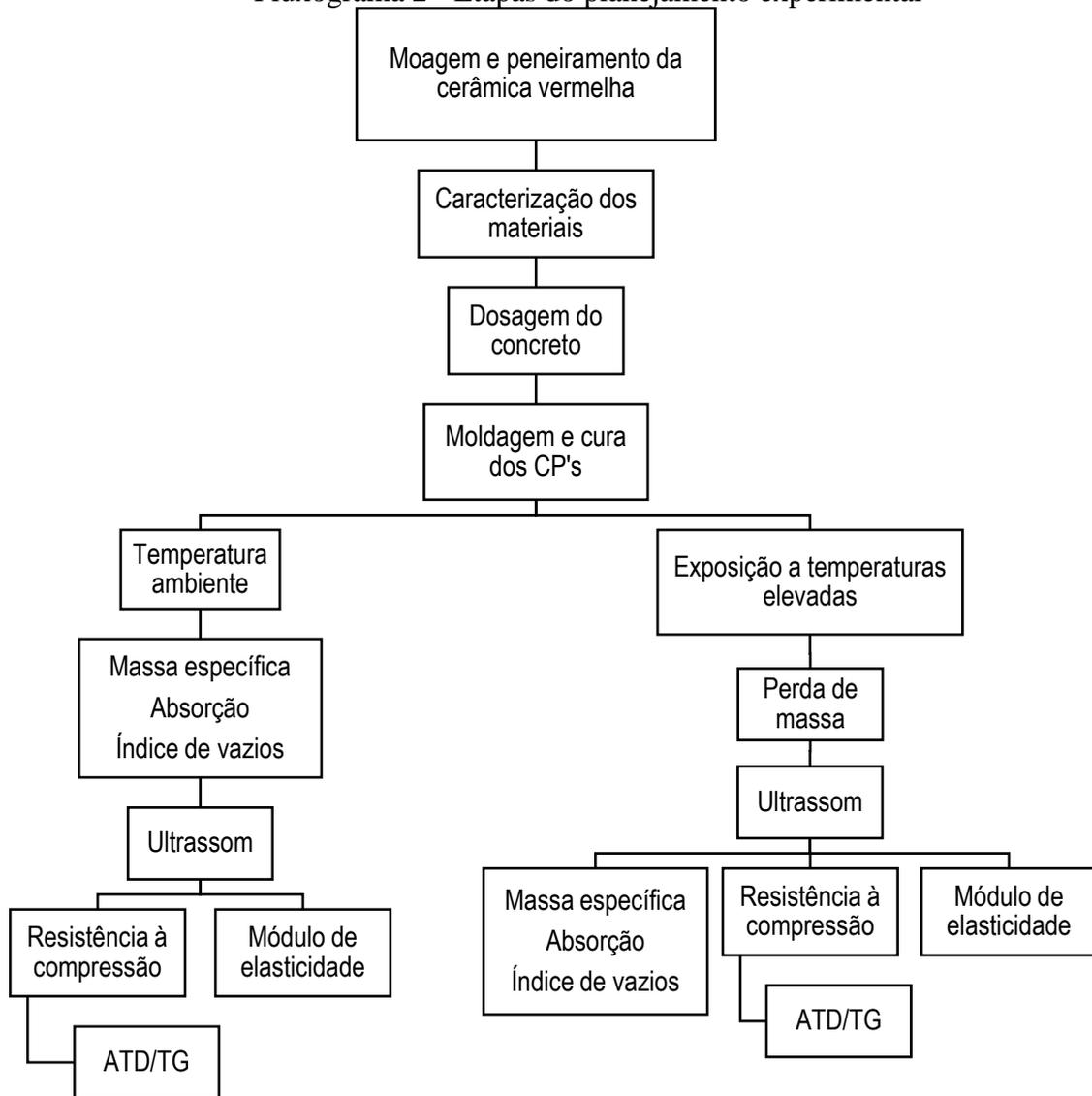
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.2.3 Planejamento experimental

Para a realização desta pesquisa foram moldados 210 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo 70 para cada um dos traços estudados. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios em temperatura ambiente e após exposição a 200°C, 400°C e 600°C.

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de determinação de massa específica, absorção, índice de vazios, velocidade de propagação de onda ultrassônica, resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa e análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD/TG), conforme esquematizado no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 - Etapas do planejamento experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.2.4 Mistura dos materiais

Antes de se iniciar a mistura dos materiais colocou-se os agregados na condição saturada com superfície seca e foi feita uma nata de cimento na betoneira, com parte do cimento e da água do traço, a fim de lubrificá-la para facilitar a retirada do concreto.

A mistura foi realizada de acordo com a seguinte ordem: colocou-se os agregados graúdos, parte da água, o cimento, a água restante, os agregados miúdos, os aditivos e, por fim, a cerâmica. A Figura 21 mostra o processo de mistura dos materiais.

Figura 21 - Mistura dos materiais na betoneira



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.2.5 Determinação da consistência

A consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone foi determinada de acordo com a NBR 16889 (2020). O ensaio consiste em encher o molde em forma de tronco de cone em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, adensar cada camada com 25 golpes da haste de adensamento igualmente distribuídos, rasar o topo, retirar o molde cuidadosamente e medir o abatimento do concreto.

5.2.6 Moldagem, cura e retificação dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados de acordo com o procedimento da NBR 5738 (2015). Os moldes foram previamente lubrificados com óleo desmoldante. O concreto foi colocado nos moldes em duas camadas de volume aproximadamente igual e o adensamento foi feito manualmente utilizando-se a haste metálica. Foram dados 12 golpes, distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde, em cada camada.

Posteriormente foi feito o rasamento da superfície com a borda do molde empregando-se a colher de pedreiro e os corpos de prova foram levados para a câmara úmida para a cura inicial (Figura 22). Após 24 horas, foram retirados dos moldes e imersos em água saturada de hidróxido de cálcio, onde permaneceram até a idade dos ensaios (Figura 23).

Figura 22 - Cura inicial dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 23 - Corpos de prova imersos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os corpos de prova foram retificados a fim de tornar a superfície plana e perpendicular ao seu eixo. A retificação consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material da superfície.

5.2.7 Exposição térmica

A exposição térmica ocorreu em um forno tipo mufla, no qual os corpos de prova, aos 63 dias de idade e previamente secos ao ar, foram introduzidos, conforme Figura 24, e submetidos a 200°C, 400°C ou 600°C. As temperaturas foram adotadas com o objetivo de analisar as diferenças no comportamento do concreto com distintos teores de substituição principalmente quanto à porosidade e aos danos decorrentes da decomposição do hidróxido de

cálcio. A taxa de variação de temperatura adotada foi de 0,5°C/min e o tempo de exposição após o atingimento da temperatura máxima foi de 60 minutos, conforme recomendações da RILEM TC 129-MHT (2000). Os corpos de prova permaneceram dentro da mufla até o equilíbrio com a temperatura ambiente. Posteriormente foram retirados e submetidos aos demais ensaios, dessa forma foram determinadas as propriedades residuais.

Figura 24 - Corpos de prova dentro da mufla



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5.2.8 Determinação da massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios

Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, onde estavam imersos em água, pesados submersos, saturados com superfície seca e após a secagem. A massa específica da amostra seca, a absorção e o índice de vazios foram calculados, respectivamente, a partir das Equações 6, 7 e 8:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (6)$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (7)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (8)$$

Sendo:

ρ_s a massa específica da amostra seca expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

A a absorção em porcentagem (%);

Iv o índice de vazios em porcentagem (%);

ms a massa seca em gramas (g);

m_{sat} a massa da amostra saturada em água em gramas (g);

m_i a massa da amostra saturada imersa em água em gramas (g).

5.2.9 Ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

O ensaio de propagação de onda ultrassônica é um ensaio não destrutivo que pode ser realizado tanto em laboratório quanto em campo. Esse método possibilita estimar vários parâmetros do concreto, tais como resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, profundidade de fissuras, homogeneidade, falhas no interior do concreto, entre outros (MALHOTRA e CARINO, 2004).

O método se baseia na ideia de que a velocidade de propagação de um pulso de ondas através de um determinado meio depende das propriedades elásticas e da densidade do meio. O transdutor-emissor do instrumento de teste emite um pulso de onda ultrassônica na superfície do concreto e o transdutor-receptor o recebe. Conhecendo-se o tempo que a onda leva para percorrer o concreto e a distância entre os transdutores é possível determinar a velocidade de propagação da onda (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica de acordo com a NBR 8802 (2019). Antes da realização do ensaio calibrou-se o aparelho utilizando-se a barra de referência. O ensaio consiste em aplicar fina camada de gel acoplante nas faces dos transdutores e posicioná-los de acordo com um dos arranjos previstos na norma. Nesse caso, as medições foram realizadas utilizando-se transmissão direta, em que os transdutores se posicionam em faces opostas, como mostrado na Figura 25. Esse é o arranjo mais recomendado pois as ondas são recebidas com maior intensidade.

Figura 25 - Ensaio de medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A velocidade de propagação das ondas é calculada pela Equação 9:

$$V = \frac{L}{t} \quad (9)$$

Sendo:

V a velocidade de propagação, expressa em metros por segundo (m/s);

L a distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores, expressa em metros (m);

t o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, expresso em segundos (s).

5.2.10 Determinação da resistência à compressão

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão conforme NBR 5739 (2018). O ensaio consiste na aplicação de uma força contínua no corpo de prova até que ocorra a ruptura completa da peça. O corpo de prova deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro. A Figura 26 mostra o corpo de prova posicionado na prensa antes e após o rompimento.

Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão
 (a) Antes do rompimento (b) Após o rompimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A resistência à compressão da peça é calculada pela Equação 10:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (10)$$

Sendo:

f_c a resistência à compressão, expressa em megapascal (MPa);

F a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

D o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

5.2.11 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático conforme NBR 8522-1 (2021). O ensaio consiste na aplicação de carga e medida das deformações, de acordo com um dos métodos constantes na norma. Os corpos de prova devem ser devidamente instrumentados com os medidores de deformação e centralizados na máquina, de forma que seu eixo coincida com o eixo de aplicação de carga, conforme Figura 27.

O corpo de prova é carregado até a força correspondente a 30% da tensão de ruptura e a tensão é mantida nesse nível por 60 segundos. Em seguida o corpo de prova é descarregado até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa e a tensão é mantida por 60 segundos. São realizados três ciclos de carregamento e descarregamento, posteriormente o corpo de prova é novamente submetido a tensão corresponde a 30% da tensão de ruptura por 60 segundos e, após a leitura das deformações, deve-se liberar a instrumentação do corpo de prova e continuar o carregamento até que ocorra a ruptura.

Figura 27 - Corpo de prova instrumentado posicionado na máquina



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O módulo de elasticidade, $E_{ci,i}$, é dado pela seguinte Equação 11:

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (11)$$

Sendo:

σ_b a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

0,5 o valor da tensão básica, expresso em megapascals (MPa);

ε_b a deformação específica do concreto sob a tensão maior;

ε_a a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

5.2.12 Perda de massa

A perda de massa, em porcentagem, foi determinada a partir da pesagem dos corpos de prova em temperatura ambiente e após a exposição a 200°C, 400°C e 600°C.

5.2.13 Análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD/TG)

A análise termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (TG) foi realizada em fragmentos dos corpos de prova submetidos à compressão previamente moídos. Essa análise permite estudar o comportamento térmico de determinada amostra sob uma taxa de aquecimento. O procedimento experimental consiste no aquecimento, em ritmo linear, da substância a ser analisada, comparando-a a uma substância termicamente inerte, que funciona como referência. Os resultados das análises podem ser observados a partir de termogramas que registram as transformações dos constituintes das amostras por meio de picos de reações endotérmicas ou exotérmicas, associados ou não à perda de massa. Nos concretos, os compostos passíveis dessas transformações são, em geral, aqueles presentes na pasta endurecida decorrentes da hidratação do cimento, e adições como fíler calcário, escória ou certos materiais pozolânicos.

5.2.14 Análise visual

Os corpos de prova foram observados quanto às alterações visíveis sofridas após a exposição a 200°C, 400°C e 600°C.

5.2.15 Análise estatística

Os dados experimentais foram analisados pelo método estatístico de Análise de Variância com um fator (*one-way* ANOVA), essa é uma análise paramétrica que busca diferenças entre três ou mais grupos quanto a uma variável quantitativa. As análises foram feitas para cada temperatura estudada considerando-se o traço (em três níveis: TR, T10 e T25) como variável independente e cada propriedade analisada como variável dependente.

A ANOVA permite comparar os valores de uma variável dependente medida em diversos grupos, determinando se há ou não diferenças significativas entre pelo menos duas médias dos grupos. Cada traço analisado configura um grupo. O nível de significância adotado (α) foi de 0,05, ou seja, a probabilidade de ocorrer um erro do tipo I, que significa concluir que existe uma diferença entre as médias dos grupos quando não há uma diferença real, é de 5%.

Para o emprego da ANOVA três premissas devem ser satisfeitas:

- Os resíduos (observação menos a média) da análise devem se ajustar à distribuição normal. Para verificar essa premissa utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk.
- As variâncias dos resíduos entre os grupos devem ser semelhantes (homoscedasticidade). Essa premissa foi verificada utilizando-se o Teste de Levene.
- As observações devem ser independentes.

Quando a premissa da distribuição normal dos resíduos não foi satisfeita, as análises foram feitas utilizando-se o teste de Kruskal-Wallis, que é o teste não paramétrico equivalente à ANOVA com um fator. Quando a premissa da igualdade das variâncias não foi satisfeita utilizou-se a ANOVA com correção de Welch.

A ANOVA, assim como o teste de Kruskal-Wallis, indica que há pelo menos um par de médias diferente entre os grupos testados, mas não indica entre quais grupos a diferença ocorre. Assim, posteriormente é necessário realizar testes de comparações múltiplas para determinar quais grupos têm médias diferentes. Neste caso, a ANOVA foi seguida pelo teste Tukey quando as variâncias foram semelhantes (homoscedasticidade) e pelo teste de Games-Howell quando as variâncias foram desiguais (heterocedasticidade). Já o teste de Kruskal-Wallis foi seguido pelo teste de comparações múltiplas de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados os resultados e as análises pertinentes dos ensaios de caracterização da cerâmica vermelha e de consistência, massa específica da amostra seca, índice de vazios, absorção, ultrassom, resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa, análise visual e análise termodiferencial e termogravimétrica do concreto.

Os resultados individuais de cada corpo de prova encontram-se no Apêndice A e as análises estatísticas no Apêndice B.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA

As propriedades do material cerâmico estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades da cerâmica vermelha

Propriedade	Cerâmica Vermelha
Massa específica NBR 16605 (2017)	2,66 g/cm ³
Perda ao fogo NBR NM 18 (2012)	7%
Índice de desempenho com cimento aos 28 dias NBR 5752 (2014)	98%
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias NBR 5751 (2015)	6,3 MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

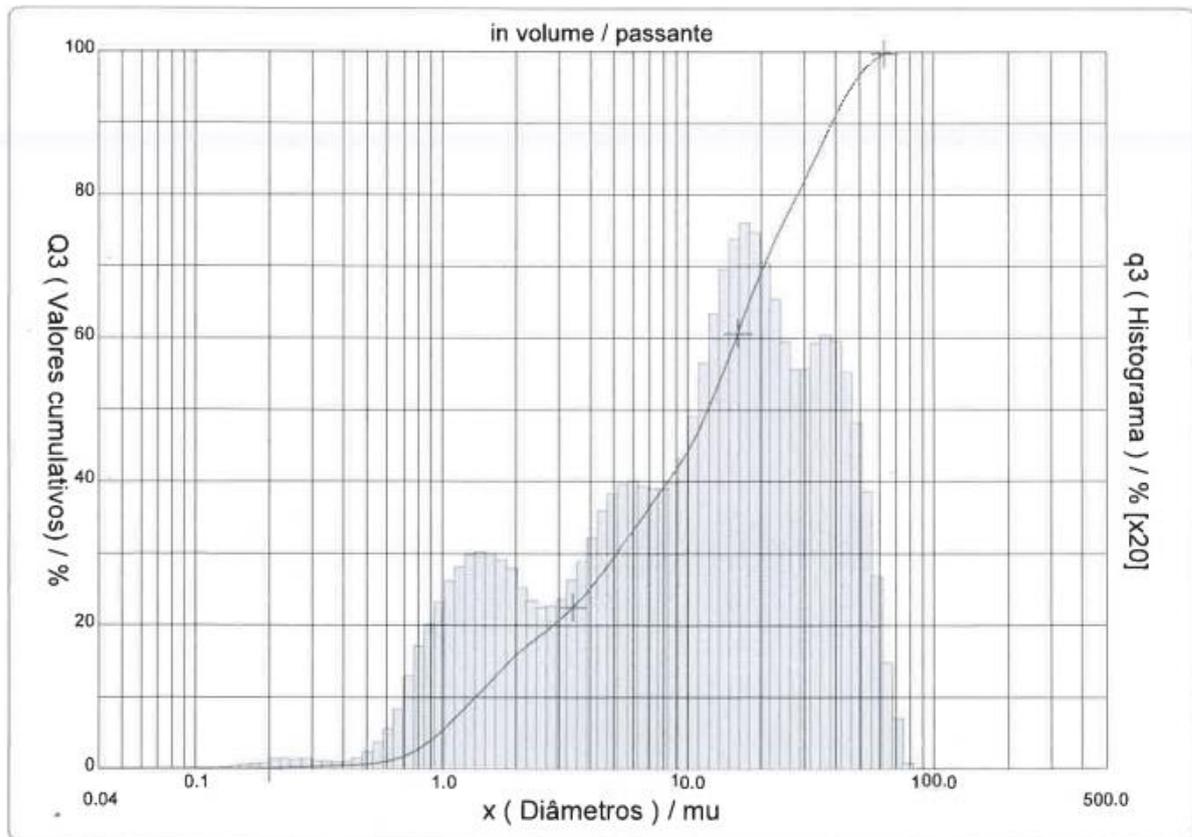
A perda ao fogo da cerâmica vermelha utilizada é 7% enquanto a do cimento é 6%. O limite estipulado na NBR 12653 (2014) é de 10% para materiais pozolânicos de Classe N.

A NBR 12653 (2014) estabelece que o índice de desempenho com cimento aos 28 dias deve ser maior ou igual a 90% e a atividade pozolânica com cal aos sete dias maior ou igual a 6 MPa. Ambos os requisitos foram atendidos.

A distribuição granulométrica da cerâmica vermelha é mostrada no Gráfico 19. O diâmetro médio das partículas é de 16,00 µm, o diâmetro a 10% é 1,36 µm, a 50% é 12,07 µm e a 90% é 38,57 µm.

Vale ressaltar que a porcentagem retida na peneira de abertura igual a 45 µm é inferior a 20%, conforme estabelecido na NBR 12653 (2014).

Gráfico 19 - Curva granulométrica da cerâmica vermelha



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

6.2 CONSISTÊNCIA

Os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone das misturas estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do abatimento de tronco de cone

Traço	Aditivo plastificante / superplastificante (%)	Abatimento (mm)
TR	0,50 / 0,25	-
T10	0,50 / 0,37	210
T25	0,50 / 0,50	120

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No traço de referência não foi possível realizar o ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone devido à fluidez da mistura. Observa-se que, mesmo com o aumento da quantidade de aditivo superplastificante, o abatimento diminuiu com o aumento da porcentagem de adição da cerâmica. Em relação ao traço T10, o traço T25 apresentou um valor aproximadamente 43% menor. Isso ocorre pois a cerâmica, por ser mais fina que o cimento,

possui uma superfície específica maior, logo a quantidade de água necessária para envolver os grãos de cerâmica é maior, ocasionando uma diminuição no abatimento do concreto.

Sales e Auferes Filho (2014) também constataram redução no abatimento do concreto em função do aumento do teor de cerâmica. Foi utilizado aditivo superplastificante para adequar a trabalhabilidade das misturas ao abatimento estabelecido, sendo os teores de 0,38%, 0,64%, 0,77% e 1,18% para os níveis de substituição de 0, 10%, 20% e 40%, respectivamente.

6.3 MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO

Os resultados de massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios para cada temperatura analisada estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados de massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios

	Traço	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
ρ_s (g/cm ³) – amb.	TR	2,41	0,01	0
	T10	2,41	0,02	0,01
	T25	2,40	0,02	0
IV (%) – amb.	TR	1,28	0,05	0,01
	T10	0,79	0,08	0,02
	T25	0,84	0,08	0,02
Absorção (%) – amb.	TR	0,53	0,02	0,01
	T10	0,33	0,03	0,01
	T25	0,35	0,03	0,01
ρ_s (g/cm ³) - 200°C	TR	2,22	0,05	0,03
	T10	2,23	0,02	0,01
	T25	2,24	0,01	0,01
IV (%) - 200°C	TR	15,01	0,11	0,06
	T10	13,61	0,38	0,22
	T25	15,15	0,28	0,16
Absorção (%) - 200°C	TR	6,77	0,19	0,11
	T10	6,12	0,22	0,13
	T25	6,77	0,08	0,05
ρ_s (g/cm ³) - 400°C	TR	2,23	0,03	0,01
	T10	2,20	0,04	0,02
	T25	2,20	0,01	0,01

IV (%) - 400°C	TR	18,49	1,10	0,63
	T10	18,27	0,27	0,15
	T25	18,87	0,16	0,09
Absorção (%) - 400°C	TR	8,28	0,59	0,34
	T10	8,29	0,24	0,14
	T25	8,57	0,10	0,06
ρ_s (g/cm ³) - 600°C	TR	2,17	0,03	0,01
	T10	2,21	0,01	0,01
	T25	2,16	0,02	0,01
IV (%) - 600°C	TR	21,72	0,92	0,53
	T10	21,52	0,29	0,21
	T25	22,39	0,64	0,37
Absorção (%) - 600°C	TR	9,98	0,52	0,30
	T10	9,72	0,18	0,13
	T25	10,39	0,39	0,23

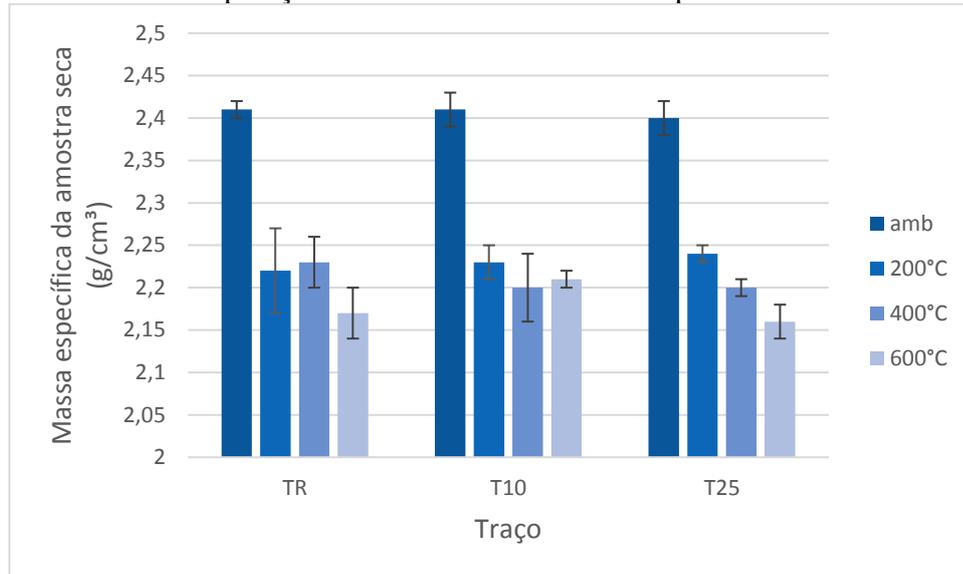
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 20 é possível observar a comparação entre os resultados de massa específica da amostra seca. As análises estatísticas indicam que, para todas as temperaturas estudadas, não há diferenças significativas entre os traços. Pode-se concluir que a tendência de diminuição da massa específica do concreto devido à substituição do cimento por um material com menor massa específica foi compensada pela tendência de aumento por causa do refinamento do tamanho dos poros ocasionado pela adição de pozolana, resultando em diferenças insignificantes para todas as temperaturas analisadas.

Em consonância com os resultados obtidos nesta pesquisa, Belchior (2017) e Sales e Auferes Filho (2014) também não verificaram diferenças significativas para os resultados de massa específica em temperatura ambiente até o teor de 40% de substituição de cimento por material cerâmico.

Observa-se também que há uma tendência de diminuição da massa específica da amostra seca com o aumento da temperatura. Isso ocorre devido à perda de massa e aumento da porosidade ocasionados pelo aquecimento.

Gráfico 20 - Comparação dos resultados de massa específica da amostra seca



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

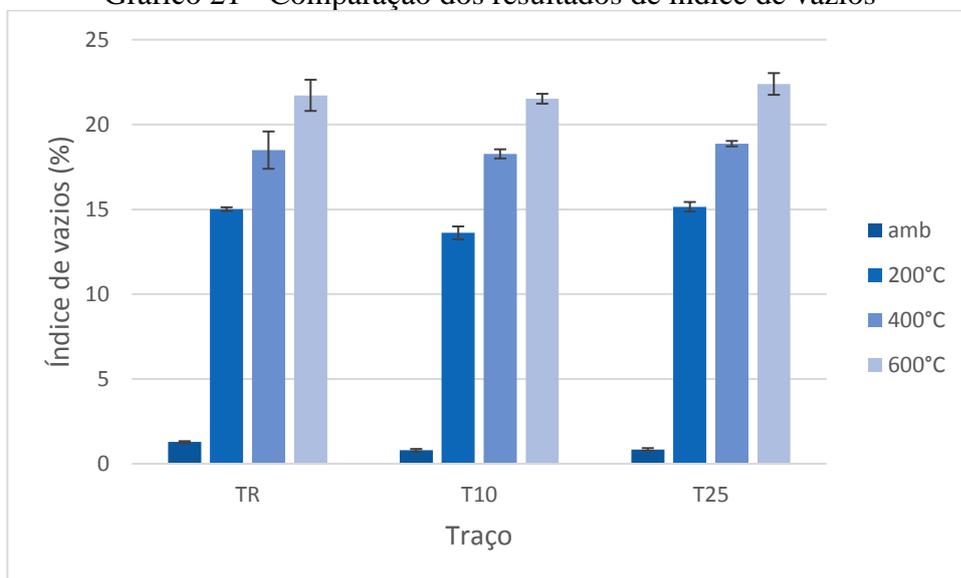
Nos Gráficos 21 e 22 observa-se a comparação entre os resultados de índice de vazios e absorção, respectivamente. Para essas propriedades, as análises estatísticas indicam que, em temperatura ambiente, há diferenças significativas entre o traço TR e o demais, sendo que o TR apresentou o maior valor. Entre os traços T10 e T25 não há diferença estatisticamente significativa. O traço T10 apresentou um valor cerca de 38% inferior ao TR, enquanto o T25 cerca de 34%. Para a temperatura de 200°C o traço T10 apresentou o menor valor (cerca de 9% inferior ao TR) e não foram constatadas diferenças entre os traços TR e T25.

Os traços com adição de material cerâmico apresentam menores valores para o índice de vazios e absorção por causa da diminuição do volume dos poros permeáveis devido ao refinamento do tamanho dos poros ocasionado pela adição de pozolana. Já para as temperaturas de 400°C e 600°C não há diferença entre os traços para ambas as propriedades devido ao fato de que, para essas temperaturas, o nível de fissuração do concreto é mais alto e os poros se encontram interligados.

Quanto ao índice de vazios e à absorção em temperatura ambiente, Jerônimo (2014) constatou que com o aumento do teor de cerâmica no traço houve uma discreta diminuição nos valores dessas propriedades, sendo de cerca de 3% para um teor de 30% de substituição. Sales e Auferes Filho (2014) obtiveram valores de índice de vazios e absorção bem próximos para os concretos de referência e com teores de 10%, 20% e 40% de substituição, sendo a diferença máxima igual a 6,5%. Já Belchior (2017) não encontrou diferenças significativas para essas propriedades até o teor de 30% de substituição.

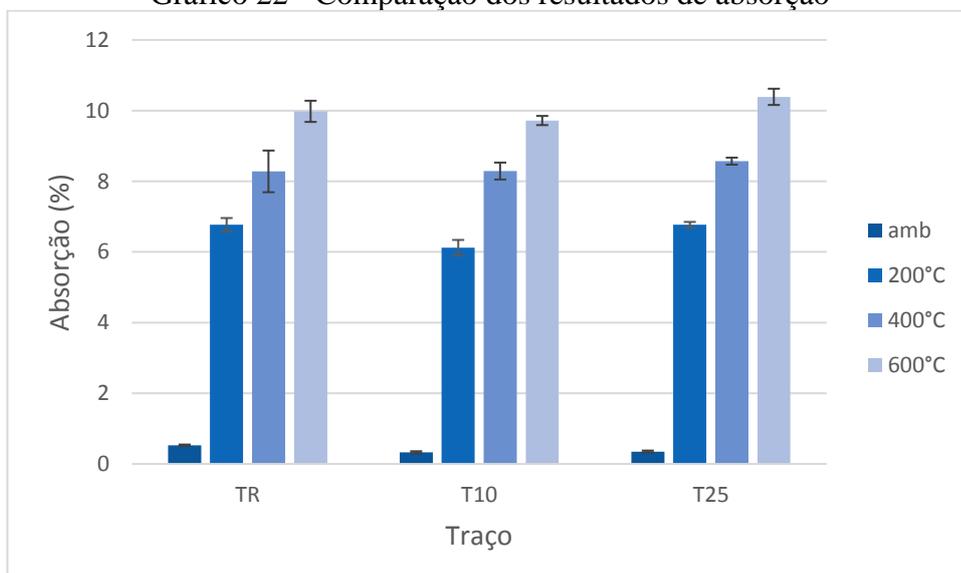
Observa-se também que, como esperado, o índice de vazios e a absorção aumentam com o aumento da temperatura devido ao aumento da porosidade decorrente do processo de decomposição dos produtos de hidratação e ao aumento da fissuração do concreto com o aquecimento. No Gráfico 23 nota-se que o índice de vazios aumenta de forma mais acentuada até 200°C, isso ocorre pois até 200°C o concreto perde umidade rapidamente devido à perda da água livre, que ocorre até 80°C, e à perda da água capilar e fisicamente adsorvida, que ocorre de 80°C a 200°C, ocasionando um aumento mais acentuado da porosidade. O mesmo comportamento é observado para a absorção.

Gráfico 21 - Comparação dos resultados de índice de vazios



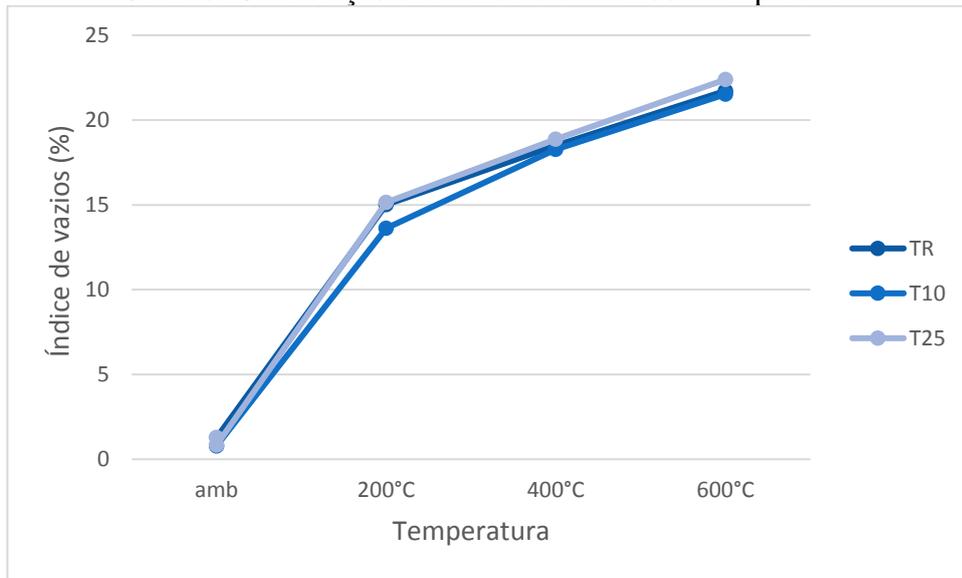
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 22 - Comparação dos resultados de absorção



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

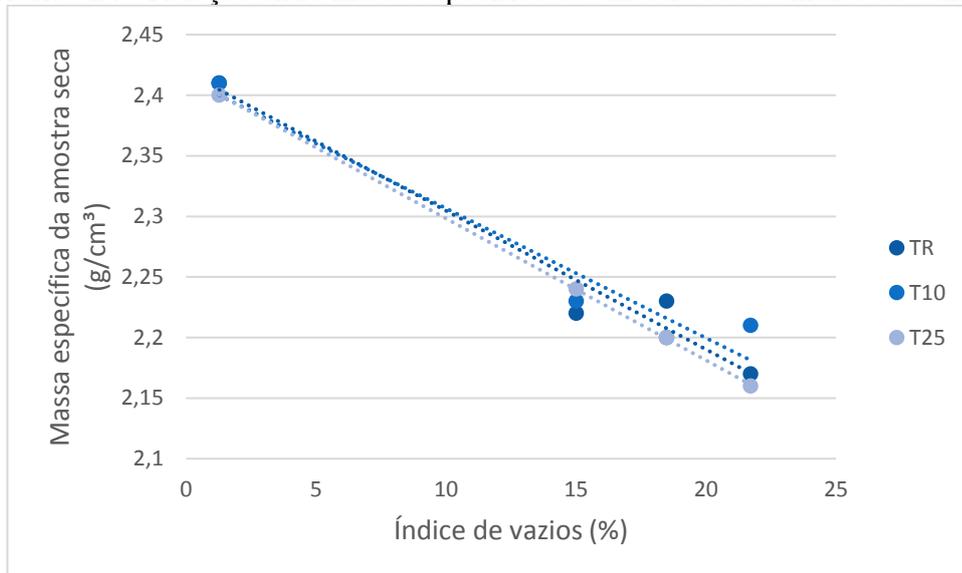
Gráfico 23 - Relação entre índice de vazios e temperatura



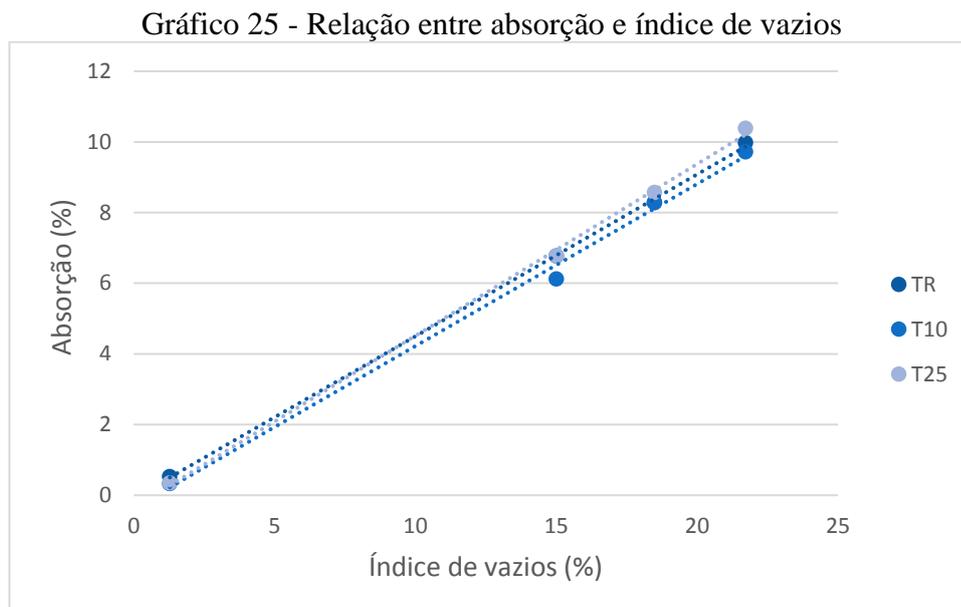
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nos Gráficos 24 e 25 observa-se a relação entre as propriedades de massa específica da amostra seca e absorção, respectivamente, e índice de vazios. Conforme o esperado, a massa específica da amostra seca diminui e a absorção aumenta com o aumento do índice de vazios. Essas relações estão ligadas à porosidade, conforme explicado anteriormente.

Gráfico 24 - Relação entre massa específica da amostra seca e índice de vazios



Fonte: Elaborado pela autora (2021).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

6.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica para cada temperatura analisada estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica

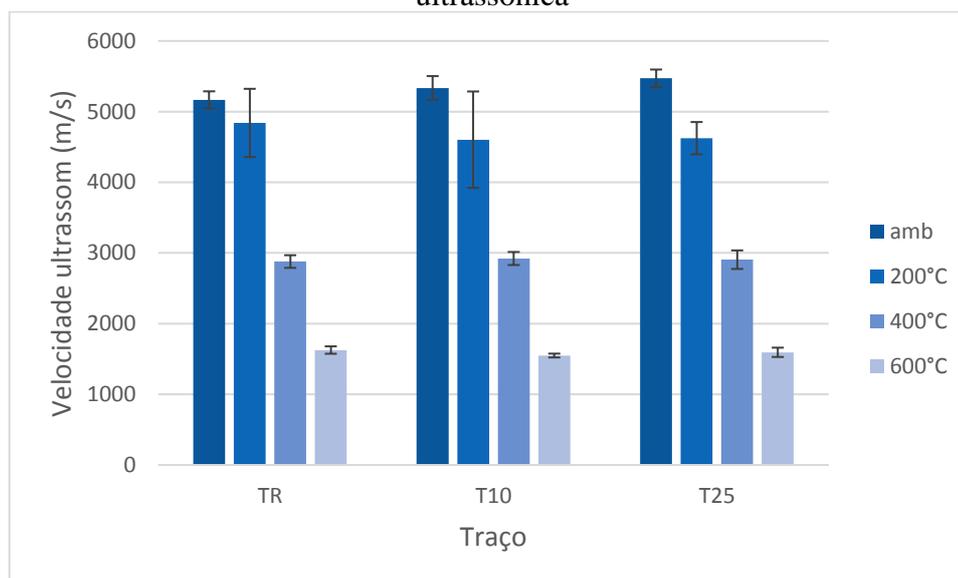
	Traço	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
Velocidade ultrassom (m/s) - amb.	TR	5167,26	120,39	30,1
	T10	5334,72	168,09	42,02
	T25	5471,79	124,14	31,04
Velocidade ultrassom (m/s) - 200°C	TR	4840,35	482,51	120,63
	T10	4603,50	681,74	176,02
	T25	4624,67	228,67	66,01
Velocidade ultrassom (m/s) - 400°C	TR	2878,85	89,71	25,90
	T10	2922,03	92,23	26,63
	T25	2905,13	131,43	46,47
Velocidade ultrassom (m/s) - 600°C	TR	1618,25	50,79	20,74
	T10	1548,91	27,19	10,28
	T25	1594,27	65,97	29,5

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 26 observa-se a comparação entre os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica. Considerando a temperatura ambiente, as análises estatísticas indicam que há diferença nas velocidades para os três traços. A maior velocidade foi para o T25, seguida pelo T10 e TR. A velocidade de propagação de onda ultrassônica tende a decrescer com o aumento do índice de vazios, visto que a onda se propaga em um meio sólido, por essa razão os traços com adição de cerâmica e conseqüente refinamento do tamanho dos poros apresentam valores maiores para a velocidade de propagação.

Nas demais temperaturas analisadas não há diferença entre os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica para os traços. Nota-se que a velocidade diminui com o aumento da temperatura, chegando a reduções de cerca de 70% a 600°C, seguindo a tendência inversa à do índice de vazios.

Gráfico 26 - Comparação entre os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Demirel e Kelestemur (2010) observaram reduções menores na velocidade de propagação de onda ultrassônica. Em concretos com substituição de cimento por pedra-pomes finamente moída e sílica ativa em teores variando entre 5% e 20% as reduções foram de cerca de 30% a 600°C, chegando a cerca de 70% apenas a 800°C. Os autores constataram que o decréscimo foi maior para amostras contendo sílica ativa, especialmente a 600°C e 800°C, fato atribuído à formação de uma estrutura mais porosa devido à decomposição dos silicatos de cálcio hidratados, que, segundo os autores, é mais abundante em concretos contendo sílica ativa.

6.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão em temperatura ambiente aos 28, 63 e 91 dias estão apresentados na Tabela 20.

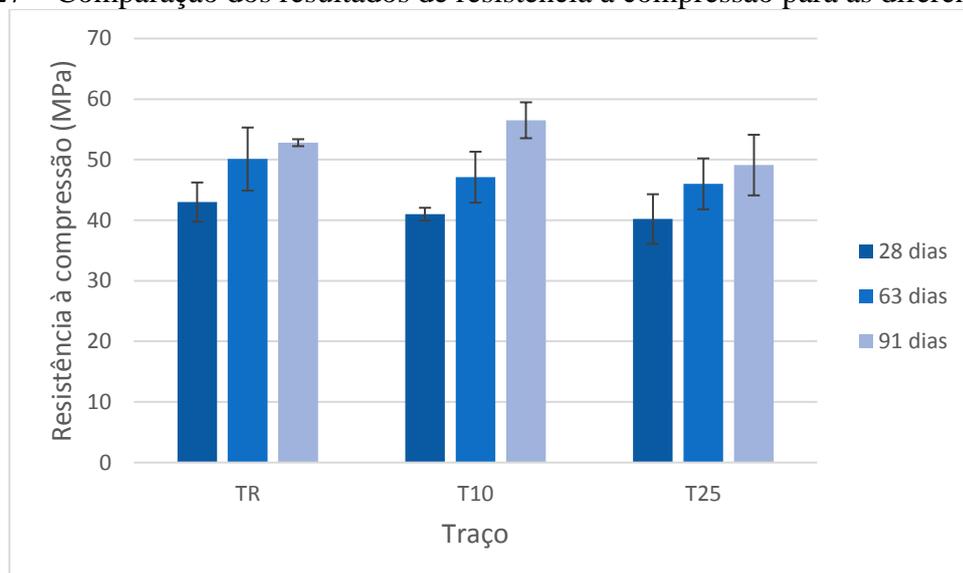
Tabela 20 - Resultados de resistência à compressão para as diferentes idades

Idade	Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Erro Padrão (MPa)
28 dias	TR	43,0	3,23	1,86
	T10	41,0	1,05	0,74
	T25	40,2	4,09	2,89
63 dias	TR	50,1	5,20	1,65
	T10	47,1	4,21	1,33
	T25	46,0	4,20	1,33
91 dias	TR	52,8	0,57	0,40
	T10	56,5	2,97	1,71
	T25	49,1	5,00	2,89

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 27 é possível observar a comparação dos resultados de resistência à compressão nas diferentes idades. Considerando as resistências médias na temperatura ambiente, as análises estatísticas indicam que não há diferenças significativas entre os três traços nas idades de 28, 63 e 91 dias. Isso demonstra que o ganho de resistência decorrente da reação pozolânica e do refinamento do tamanho dos poros e dos grãos causado pela adição do material cerâmico não supera significativamente a perda decorrente da redução do consumo de cimento.

Gráfico 27 – Comparação dos resultados de resistência à compressão para as diferentes idades

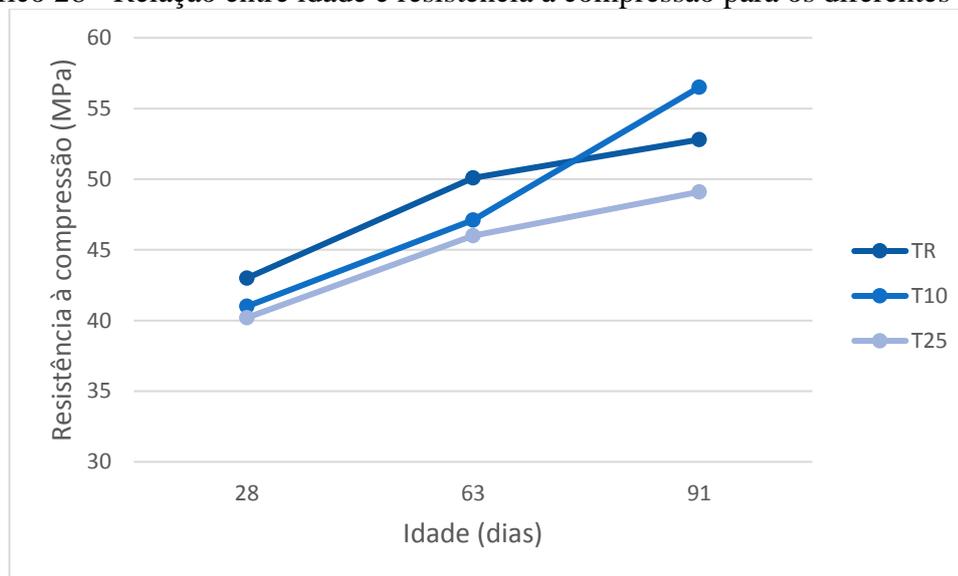


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 28 é possível observar a relação entre idade e resistência para os diferentes traços. Nota-se que entre 28 e 63 dias o aumento de resistência foi similar para os três traços, no entanto entre 63 e 91 dias o traço T10 apresentou um aumento de resistência maior que os traços TR e T25. O ganho de resistência é maior para o traço T10 em idades mais avançadas pois a reação pozolânica ocorre mais lentamente que a hidratação do cimento.

O mesmo fato não ocorreu para o traço T25. Apesar de as resistências aos 91 dias não apresentarem diferenças estatisticamente significativas entre os três traços, o T10 foi o que apresentou um maior aumento da resistência em relação à obtida aos 28 dias, sendo de 38%, contra 23% do TR e 22% do T25, o que indica que o teor de substituição de 10% é mais eficaz que o de 25% quanto à resistência à compressão, considerando idades mais avançadas.

Gráfico 28 - Relação entre idade e resistência à compressão para os diferentes traços



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em consonância aos resultados obtidos nesta pesquisa, Gonçalves (2007) não constatou diferenças significativas nas resistências à compressão aos 28 dias de concretos com teores de substituição de 20%.

Já Sales e Auferes Filho (2014) observaram que, aos 28 dias, as substituições de 10% e 40% do cimento por cerâmica vermelha provocaram reduções de 11,4% e 16,9% na resistência à compressão, respectivamente. Para a mistura com 20% de substituição, a resistência aumentou em 11,1%.

Belchior (2017) constatou que, aos 28 dias, houve uma leve diminuição da resistência para os traços com 10% e 20% de substituição, enquanto o traço com 30% de substituição apresentou um aumento de cerca de 10%.

Jerônimo (2014) também observou diferenças significativas entre os resultados de resistência. Segundo o autor, há uma tendência para a queda de resistência com o aumento do teor de substituição. Entre os resultados dos traços com 10% e 20% de substituição não houve diferença, sendo a redução média em relação ao traço de referência de cerca de 12,6%. A maior perda de resistência foi para a substituição de 30%, chegando ao valor médio de 16,9%.

Os resultados de resistência à compressão aos 63 dias para cada temperatura analisada estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados de resistência à compressão para as diferentes temperaturas

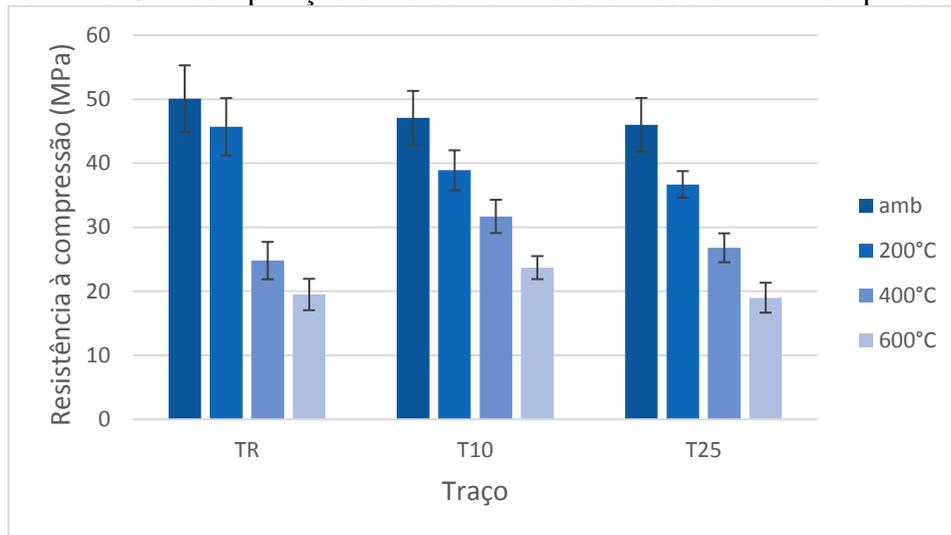
Temperatura	Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Erro Padrão (MPa)
Ambiente	TR	50,1	5,20	1,65
	T10	47,1	4,21	1,33
	T25	46,0	4,20	1,33
200°C	TR	45,7	4,48	1,42
	T10	38,9	3,13	0,99
	T25	36,7	2,08	0,66
400°C	TR	24,8	2,92	0,92
	T10	31,7	2,60	0,82
	T25	26,8	2,26	0,71
600°C	TR	19,5	2,45	0,77
	T10	23,7	1,80	0,57
	T25	19,0	2,34	0,74

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O Gráfico 29 mostra a comparação entre os resultados de resistência à compressão nas diferentes temperaturas. Para a temperatura ambiente, como mencionado, não há diferença entre os três traços. Para a temperatura de 200°C o traço TR apresentou o maior resultado e não houve diferença significativa entre os traços T10 e T25, que apresentaram valores cerca de 15% e 20% inferiores ao TR, respectivamente.

Para as temperaturas de 400°C e 600°C o maior resultado foi do traço T10 e não houve diferença entre os traços TR e T25. A diferença de resistência entre T10 e TR foi de aproximadamente 28% e 21% para as temperaturas de 400°C e 600°C, respectivamente.

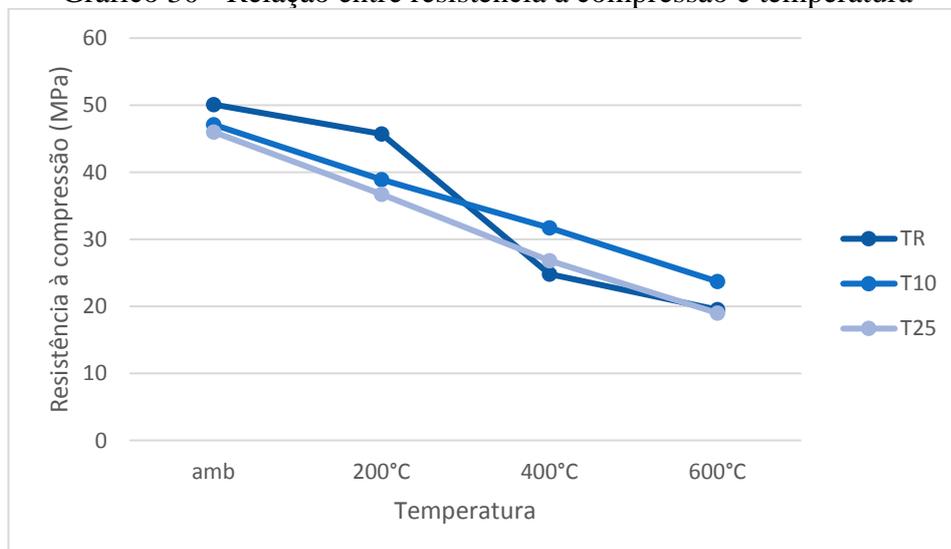
Gráfico 29 – Comparação entre os resultados de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 30 é possível observar a relação entre a resistência à compressão e a temperatura. Entre 200°C e 400°C o traço TR apresenta uma queda mais acentuada da resistência. Isso ocorre porque a dissociação do hidróxido de cálcio durante o aquecimento começa por volta de 400°C. A decomposição do hidróxido de cálcio em cal e vapor de água não é crítica em termos de perda de resistência, no entanto essa decomposição pode levar a sérios danos devido à expansão da cal decorrente da reidratação durante o resfriamento, o que gera aumento da fissuração, resultando em perda de resistência. Visto que a quantidade de hidróxido de cálcio é reduzida pela reação pozolânica, os traços com adição de material cerâmico apresentam maiores valores de resistência à compressão a 400°C.

Gráfico 30 - Relação entre resistência à compressão e temperatura



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As resistências à compressão residuais relativas à resistência à compressão em temperatura ambiente para os traços estudados são mostradas na Tabela 22. Observa-se que até 200°C o traço TR obteve o melhor desempenho e a partir de 400°C os traços T10 e T25 obtiveram melhor desempenho que o TR, devido à decomposição do hidróxido de cálcio, com destaque para o T10 que apresentou um resultado de resistência à compressão residual a 600°C de 50,3% da resistência à compressão em temperatura ambiente.

Tabela 22 - Resistências à compressão residuais relativas

Temperatura	Resistência à compressão residual relativa (%)		
	TR	T10	T25
200°C	91,2	82,6	79,8
400°C	49,5	67,3	58,3
600°C	38,9	50,3	41,3

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto ao efeito da adição de pozolanas no concreto após a exposição a temperaturas elevadas, Lima (2005) observou que, para temperaturas de até 900°C, concretos com adição de 5% e 10% de metacaulim apresentam uma curva de queda muito similar à dos concretos sem adição, para quase todos os patamares de temperatura. O mesmo comportamento foi observado por Poon *et al.* (2003) para concretos com 5%, 10% e 20% de substituição do cimento por metacaulim até 800°C. A diferença foi que os concretos com adição apresentaram um aumento na resistência à compressão a 200°C, atribuído à hidratação de partículas de metacaulim não hidratadas que foram ativadas como resultado do aumento da temperatura.

Demirel e Kelestemur (2010), estudando concretos com substituição de cimento por pedra-pomes finamente moída e sílica ativa em teores variando entre 5% e 20%, constataram que a resistência aumentou até a temperatura de 400°C (com exceção da amostra de referência) e depois diminuiu entre 400°C e 600°C. Por fim, ocorreu uma redução acentuada na resistência relativa até 800°C. A resistência relativa mínima do concreto para a temperatura de 600°C foi de cerca de 70%, valor mais alto que o encontrado nesta pesquisa.

6.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados de módulo de elasticidade para as diferentes temperaturas analisadas estão apresentados na Tabela 23.

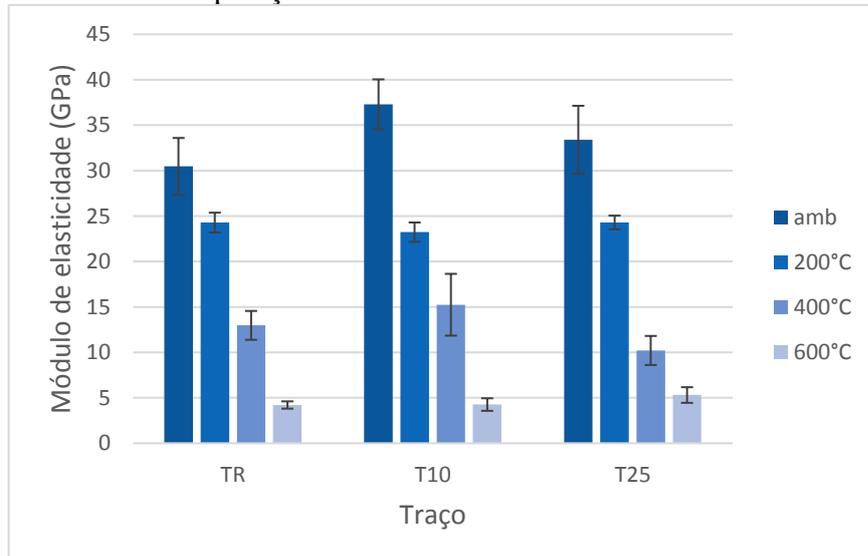
Tabela 23 - Resultados de módulo de elasticidade

	Traço	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
Módulo de elasticidade (GPa) - amb.	TR	30,46	3,13	1,81
	T10	37,3	2,74	1,27
	T25	33,4	3,73	2,16
Módulo de elasticidade (GPa) - 200°C	TR	24,28	1,09	0,63
	T10	23,23	1,06	0,61
	T25	24,29	0,76	0,44
Módulo de elasticidade (GPa) - 400°C	TR	12,97	1,59	0,92
	T10	15,24	3,4	0,83
	T25	10,21	1,6	0,57
Módulo de elasticidade (GPa) - 600°C	TR	4,21	0,4	0,23
	T10	4,26	0,69	0,4
	T25	5,31	0,86	0,17

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Gráfico 31 é possível observar a comparação entre os resultados de módulo de elasticidade. As análises estatísticas indicam que não há diferenças significativas entre o módulo de elasticidade dos três traços para todas as temperaturas estudadas. Isso indica que a adição de cerâmica vermelha não influencia a rigidez do concreto, nem na temperatura ambiente, nem após a exposição a temperaturas elevadas.

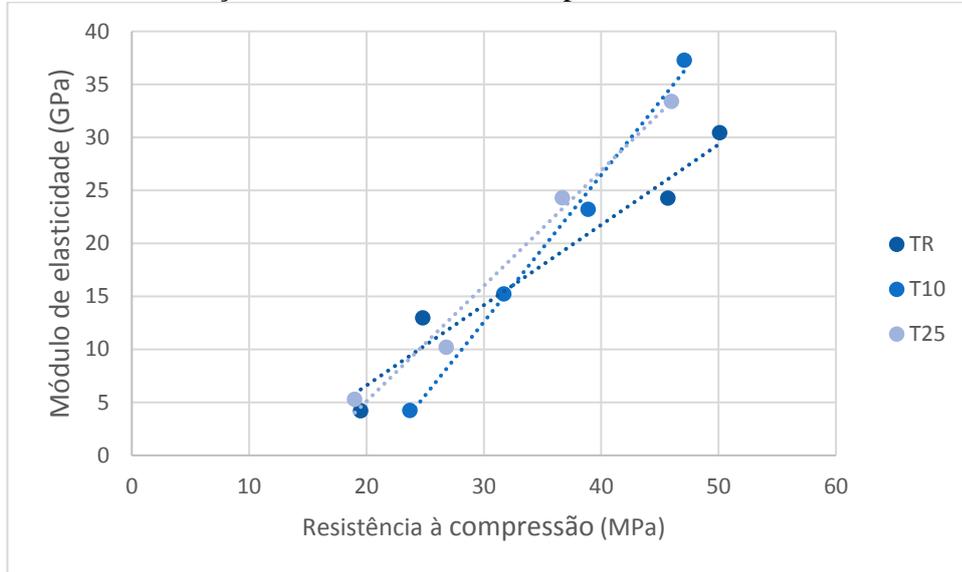
Gráfico 31 - Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que, conforme o esperado, o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura, acompanhando a tendência da resistência à compressão. O Gráfico 32 mostra a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Gráfico 32 - Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

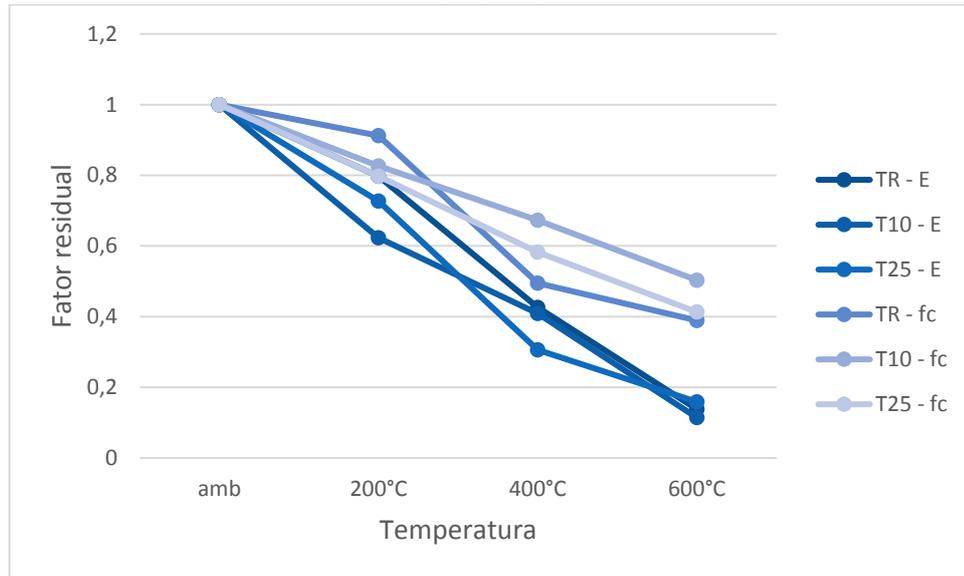
Os módulos de elasticidade residuais relativos para os traços estudados e a comparação entre os módulos e as resistências à compressão residuais relativas são mostrados na Tabela 24 e Gráfico 33, respectivamente. Observa-se que o módulo de elasticidade é mais sensível ao aumento da temperatura que a resistência à compressão. O valor relativo mais baixo atingido a 600°C foi de 11,4% contra 39,8% da resistência à compressão.

Tabela 24 - Módulos de elasticidade residuais relativos

Temperatura	Módulo de elasticidade residual relativo (%)		
	TR	T10	T25
200°C	79,7	62,3	72,7
400°C	42,6	40,9	30,6
600°C	13,8	11,4	15,9

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 33 - Comparação entre módulo de elasticidade residual e resistência à compressão residual



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Sales e Auferes Filho (2014) não encontraram diferença entre os resultados de módulo de elasticidade em temperatura ambiente para substituições de cimento por material cerâmico nos teores de 10% e 40%, enquanto para o teor de 20% o resultado foi ligeiramente superior (8,25% maior que o concreto de referência). Gonçalves (2007) observou que a substituição de cimento por material cerâmico no teor de 20% provocou uma redução no módulo de elasticidade de até 12%. A redução foi atribuída à menor rigidez dos produtos hidratados decorrentes da reação pozolânica, gerando misturas com maior capacidade de deformação sob tensão.

Quanto ao efeito da adição de pozolanas no módulo de elasticidade após a exposição a temperaturas elevadas, Lima (2005) constatou que concretos com adições de sílica ativa e metacaulim apresentaram uma curva de queda semelhante à do concreto sem adições. Os valores foram próximos para temperatura de até 200°C e a partir de 400°C os concretos com teor de 10% de substituição apresentaram valores mais baixos para essa propriedade, chegando a valores relativos de 16% a 600°C, contra 36% do concreto de referência.

6.7 PERDA DE MASSA

Os resultados de perda de massa para as diferentes temperaturas analisadas estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados de perda de massa

	Traço	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
Perda de massa (%) - 200°C	TR	6,27	0,32	0,08
	T10	5,32	0,28	0,07
	T25	5,87	0,26	0,07
Perda de massa (%) - 400°C	TR	7,44	0,30	0,07
	T10	7,24	0,22	0,05
	T25	7,63	0,31	0,08
Perda de massa (%) - 600°C	TR	8,07	0,28	0,07
	T10	7,99	0,09	0,03
	T25	8,91	0,41	0,10

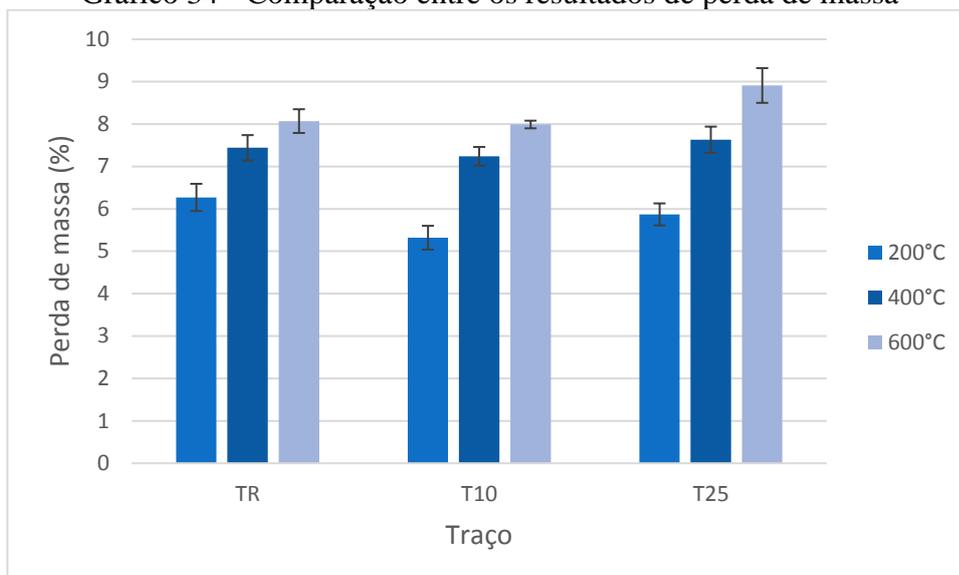
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A comparação entre os resultados de perda de massa é mostrada no Gráfico 34. Para a temperatura de 200°C as análises estatísticas indicam que o traço T10 apresenta o menor valor de perda de massa, sendo cerca de 15% inferior ao TR, e entre os traços TR e T25 não há diferenças significativas. Para a temperatura de 400°C o traço T10 apresentou um resultado menor que o T25 e entre TR e T10 e TR e T25 não há diferença. Para a temperatura de 600°C não há diferença significativa entre os traços T10 e TR, que apresentaram os menores resultados, sendo cerca de 10% inferior ao T25.

De um modo geral, o traço T10 apresentou o melhor resultado para essa propriedade. Isso ocorre pois o processo de refinamento do tamanho dos poros decorrente da adição de pozolana reduz a porosidade do concreto, dificultando a liberação de vapor e consequentemente a perda de massa durante o aquecimento.

O mesmo comportamento não é observado para o traço T25 pois a cerâmica apresenta maior perda ao fogo que o cimento, logo para teores mais altos de substituição a tendência de aumento da perda de massa prevalece.

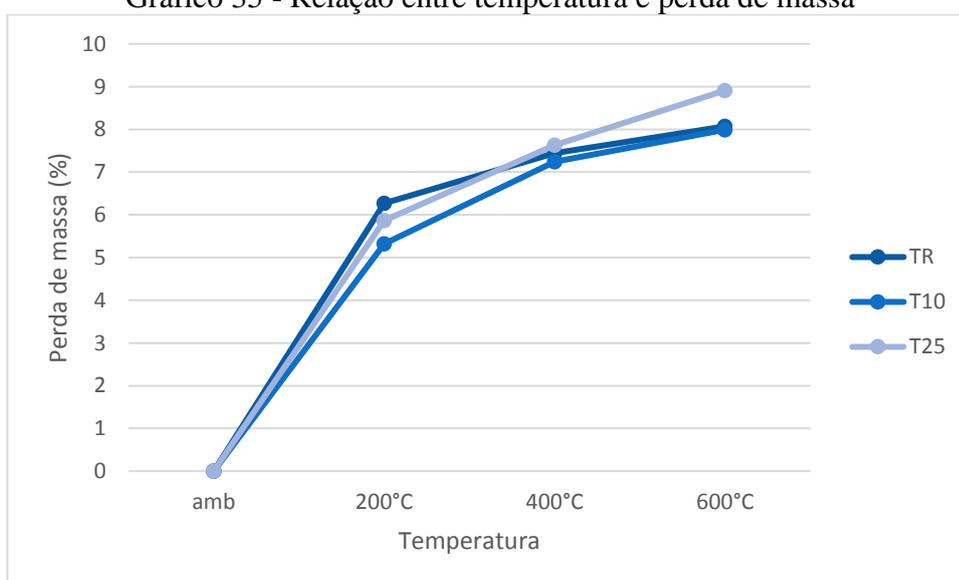
Gráfico 34 - Comparação entre os resultados de perda de massa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

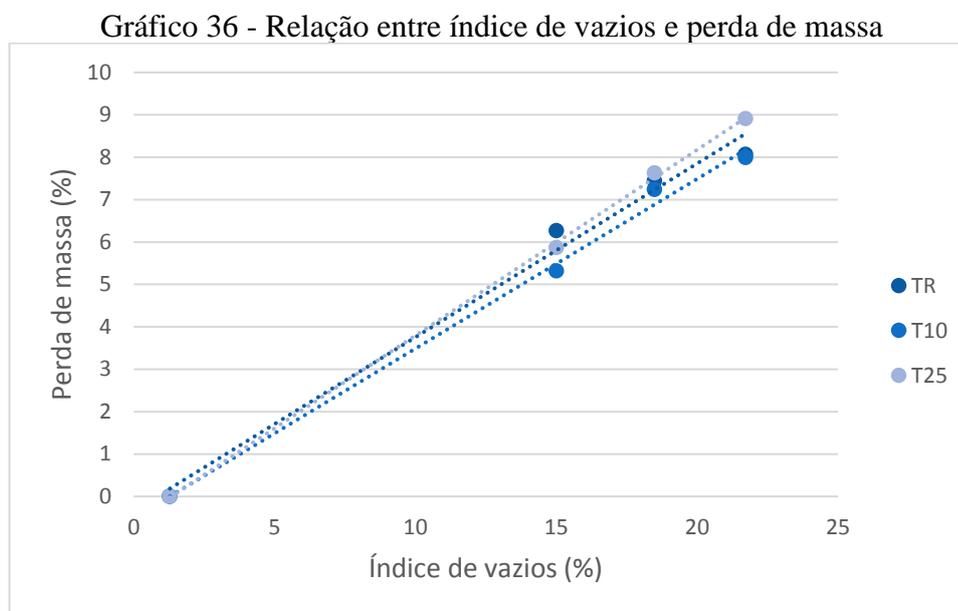
A perda de massa está relacionada ao aumento da porosidade do concreto devido à perda de água decorrente do aquecimento. Como mostrado no Gráfico 35, assim como ocorre com o índice de vazios, até 200°C a perda de massa é mais acentuada pois o concreto perde umidade rapidamente devido à perda da água livre, que ocorre até 80°C, e à perda da água capilar e fisicamente adsorvida, que ocorre de 80°C a 200°C. Entre 200°C e 600°C a taxa de perda de massa diminui, pois está relacionada principalmente à decomposição do hidróxido de cálcio e à evaporação da água quimicamente combinada aos silicatos de cálcio hidratados.

Gráfico 35 - Relação entre temperatura e perda de massa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O Gráfico 36 mostra a relação entre o índice de vazios e a perda de massa para os três traços. Nota-se que, conforme o esperado, quando o índice de vazios aumenta a perda de massa também aumenta, visto que as duas propriedades estão relacionadas à perda de água decorrente do aquecimento.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quanto à perda de massa de concretos contendo pozolanas após a exposição a temperaturas elevadas, Demirel e Kelestemur (2010), estudando concretos com adição de pedra-pomes finamente moída e sílica ativa nos teores de 5% a 20%, constataram perdas médias de massa de 4% a 400°C, 6% a 600°C e 8,06% a 800°C, valores inferiores aos obtidos nesta pesquisa. As perdas de massa nos traços contendo sílica ativa e pedra-pomes foram maiores que as perdas nas amostras apenas com pedra-pomes, especialmente a 800°C.

Khurram *et al.* (2018) constataram que concretos com adição de cinzas volantes e cinzas vulcânicas nos teores de 20% apresentaram perdas de massa maiores que o concreto de referência para todas as faixas de temperatura até 800°C, sendo os valores para os concretos com adição cerca de 2% a 200°C, 4% a 400°C e 5% a 600°C, valores próximos aos obtidos por Demirel e Kelestemur (2010).

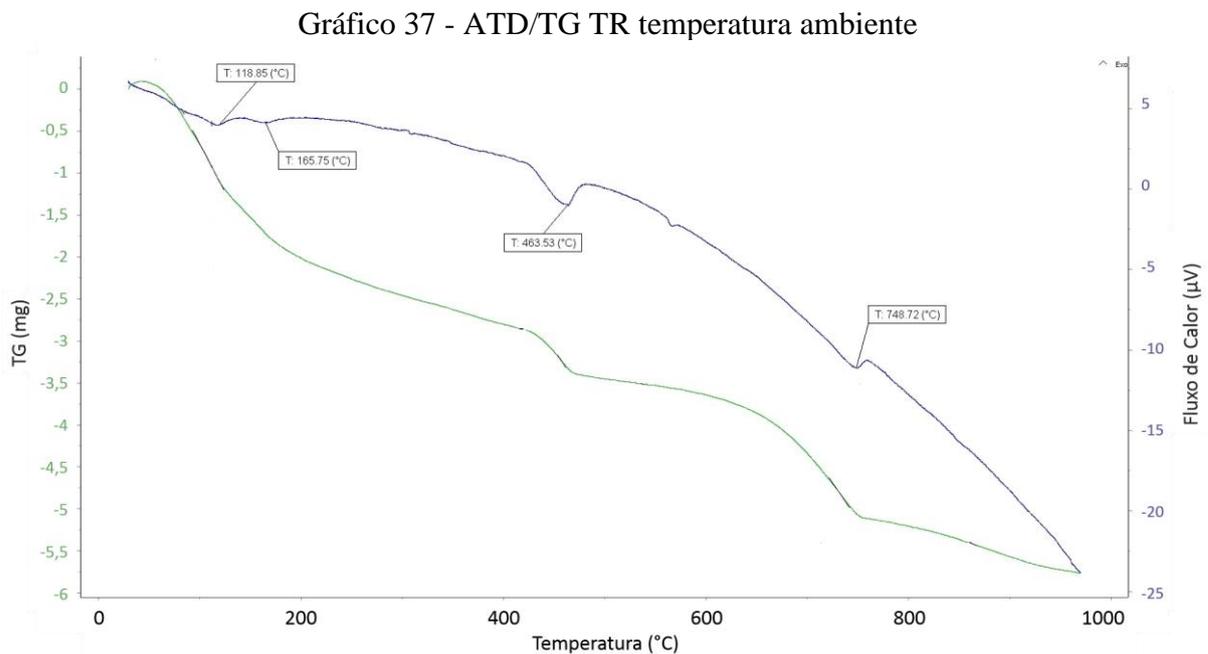
6.8 ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (ATD/TG)

A partir dos resultados das análises termodiferencial e termogravimétrica, mostrados nos Gráficos 37 a 48, é possível observar que os três traços apresentaram um comportamento similar durante o ensaio.

Até 180°C a curva de perda de massa apresenta uma inclinação mais acentuada, que representa a perda inicial da água presente no concreto. Aproximadamente a 450°C ocorre uma reação endotérmica significativa, representada pelo pico na curva da análise termodiferencial. Essa reação corresponde à dissociação do hidróxido de cálcio e causa o aparecimento de uma maior declividade na curva de perda de massa, entre 400°C e 480°C. Por volta de 750°C há um pico endotérmico que representa a descarbonatação da calcita (CaCO_3 que se decompõe em CaO e CO_2), essa reação é associada a uma maior declividade na curva de perda de massa.

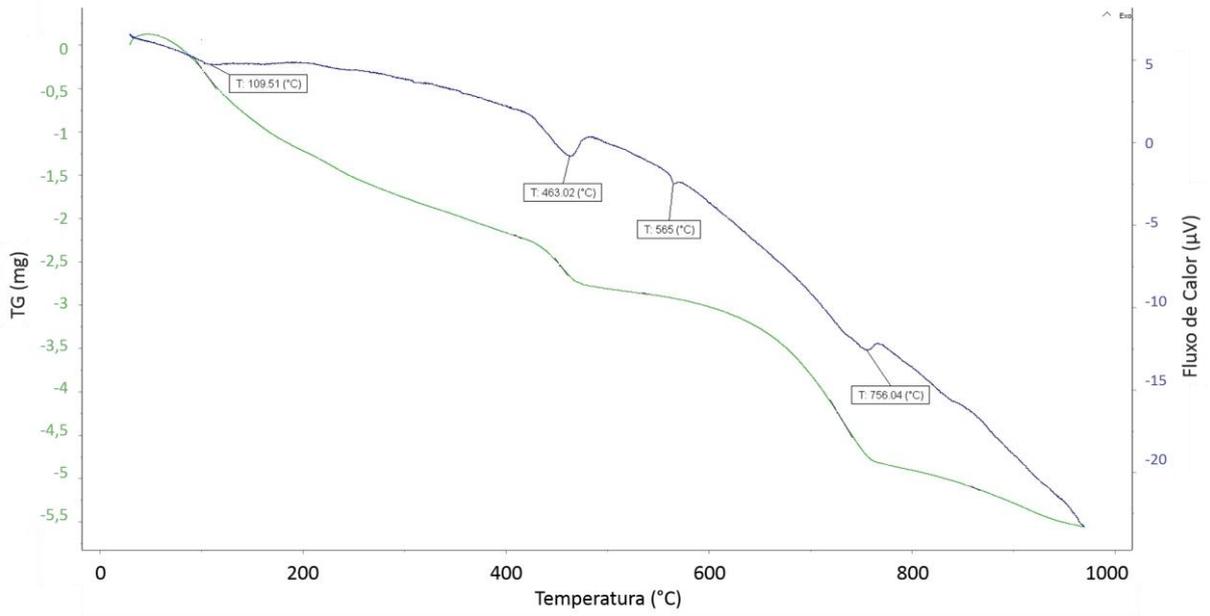
É possível observar que o pico associado à dissociação do hidróxido de cálcio diminui à medida que o teor de substituição do cimento pelo material cerâmico aumenta, confirmando que há uma quantidade menor desse composto nos concretos com pozolana. Conseqüentemente a perda de massa relativa a esse pico, indicada pela inclinação da curva, é menor.

Observa-se também que os termogramas das amostras que foram submetidas a 600°C apresentam picos muito suaves, pois as reações de decomposição dos constituintes que ocorrem até essa faixa de temperatura já haviam ocorrido anteriormente.



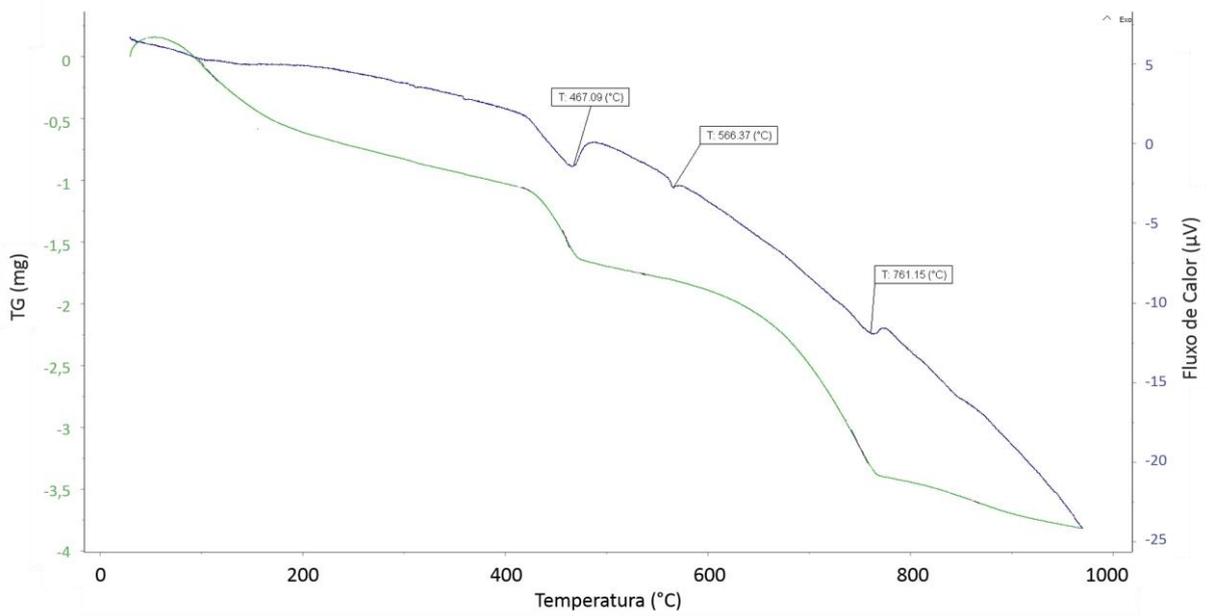
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 38 - ATD/TG TR após exposição a 200°C



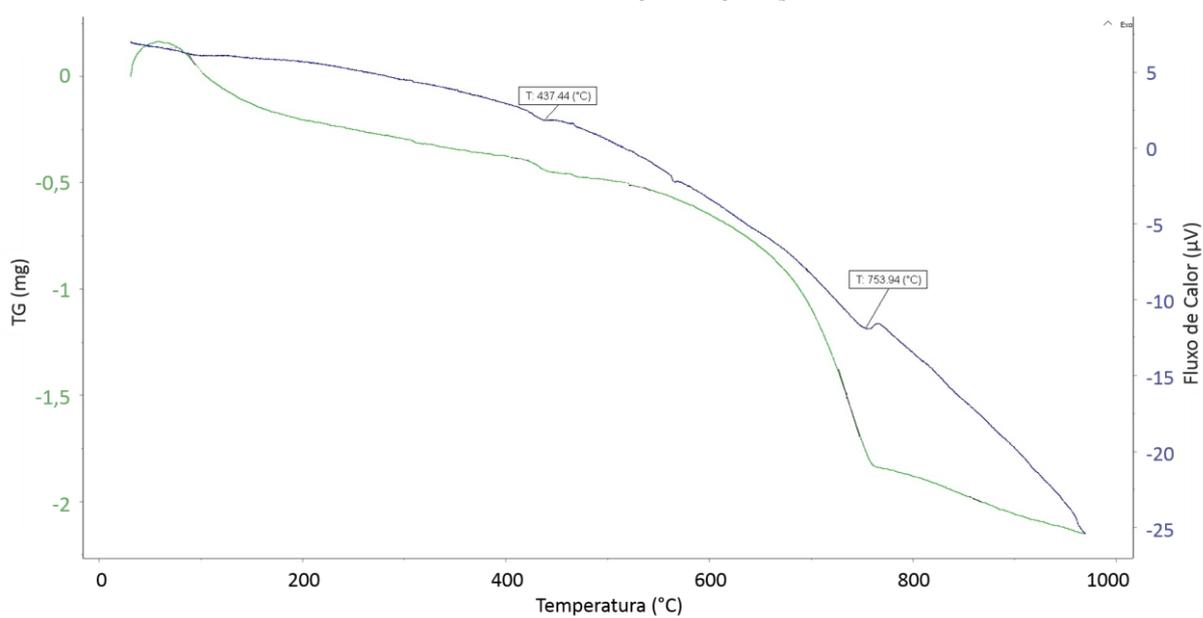
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 39 - ATD/TG TR após exposição a 400°C



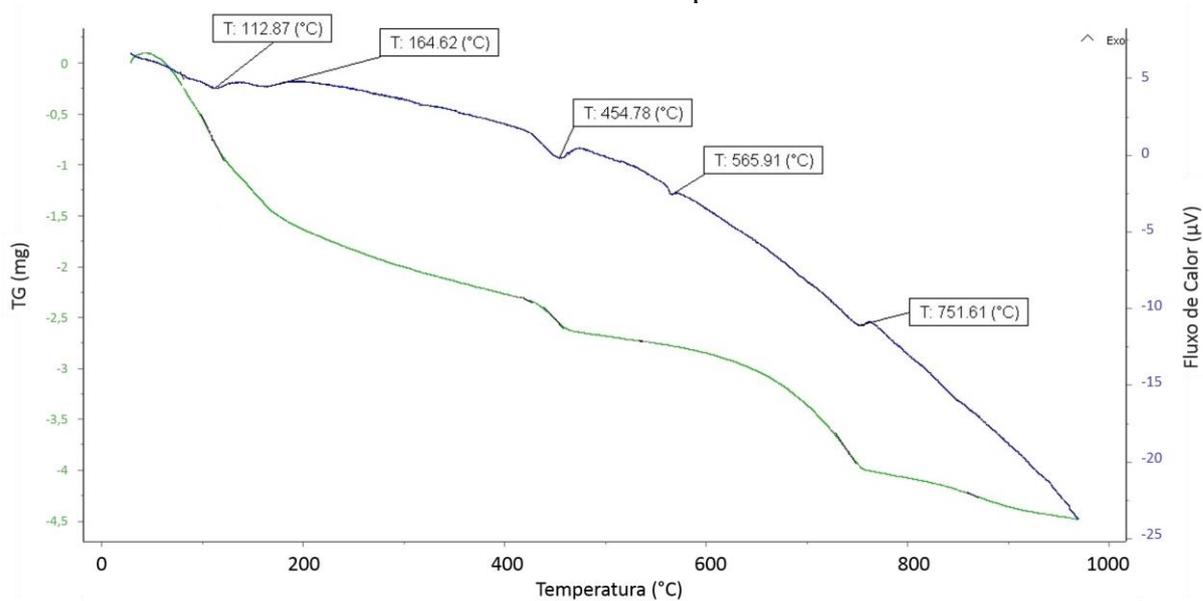
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 40 - ATD/TG TR após exposição a 600°C



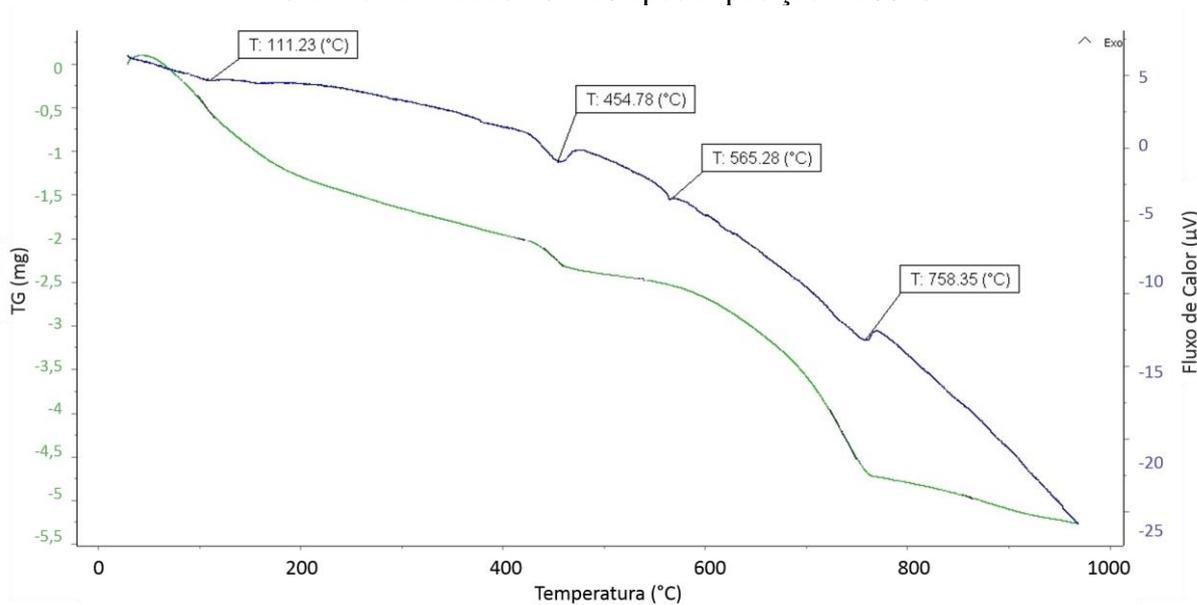
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 41 - ATD/TG T10 temperatura ambiente



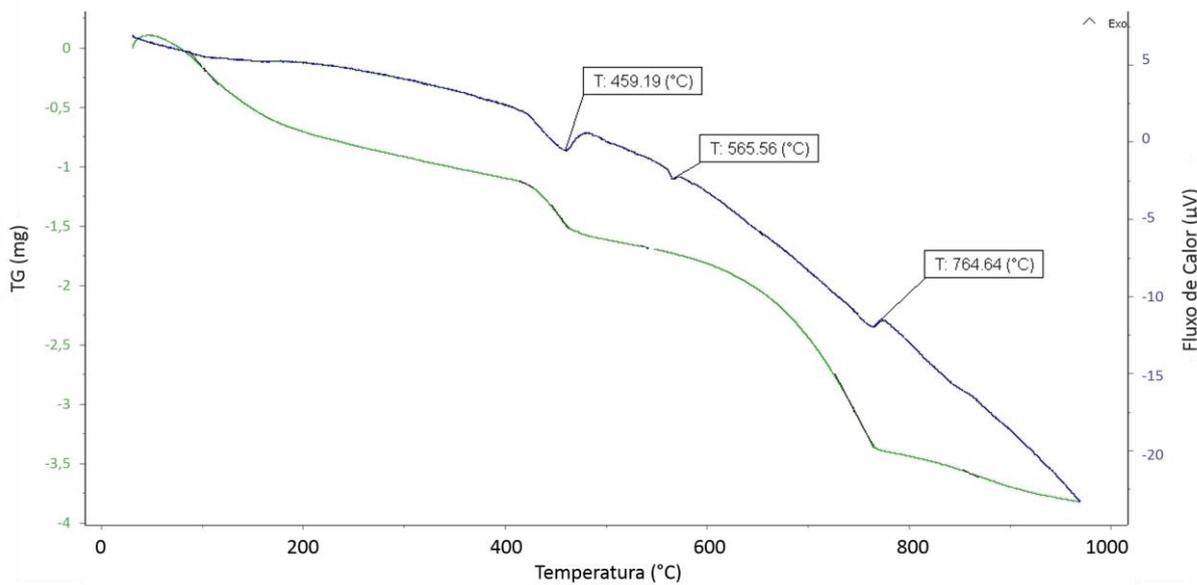
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 42 - ATD/TG T10 após exposição a 200°C



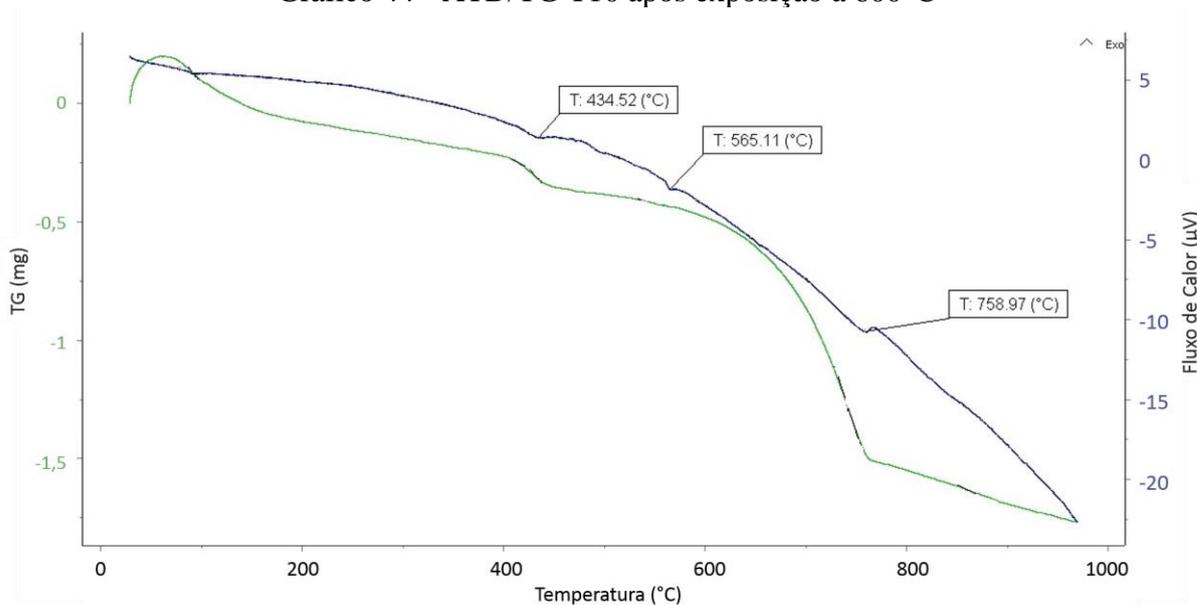
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 43 - ATD/TG T10 após exposição a 400°C



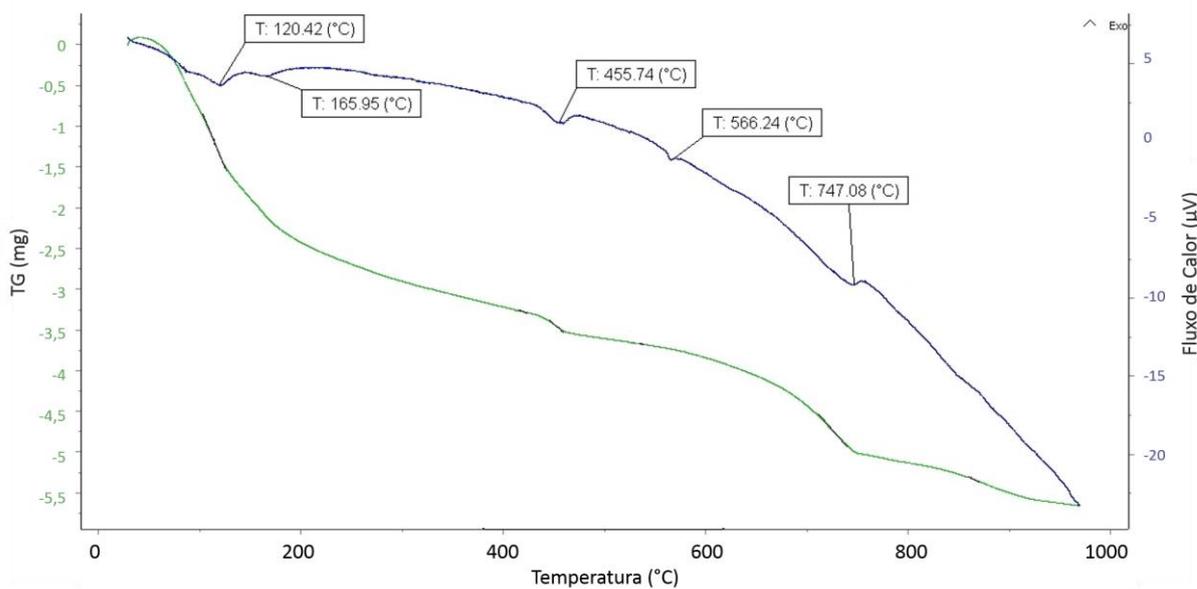
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 44 - ATD/TG T10 após exposição a 600°C



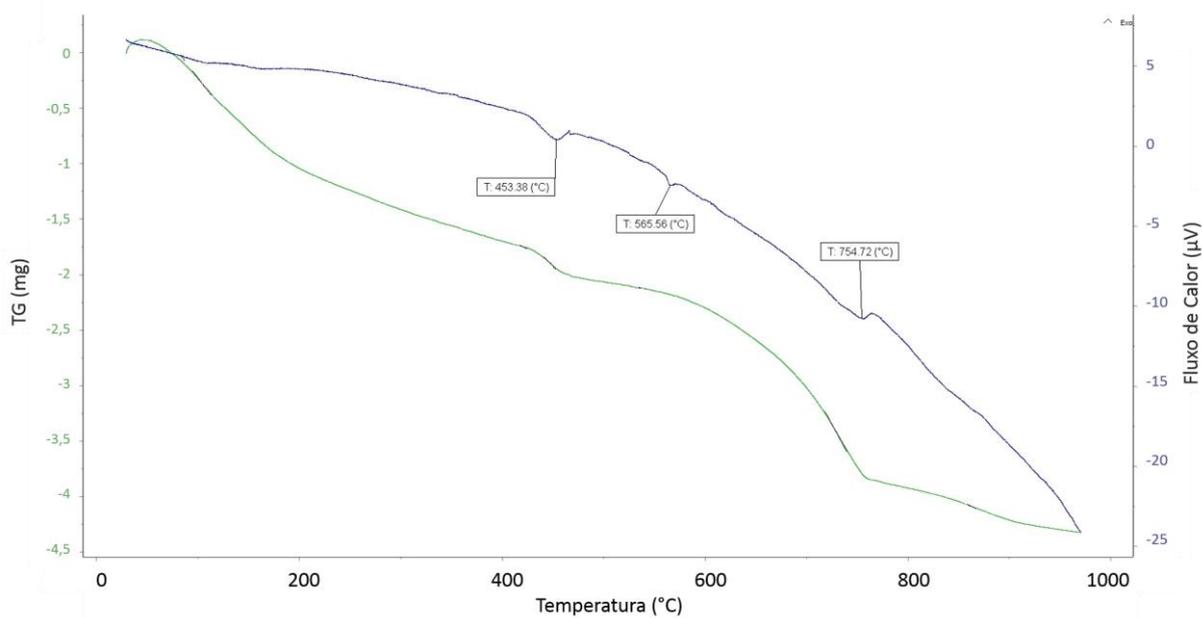
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 45 - ATD/TG T25 temperatura ambiente



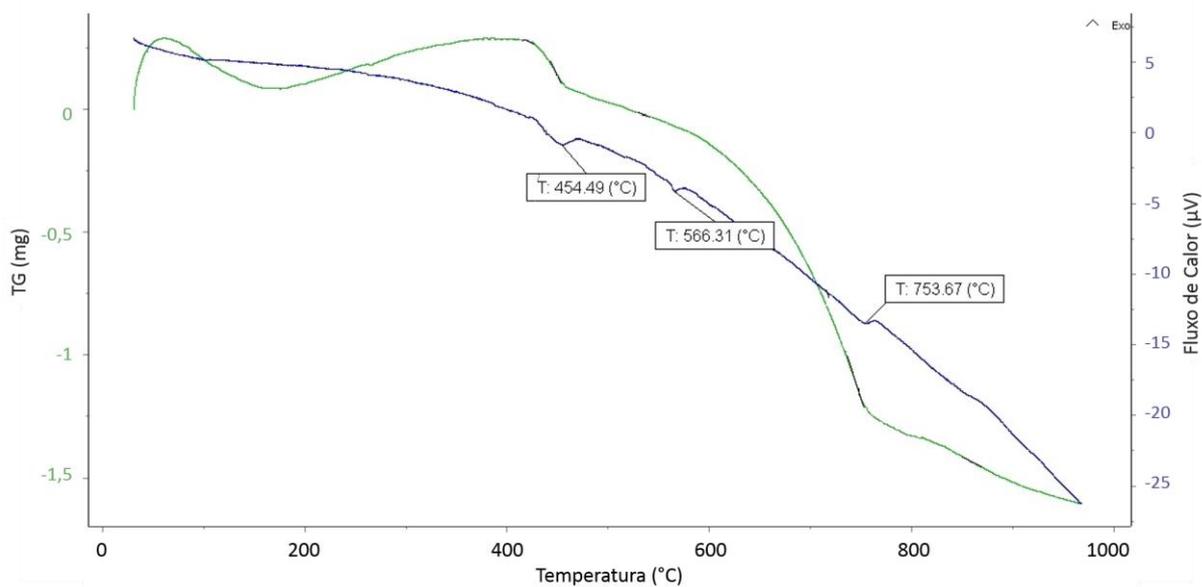
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 46 - ATD/TG T25 após exposição a 200°C



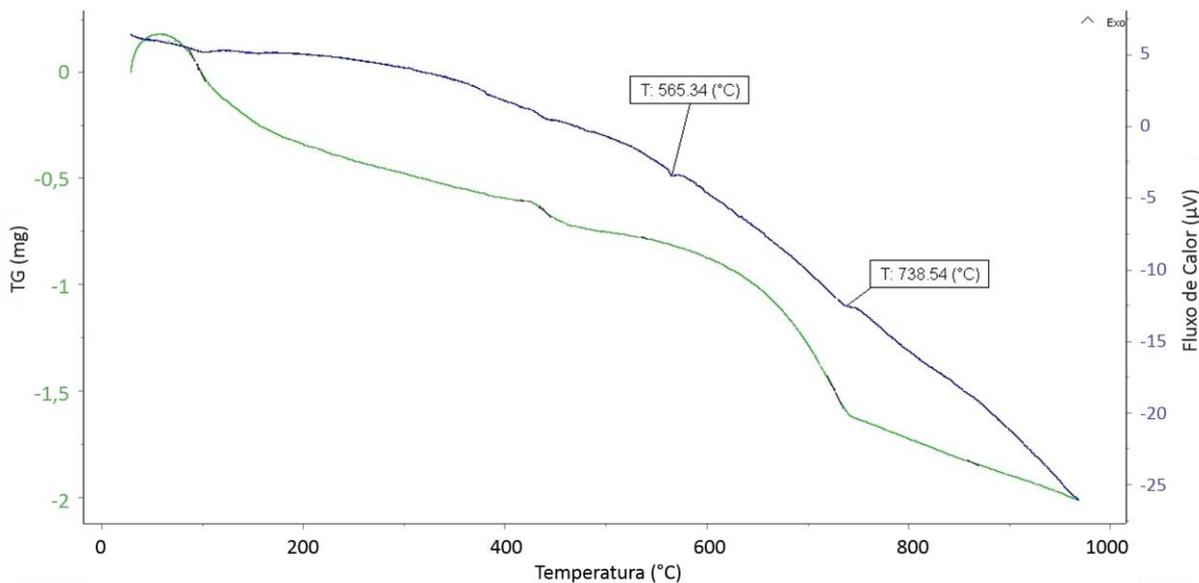
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 47 - ATD/TG T25 após exposição a 400°C



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 48 - ATD/TG T25 após exposição a 600°C



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

6.9 ANÁLISE VISUAL

As Figuras 28 a 31 mostram os corpos de prova em temperatura ambiente e após a submissão a 200°C, 400°C e 600°C, respectivamente. É possível observar que, para os três traços, as fissuras são perceptíveis apenas nos corpos de prova que foram submetidos à temperatura de 600°C.

Figura 28 - Corpos de prova em temperatura ambiente

(a) TR



(b) T10



(c) T25



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 29 - Corpos de prova após a exposição a 200°C

(a) TR



(b) T10



(c) T25



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 30 - Corpos de prova após a exposição a 400°C

(a) TR



(b) T10



(c) T25



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 31 - Corpos de prova após a exposição a 600°C

(a) TR



(b) T10



(c) T25



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A cerâmica vermelha apresenta um índice de desempenho com cimento de 98% e índice de atividade pozolânica com cal de 6,3 MPa. Ambos os valores atendem aos requisitos da NBR 12653 (2014), o que torna esse material adequado para uso como pozolana em compósitos de cimento Portland.
- A adição de cerâmica vermelha influencia a consistência do concreto. Apesar do aumento da dosagem de aditivo superplastificante, os concretos com material cerâmico apresentaram menor abatimento. Essa alteração na consistência é decorrente da maior superfície específica da cerâmica em relação à do cimento, o que faz com que a quantidade de água necessária para envolver os grãos de cerâmica seja maior.
- Os resultados de massa específica da amostra seca não apresentaram diferenças significativas entre os traços para todas as temperaturas estudadas. Pode-se concluir que a tendência de diminuição da massa específica do concreto devido à substituição do cimento por um material com menor massa específica foi compensada pela tendência de aumento por causa do refinamento do tamanho dos poros ocasionado pela adição de pozolana, resultando em diferenças insignificantes para todas as temperaturas analisadas.
- Há uma tendência de diminuição da massa específica da amostra seca com o aumento da temperatura. Isso ocorre devido à perda de massa e ao aumento da porosidade ocasionados pelo aquecimento.
- Quanto ao índice de vazios e à absorção, os traços T10 e T25 apresentaram os menores valores para a temperatura ambiente e o T10 o menor valor para 200°C. Os traços com adição de material cerâmico apresentam menores valores para essas propriedades por causa da diminuição do volume dos poros permeáveis devido ao refinamento do tamanho dos poros ocasionado pela adição de pozolana. Já para as temperaturas de 400°C e 600°C não houve diferença entre os traços para ambas as propriedades devido ao fato de que, para essas temperaturas, o nível de fissuração do concreto é mais alto e os poros se encontram interligados.
- O índice de vazios e a absorção aumentam com o aumento da temperatura devido ao aumento da porosidade decorrente do processo de decomposição dos produtos de hidratação e ao aumento da fissuração do concreto com o aquecimento. Esse

aumento é mais intenso até 200°C, pois até essa temperatura o concreto perde umidade rapidamente devido à perda da água livre, que ocorre até 80°C, e à perda da água capilar e fisicamente adsorvida, que ocorre de 80°C a 200°C, ocasionando um aumento mais acentuado da porosidade.

- A velocidade de propagação de onda ultrassônica em temperatura ambiente é maior para o traço T25, seguido pelo T10 e TR. A velocidade tende a decrescer com o aumento do índice de vazios, por essa razão os traços com adição de cerâmica e consequente refinamento do tamanho dos poros apresentam valores maiores. Nas demais temperaturas analisadas não houve diferença entre os resultados dos três traços.
- As resistências à compressão na temperatura ambiente nas idades de 28, 63 e 91 dias não apresentaram diferenças entre os três traços. Isso demonstra que o ganho de resistência decorrente da reação pozolânica e do refinamento do tamanho dos poros e dos grãos causado pela adição do material cerâmico não supera significativamente a perda decorrente da redução do consumo de cimento. No entanto, entre 63 e 91 dias o traço T10 apresentou um aumento de resistência maior que os traços TR e T25, indicando que o teor de substituição de 10% é mais eficaz que o de 25% quanto à resistência à compressão, considerando idades mais avançadas.
- Para a temperatura de 200°C o traço TR apresentou o maior resultado de resistência à compressão e para as temperaturas de 400°C e 600°C o maior resultado foi do traço T10, logo o melhor desempenho após o aquecimento foi do concreto com 10% de substituição do cimento pelo material cerâmico.
- Entre 200°C e 400°C o traço TR apresenta uma queda mais acentuada na resistência à compressão devido a decomposição do hidróxido de cálcio em cal e vapor de água, que leva a danos decorrentes da expansão da cal durante o resfriamento, o que gera aumento da fissuração, resultando em perda de resistência.
- Não houve diferenças significativas entre o módulo de elasticidade dos três traços para todas as temperaturas analisadas, indicando que a adição de cerâmica vermelha não influencia a rigidez do concreto, nem na temperatura ambiente, nem após a exposição a temperaturas elevadas.
- O módulo de elasticidade é mais sensível ao aumento da temperatura que a resistência à compressão, atingindo valores relativos mais baixos após o aquecimento.

- De um modo geral, o traço T10 apresentou menores valores de perda de massa. Isso ocorre pois o processo de refinamento do tamanho dos poros decorrente da adição de pozolana reduz a porosidade do concreto, dificultando a liberação de vapor e conseqüentemente a perda de massa durante o aquecimento.
- A perda de massa é mais acentuada até 200°C pois o concreto perde umidade rapidamente devido à perda da água livre, que ocorre até 80°C, e à perda da água capilar e fisicamente adsorvida, que ocorre de 80°C a 200°C. Entre 200°C e 600°C a taxa de perda de massa diminui, pois está relacionada principalmente à decomposição do hidróxido de cálcio e à evaporação da água quimicamente combinada aos silicatos de cálcio hidratados.
- Os termogramas de ATD/TG indicam que a perda de massa associada à dissociação do hidróxido de cálcio diminui à medida que o teor de substituição do cimento pelo material cerâmico aumenta, confirmando que há uma quantidade menor desse composto nos concretos com pozolana.
- As fissuras são perceptíveis a partir da análise visual apenas nos corpos de prova que foram submetidos à temperatura de 600°C para os três traços analisados.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que a substituição parcial do cimento pela cerâmica vermelha é tecnicamente viável para concretos expostos a temperaturas elevadas, sendo que, de um modo geral, o teor de substituição de 10% é o mais adequado. Dessa forma, a utilização da cerâmica vermelha em concretos expostos a temperaturas elevadas se constitui em uma maneira de diminuir a deposição inadequada de resíduos, a exploração de recursos não renováveis e os impactos ambientais causados pela fabricação do cimento Portland, melhorando o desempenho do concreto após o aquecimento.

7.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Levando-se em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se sugerir como temas para pesquisas futuras:

- Analisar as propriedades do concreto com outros teores de substituição do cimento pela cerâmica vermelha, principalmente entre 10% e 25%, a fim de determinar o teor de substituição mais adequado.
- Analisar as propriedades do concreto com teores de 10% e 25% de substituição variando a dosagem do aditivo para manter o mesmo abatimento.

- Confeccionar concreto com substituição do cimento por algum material pozolânico amplamente utilizado, a fim de possibilitar a comparação entre as reatividades dos materiais e a influência de cada um nas propriedades do concreto.
- Analisar as propriedades e microestrutura do concreto com e sem adição de cerâmica vermelha após a exposição a temperaturas acima de 600°C, temperaturas nas quais os efeitos térmicos são mais acentuados.
- Analisar as alterações microestruturais do concreto através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após a exposição a temperaturas elevadas.
- Realizar porosimetria por intrusão de mercúrio para comparar a distribuição do tamanho dos poros nas pastas de cimento com e sem adição de material cerâmico, antes e após a exposição térmica.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Fluxogramas**. São Paulo. Disponível em: < <https://abceram.org.br/fluxograma/>>. Acesso em: 18 de out. de 2021.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: 2021.
- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 232.2R-03: Use of Fly Ash in Concrete**. Farmington Hills (EUA), 2003.
- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 234R-06: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete**. Farmington Hills (EUA), 2006.
- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Concrete Terminology — 2018**. Farmington Hills (EUA), 2018.
- AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. 1 ed. Nova York (EUA): E & FN Spon, 1998. 591 p.
- ANDRADES, R. C.; NEVES, R. F.; DIAZ, F. R. V.; JÚNIOR, A. H. M. Influence of Alkalinity on the Synthesis of Zeolite A and Hydroxysodalite from Metakaolin. **Journal of Nano Research**, v. 61, p. 51-60, Suíça, 2020.
- ANICER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Dados do Setor**. Rio de Janeiro. Disponível em: < <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>>. Acesso em: 18 de out. de 2021.
- ASHIK, M. M.; GOMATHI, D. **Strength Properties of Concrete Using Metakaolin**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 6, n. 11, p. 149-152, Nova Delhi, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 2021.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Material pozolânicos –Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation C125 - 13a: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. West Conshohocken (EUA), 2013.

BACCELLI JÚNIOR, G. **Avaliação do Processo Industrial da Cerâmica Vermelha na Região do Seridó – RN**. Tese de Doutorado. Natal: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010. 200 p.

BARBOSA, C. T. **A origem do quartzo green gold: tratamento e ambiente geológico**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2012. 133 p.

BEAUNDOIN, J.; ODLER, I. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. In: HEWLETT, P. C.; LISKA, M. (Ed.) **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5 ed. Oxford: Elsevier, 2019. cap. 9. p. 157-250.

BELCHIOR, W, M. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos com substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos**. Dissertação de Mestrado. Manaus: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, 2017. 115 p.

BLACK, L. Low clinker cement as a sustainable construction material. In: KHATIB, J. M. (Ed.) **Sustainability of Construction Materials**. 2 ed. Amsterdã (Holanda): Elsevier, 2016. cap. 17. p. 415-457.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030**. Brasília: MME, 2011.

BYE, G. **Portland Cement**. 3 ed. Londres (Inglaterra): ICE Publishing, 2011.

CACHEPA, M. M. **Mitigação da reação álcali-agregado em concreto com o emprego de resíduo de cerâmica vermelha e metacaulim**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2017. 134 p.

CARVALHO, C. M. **Caracterização de resíduos da indústria cerâmica e seu emprego em argamassas de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. João Pessoa: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, 2016. 100 p.

CASTRO, A. L.; SANTOS, R. F. C.; GONÇALVES, K. M.; QUARCIONI, V. A. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 28-39, Jan./Mar., 2017.

CEMBUREAU. **Activity Report 2020**. Bruxelas: 2021.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Tese de Doutorado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 191 p.

DEMIREL, B.; KELESTEMUR, K. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. **Fire Safety Journal**, v. 45, p. 385–391, 2010.

DETWILER, R. J.; BHATTY, J. I.; BHATTACHARJA, S. **Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements**. Research and Development Bulletin RD112T. Skokie (EUA): Portland Cement Association, 1996. 96p.

ELIAS, H. B. Q. **Diagnóstico dos resíduos de construção e demolição para elaboração e implantação da Gestão Integrada no município de Patrocínio-MG**. Dissertação (mestrado). Ribeirão Preto: Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade de Ribeirão Preto, 2006. 99 p.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling**. State-of-art report. Bulletin 38. Lausanne, 2007.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 4. p. 639-344, out. dez. 2007.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, Varsóvia, v. 61, n. 1, 2013.

HANSEN, D. M.; BREHM, F. A.; MORAES, C. A. M.; KULAKOWSKI, M. P. **Aplicação de resíduo cerâmico calcinado como pozolana: a review**. In: 6º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 6, 2015, São José dos Campos.

JERÔNIMO, V. L. **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 207 p.

KHOURY, P. G. A.; ANDERBERG, Y. **Fire Safety Design – Concrete Spalling Review**. Estocolmo: Swedish National Road Administration, 2000.

KHURRAM, N.; KHAN, K.; SALEEM, M. U.; AMIN, M. N.; AKMAL, U. Effect of Elevated Temperatures on Mortar with Naturally Occurring Volcanic Ash and Its Blend with Electric Arc Furnace Slag. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, Londres, 2018.

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials**, EB001, 15 ed. Skokie (EUA): Portland Cement Association, 2011. 460 p.

KURDOWSKI, W. **Cement and Concrete Chemistry**. Londres: Springer, 2014.

LEWIS, R. C. Silica Fume In: BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYAERT, E. (Ed.) **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials**. Cham (Suíça): Springer Nature, 2018. cap. 3. p. 99-122. RILEM State-of-the-Art Reports.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 241 p.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. 2 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2004.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 1996.

MARQUES NETO, J. C. **Diagnóstico para estudo de gestão dos resíduos de construção e demolição do município de São Carlos – SP**. Dissertação Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

MARQUES, O. B.; OLIVEIRA, R. M. S; PICANÇO, A. P. Resíduos de construção civil: geração e alternativas para reciclagem em um canteiro de obras de pequeno porte. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 2, p. 143-156, mar./abr. 2013.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. Pozzolanas and Pozzolanic Materials. In: HEWLETT, P. C.; LISKA, M. (Ed.) **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5 ed. Oxford: Elsevier, 2019. cap. 9. p. 363-468.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 134 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MORSYA, M. M.; SHEBLA, S. S.; RASHADB, A. M. Effect of fire on microstructure and mechanical properties of blended cement pastes containing metakaolin and silica fume. **ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)**, v. 9, n. 2, p. 93-105, 2008.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39, Março/Abril, 2001.

MURRAY, H. H. **Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskitesepiolite, and Common Clays**. 1 ed. Amsterdã (Holanda): Elsevier Science, 2007. 188 p.

MURTHY, N. K.; RAO, A. V. N.; REDDY, M. V. S.; PAMESH, P. **The Influence of Metakaolin on the Modulus of Elasticity of Concrete**. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**, v. 2, n. 11, p. 18-23, nov. 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NINCE, A. A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 300 p.

PEÇANHA JUNIOR, L. A. F. **Reformulação de Massa Cerâmica para Telhas do Município de Campos dos Goytacazes**. Dissertação de Mestrado. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy, 2006.

POON, C.; AZHAR, S.; ANSON, M.; WONG, Y. Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 83–89, Londres, 2003.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 320 p.

QIAN, X.; LI, Z. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1607 - 1611, 2001.

RILEM - RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES. **Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures - modelling and applications. Part 1: Introduction - General presentation.** Viena (Áustria): 2007.

RILEM - RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES. **RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 4: Tensile strength.** Viena (Áustria): 2000.

SAAD, A. Z.; TRZASKOS, B.; VASCONCELLOS, E. M. G. Caracterização Mineral e Tecnológica de Resíduo do Beneficiamento de Arenitos da Formação Furnas: Estudo de Caso Areal Costa, Campo Largo – PR. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 73 - 87, 2019.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2 ed. V. 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese de Doutorado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 267 p.

SHETTY, M. S. **Concrete Technology Theory and Practice.** 6 ed. Nova Déli (Índia): S. Chand & Company Ltd., 2005. 624 p.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials.** Berlim (Alemanha): Springer, 2011. 287 p. Engineering Materials.

SIDERIS, K.; JUSTNES, H.; SOUTSOS, M.; SUI, T. Fly Ash. In: BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYAERT, E. (Ed.) **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials.** Cham (Suíça): Springer Nature, 2018. cap. 2. p. 55-98. RILEM State-of-the-Art Reports.

SIKA. **Ficha do Produto - Sika ViscoCrete 3535 CB.** Osasco, 2014.

SIKA. **Ficha Técnica de Produto - Sikament RM-300.** Osasco, 2019.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSSEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, Washington, D. C., v. 74, p. 211-278, 2012.

SONEBI, M.; AMMAR, Y.; DIEDERICH, P. Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction. In: KHATIB, J. M. (Ed.) **Sustainability of Construction Materials**. 2 ed. Amsterdã (Holanda): Elsevier, 2016. cap. 15. p. 371-396.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 203 p.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Revista Engenharia Civil – UM**, n. 15, Braga, 2012.

TANYILDIZI, H.; COSKUN, A. Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2124–2129, Londres, 2008.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B. **Influence of Rice Husk Ash in Mechanical Characteristics of Concrete**. In: IV International ACI/CANMET Conference on quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing, 2005, Olinda.

TAVARES, L. P. M. **Levantamento e análise da deposição e destinação dos resíduos da construção civil em Ituiutaba, MG**. Dissertação (Mestrado). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007. 139 p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2 ed. Londres: Thomas Telford, 1997.

THOMAS, M. **Supplementary Cementing Materials in Concrete**. 1 ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2013. 179 p.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**. Paris: 2017.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1537 – 1544, 1996.

XARGAY, H.; RIPANI, M.; SAMBATARO, L.; FOLINO, P. **Degradación del hormigón frente a altas temperaturas**. In: Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 2016, Buenos Aires.

YE, G.; HUANG, H.; TUAN, N. V. Rice Husk Ash. In: BELIE, N.; SOUTSOS, M.; GRUYAERT, E. (Ed.) **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials**. Cham (Suíça): Springer Nature, 2018. cap. 8. p. 283-302. RILEM State-of-the-Art Reports.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico**. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1993. 233 p.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrografia, Universidade de São Paulo, 1989. 191 p.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 6, p. 629 – 636, 1996.

ZHANG, Q.; YE, G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 1010, p. 153 – 158, 2012.

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA

Tabela A-1 – Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção

CP	TR			T10			T25		
	ρ_s (g/cm ³)	IV (%)	A (%)	ρ_s (g/cm ³)	IV (%)	A (%)	ρ_s (g/cm ³)	IV (%)	A (%)
TEMPERATURA AMBIENTE									
1	2,38	1,26	0,53	2,38	0,79	0,33	2,41	0,83	0,35
2	2,4	1,27	0,53	2,41	1,01	0,42	2,38	0,86	0,36
3	2,41	1,2	0,5	2,4	0,76	0,32	2,41	0,8	0,33
4	2,44	1,21	0,5	2,37	0,78	0,33	2,39	0,83	0,35
5	2,41	1,26	0,52	2,41	0,66	0,27	2,4	0,77	0,32
6	2,42	1,32	0,55	2,4	0,75	0,31	2,39	0,77	0,32
7	2,4	1,28	0,53	2,43	0,73	0,3	2,37	0,71	0,3
8	2,42	1,3	0,54	2,44	0,71	0,29	2,44	0,71	0,29
9	2,4	1,37	0,57	2,42	0,81	0,33	2,42	0,88	0,36
10	2,42	1,34	0,56	2,42	0,8	0,33	2,39	0,94	0,39
11	2,4	1,29	0,54	2,42	0,74	0,31	2,39	0,95	0,4
12	2,41	1,23	0,51	2,41	0,81	0,34	2,39	0,91	0,38
13	2,43	1,25	0,51	2,38	0,79	0,33	2,41	0,89	0,37
14	2,41	1,23	0,51	2,41	0,83	0,34	2,41	0,91	0,38
15	2,42	1,37	0,56	2,41	0,82	0,34	2,4	0,9	0,38
16	2,41	1,33	0,55	2,37	0,86	0,36	2,4	0,82	0,34
TEMPERATURA - 200°C									
11	2,22	14,95	6,75	2,21	14,03	6,35	2,24	15,17	6,78
12	2,18	15,13	6,96	2,25	13,29	5,92	2,25	15,42	6,84
13	2,27	14,94	6,59	2,22	13,5	6,09	2,23	14,86	6,68
TEMPERATURA - 400°C									
11	2,21	19,48	8,83	2,24	18,04	8,05	2,2	18,83	8,55
12	2,23	18,68	8,36	2,17	18,56	8,53	2,21	18,73	8,49
13	2,26	17,31	7,66	2,19	18,2	8,3	2,19	19,04	8,68
TEMPERATURA - 600°C									
11	2,2	21,19	9,61	2,22	21,31	9,6	2,13	23,12	10,84
12	2,17	21,18	9,75	2,21	21,72	9,85	2,17	21,94	10,13
13	2,15	22,78	10,58				2,17	22,12	10,19

Tabela A-2 – Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA (m/s)							
CP	TR	T10	T25	CP	TR	T10	T25
TEMPERATURA AMBIENTE				TEMPERATURA - 200°C			
1	5000	5540,17	5333,33	1	4338,39	4555,81	5025,13
2	5037,78	5633,8	5509,64	2	4454,34	4444,44	4854,37
3	5012,53	5571,03	5390,84	3	4376,37	4587,16	4926,11
4	5361,93	5479,45	5464,48	4	4597,7		4819,28
5	5000	5449,59	5571,03	5	4796,16	4291,85	4524,89
6	5115,09	5291,01	5602,24	6	4376,37	4073,32	4301,08
7	5037,78	5181,35	5714,29	7	4683,84	4115,23	4608,29
8	5181,35	5291,01	5571,03	8	4504,5	4016,06	4395,6
9	5194,81	5319,15	5586,59	9	5633,8	4016,06	4514,67
10	5235,6	5128,21	5277,04	10	5714,29	4115,23	4434,59
11	5221,93	5263,16	5464,48	11	5540,17	4115,23	4494,38
12	5249,34	5115,09	5555,56	12	5494,51	4123,71	4597,7
13	5361,93	5390,84	5405,41	13	4938,27	5813,95	
14	5235,6	5405,41	5277,04	14	4694,84	5780,35	
15	5194,81	5128,21	5390,84	15	4494,38	5509,64	
16	5235,6	5167,96	5434,78	16	4807,69	5494,51	
TEMPERATURA - 400°C				TEMPERATURA - 600°C			
1	3016,59	2906,98		1	1567,4	1582,28	1643,39
2	2902,76	2915,45		2	1669,45	1531,39	1679,26
3	2853,07	2735,98		3	1578,00	1542,02	1515,15
4	2873,56	2840,91		4	1586,04	1568,63	1566,17
5	2881,84	3086,42	3169,57	5	1619,43	1574,8	1567,4
6	3034,9	2915,45	2945,51	6	1689,19	1536,1	
7	2820,87	2869,44	2758,62	7		1507,16	
8	2853,07	2949,85	2824,86				
9	2967,36	2873,56	2902,76				
10	2824,86	2967,36	2824,86				
11	2747,25	2954,21	2820,87				
12	2770,08	3048,78	2994,01				

Tabela A-3 – Resultados de resistência à compressão

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)							
CP	TR	T10	T25	CP	TR	T10	T25
TEMPERATURA AMBIENTE				TEMPERATURA - 200°C			
20	49,14	49,85	47,68	1	50,65	40,27	34,47
21	58,98	46,86	49,97	2	51,17	35,07	39,57
22	43,24	36,65	44,03	3	42,84	33,07	36,93
23	44,85	48,05	42,56	4	46,34	39,72	39,21
24	51,65	43,44	45,09	5	49,41	38,06	36,6
25	48,61	49,44	42,54	6	50,39	39,72	33,71
26	45,33	48,83	39,02	7	38,87	36,65	33,94
27	48,31	47,2	45,68	8	42,38	42,13	36,63
28	55,84	49,37	51,14	9	44,5	41,88	37,97
29	55,17	50,9	52,06	10	40,91	42,22	37,83
TEMPERATURA - 400°C				TEMPERATURA - 600°C			
1	23,79	31,65	28,54	1	20,48	26,12	21,85
2	24,39	30,49	22,32	2	19,54	24,06	22,20
3	21,20	31,26	26,35	3	13,61	24,36	19,91
4	25,88	30,10	30,94	4	19,22	23,33	19,01
5	28,58	36,40	26,21	5	20,81	22,13	18,80
6	20,06	34,72	25,42	6	22,33	23,87	21,21
7	25,31	32,51	25,91	7	20,70	20,86	18,07
8	29,48	29,43	26,84	8	21,60	21,36	15,81
9	23,81	27,38	28,37	9	17,86	25,84	16,90
10	25,99	32,74	26,77	10	19,24	25,16	15,85

Tabela A-4 – Resultados de módulo de elasticidade

MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)			
CP	TR	T10	T25
TEMPERATURA AMBIENTE			
17	26,87	35,17	34,52
18	32,63	36,35	36,44
19	31,89	40,39	29,23
TEMPERATURA - 200°C			
14	24,07	23,01	23,71
15	23,30	24,39	24,00
16	25,46	22,30	25,15
TEMPERATURA - 400°C			
14	12,54	19,05	9,86
15	14,73	14,17	11,97
16	11,65	12,50	9,79
TEMPERATURA - 600°C			
14	3,78	4,73	4,05
15	4,58	6,30	4,10
16	4,28	4,91	4,58

Tabela A-5 – Resultados de perda de massa

PERDA DE MASSA (%)									
CP	TR	T10	T25	TR	T10	T25	TR	T10	T25
TEMPERATURA – 200°C				TEMPERATURA – 400°C			TEMPERATURA – 600°C		
1	6,64	5,28	5,70	7,84	7,04	7,43	7,54	7,94	8,78
2	5,88	5,23	6,09	7,44	7,46	8,06	8,16	8,10	9,26
3	6,40	5,18	6,12	7,58	7,46	7,62	8,34	7,89	8,77
4	6,24	4,99	6,18	6,73	7,49	7,83	7,93	8,13	9,51
5	6,49	4,96	5,78	7,33	7,20	7,68	8,13	7,92	8,67
6	6,57	4,96	6,06	7,40	7,48	7,57	8,51	7,98	8,52
7	6,09	5,33	6,30	7,65	7,14	8,20	8,35	7,96	9,55
8	6,22	5,42	6,16	7,71	6,81	7,45	8,04	7,96	9,38
9	5,99	5,07	5,59	7,58	7,13	6,90	8,24	7,96	8,52
10	6,16	5,40	5,94	7,33	6,92	7,36	7,63	8,09	8,31
11	5,99	5,56	5,78	7,80	7,07	7,56	7,76	7,89	9,06
12	6,19	5,15	5,84	7,42	7,31	7,53	7,89	8,11	8,42
13	5,92	5,27	5,76	6,88	7,15	7,79	8,48		8,55
14	5,91	5,72	5,51	7,33	7,36	7,75	8,07		8,69
15	6,83	5,79	5,66	7,36	7,54	7,41	8,00		9,23
16	6,83	5,77	5,43	7,60	7,28	7,90	8,06		9,29

APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Tabela B-1 - Massa específica, índice de vazios e absorção – temperatura ambiente

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
ρ_s - amb. (g/cm ³)	1.69	2	45	0.197
IV - amb. (%)	241.88	2	45	<.001
Absorção - amb. (%)	227.07	2	45	<.001

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
ρ_s - amb. (g/cm ³)	0.98	0.406
IV - amb. (%)	0.97	0.328
Absorção - amb. (%)	0.97	0.364

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
ρ_s - amb. (g/cm ³)	1.26	2	45	0.293
IV - amb. (%)	0.81	2	45	0.452
Absorção - amb. (%)	0.73	2	45	0.490

Tukey Post-Hoc Test – IV - amb. (%)				
		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	0.49***	0.44***
	p-value	—	<.001	<.001
T10	Mean difference		—	-0.05
	p-value		—	0.098
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Tukey Post-Hoc Test – Absorção - amb. (%)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	0.20***	0.18***
	p-value	—	< .001	< .001
T10	Mean difference		—	-0.02
	p-value		—	0.081
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Tabela B-2 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 200°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
ρ_s - 200°C (g/cm ³)	0.27	2	6	0.770
IV - 200°C (%)	27.78	2	6	< .001
Absorção - 200°C (%)	14.28	2	6	0.005

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
ρ_s - 200°C (g/cm ³)	0.97	0.891
IV - 200°C (%)	0.96	0.753
Absorção - 200°C (%)	0.95	0.708

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
ρ_s - 200°C (g/cm ³)	2.01	2	6	0.215
IV - 200°C (%)	1.81	2	6	0.242
Absorção - 200°C (%)	0.98	2	6	0.429

Tukey Post-Hoc Test – IV - 200°C (%)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	1.40**	-0.14
	p-value	—	0.002	0.812
T10	Mean difference		—	-1.54**
	p-value		—	0.001
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Tukey Post-Hoc Test – Absorção - 200°C (%)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	0.65**	0.00
	p-value	—	0.009	1.000
T10	Mean difference		—	-0.65**
	p-value		—	0.009
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Tabela B-3 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 400°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
ρ_s - 400°C (g/cm ³)	1.64	2	6	0.270
IV - 400°C (%)	0.64	2	6	0.561
Absorção - 400°C (%)	0.59	2	6	0.584

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
ρ_s - 400°C (g/cm ³)	0.96	0.750
IV - 400°C (%)	0.90	0.279
Absorção - 400°C (%)	0.96	0.805

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
ρ_s - 400°C (g/cm ³)	2.12	2	6	0.201
IV - 400°C (%)	4.10	2	6	0.075
Absorção - 400°C (%)	2.66	2	6	0.149

Tabela B-4 - Massa específica, índice de vazios e absorção – 600°C

One-Way ANOVA (Fisher's)

	F	df1	df2	p
ρ_s - 600°C (g/cm ³)	4.37	2	5	0.080
IV - 600°C (%)	1.09	2	5	0.406
Absorção - 600°C (%)	1.58	2	5	0.294

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
ρ_s - 600°C (g/cm ³)	0.95	0.703
IV - 600°C (%)	0.85	0.086
Absorção - 600°C (%)	0.86	0.117

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
ρ_s - 600°C (g/cm ³)	1.40	2	5	0.329
IV - 600°C (%)	2.61	2	5	0.167
Absorção - 600°C (%)	2.15	2	5	0.212

Tabela B-5 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – temperatura ambiente

One-Way ANOVA (Fisher's)

	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - amb. (m/s)	19.20	2	45	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Velocidade ultrassom - amb. (m/s)	0.97	0.189

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - amb. (m/s)	1.69	2	45	0.195

Tukey Post-Hoc Test – Velocidade ultrassom - amb. (m/s)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	-	-
	p-value	—	167.46**	304.53***
T10	Mean difference		—	-137.07*
	p-value		—	0.021
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Tabela B-6 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 200°C

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Velocidade ultrassom - 200°C (m/s)	0.88	< .001

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Kruskal-Wallis

	χ^2	df	p
Velocidade ultrassom - 200°C (m/s)	3.97	2	0.137

Pairwise comparisons (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) - Velocidade ultrassom - 200°C (m/s)

		W	p
TR	T10	-2.66	0.145
TR	T25	-0.99	0.766
T10	T25	1.86	0.385

Tabela B-7 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 400°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - 400°C (m/s)	0.54	2	29	0.588

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Velocidade ultrassom - 400°C (m/s)	0.97	0.499

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - 400°C (m/s)	0.73	2	29	0.491

Tabela B-8 – Velocidade de propagação de onda ultrassônica – 600°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - 600°C (m/s)	3.49	2	15	0.057

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Velocidade ultrassom - 600°C (m/s)	0.97	0.789

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Velocidade ultrassom - 600°C (m/s)	3.32	2	15	0.064

Tabela B-9 – Resistência à compressão – temperatura ambiente

One-Way ANOVA (Fisher's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - amb. (MPa)	2.21	2	27	0.129

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Resistência à compressão - amb. (MPa)	0.99	0.990

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - amb. (MPa)	0.71	2	27	0.499

Tabela B-10 – Resistência à compressão – 200°C

One-Way ANOVA (Welch's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 200°C (MPa)	16.27	2	16.53	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Resistência à compressão - 200°C (MPa)	0.97	0.650

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 200°C (MPa)	4.87	2	27	0.016

Games-Howell Post-Hoc Test – Resistência à compressão - 200°C (MPa)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	6.87**	9.06***
	p-value	—	0.003	< .001
T10	Mean difference		—	2.19
	p-value		—	0.187
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Tabela B-11 – Resistência à compressão – 400°C

One-Way ANOVA (Fisher's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 400°C (MPa)	18.19	2	27	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
Resistência à compressão - 400°C (MPa)	0.96	0.314

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 400°C (MPa)	0.42	2	27	0.661

Tukey Post-Hoc Test – Resistência à compressão - 400°C (MPa)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	-6.82***	-1.92
	p-value	—	<.001	0.245
T10	Mean difference		—	4.90***
	p-value		—	<.001
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Tabela B-12 – Resistência à compressão – 600°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 600°C (MPa)	13.64	2	27	<.001

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Resistência à compressão - 600°C (MPa)	0.96	0.250

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 600°C (MPa)	0.27	2	27	0.769

Tukey Post-Hoc Test – Resistência à compressão - 600°C (MPa)				
		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	-4.17***	0.58
	p-value	—	<.001	0.830
T10	Mean difference		—	4.75***
	p-value		—	<.001
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Tabela B-13 – Resistência à compressão – 28 dias

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 28d (MPa)	0.53	2	4	0.624

Normality Test (Shapiro-Wilk)	
	p
Resistência à compressão - 28d (MPa)	0.372

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 28d (MPa)	1.47	2	4	0.332

Tabela B-14 – Resistência à compressão – 63 dias

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 63d (MPa)	1.14	2	5	0.390

Normality Test (Shapiro-Wilk)	
	p
Resistência à compressão - 63d (MPa)	0.513

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 63d (MPa)	2.24	2	5	0.202

Tabela B-15 – Resistência à compressão – 91 dias

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 91d (MPa)	2.99	2	5	0.140

Normality Test (Shapiro-Wilk)	
	W
Resistência à compressão - 91d (MPa)	0.97

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Resistência à compressão - 91d (MPa)	2.03	2	5	0.227

Tabela B-16 – Módulo de elasticidade – temperatura ambiente

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - amb. (GPa)	3.39	2	6	0.103

Normality Test (Shapiro-Wilk)	
	W
Módulo de elasticidade - amb. (GPa)	0.90

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - amb. (GPa)	0.25	2	6	0.789

Tabela B-17 – Módulo de elasticidade – 200°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 200°C (GPa)	1.13	2	6	0.382

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Módulo de elasticidade - 200°C (GPa)	0.86	0.107

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 200°C (GPa)	0.22	2	6	0.812

Tabela B-18 – Módulo de elasticidade – 400°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 400°C (GPa)	3.44	2	6	0.101

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Módulo de elasticidade - 400°C (GPa)	0.92	0.399

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 400°C (GPa)	1.97	2	6	0.219

Tabela B-19 – Módulo de elasticidade – 600°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 600°C (GPa)	2.53	2	6	0.159

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Módulo de elasticidade - 600°C (GPa)	0.86	0.086

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Módulo de elasticidade - 600°C (GPa)	1.71	2	6	0.259

Tabela B-20 – Perda de massa – 200°C

Normality Test (Shapiro-Wilk)			
	W	p	
Perda de massa - 200°C (%)	0.95	0.041	

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Kruskal-Wallis			
	χ^2	df	p
Perda de massa - 200°C (%)	32.24	2	< .001

Pairwise comparisons (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner) - Perda de massa - 200°C (%)			
		W	p
TR	T10	-6.82	< .001
TR	T25	-4.53	0.004
T10	T25	5.70	< .001

Tabela B-21 – Perda de massa – 400°C

One-Way ANOVA (Fisher's)				
	F	df1	df2	p
Perda de massa - 400°C (%)	7.81	2	45	0.001

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Perda de massa - 400°C (%)	0.96	0.139

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)				
	F	df1	df2	p
Perda de massa - 400°C (%)	0.28	2	45	0.760

Tukey Post-Hoc Test – Perda de massa - 400°C (%)				
		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	0.20	-0.19
	p-value	—	0.123	0.136
T10	Mean difference		—	-0.39***
	p-value		—	< .001
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Tabela B-22 – Perda de massa – 600°C

One-Way ANOVA (Welch's)				
	F	df1	df2	p
Perda de massa - 600°C (%)	35.84	2	23.17	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)		
	W	p
Perda de massa - 600°C (%)	0.98	0.769

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Homogeneity of Variances Test (Levene's)

	F	df1	df2	p
Perda de massa - 600°C (%)	13.80	2	41	< .001

Games-Howell Post-Hoc Test – Perda de massa - 600°C (%)

		TR	T10	T25
TR	Mean difference	—	0.08	-0.84***
	p-value	—	0.571	< .001
T10	Mean difference		—	-0.91***
	p-value		—	< .001
T25	Mean difference			—
	p-value			—

Note. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$