

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Cajazeiras-PB
2023

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação da Prof.^a Ma. Raquel Ferreira do Nascimento e Coorientação do Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

B554a Beserra, Lucas Gonçalves.
Avaliação da durabilidade e das propriedades mecânicas de argamassa com baixa porosidade incorporada com cinza de olaria / Lucas Gonçalves Beserra. – 2023.

64f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

Orientador(a): Prof^ª. Ma. Raquel Ferreira do Nascimento
Co-orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

1. Construção civil. 2. Agentes patológicos. 3. Estrutura de concreto. 4. Cinza de olaria. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 624.01(043.2)

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 14 de Julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Raquel Ferreira do Nascimento – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Robson Arruda dos Santos– IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador



Documento assinado digitalmente

LEONARDO DE SOUZA DIAS

Data: 27/07/2023 15:47:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo de Souza Dias– UFPB-*Campus* João Pessoa

Dedico este trabalho ao meu Deus, meus pais, amigos e familiares, pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem sirvo, por ter me ajudado e me guiado para chegar até aqui.

Aos meus pais, Luiz Beserra e Samara Alves, por sempre terem se esforçado para me proporcionar educação de qualidade, apoio e palavras de encorajamento.

Às minhas irmãs, Barbara Luísa, Beatriz, Manuela e Maria Luísa, por serem uma base firme e sólida na qual sempre pude confiar.

À Débora Fernandes, minha fiel companheira, por ser minha auxiliadora e sempre estar comigo, desde o primeiro ao último período, me motivando com palavras e ações de encorajamento.

Aos demais familiares que me prestaram apoio.

Agradeço a todos os professores que me ajudaram a chegar até aqui, em especial à Amanda Costa, por ter me incentivado a buscar os meus sonhos, mesmo quando tudo parecia impossível.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, me apoiando e motivando a chegar até o fim, em especial: Priscila Arruda, Yury Diniz, Gabriel Morais, Fernanda Rolim e Mel Andrade.

Ao Dr. Robson Arruda e à Ma. Raquel Nascimento, por terem contribuído de forma grandiosa em meu aprendizado, tanto na produção deste trabalho como na vida profissional.

Ao José, pela ajuda na execução dos ensaios nos laboratórios do Campus do IFPB.

RESUMO

A durabilidade é um aspecto fundamental em todas as etapas do processo construtivo, desde a fundação até o revestimento, a fim de garantir segurança e conforto. No entanto, estruturas de concreto podem sofrer degradação devido a ataques químicos, físicos e biológicos. Logo, se faz necessário o estudo de métodos que contribuam para um melhor desempenho das estruturas quanto a sua durabilidade. Também, o Brasil é o segundo maior produtor de cerâmica do mundo, e as olarias geram uma grande quantidade de resíduos durante o processo de produção, conhecidos como cinza de olaria, que muitas vezes são descartados de maneira inadequada. Dessa forma, com o intuito de amenizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado das cinzas provenientes de olarias e mitigar os danos acusados pelo ataque de sulfato nas estruturas, esse estudo analisou a influência da cinza como uma adição mineral. Para alcançar esse objetivo, um estudo experimental foi conduzido, o qual envolveu a caracterização dos materiais utilizados, uma avaliação das mudanças dimensionais de amostras de argamassa e uma análise da resistência mecânica. Desse modo, foram analisados traços de argamassas, utilizando o método de empacotamento de partículas, calculado pelo programa Q-mix, contendo 10% e 15% de substituição de massa de cimento por cinza de olaria, sendo submetidas a três ambientes, sendo eles a cura convencional, cura com sulfato de sódio e cura com sulfato de magnésio. Assim, percebeu-se que para a análise de expansão geométrica para 14, 21 e 28 dias as expansões não seguiram um padrão, visto que necessita mais tempo de análise, sendo o melhor traço o de empacotamento de partículas. Para a análise da resistência mecânica aos 7 e 28 dias verificou-se que o traço T10 o mais resistente.

Palavras-chave: Patologia; Ataque por sulfato; Empacotamento de partículas; Durabilidade.

ABSTRACT

Durability is a fundamental aspect in all stages of the construction process, from the foundation to the cladding, in order to guarantee safety and comfort. However, concrete structures can suffer degradation due to chemical, physical and biological attacks. Therefore, it is necessary to study methods that contribute to a better performance of structures regarding their durability. Also, Brazil is the second largest producer of ceramics in the world, and potteries generate a large amount of waste during the production process, known as pottery ash, which is often disposed of improperly. Thus, with the aim of mitigating the environmental impacts caused by improper disposal of ash from brickworks and mitigating the damage caused by sulfate attack on structures, this study analyzed the influence of ash as a mineral addition. To reach this objective, an experimental study was carried out, which involved the characterization of the materials used, an evaluation of the dimensional changes of mortar samples and an analysis of the mechanical resistance. Thus, mortar traces were analyzed, using the particle packing method, calculated by the Q-mix program, containing 10% and 15% of replacement of cement mass by pottery ash, being submitted to three environments, namely the conventional curing, sodium sulfate curing, and magnesium sulfate curing. Thus, it was noticed that for the geometric expansion analysis for 14, 21 and 28 days, the expansions did not follow a pattern, since it requires more analysis time, with the best trace being that of particle packing. For the analysis of the mechanical resistance at 7 and 28 days it was found that the T10 trait was the most resistant.

Keywords: Pathology; Sulphate attack; Particle packing; Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Migrografia de cristais monossulfato hidratado e cristais de etringita.....	22
Figura 2 - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	23
Figura 3 - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.	24
Figura 4 - Causas físicas da deterioração do concreto.	24
Figura 5 - Deterioração do concreto por Reações Químicas.....	25
Figura 6 - Granulometria do cimento CPV-ARI.	32
Figura 7 – Caracterização química do cimento CPV- ARI.....	32
Figura 8 - Granulometria da cinza de olaria.	34
Figura 9 - Faixas do agregado miúdo- Referência de norma.	35
Figura 10 - Faixas do agregado miúdo- Empacotamento de partículas.	35
Figura 11 - Faixas do agregado miúdo- T10 e T15.....	36
Figura 12 - Corpos de prova prismáticos.	39
Figura 13 – Resistências à compressão - traço de referência de norma.	42
Figura 14 – Resistência à compressão - traço empacotamento de partículas.....	43
Figura 15 – Resistência a compressão - traço T10.....	44
Figura 16 – Resistência à compressão - traço T15.....	45
Figura 17 - Expansão média em porcentagem das argamassas de referência da norma.	47
Figura 18 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com empacotamento de partículas.....	49
Figura 19 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T10....	50
Figura 20 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T15....	51
Figura 21 - Amostra de corpos de provas submetidos a cura em cal.	53
Figura 22 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de sódio.....	53
Figura 23 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de magnésio.....	54
Figura 24 - Amostra da formação de compostos oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.....	52
Figura 25 - Amostra da formação de cristais oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova	53

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.	30
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química do cimento Portland.	20
Quadro 2 – Normas utilizadas na caracterização dos materiais.	31
Quadro 3 - Caracterização química da cinza de olaria.....	33
Quadro 4 – Massa específica do agregado miúdo.....	36
Quadro 5 – Massa unitária do agregado miúdo.....	36
Quadro 6 – Medidas do traço TN.....	37
Quadro 7 - Traço de empacotamento de partículas.....	38
Quadro 8 – Medidas do traço TE0.	38
Quadro 9 – Medidas do traço T10.....	38
Quadro 10 – Medidas do traço T10.....	39
Quadro 11 – Normas utilizadas para a cura submersa.	40
Quadro 12 – Normas utilizadas para os ensaios.....	40
Quadro 13 – Esquema do que foi realizado em cada idade de cura.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

CAA – Classes de Agressividade Ambiental

CAD – Concreto com Alto Desempenho

CBV – Cinza de Biomassa Vegetal

DEF - *Delayed Ettringite Formation*

ISO - *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

Na^+ – Íon de sódio

K^+ – Íon de Potássio

Mg^{2+} – Íon de Magnésio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

% – Porcentagem

CO_2 – Dióxido de carbono

C_2S – Silicato bicálcio

C_3S – Silicato tricálcico

C_3A – Aluminato tricálcico

C_4AF – Aluminoferrato tetracíclico

CaO – Óxido de cálcio

SiO_2 – Dióxido de silício

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro(III)

MgO – Óxido de magnésio

SO_3 – Óxido sulfúrico

H_2O – Água

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – Alita

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – Belita

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – Aluminato tricálcio

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – Aluminoferrito de tetracálcio

→ - Indicação de transformação química que produz outras substâncias

SO_4^{2-} - Íons de sulfato

CaOH_2 - Hidróxidos de cálcio

AFm - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado

DS - Diâmetro Mínimo

DI - Diâmetro Máximo

q - Módulo de Distribuição

mm – Milímetro

g – Grama

L - Litro

NaSO_4 - Sulfato de sódio

MgSO - Sulfato de magnético

Ca(OH)_2 - Hidróxido de cálcio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	MICROESTRUTURA DO CONCRETO.....	20
3.1.1	Durabilidade.....	22
3.1.2	Efeito de íons sulfato no concreto	25
3.2	ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO.....	26
3.2.1	Cinza de olaria.....	27
3.3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	27
3.3.1	Método de furnas.....	28
3.3.2	Modelo de Andreasen e Andersen	28
3.3.3	Método de Alfred	29
4	METODOLOGIA	30
4.1	COLETA DE MATERIAIS.....	31
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	31
4.2.1	Cimento.....	31
4.2.2	Cinza de olaria.....	33
4.2.3	Agregado.....	34
4.2.4	Definição do traço	37
4.2.5	Moldagem	39
4.2.6	Cura submersa.....	39
4.2.7	Ensaio no estado endurecido	40
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	42

5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	42
5.2	EXPANSÃO GEOMÉTRICA	47
6	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIA.....	58

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil exerce uma importante função na sociedade, sendo o ramo capaz de imaginar, projetar e executar construções de todos os tamanhos, formatos e materiais possíveis. Dentre os materiais usados, destaca-se o concreto. Conforme Couto *et al.* (2013), o concreto é amplamente considerado o principal material utilizado na construção civil, sendo uma mistura heterogênea composta principalmente por cimento, água e agregados como pedra, areia e outros materiais similares. Além disso, é possível incorporar diversos aditivos para melhorar suas propriedades ou conferir características específicas ao concreto.

Ademais, é fundamental ressaltar que a segurança e o conforto dependem diretamente da seleção apropriada dos materiais de construção. De fato, essa escolha criteriosa representa um dos principais elementos que asseguram a longevidade e resistência da estrutura. Assim, a durabilidade é algo que deve estar presente em todas as etapas do processo construtivo (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Conforme Felipe (2013), a degradação das estruturas de concreto pode acontecer por meio de ataques químicos, físicos e biológicos. Os ataques químicos e físicos podem afetar diretamente a durabilidade da estrutura, podendo causar a degradação do material uma vez que a sua microestrutura é afetada de forma direta.

Também, segundo Mehta e Monteiro (2008), as fases que contêm alumina, bem como o hidróxido de cálcio, contidos no Cimento Portland, são mais vulneráveis ao ataque de íons sulfato, e ambos os hidratos que contêm alumina se convertem à forma altamente sulfata da etringita. Seguidamente, dependendo do tipo de cátion associado à solução de sulfato, Na^+ , K^+ ou Mg^{2+} , tanto o hidróxido de cálcio quanto o C-S-H, presentes na pasta de Cimento Portland hidratada, podem se converter em gipsita pelo ataque por sulfato. Assim, a gipsita e a etringita resultantes de reações químicas entre os compostos de sulfato e os produtos de hidratação do Cimento Portland, causando fissurações devido a expansão, redução de resistência e diminuição de massa devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento.

Paralelo a posição de destaque, Roth e Garcias (2013) falam que a indústria da construção civil ocupa posição de destaque na economia do Brasil, porém apresenta-se como grande geradora de impactos ambientais que resultam na formação de áreas degradadas. Diante disso, a engenharia civil, na mesma proporção que busca aumentar a durabilidade das suas construções, investiga formas para minimizar os danos causados a natureza e, sempre que possível, reaproveitar os insumos capazes de contribuir de forma positiva para o aumento das

propriedades dos materiais. Entre as matérias primas que podem ser utilizadas, encontram-se os resíduos provenientes da indústria de produção de cerâmica e da mineração, como a cinza de olaria.

Tem-se que o Brasil é o segundo maior produtor de cerâmica do mundo. Além disso, as olarias, locais onde os materiais cerâmicos são produzidos, também são conhecidas devido a grande quantidade de resíduos que são gerados durante o processo de produção. Assim, esses despojos são denominados como cinza de olaria, que muitas das vezes são descartados de forma irregular ao meio ambiente. Conforme Costa *et al.* (2020), o descarte inadequado da cinza de olaria pode acarretar graves danos ao meio ambiente, afetando a natureza, o solo, os recursos hídricos e comprometendo a saúde da população local.

Desta forma, para buscar um meio de mitigação do mal causado à natureza devido ao descarte da cinza, investiga-se a sua incrementação na produção de materiais construtivos. Embora os ensaios laboratoriais constatem que adicionar 10% da cinza de olaria no traço de blocos solo-cimento ajudaram a preencher os vazios do material, gerando uma boa viabilidade, ainda são necessários estudos mais aprofundados sobre o tema para mostrar uma efetividade dos benefícios que a adição desse resíduo pode causar em materiais argamassados (ASSUNÇÃO *et al.*, 2019).

Além disso, segundo Beserra (2019), a indústria cimentícia, sendo a produtora do principal componente do concreto, é responsável pela emissão de 88,6% a 92,2% de dióxido de carbono (CO₂). Dessa forma, é notória a sua contribuição para a degradação ambiental. Logo, é preciso realizar estudos nessa área para encontrar maneiras de reduzir a sua medida na produção do concreto.

Adicionalmente, um estudo realizado por Costa *et al.* (2020), na Cidade de Gramado-RS, verificou que as cinzas de olarias não possuem atividade pozolânica. Desta forma, esse material pode ser utilizado como filler, preenchendo vazios, proporcionando benefícios à resistência mecânica e ambientais com a sua reciclagem. No entanto, deve-se realizar mais pesquisas na área a fim de se obter respostas mais específicas quanto a resistência à tração, capacidade de absorção de água e ataques por sulfato.

Dessa forma, Beserra (2019) realizou um estudo com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto produzido com baixo teor de cimento e adição de cinza de olaria, no qual verificou-se que o concreto com adição, sob ataque de sulfato de sódio, obteve uma melhoria na resistência à atuação do sulfato de sódio em comparação ao concreto convencional.

Para o desenvolvimento desse trabalho, o capítulo 2 foi destinado a descrição dos

objetivos. O capítulo 3 está dedicado a revisão da literatura. O capítulo 4 irá apresentar a metodologia usada para a obtenção dos resultados. Seguidamente, o capítulo 5 explanará os resultados, bem como suas respectivas análises. Por fim, o capítulo 6 apresentará as conclusões da pesquisa.

Portanto, esse estudo terá seu foco na verificação dos benefícios que a incorporação da cinza de olaria pode originar em argamassas para concreto, avaliando a capacidade de suportar aos ataques químicos e solicitações físicas que podem ser submetidos durante toda a sua vida útil e como alternativa sustentável no desenvolvimento de concreto.

2 OBJETIVOS

Esse capítulo é destinado aos objetivos da pesquisa proposta.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassa para concreto com substituição parcial do cimento por cinza de olaria.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a influência da adição de cinza de olaria na resistência mecânica de argamassa, com e sem ataque por sulfato;
- compreender a influência da adição de cinza de olaria no controle de expansão da argamassa mediante ataque por sulfato;
- realizar comparação das propriedades das argamassas mediante exposição a ambientes agressivos contendo sulfato de sódio e de magnésio.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MICROESTRUTURA DO CONCRETO.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a microestrutura do concreto é constituída por fases que são de diferentes tipos, tamanhos, quantidades e distribuições, características que possuem influência direta nas propriedades mecânicas, físicas e químicas do material. Dessa forma, entende-se a importância de se realizar estudos nesse segmento, visando a melhoria, criação de novos materiais e técnicas construtivas.

De acordo com Duart (2008), a microestrutura do concreto é formada por três fases, que são: fase agregado, matriz da pasta de cimento e a zona de transição, as quais serão explicadas nos tópicos seguintes:

a) Agregado

A fase agregado é responsável pela massa unitária, modulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. Porém, mesmo sendo a mais resistente das fases, ela não irá possuir, na maioria das vezes, influência direta na resistência do concreto. A dimensão do agregado graúdo, contudo, irá interferir de forma indireta na resistência, visto que quanto mais alongado e achatado for o agregado, mais filme d'água irá ocorrer em sua superfície, enfraquecendo a zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

b) Matriz pasta de cimento

O Cimento Portland possui quatro constituintes principais, sendo eles: Silicato bicálcio (C_2S), silicato tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) e aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), (KIRCHHEIM, 2003).

O Quadro 1 mostra a composição química do Cimento Portland:

Quadro 1 - Composição química do cimento Portland.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
SiO ₂	S	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Al ₂ O ₃	A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Fe ₂ O ₃	F	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
MgO	M	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$	$C_4A_3\bar{S}$
SO ₃	\bar{S}	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	$C_3S_2H_3$

H ₂ O	H	CaSO ₄ .H ₂ O	C $\bar{5}$ H ₂
------------------	---	-------------------------------------	----------------------------

Fonte: Adaptado Mehta e Monteiro (2008)

Quando esses compostos químicos entram em contato com a água, ocorre o processo de hidratação, gerando a formação de cristais (SANTIAGO, 2011).

No entanto, o processo de hidratação do cimento dependerá do seu tipo, da sua finura, da relação água cimento (a/c), da temperatura de cura e dos aditivos usados. (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006).

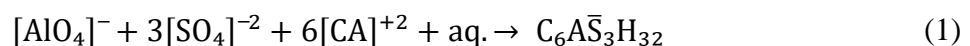
O processo será constituído por reações simultâneas dos compostos anidros com a água, porém, eles possuem velocidade de hidratação diferentes, sendo os aluminatos mais velozes que os silicatos. Assim, tem-se que a perda de consistência e a pega ocorrem devido as reações de aluminatos. Além disso, percebe-se que o resultado das reações químicas entre sulfatos, cálcio, aluminato e íons hidroxila são cristais de etringita primária (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ademais, tem-se que a matriz pasta de cimento é uma mistura heterogênea de partículas, filmes, micro cristais e elementos sólidos, sendo ligados por uma massa porosa que contém porções de alguns vazios e soluções, sendo essa fase a mais importante para o concreto, pois ela tem mais influência na sua durabilidade, visto que essa propriedade está diretamente relacionada com a permeabilidade da pasta de cimento hidratada (SANTIAGO, 2011).

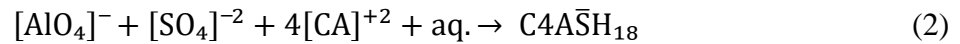
Sabendo disso, vale salientar que o sulfato afeta o mecanismo de hidratação do C₃A formado por dois compostos químicos. Primeiramente, a reação entre água, sulfato e C₃A formará etringita, posteriormente, devido ao teor de sulfato ter caído pela reação do C₃A que resta, reage com a água e a etringita, tendo como produto o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (GIROTTO, 2018).

As reações químicas da etringita e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado são escritas da seguinte forma:

- Etringita:

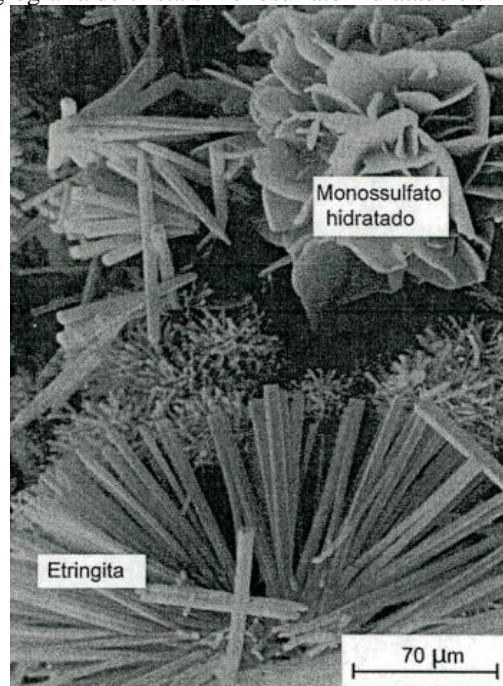


- Monossulfato:



Por meio de uma micrografia eletrônica é possível perceber a forma geométrica hexagonal que têm os cristais de monossulfato e a forma cilíndrica que têm os cristais de etringita, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Migrografia de cristais monossulfato hidratado e cristais de etringita.



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

c) Zona de transição

Por fim, a última fase da microestrutura do concreto diz respeito a zona de transição que, consoante a Castro (2008), corresponde a região que está localizada pela interface agregado-pasta e, conforme Mehta e Monteiro (2014), é o elo mais fraco do concreto.

3.1.1 Durabilidade

O conceito de durabilidade do concreto vem passando por modificações ao longo dos anos, segundo Almeida (2019), e os fatores que a influenciam são: as propriedades dos materiais, a interação destas propriedades com o meio ambiente no qual a estrutura está inserida

e o desempenho final observado pelo usuário. Dessa forma, a engenharia civil deve buscar meios para que a estrutura seja utilizada de forma segura pelo maior tempo possível e da melhor forma possível.

Também, a durabilidade do concreto pode ser influenciada por diversos fatores, por exemplo, o meio no qual esse material estará exposto, a forma de cura e ações de carregamentos, os quais podem ocasionar microfissuras ou fissuras na estrutura (VASCONCELOS; AKASAKI, 2010). Logo, entende-se que a durabilidade passa a ter uma visão mais ampla no que diz respeito ao desempenho da estrutura, sendo um assunto que engloba a interação da estrutura com o ambiente e com o indivíduo que a utiliza.

Dessa forma a NBR 6118 (ABNT, 2014), dispõe de uma tabela com classificações de agressividade ambiental, conforme o ambiente em que a estrutura se encontra, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

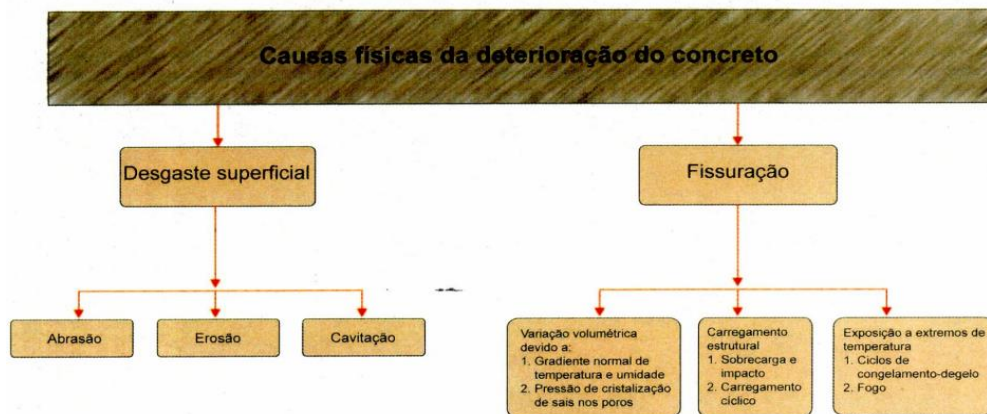
O processo de deterioração do concreto pode acontecer por diversas formas. Reis (2001) organizou esses mecanismos em uma tabela que será mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.

MECANISMO	AGENTES	AÇÃO	SINTOMATOLOGIA
1. Lixiviação	Águas puras, carbônicas agressivas e ácidas	Carrear compostos hidratados da pasta de cimento	- Superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial;- Eflorescência de carbonato;- Elevada retenção de fuligem / fungos
2. Expansão	Águas e solos contaminados por sulfatos	Reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado	- Superfície com fissuras aleatórias e esfoliação - Redução da dureza e do pH
3. Expansão	Agregados reativos	Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos	- Expansão geral da massa do concreto - Fissuras superficiais e profundas
4. Reações deletérias	Certos agregados	Transformações de produtos ferruginosos presentes nos agregados	- Manchas, cavidades e protuberância na superfície do concreto
5. Despassivação da armadura	Gás carbônico da atmosfera	Penetração por difusão e reação com os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução	- Requer ensaios específicos - Em casos mais acentuados, apresentam manchas, fissuras, destacamentos do concreto, perda da seção resistente e da aderência
6. Despassivação da armadura	Cloretos	Penetração por difusão, impregnação ou absorção capilar, despassivando a superfície do aço.	- Requer ensaios específicos - Ao atingir a armadura apresenta os mesmos sinais do item 5.

Fonte: Reis, 2001.

Além disso, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a deterioração do concreto se dá pelos ataques físicos e químicos, sendo as causas físicas desencadeadas pelo desgaste superficial e fissuração e as causas químicas dependendo do tipo de agressor. Valendo ressaltar que nesses ataques as reações não precisam ser precisamente entre os agentes externos e a pasta, pois existem reações que ocorrem entre minerais reativos e os álcalis. No entanto, sempre existirá a perda de resistência, conforme apresenta as Figuras 4 e 5, respectivamente:

Figura 4 - Causas físicas da deterioração do concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

Figura 5 - Deterioração do concreto por Reações Químicas.



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

3.1.2 Efeito de íons sulfato no concreto

De acordo com Tainara e Barreto (2018), denomina-se ataque por sulfato uma série de reações químicas que acontecem entre íons de sulfato e os produtos oriundos da hidratação do cimento Portland. Os íons de sulfato (SO_4^{2-}) são alguns dos fatores que acarretam a deterioração do concreto, possuindo diversas origens. Dessa forma, os íons provenientes do meio, ao entrarem em contato com a matriz farão com que ocorram reações químicas, com os hidróxidos de cálcio (CaOH_2), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) (HOPPE FILHO *et al.*, 2015).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o ataque por sulfato vindo de uma fonte externa poderá ter duas formas de atuação distintas entre si, sendo que a predominante dependerá da concentração, da fonte dos íons sulfato que estarão na água de contato e da composição da pasta de cimento que compõe o concreto.

De acordo com Hoppe Filho *et al.* (2015), as fases de atuação do processo de deterioração do concreto por ataque de sulfato são duas, sendo a primeira caracterizada por um período em que não ocorrem nenhum efeito resultante, denominado por período de dormência, e na segunda fase existirá uma significativa expansão.

A expansão oriunda do ataque de íons de sulfato está relacionada com a formação da etringita secundária, ocasionadas por uma fonte externa de sulfatos e também da etringita tardia, ocasionada por uma fonte interna de sulfatos (DEF – Delayed Etringite Formation). Conforme

Torres e Andrade (2016), esse fenômeno resultará em fissuras mapeadas ou direcionadas na superfície do concreto.

Segundo Bonifácio *et al.* (2022), os tipos de sulfatos mais comuns são: sulfato de sódio, sulfato de potássio, sulfato de magnésio e sulfato de cálcio. Assim, entre os sulfatos, o mais forte é o de magnésio, pois durante o ataque as reações químicas acontecerão dando origem a gipsita, devido a conversão do hidróxido de cálcio, e acompanhada dela ocorrerá a formação do hidróxido de magnésio. Esse composto é insolúvel e torna o concreto mais ácido ao reduzir a sua alcalinidade. Caso não exista hidroxilas na solução durante o ataque, o C-S-H se tornará instável (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2 ADIÇÕES NO CONCRETO

Conforme Bonifácio *et al.* (2022), os concretos conhecidos como especiais possuem em sua composição mais do que uma mistura comum de água, cimento e agregados, mas, sim, adições químicas e adições minerais, que oferecem inúmeros benefícios relativos à propriedade do concreto, acrescentando características especiais ao material.

Ademais, Fernandes *et al.* (2015), afirma que ao incorporar adições minerais em concretos, algumas de suas propriedades serão melhoradas e isso se deve ao refinamento dos poros e dos grãos, aumento da tortuosidade dos canais e aos poros que passam a ter uma interconectividade reduzida. Dessa forma, fazendo o controle de forma adequada, muitos dos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, por meio da adição mineral (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Rocha (2008) apresenta que a eficiência da adição mineral poderá variar conforme a quantidade utilizada, das condições de cura, da composição química, mineralógica e granulométrica, sendo as duas últimas características as principais responsáveis pela alteração do comportamento do concreto.

Mehta e Monteiro (2008), dividem as adições minerais em duas formas, são elas:

- a) Materiais naturais: sendo esses processados com o único intuito de produzir pozolana. O material passa por processo de britagem, moagem e separação por granulometria; e em alguns casos tem-se a necessidade de haver uma ativação térmica.
- b) Materiais de subproduto: eles são os subprodutos industriais que podem ou não exigir algum processamento.

Assim, as cinzas da casca de arroz, biomassa de cana de açúcar e o meta caulim são alguns dos minerais usados no concreto para incrementação do aumento das propriedades

(DINIZ *et al.*, 2018) Dessa forma, é necessário o estudo de novas fontes de minerais que possam ser usadas na composição do concreto a fim de melhorar suas características.

3.2.1 Cinza de olaria

Conforme Silva *et al.* (2020), durante a produção da cerâmica vermelha, uma grande quantidade de energia é empregada, além dos recursos naturais, tendo como subprodutos cinzas provenientes da queima da lenha. De acordo com a Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2015), existem cerca de 5.437 empresas do ramo no Brasil, sendo responsáveis pela produção de 1.869.231.000 telhas, 4.675.095.000 blocos cerâmicos e 6.048 toneladas tubos cerâmicos por ano.

Assim, tem-se que o Brasil, todos os anos, produz toneladas de cinza de olarias provenientes da queima da lenha para a produção de materiais cerâmicos. No entanto, Melo (2012) expõe que essa elevada quantidade de cinza muitas das vezes são descartadas de forma irregular ao meio ambiente, sendo jogadas em valas abertas no próprio terreno das olarias e sem nenhum fim comercial, poluindo, assim, o meio ambiente.

Um estudo realizado por Silva *et al.* (2020) caracterizou a cinza proveniente dos fornos de uma olaria da cidade de Presidente Epitácio - SP. Como resultado dessa caracterização, observou-se que a cinza de olaria apresentou a formação de material vítreo sem reatividade pozolânica, dando margem a estudos futuros sobre a utilização desse mineral como um agregado miúdo que produza o efeito de *filler*.

Por fim, vale ressaltar que, devido a cinza de olaria ser proveniente da queima de madeira, a sua propriedade pode ser diferente de acordo com o tipo de madeira usada. Assim, é necessário realizar a caracterização do material e analisar a sua influência como adição.

3.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Segundo Lopes (2019), o empacotamento de partículas irá consistir em otimizar composições com o emprego de partículas de diferentes tamanhos, tendo, assim, um refinamento dos poros que resultará na redução do volume de pasta necessário para envolver as partículas da mistura.

Conforme Castro e Pandolfelli (2009), o estudo do empacotamento de partículas envolverá a correta relação entre os tamanhos adequados das partículas dos materiais usados, assim, os espaços que as partículas maiores deixam são preenchidas por partículas menores e

os vazios ainda existentes são preenchidos por partículas muito menores e assim sucessivamente.

Assim, para produzir concretos com altos desempenhos (CAD), será necessário o estudo da engenharia de microestrutura. Dessa forma, a seleção e dosagem dos materiais que compõe o CAD devem ser cuidadosamente dosados. Entre os métodos de dosagem está o conceito de reologia e de empacotamento de partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Sarkar (2016), afirma que muitos pesquisadores já estudaram sobre a influência das diferentes granulometrias na composição do concreto, porém o método de furnas, o modelo de Andreasen e Andersen e o método de Alfred são os mais aceitos atualmente.

3.3.1 Método de furnas

Furnas desenvolveu, usando uma abordagem discreta, uma forma para calcular o volume aparente de misturas binárias ou de multicomponentes. Ele constatou que se todos os vazios fossem preenchidos, tinha-se o máximo empacotamento, e ao observar que as matérias-primas formam uma progressão geométrica, ele generalizou que sua teoria serviria para qualquer mistura poli modal (MACIEL *et al.*, 2018).

Assim, Furnas definiu a Equação 3 como resultado da sua teoria:

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_l^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

CPFT: Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p : Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s : Diâmetro da menor partícula em mm;

D_l : Diâmetro da maior partícula em mm;

r : Quociente entre o volume retido em uma malha e na imediatamente inferior.

3.3.2 Modelo de Andreasen e Andersen

Andreasen mostrou que, em uma composição granulométrica, todos os tamanhos de partículas podem estar presentes e, com isso, uma teoria de empacotamento deveria ser desenvolvida considerando a granulometria. Assim, para ele, o empacotamento ideal deve ser

obtido a partir da imagem de granulação, que seria uma hipótese de similaridade em torno de duas partículas específicas que possuem tamanhos muito diferentes. Dessa forma, o autor desenvolveu uma Equação 4 (MACIEL *et al.*, 2018).

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D}{D_1}\right)^q * 100 \quad (4)$$

Onde:

CPFT: Percentual acumulado de finos menor que “D” em volume;

D : Tamanho da partícula;

D₁ : Maior tamanho de partícula de distribuição.

q : Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

3.3.3 Método de Alfred

Após uma análise de comparação entre os modelos de Furnas e Andreasen, Dinger e Funk conseguiram provar que ambos os modelos convergem matematicamente para uma mesma equação (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Hermann *et al.* (2020) relata que, dentre os modelos disponíveis, o método de Alfred, conhecido como Andreasen modificado, se destaca por possuir maior eficiência no empacotamento de partículas e por ser mais condizente com a realidade. Conforme Castro e Pandolfelli (2009), o modelo de Alfred introduz o conceito do tamanho mínimo de partículas (DS) na equação de Andreasen, envolvendo também uma revisão matemática do modelo de Furnas, gerando assim a Equação 5.

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_1^q - D_s^q}\right) * 100 \quad (5)$$

Onde:

CPFT: Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p;

D_p : Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s : Diâmetro da menor partícula em mm;

D₁ : Diâmetro da maior partícula em mm;

q : Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

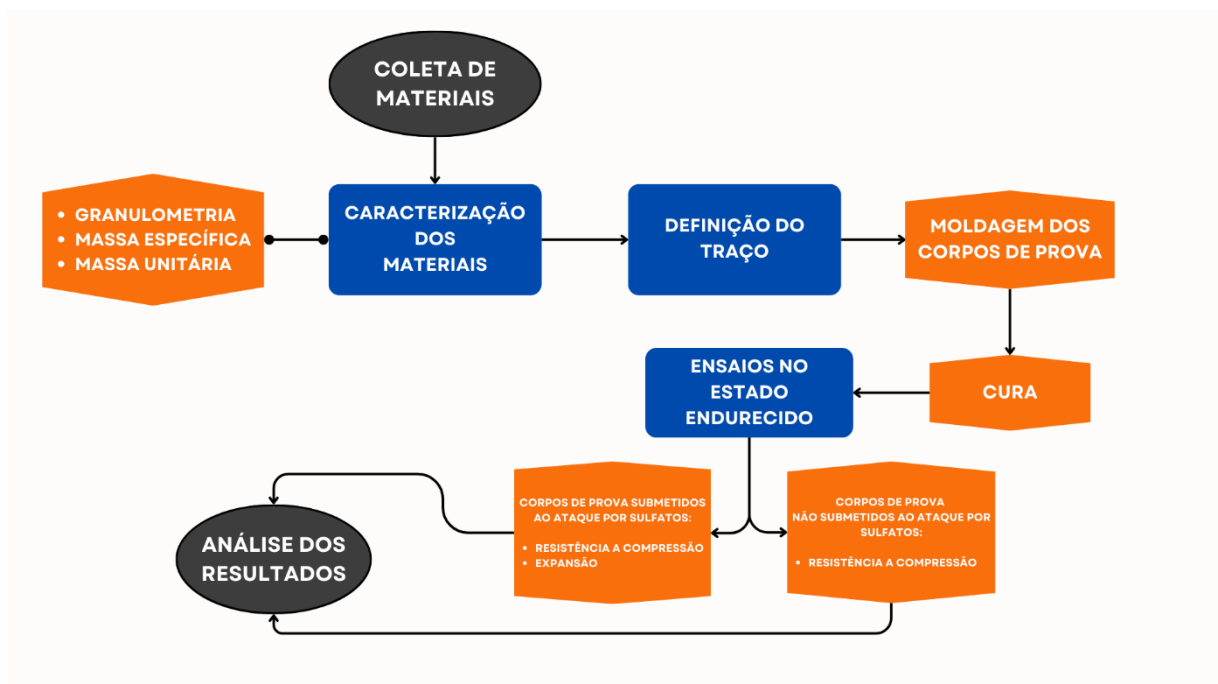
4 METODOLOGIA

Este capítulo dedica-se a mostrar todo o percurso metodológico que foi necessário para atingir o objetivo dessa pesquisa, descrevendo os métodos e materiais que foram usados.

Quanto à abordagem, essa pesquisa é quantitativa, visto que tem seu enfoque na análise de argamassa no estado fresco e endurecido. Quanto à natureza, ela é aplicada, pois tem por objetivo a mitigação ao ataque de NaSO_4 (Sulfato de sódio) e MgSO_4 (Sulfato de Magnésio) em argamassas para concreto. Quanto ao objetivo, a pesquisa é descritiva, uma vez que foi caracterizada a durabilidade de argamassa com substituição de cinza de olaria.

Por fim, esse trabalho será experimental, já que para obtenção dos dados necessários para a resolução dos problemas foi preciso usar de experimentos e reproduzir relações de causa e efeito. A pesquisa seguiu conforme indica o Fluxograma abaixo.

Fluxograma 1 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1 COLETA DE MATERIAIS

Essa etapa se destina a coleta dos materiais usados para o desenvolvimento da pesquisa.

São eles:

- a) Areia
- b) Sulfato de Sódio (NaSO_4)
- c) Sulfato de Magnésio (MgSO_4)
- d) Cinza de olaria

A cinza de olaria foi adquirida da empresa Irmãos Rolim Cerâmica, localizada na cidade de São João do Rio do Peixe – PB.

- e) Cimento CP V - ARI

O cimento usado foi comprado da empresa Churrasqueiras Fortaleza, localizada no município de Cajazeiras – PB.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais é de suma importância para as pesquisas, pois é por meio dessa análise que se pode verificar as suas propriedades físicas e químicas. Desta forma, com esses dados é possível analisar o seu comportamento frente ao que será estudado. Assim, os ensaios utilizados para a caracterização dos materiais desse estudo serão baseados nas normativas que serão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Normas utilizadas na caracterização dos materiais.

Norma	Ensaio	Material
ABNT NM 208:2003	Granulometria	Areia
ABNT NM 52:2009	Massa específica	Areia e Cinza de olaria
ABNT ISO 13320:2009	Granulometria a Laaser	Cinza de olaria
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária	Areia

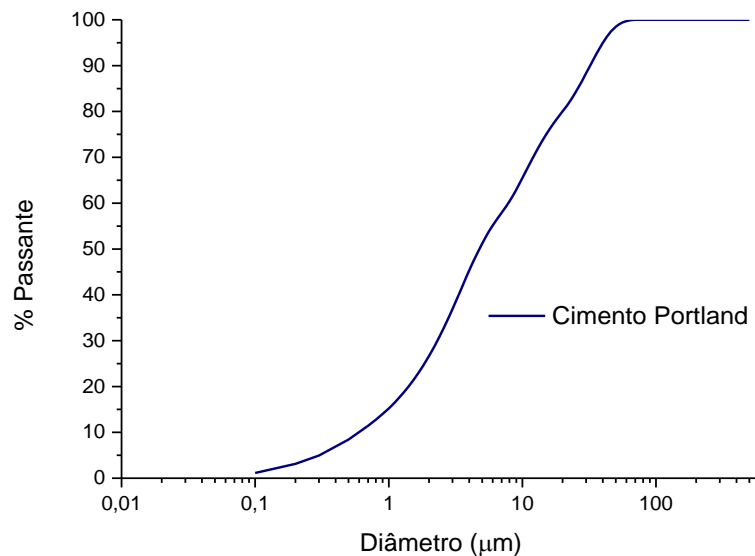
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CPV-ARI, sendo sua caracterização química fornecida pelo fabricante. Para os ensaios de granulometria, foi utilizado um granulômetro da marca CILAS,

modelo 1090, como mostrado na Figura 6. Esses ensaios foi conduzido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB-Campus João Pessoa.

Figura 6 - Granulometria do cimento cimento CPV-ARI.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a caracterização química do cimento CPV-ARI usou-se os dados ofertados pelo fabricante, como mostra a Figura 7.

Figura 7– Caracterização química do cimento CPV-ARI

3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÃO SOBRE OS INGREDIENTES		
Tipo de cimento: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente à Sulfatos CPV		
Número de reg.: CAS: 65997-15-1		
Descrição da constituição do produto:	O cimento Portland é constituído basicamente de clínquer Portland finamente moído e gesso, podem, ainda, ser adicionados outros materiais normalizados dependendo do tipo que se deseja. Tais adições podem ser: calcário com carbonato de cálcio acima de 85%, escórias granuladas de alto fornos, argilas pozolânicas e etc.	
Componente	Faixa de concentração (%)	Número CAS
Silicato tricálcico	20 – 70	12168-85-3
Silicato Dicálcico	10 – 60	10034-77-2
Ferro-aluminato tetracálcico	5 – 15	12068-35-8
Aluminato tricálcico	1 – 15	12042-78-3
Sulfato de cálcio	2 – 10	Vários
Carbonato de cálcio	0 – 5	1317-65-3
Óxido de magnésio	0 – 6	1309-48-4
Óxido de cálcio	0 – 2	1305-78-8

Fonte: Mizu, 2022.

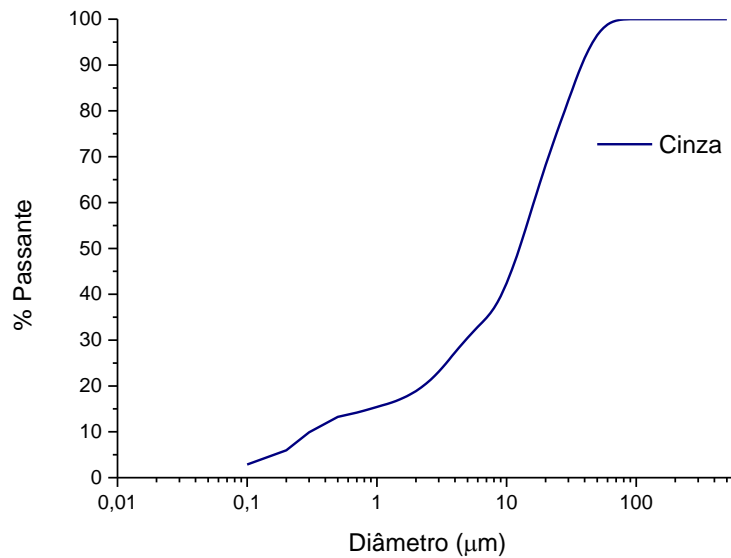
4.2.2 Cinza de olaria

A cinza usada foi disponibilizada pela empresa Irmãos Rolim Cerâmica, localizada na cidade de São João do Rio do Peixe – PB, e teve a sua caracterização feita no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB-Campus João Pessoa, onde foi utilizado um granulômetro da marca CILAS, modelo 1090, para as técnicas de granulometria a laser e espectrometria de fluorescência de raios X para análise química, como mostram o Quadro 3 e a Figura 8.

Quadro 3 - Caracterização química da cinza de olaria.

Composto	Porcentagem presente(%)
CaO	84,649
K ₂ O	6,611
SiO ₂	3,807
SO ₃	1,502
SrO	1,399
TiO ₂	0,775
Fe ₂ O ₃	0,743
MnO	0,151
P ₂ O ₅	0,139
Lu ₂ O ₃	0,069
CuO	0,066
V ₂ O ₅	0,037
ZnO	0,02
Rb ₂ O	0,017
Br	0,014

Fonte: Adaptado Beserra (2019).

Figura 8 - Granulometria da cinza de olaria.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a determinação da massa específica, foi realizada de acordo com a norma NBR 16605(ABNT, 2017) , resultando em um valor de 2,686 g/cm³

4.2.3 Agregado

Para esse estudo as classificações granulométricas do agregado miúdo foram definidas conforme as frações escolhidas para cada tipo de situação analisada, traço, denominado de TN, de referência da norma NBR 7214 (ABNT, 2015), traço com substituição de 10% de cimento por cinza de olaria, denominado de T10, traço com substituição de 15% de cimento por cinza de olaria, denominado de T15 e traço de empacotamento de partículas, denominado de TE0, seguindo a seguinte sequência:

a) Traço TN:

Para essa referência foram separadas quatro frações de areia para que se conseguisse chegar à areia normal. Dessa forma, foi utilizado a seguinte metodologia: a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa 1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm e retida na 0,15 mm correspondendo a faixa 3 e a passante da 0,15 mm correspondendo a faixa 4. Essas frações podem ser verificadas na Figura 9.

Figura 9 - Faixas do agregado miúdo- TN.



Fonte: Autoria própria, 2023.

b) Traço TE0:

Para os corpos de prova que foram dosados seguindo o empacotamento de partículas, foram usadas três frações de areia, seguindo a mesma metodologia do traço TN, a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa 1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm correspondendo a faixa 3. Essas frações podem ser verificadas na Figura 10.

Figura 10 - Faixas do agregado miúdo- TE0.



Fonte: Autoria própria, 2023.

c) Traços T10 e T15:

Os corpos de prova que tiveram a substituição parcial do cimento em 10% (T10) e 15% (T15) utilizaram 3 frações de areia, seguindo a mesma metodologia adotada no traço TE0, onde a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa

1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm correspondendo a faixa 3. Essas frações podem ser verificadas na Figura 11.

Figura 11 - Faixas do agregado miúdo- T10 e T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Vale ressaltar que para uma distribuição granulométrica mais detalhada fora utilizado peneiras da série normal e intermediária .

Para a determinação da massa específica e massa unitária do agregado, foram observadas as recomendações dadas pelas normas descritas no Quadro 2. Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados, descritos respectivamente nos Quadros 4 e 5:

- Massa específica:

Quadro 4 – Massa específica do agregado miúdo.

Faixa 1	2,60 g /cm ³
Faixa 2	2,60 g /cm ³
Faixa 3	2,62 g /cm ³

Fonte: Autoria própria, 2023.

- Massa unitária:

Quadro 5 – Massa unitária do agregado miúdo.

Faixa 1	1,27 g /cm ³
Faixa 2	1,27 g /cm ³
Faixa 3	1,36 g /cm ³

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.4 Definição do traço

As argamassas foram formuladas de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13583 (ABNT, 2014). A proporção de ligante utilizada foi de 1,0:3,2 em massa, enquanto a proporção de água em relação ao ligante foi de 0,60.

a) Traço TN:

A NBR 13583 (ABNT, 2014) aconselha usar o traço 1,0:3,2, assim, para manter as proporções adequadas para as quatro faixas de areia, foi realizado uma divisão 3,2 por 4, dessa forma, se obteve a relação de 1,0:0,8:0,8:0,8:0,8.

O Quadro 6 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 6 – Medidas do traço TN.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/C
TN	1250	-	Faixa 1	1000	600	0,6
			Faixa 2	1000		
			Faixa 3	1000		
			Faixa 4	1000		

Fonte: Autoria própria, 2023.

b) Traço TE0 pelo software Q – mix:

Segundo Daminieli, Pileggi e John (2017), a teoria do empacotamento de partículas usa frações de tamanhos diferentes de partículas com a finalidade de haver uma diminuição dos vazios. Desta forma, para se obter um resultado que diminuísse ao máximo o número de vazios, foi usado o software desenvolvido por Arruda (2022), o Q – mix, para definição do traço de empacotamento.

Esse programa se utiliza do modelo teórico de e Andreassen Modificado (ou Alfred), gerando cálculos para a obtenção das porcentagens ótimas. Dessa forma, inicialmente o programa pede a inserção da granulometria feita dos agregados, como mostra a Figura 8, posteriormente se deve escolher os parâmetros de entrada.

Como o programa se utiliza da Equação 5 de Alfred, se faz necessário escolher o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem utilizados. A última etapa consiste em encontrar as porcentagens ótimas. Dessa forma foram

encontradas as seguintes porcentagens a serem usadas no traço de empacotamento para cada faixa de agregado, como mostra o Quadro 7.

Quadro 7- Traço de empacotamento de partículas

Faixa 1	42,64%
Faixa 2	16,17%
Faixa 3	41,17%

Fonte: Autoria própria, 2023.

O Quadro 8 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 8 – Medidas do traço TE0.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/C
TN	1250	-	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

c) Traço T10:

Para o traço T10, foi seguido as mesmas proporções calculada para o traço de empacotamento de partículas, porém, nesse caso, foi retirado 10% da massa de cimento e adicionado 10% da massa de cinza de olaria.

O Quadro 9 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 9 – Medidas do traço T10.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/F
TN	1125	125	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

d) Traço T15:

Para o traço 15 foi usada a mesma metodologia onde se utilizou as mesmas proporções calculadas do traço TE0, sendo a única diferença a porcentagem retirada de 15% de massa de cimento e adicionada de massa de cinza.

O Quadro 10 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 10 – Medidas do traço T10.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/F
TN	1062,5	187,5	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

Para a mistura dos materiais, foi usada a argamassadeira do Laboratório de Técnicas Construtivas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras-PB*.

4.2.5 Moldagem

A moldagem dos corpos de provas seguiu a normativa da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para a pesquisa foram produzidos 18 exemplares de corpos de prova prismáticos 4x 4x 16 (mm), como indica a Figura 12, para cada traço analisado. Sendo que 6 corpos de prova foram destinados a cura por cal, 6 corpos de prova destinados a cura por sulfato de sódio (NaSO₄) e 6 a cura por sulfato de magnético (MgSO₄).

Dessa forma, foram produzidos um total de 72 corpos de prova.

Figura 12 - Corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.6 Cura submersa

A cura submersa dos corpos de provas seguiu as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificada no Quadro 11.

Quadro 11 – Normas utilizadas para a cura submersa.

Norma	Tipo de cura
ABNT NBR 7215/2019	Saturada em Cal
ABNT NBR 13.583/2014	Cura submersa em NaSO ₄ e MgSO ₄

Fonte: Autoria própria, 2023.

Segundo a ABNT NBR 7215/2009:

Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova destinados a determinação da resistência em idades maiores que 24h devem ser retirados das formas, identificados e imersos, separados entre si no tanque de água (não corrente) saturada de cal, onde devem permanecer até o momento a ruptura. (ABNT, 2009, p. 3)

Dessa forma, seguiu a cura submersa dos corpos de prova destinado a cura em cal.

Para os corpos de prova destinados a cura em sulfato de sódio (NaSO₄) e sulfato de magnésio (MgSO₄), seguiu-se as orientações da norma NBR 13583 (ABNT, 2014), onde a cada 1L de água foram dissolvidos 100 gramas de sulfato, e vale ressaltar que a cada 20 dias foi trocado a solução.

4.2.7 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios dos corpos de prova seguiram a normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificadas no Quadro 12.

Quadro 12 – Normas utilizadas para os ensaios.

Norma	Ensaio realizado
ABNT NBR 13279/2005	Compressão
ABNT NBR 13583/2014	Determinação da variação dimensional de barras de argamassa.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a realização do ensaio, foi utilizado a prensa mecânica do Laboratório de Estruturas do IFPB, *Campus Cajazeiras*.

O material foi submerso em ambiente contendo solução por sulfato de sódio e outro sulfato de magnésio por um período de 28 dias. A verificação se deu da seguinte forma, como mostra o Quadro 13:

Quadro 13 – Esquema do que foi realizado em cada idade de cura.

Idade de cura	Análise
7	Rompimentos de corpos de prova.
14	Análise da expansão do corpo de prova.
21	Análise da expansão do corpo de prova.
28	Análise da expansão do corpo de prova e Rompimentos de corpos de prova.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para obter os resultados de resistência a compressão foi utilizado a seguinte equação:

$$Resistência = \frac{F}{A * 10} \text{ (MPA)} \quad (6)$$

Para obter os dados de expansão foi utilizado um paquímetro, após a obtenção de todos os dados foi feito a comparação das dimensões dos corpos de prova com 14, 21 e 28 dias submetidos a cura, com a dimensão original da peça de 160x40x40 (mm).

Com a diferença para cada dia de cura foi verificado a porcentagem da expansão usando a seguinte fórmula:

$$\frac{160}{(x - 160)} = \frac{100}{y} \quad (7)$$

Onde:

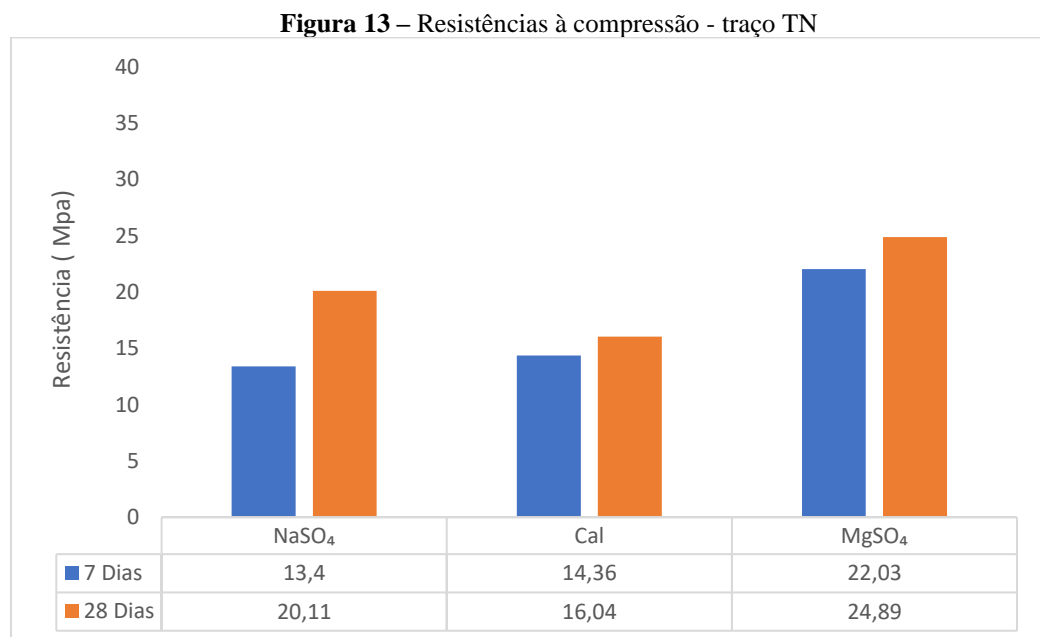
Y= porcentagem de expansão;

X= valor do comprimento medido para cada dia de cura.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam os resultados para o ensaio de compressão axial obtidos para os traços TN, TE0, T10 e T15, nos tipos de cura estudados, para as idades de 7 e 28 dias



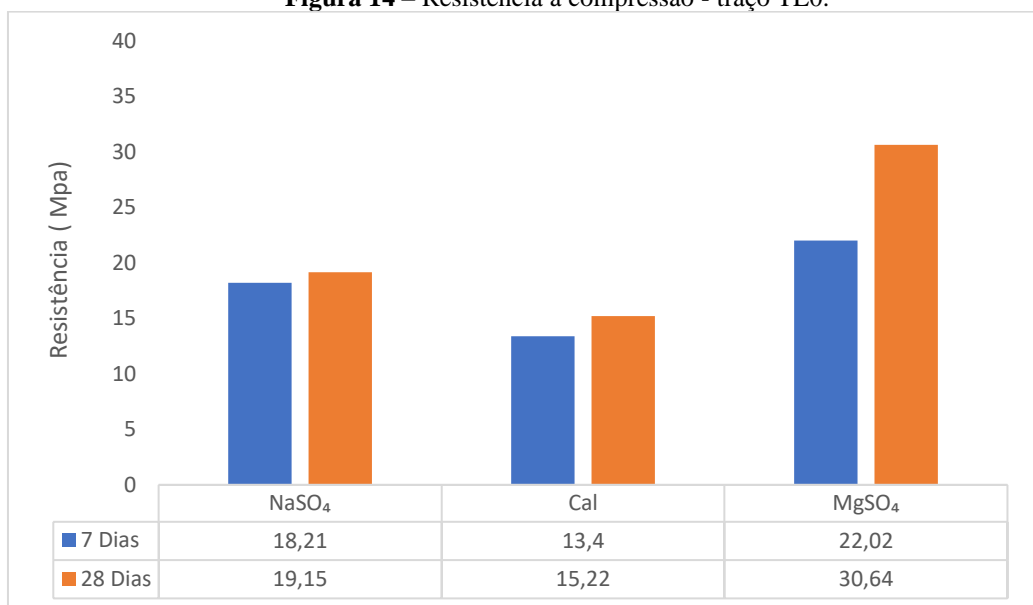
Fonte: Autoria própria, 2023.

Houve um aumento de resistência para as argamassas atacadas por sulfatos. Logo, entende-se que os produtos das reações químicas entre sulfato de sódio e a pasta e cimento, bem como o sulfato de magnésio e a pasta de cimento resultaram em um preenchimento dos poros acarretando um aumento de resistência inicial, e como indica a literatura, para idades mais avançadas espera-se que essas resistências diminuam. Sendo assim, é necessário a análise da resistência a compressão para mais dias de cura

SOUZA, D. D. *et al* (2020), em sua pesquisa no qual foi avaliado o ataque externo por sulfato de magnésio e sulfato de sódio em argamassa, verificaram que houve um aumento de resistência ao comparar as argamassas atacadas por sulfato com as de referência, para as idades de até 8 semanas, também eles explicam que isso se deve a presença dos poros que foram preenchidos por produtos provenientes das reações químicas entre o sulfato e os compostos do

cimento, como o gesso, etringita secundária e brucita. Devido a isso, os vazios passam a ser preenchidos por material sólido, resultando em um aumento de densidade e uma área maior para absorver carga, justificando assim o aumento de resistência. Vale ressaltar que esse aumento de resistência ocorreu para os dias iniciais de cura, havendo um início de perda de resistência para idades entre 8 e 12 semanas ocasionadas pelos efeitos negativos que o sulfato pode ocasionar no concreto. Essa perda de resistência se dá pela expansão que irá ocorrer, bem como o consumo de C-S-H, no caso do ataque por sulfato de magnésio.

Figura 14 – Resistência à compressão - traço TE0.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O mesmo princípio dissertado anteriormente vale para o traço TE0 que apresentou maiores resistências para os corpos de provas atacadas com sulfatos.

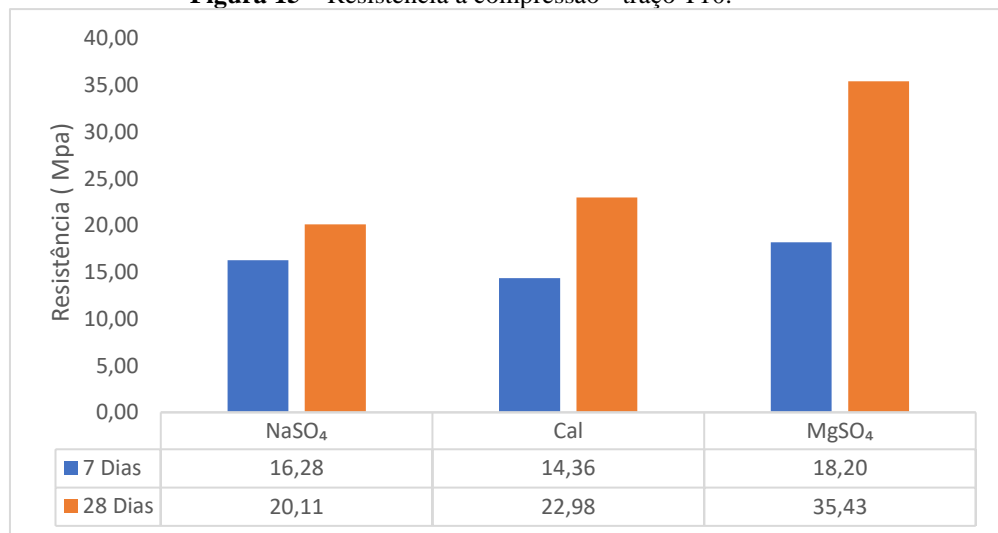
Os produtos oriundos das reações químicas entre os sulfatos de magnésio e de sódio preencheram os vazios, aumentando a sua resistência para as idades iniciais. Como falado anteriormente, segundo a literatura a resistência tenderá a diminuir, assim, esse traço deverá ser analisado para mais dias de cura e observado se existirá perda ou não de resistência.

As amostras desenvolvidas com empacotamento apresentam maior resistência quando atacadas por sulfato de sódio comparadas com a referência da norma para os 7 primeiros dias de cura, isso pode ter ocorrido devido a porosidade do material, sendo o traço TE0 menos poroso tenderá a possuir maior resistência, com o passar dos dias os produtos das reações químicas do sulfato com a pasta de cimento irá preencher os poros do material, isso pode

explicar o motivo que para 28 dias o corpo de prova atacado por sulfato de sódio para o traço TN ter maior resistência em comparação ao traço TE0 teve um leve aumento de resistência.

Para os corpos de prova curados em sulfato de magnésio com 7 dias ambos os traços tiveram resultados bem semelhantes, porém para 28 dias de cura o corpo de prova do traço TE0 possuiu uma resistência bem maior comparado ao traço TN, isso pode ter ocorrido pois o ataque por sulfato de magnésio, como agente mais agressivo que o sulfato de sódio, acarretará em mais agentes expansivos, como etringita secundária e brucita, preenchendo os poros do traço TE0 deixando-o mais resistente que o traço TN para as mesma condições, vale ressaltar que essa resistência tenderá a ser perdida para idades mais avançadas, principalmente em argamassas atacadas por sulfato de magnésio, visto que o hidróxido de magnésio consumirá o C-S-H do meio acarretando em perda de resistência. Assim, necessita-se observar como a patologia irá progredir para idades mais avançadas.

Figura 15 – Resistência a compressão - traço T10.



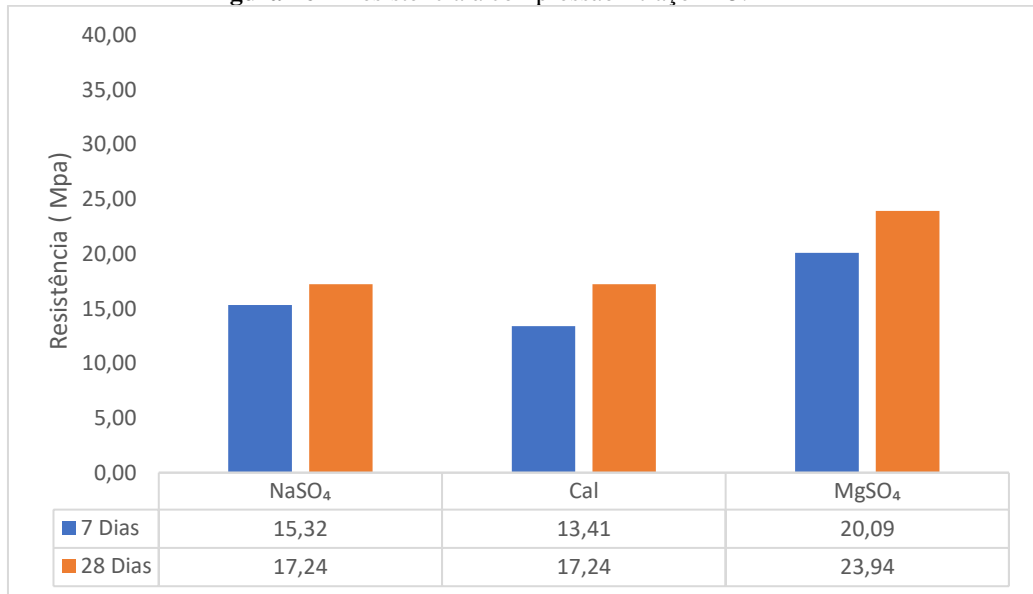
Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o traço T10, os corpos de prova atacados por sulfato também apresentaram uma alta resistência, podendo ser explicado pelo fato de os produtos oriundos das reações químicas entre os sulfatos preencheram os vazios acarretando uma maior resistência inicial. Vale ressaltar que esse aumento de resistência é temporário visto que na literatura verifica-se uma significativa perda de resistência devido as tensões internas oriundas dos compostos expansivos e do consumo de C-S-H pelo hidróxido de magnésio.

Ainda mais, verifica-se a eficiência da cinza como filler, uma vez que as resistências das argamassas curadas em cal são maiores para o traço T10 em comparação ao traço de TE0 e TN.

Para os corpos de prova curados em sulfato, observa-se que o traço T10 obteve mais resistência mecânica em comparação ao traço TE0 e de TN para idade de 28 dias de cura. Isso pode ser explicado pela ação da cinza, que, ao preencher os vazios, garantiu mais resistência. Esse efeito pode ser evidenciado uma vez que comparando os corpos de prova curados em cal de ambos os traços, o traço T10 teve maior resistência do que o traço TE0. Além disso, os produtos expansivos gerados pelo ataque por sulfato podem ter diminuído ainda mais a porosidade do material, resultando no ganho de resistência nas primeiras idades. Portanto, é necessário analisar a evolução da patologia em um período mais longo de cura para obter mais dados e verificar a progressão.

Figura 16 – Resistência à compressão - traço T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O traço T15 também possui uma resistência maior para os corpos de prova curados em sulfato de sódio e sulfato de magnésio. Essa explicação também consiste na acomodação dos produtos oriundos das reações químicas entre a pasta de cimento e os sulfatos. Nesse traço, percebe-se também a atuação da cinza de olaria como filler uma vez que a cura em cal apresentou resistência maior aos 28 dias de cura em comparação a TN e TE0, mesmo tendo 15% menos massa de cimento.

Em relação aos corpos atacados por sulfatos em comparação ao traço TE0 e TN verifica-se que houve uma menor resistência no traço T15, podendo ser justificada devido a porosidade do material, uma vez que os poros podem ser preenchidos por compostos expansivos oriundos das reações entre sulfato e cimento, o traço TE0 e TN tiveram seus poros preenchidos ocasionando maior resistência inicial, já o traço T15 por possuir menos cimento em sua

composição, as reações tendem a ser menos severas mitigando o processo de alta resistência inicial para ataques por sulfato. Isso se torna evidente uma vez que os corpos de prova curado com cal tiveram maiores resistências para o traço T15 em relação ao TE0 e TN.

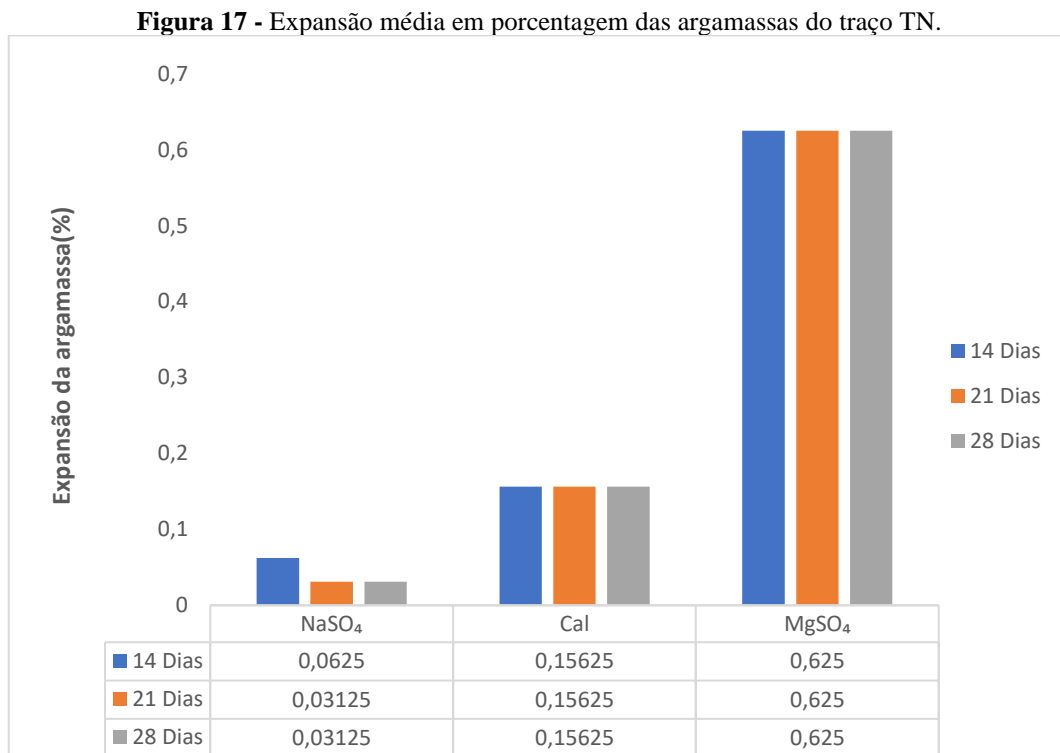
Dessa forma, tem-se que o traço T10 obteve maior resistência mecânica, em comparação ao traço T15. Uma explicação para essa maior resistência pode ser a quantidade de porcentagem de massa de cimento retirada de cada um, uma vez que no traço T10 possui mais C-S-H do que o traço T15 isso é evidente quando se observa maiores resistências nos corpos de prova curados em cal para o traço T10 em comparação ao traço T15. Também, por existir mais cimento no traço T10 conseqüentemente existirá mais C_3A , composto que reage com o sulfato produzindo compostos expansivos, que como falado anteriormente em idades iniciais de cura preenchem os poros dos corpos de prova provocando um aumento de resistência inicial, logo entende-se o motivo do traço T15 possuir menor resistência em comparação ao traço T10, para os corpos de prova atacados por sulfato.

Como já falado, a tendência do ataque por sulfato é de que para mais idades de cura exista uma diminuição da resistência pois os compostos expansivos ocasionarão uma tensão interna causando expansão, e no caso do sulfato de magnésio o C-S-H será consumido pelo hidróxido de magnésio. Dessa maneira, se necessita verificar a resistência a compressão desses traços para mais dias de cura e assim obter mais resultados verificando a progressão da patologia.

De forma geral, observou-se que para todos os traços, os corpos de prova atacados com sulfato de magnésio sempre teve os maiores valores de resistência em comparação aos atacados com sulfato de sódio. SOUZA, D. D. *et al* (2020), verificam que as argamassas contendo CPV-ARI mostraram uma degradação mais precoce devido à exposição à solução de sulfato de sódio e processos de danos mais lentos quando exposto ao ataque de sulfato de magnésio. Isso pode explicar o motivo das resistências das argamassas atacadas por sulfato de sódio terem resistências menores, uma vez que seu processo de degradação é mais rápida do que o processo de degradação de peças submetidas a ataque por sulfato de magnésio, porém vale ressaltar que segundo a literatura a tendência das peças atacadas por sulfato de magnésio é sofrer maior perda de resistência ao longo dos dias de cura, uma vez que a reação química gera hidróxido de magnésio que consumirá o C-S-H.

5.2 EXPANSÃO GEOMÉTRICA

Foram observadas expansões geométricas em corpos de prova de argamassas para cada traço feito, como mostram as Figuras 17, 18, 19, 20. As medições foram realizadas em três diferentes idades: 14, 21 e 28 dias. Os resultados obtidos foram registrados como a porcentagem das expansões médias para os corpos de provas curados em cal, sulfato de sódio e sulfato de magnésio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que os corpos de prova submetidos ao ambiente contendo sulfato de sódio tiveram menores expansões em comparação ao ambiente contendo cal, pode-se associar que para essas idades de cura os compostos expansivos oriundos do ataque de sulfato de sódio nas argamassas não foram o suficiente para gerar tensão interna capaz que promover expansão. Já os corpos de prova atacados por sulfato de magnésio possuíram as maiores expansões em comparação ao ambiente curado em cal, isso pode ter acontecido devido ao cátion de magnésio ser mais agressivo, em comparação ao cátion de sódio, causando maiores formações de compostos expansivos como etringita secundária, gipsita e taumasita.

Assim, analisando as Equações 8, 9 e 10 das reações químicas entre os sulfatos e os compostos do cimento e a água, verifica-se o motivo dos corpos de provas terem

comportamentos diferentes.

- Equação da reação entre sulfato de sódio e hidróxido de cálcio e água.

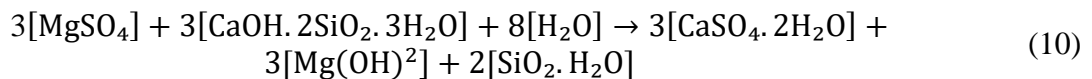


- Equação da reação entre sulfato de magnésio e hidróxido de cálcio e água.

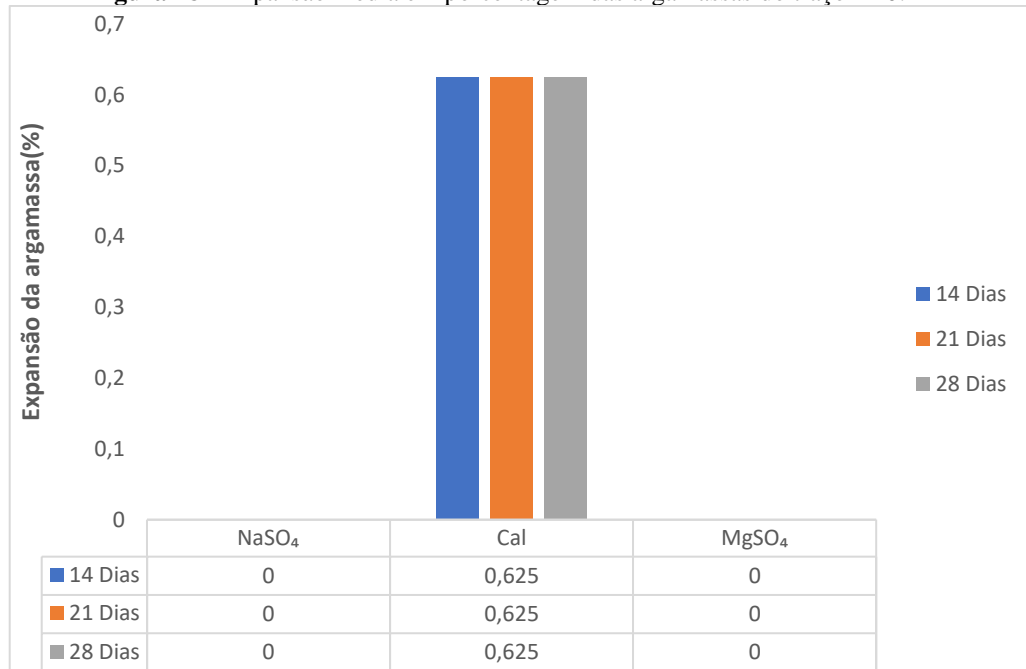


Conforme Mehta e Monteiro (2014), durante o ataque por sulfato de sódio se tem a formação do hidróxido de sódio como subproduto mantendo a alta alcalinização do sistema, que é essencial para a estabilidade do produto da hidratação, C-S-H. Já para os ataques por sulfato de magnésio, ocorrerá uma conversão do hidróxido de cálcio em gipsita e de forma simultânea o hidróxido de magnésio, que é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema. Na ausência de Íons hidroxila na solução, o C-S-H deixa de ser estável e é atacado pela solução de sulfato. O sulfato de magnésio, portanto, é mais severo no concreto.

-Equação química da reação entre sulfato de magnésio e o C-S-H.



De acordo com Zarzar, *et al.* (2010), o ataque por sulfatos resulta na formação de gesso, etringita e taumasita. Enquanto a formação de gesso e etringita secundária dependem de uma fonte de alumina, a taumasita requer uma fonte de sílica e carbonato. Assim, entende-se o motivo pelo qual o ataque por sulfato de magnésio teve uma maior expansão em relação aos corpos de prova curados apenas com cal.

Figura 18 - Expansão média em porcentagem das argamassas do traço TE0.

Fonte: Autoria própria, 2023.

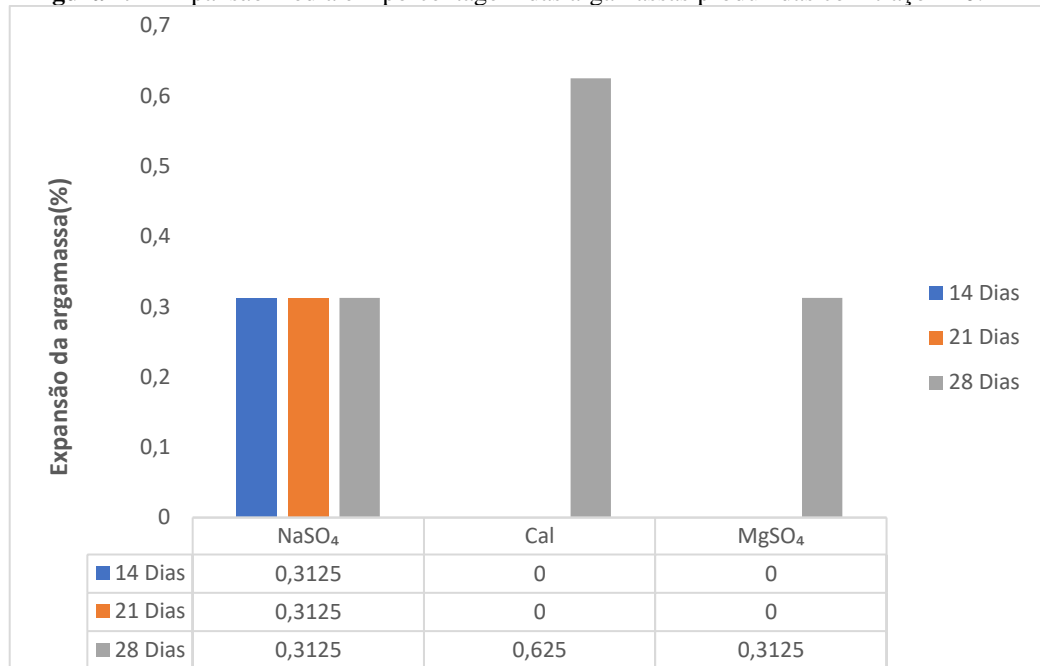
Verifica-se que para o traço TE0 não houve expansão dos corpos de prova em ambientes contendo sulfatos, para nenhuma idade analisada.

Ainda mais, como já falado, durante o processo de reações químicas os vazios presentes nos corpos de prova são preenchidos pelos produtos das reações dos sulfatos, isso pode explicar o motivo pelo qual não houve expansão dos corpos de prova para essas idades de cura, porém com o passar do tempo os compostos expansivos tenderão a produzir uma tensão interna no corpo de prova podendo ocasionar as expansões.

Isso também explica o motivo pelo qual os corpos de prova curados em cal terem expandido, uma vez que não possuem compostos que baixem sua porosidade, assim como os oriundos do ataque por sulfato.

Em comparação com o traço TN o traço TE0 teve uma menor expansão dos corpos de prova curados em sulfato, e como já mencionado isso se implica a porosidade do material, em relação aos corpos de prova curados em cal o traço TE0 teve uma maior expansão, assim supõe-se que o traço TN teve uma menor porosidade em relação ao de empacotamento, sendo necessário mais estudos para a comprovação da hipótese.

Porém, é necessário analisar a expansão dos corpos de provas para mais idades de cura, a fim de verificar a progressão da patologia, uma vez que ela tenderá a formar tensões internas causando expansões

Figura 19 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T10.

Fonte: Autoria própria, 2023.

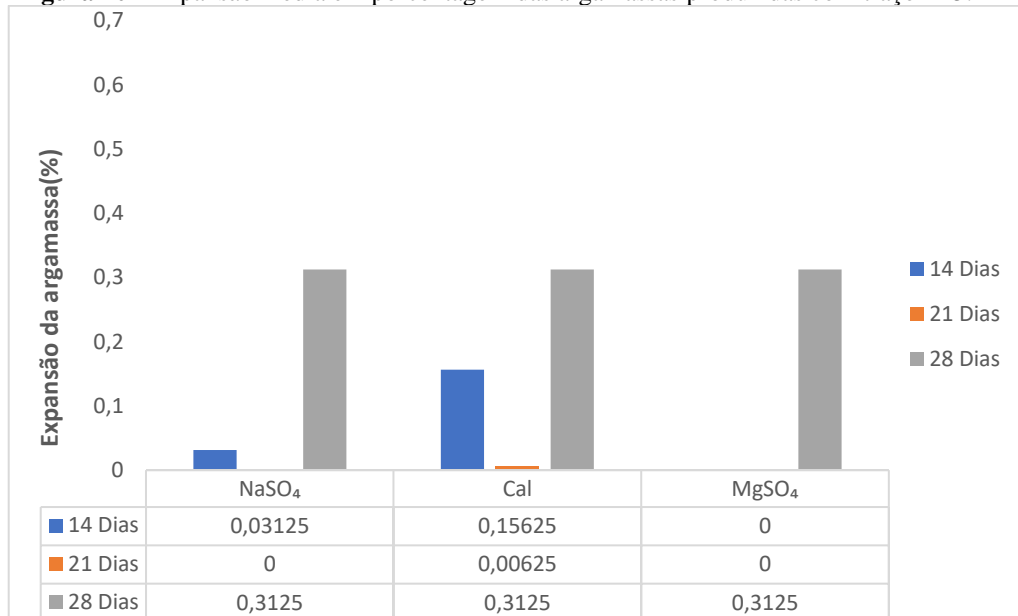
Para o traço T10, foi retirado 10% de massa de cimento que foi substituído pela mesma quantidade de massa de cinza de olaria. Assim, verifica-se que para esse traço os corpos de prova atacados por sulfato de sódio existiu expansão. De acordo com a Equação 8 o sulfato de sódio precisa do hidróxido de cálcio para realizar reação química que formará produtos expansivos, como a gipsita. Isso acontece pois mesmo com a retirada de massa de cimento que contém óxido de cálcio, forma anidra do hidróxido de cálcio, como mostra a Figura 7, a cinza adicionada possui 84,649% de óxido de cálcio como mostra o Quadro 3, em sua composição. Vale salientar que, o hidróxido de cálcio reage tanto com o sulfato de sódio quanto com o sulfato de magnésio formando compostos expansivos, porém como já falado as reações químicas contendo cátion de sódio podem ocorrer de forma mais rápida do que as contendo cátions de magnésio.

Isso pode explicar o motivo para qual o sulfato de magnésio expandir tão tardiamente em comparação ao sulfato de sódio.

Comparando os corpos de prova atacados por sulfatos com os corpos de prova curados em cal, para a idade de 28 dias, a expansão pode ter sido menor para o ataque por sulfatos devido a pouca idade de cura analisada, uma vez que os compostos expansivos das reações tendem a se acomodar nos poros e mais tardiamente causar tensões internas causando expansões graves, algo que não acontece na cura em cal, uma vez que os poros não tendem a ser preenchidos por compostos expansivos.

Comparando o traço T10 com o traço TE0 se observa que o traço TE0 não possuiu expansão para os corpos de prova curados em sulfato, diferente do que ocorreu com o traço T10, isso se deve a porosidade dos materiais , uma vez que o traço de empacotamento de partículas acomodou os compostos oriundos da reação de sulfato, causando menos expansão para as primeiras idades. Valendo salientar que a literatura evidencia que para mais idades de cura a tendência é que seja formada tensões internas que causem expansão nas peças atacadas por sulfatos. Assim é necessário que se observe para mais dias de cura e verifique a progressão da patologia para esse traço.

Figura 20 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o traço T15 foi observado uma leve expansão, nas primeiras idades de cura, nos corpos de prova atacados com sulfato de sódio e nos corpos de prova curados com cal. Para a idade mais avançada, de 28 dias, todos os corpos de prova expandiram de forma semelhante.

Segundo Hoppe Filho *et al.* (2015) a adição de minerais ao material ligante em substituição parcial ao cimento causa mudanças na estrutura microscópica que afetam a porosidade e a distribuição dos poros. Isso pode influenciar a entrada de água com íons sulfato na estrutura, podendo ter impactos positivos ou negativos. Assim, é importante estudar e controlar essas alterações para garantir a durabilidade adequada da estrutura.

Silva Filho (1994), sustenta a ideia de que um maior número de poros é capaz de acomodar as etringitas formadas, diminuindo assim a probabilidade de expansões e fissurações, ao contrário do que ocorre em uma matriz densa e com poucos poros.

Beserra (2019), em sua análise de corpos de prova contendo 10%, 15% e 20% de adição de cinza de biomassa vegetal (CBV) afirmou que, o aumento no consumo de CBV está relacionado a um aumento na porosidade e uma acomodação das etringitas formadas. Isso pode ter resultado em uma maior densificação nos traços T10 e T15 em comparação com o T20, o que, por sua vez, levou a um melhor desempenho mecânico devido à redução do índice de vazios.

Assim, nessa pesquisa constatou-se que a expansão do traço T15 para os corpos de prova atacados por sulfato podem ter sido menores comparados ao traço T10 devido a acomodação dos compostos expansivos formados. Ainda mais, ao comprar os corpos e prova curados em cal dos traços T10 e T15 para a idade de 14 dias verifica-se que para o traço T15 existe expansão, o que não ocorreu com o traço T10, levando a hipótese de que a cinza de olaria preencheu os poros do traço T10 de melhor forma do que no traço T15, podendo confirmar o que foi dito anteriormente por Hoppe Filho *et al.* (2015).

De forma semelhante a comparação dos traços T15 e T10, ao comparar o traço T15 com o traço TN percebe-se que o traço T15 apresenta menores expansões para as primeiras idades de cura, para todos os ambientes. Para os ambientes curados com sulfatos é possível que os compostos expansivos se tenham acomodado nos poros dos corpos de prova gerando pouca expansão. Já em comparação ao traço TE0, observa-se que para os corpos de prova curados em cal o traço T15 expandiu menos, para as primeiras idades, isso pode ser explicado devido a cinza de olaria deixar a argamassa menos porosa em comparação ao traço TE0, já para ataques por sulfato devido a presença de mais cimento houve mais produtos de expansão para o traço TE0, acarretando menor porosidade e menor expansão, diferente do traço T15.

Segundo Beserra (2019), em sua pesquisa verificou-se expansão de corpos de prova contendo adição de 10% e 15% de cinza de biomassa vegetal (CBV) e notou-se que com 28 dias de cura iniciou-se uma proximidade de valores de expansão de corpos de provas e apenas com 42 dias de cura foi observado uma padronização das expansões.

Semelhante a esta pesquisa que analisou as expansões dos corpos de prova com substituição parcial de cimento por cinza de olaria para 14, 21 e 28 dias e observou-se que também houve uma aproximação dos valores de expansão a partir de 28 dias.

Para uma melhor análise das expansões e da influência de cada traço é necessário que haja verificação para mais dias de cura.

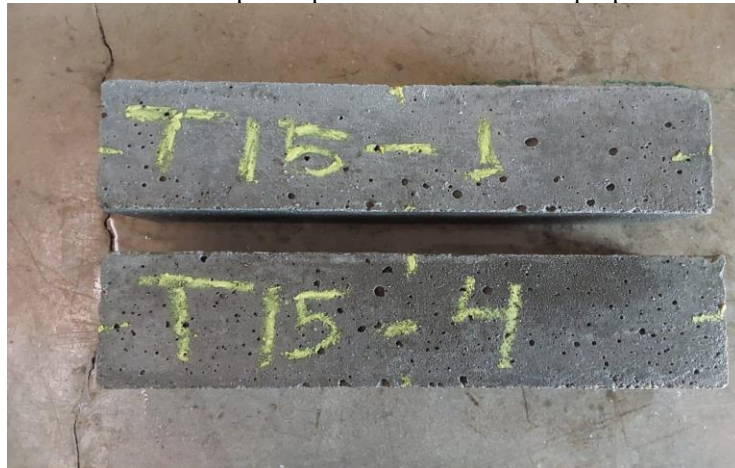
Conforme as amostras foram expostas aos ambientes agressivos por sulfato de sódio e magnésio analisou-se uma mudança de coloração nas suas superfícies, conforme mostras as Figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

Figura 21 - Amostra de corpos de provas submetidos a cura em cal.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 22 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de sódio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 23 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de magnésio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 24 – Amostra da formação de compostos oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 25 – Amostra da formação de cristais oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Segundo Costa (2004), quando o concreto é atacado pelo sulfato, ele pode adquirir uma coloração esbranquiçada externamente. Em seguida, podem se formar compostos expansivos em seu interior, levando à fissuração externa e, em casos mais graves, ao deslocamento, resultando em perda de resistência à compressão.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a análise das propriedades mecânicas e da durabilidade de argamassa para concreto com substituição parcial do cimento por cinza de olaria. Assim, foram feitas substituições de 10% e 15% da massa de cimento por cinza de olaria, a fim de compreender as propriedades mecânicas para ganho ou perda de resistência, para corpos de prova curados em de magnésio, sulfato de sódio e cal, foram realizados ensaios mecânicos de compressão axial e de expansão geométrica.

Dessa forma percebeu-se que para os traços contendo substituição parcial de cimento por cinza de olaria houve um acréscimo de resistência para o traço T10 em relação ao traço T15, para todos os ambientes analisados, tornando evidente que a substituição de 10% de massa de cimento por cinza de olaria possui um melhor desempenho em comparação a retirada de 15% de massa de cimento por cinza de olaria. Esse efeito positivo que a cinza causa é percebida também em relação aos corpos de prova, curados em cal, dos traços T10 e T15 em comparação aos traços TN e TE0 uma vez que possuem maiores resistências mecânicas.

Em relação a expansão, os corpo de prova do traço T10 apresentou expansão apenas na idade de cura para 28 dias, para os corpos de provas curados em cal, diferente do traço T15 que teve uma leve expansão a partir do 14^o dia de cura, para os corpos de provas curados em cal, porém, o traço T15 observou-se uma menor expansão para 28 dias em comparação ao traço T10. Comparando os resultados dos traços, curados em cal, que tiveram a substituição do cimento por cinza de olaria com o traço TN e TE0 observou-se que o traço T10 obteve expansões semelhante, para 28 dias de cura, com o traço de empacotamento e houve uma expansão maior em comparação ao traço TN. Já o traço T15, para as mesmas condições, obteve menores expansões em comparação ao traço TE0, porém a expansão ainda foi um pouco maior em comparação ao traço TN.

Observou-se também que para a resistência a compressão axial comparando os corpos de provas atacados por sulfato de magnésio e sulfato de sódio apresentaram maiores resistências os curados em sulfato de magnésio, fato ocorrido para todos os traços analisados. Vale ressaltar que isso acontece para as idades iniciais de cura, e segundo a literatura e estudos citados por esse trabalho isso já era esperado uma vez que os cátions de magnésio produzem mais compostos expansivos que preenches os poros do material causando maior resistência mecânica em idades iniciais. Em relação a expansão geométrica observou-se que a somente a partir de 28 dias de cura houve um início de padronização dos valores de expansão para ambos os sulfatos

de sódio e de magnésio e como mostrado os estudos indicam que a padronização da expansão ocorrem a partir dos 42 dias de cura, sendo assim é necessário um estudo desses traços analisados para idades mais avançadas, uma vez que se estudou por 14, 21 e 28 dias. Vale ressaltar que o traço TEO não evidenciou expansão para as idades analisadas, sendo necessário observar para maiores idades de cura.

Assim, verificou-se que para essas idades iniciais de cura não houve grandes expansões geométricas necessitando de uma análise dos corpos de prova por mais tempo afim de verificar a progressão da patologia. Em relação as resistências mecânicas percebeu-se que a cinza de olaria teve uma influência positiva, dessa forma podendo ser aplicada na prática.

Logo, constata-se que o empacotamento de partículas na prática se mostra viável, uma vez que emprega técnicas simples para a composição final do traço, sendo necessário apenas a granulometria e dados de massa unitária e específica do agregado, apresentando bons resultados de expansão e resistência para argamassas para concreto.

De igual forma, associando o empacotamento de partículas com a substituição parcial do cimento por cinza de olaria, atende-se as duas problemáticas dadas na introdução desse trabalho, uma vez que ela contribui para o controle de porosidade do material, dando, assim, um uso para esse mineral. Ademais, verificou-se resistência aos ataques por sulfatos.

Sendo assim, visando aprofundar os conhecimentos sobre argamassas para concreto com baixo teor de cimento e adição de cinza, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Verificação da resistência mecânica para os traços dados nesse trabalho por mais dias de cura.
- Verificação da expansão para os traços dados nesse trabalho por mais dias de cura.
- Verificação da resistência mecânica (flexão) para os traços dados nesse trabalho.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, D. M. de. **Análise de variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e de estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- ARRUDA, R., MEIRA, G., BRAGA, F., FERREIRA, K., & ALVES, A Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, 2021. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rmat/a/hwYkKxdsKZWmBq7jsjCH4gP/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 23 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13583**: Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: Concreto e — Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSUNÇÃO, M. S. L.; MACEDO, G. C.C.; SILVA, A. C.C.; QUIRINO, R. G. B. Estudo da adição de cinza de olaria em blocos modulares de solo-cimento. In: X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 10., 2019, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: Ibeas, 2019. p. 01-06. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/III-130.pdf>. Acesso em 23 out. 2022.

BESERRA, A. V. S. **Análise do comportamento de concreto com baixo teor de cimento e adição de biomassa vegetal submetido ao ataque de íons sulfato**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

BONIFÁCIO, D. R., LUZ, T. M., de MATOS, A. C. T., dos SANTOS SILVA, E., de PAULA CORDEIRO, M. L., FONGARO, M. H. O., & de OLIVEIRA SILVA, T. Análise sobre ataques por sulfatos ao concreto de fundações. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ji-Paraná, v. 14, n. 4, 2022, p. 114-127. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20653>. Acesso em: 03 maio 2023.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 55, n. 333, mar. 2009, p. 18-32.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 15., 2003, João Pessoa. **Anais [...]** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2003, p. 2171-2181.

da COSTA, N. T., da SILVA, R. F., da SILVA, R. N., de SOUZA, J., & AVELINO, V. K. G. R. Efeitos da adição da cinza de olaria (czo) nas propriedades do concreto não estrutural. In: 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 3., 2020, Gramado. **Anais [...]** Gramado: Ibeas, 2020. p. 01-08. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/III-130.pdf>. Acesso em 23 out. 2022.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L. ; NUNES, R. R. A., MOURA, R. C. A. O CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, out. 2013

- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, [s.l.], v. 10, n. 5, set. 2017, p. 998-1024.
- DINIZ, H. A. A., de OLIVEIRA, J. N., da SILVA, L. P., de MACÊDO, M. S., & de SOUZA, M. M. Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento. **HOLOS**, [s.l.], v. 5, 2018, p. 51-64.
- DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição da cinza da casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7693/MARCELOADRIANODUART.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- FELIPE, M. C. Durabilidade, vida útil, e principais causadores da degradação das estruturas de concreto. In: IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN, 9., 2013, Currais Novos. **Anais [...]** Currais Novos: IFRN, 2013. p. 2505-2508. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1369/149>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- FERNANDES, S. E., TASHIMA, M. M., Moraes, J. C. B. D., ISTUQUE, D. B., FIORITI, C. F., MELGES, J. L. P., & AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, dez. 2015, p. 909-923. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/CmbqPSvvZDNBCMJgzhRV46R/?lang=pt>. Acesso em: 03 maio 2023.
- GIROTTI, L. S. **Cinética da hidratação do aluminato tricálcico cúbico e ortorrômbico na primeira hora: estudo com fases cristalinas sintéticas e extraídas do clínquer Portland**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/205352/001111406.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 6, n. 4, 2008, p. 83–94. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3721>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- HERMANN, A., BILCATI, G. K., AMES, I., SILVA, A. G. C. D., GROSSMAN, D. D. A., & FAUSTO, T. B. A Using a particle packing model considering cement as part of the. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020.
- HOPPE FILHO, J., SOUZA, D. J., MEDEIROS, M. D., PEREIRA, E., & PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, 2015, p. 168-177. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/crzQLMfRtvsd4p3b8p8DP8Q/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 maio 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis — Laser diffraction methods. Genebra, 2009.

KACZAM, F. **Avaliação do processo produtivo de uma indústria de cerâmica vermelha do oeste paranaense por meio da aplicação de ferramentas da qualidade**. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12891/1/avaliacaoprocessoprodutivoceramica.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Avaliação da carbonatação e absorção capilar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4460/000411974.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 maio 2023.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de aplicação de partículas na otimização de dosagem de concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-04072019-123140/publico/ME2019_HerbertMedeirosTorresLopes.pdf. Acesso em: 04 maio 2023.

MACIEL, M. H., BERNARDO, H. M., SOARES, G. S., ROMANO, R. C. D. O., CINCOTTO, M. A., & PILEGGI, R. G. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 18, n. 1, 2018, p. 245-259. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/hQ9CtgbtCC8pt3xvDjvbqSc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 maio 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, F. C. A. C. **Análise de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza Residual de Lenha de Algaroba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14842/1/FellipeCACM DISSERT.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

Mizu Cimentos Especiais. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico** – FISPQ Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente à Sulfatos CPV. 2022.

NUNES JUNIOR, J. J. **Efeito do pó de pedra em argamassa para alvenaria estrutural**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

OLIVEIRA, C. O., MACIEL, G. D. F., CASTRO, A. L. D., BARBOSA, M. P., & CAMPOS,

R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/PTrk3PVCJc6rkMWLWtB5RCL/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 maio 2023.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-científica**, Paraná, n. 1, 2013, p. 1-14.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. “**Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Rio Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

ROCHA, C. A. A. **Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008. Disponível em: <https://uenf.br/cct/leciv/files/2015/01/5.pdf>. Acesso em: 03 maio 2023.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção civil e a degradação ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, [s.l.], v. 7, n. 13, 2009, p. 111-128.

SANTIAGO, W. C. Estudo da não conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural. **Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos**, 2011.

SARKAR, R. Particle size distribution for refractory castables: a review. **Interceram: International ceramic review**, v. 65, n. 3, 2016.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, L. H. P., TAMASHIRO, J. R., ANTUNES, P. A., & PEREIRA, D. R. Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, set. 2020.

SOUZA, DJ DE; MEDEIROS, MHF; HOPPE FILHO, J. Avaliação do ataque externo por sulfato (Na_2SO_4 e MgSO_4): Argamassas de cimento Portland contendo fíleres. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, p. 644-655, 2020.

TAINARA, A. C. J.; BARRETO, M. F. F. M. Análise Comparativa dos Sistemas Construtivos em Alvenaria Convencional, Alvenaria Estrutural e Moldes Isolantes para Concreto (Icf). **E&S Engineering and Science**, [s.l.], v. 7, n. 3, 2018, p. 12-27.

TEIXEIRA, C. S.; CORDON, H. C. F. **Estudo da influência do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto**. Mauá: Escola de Engenharia de Mauá, 2015. Disponível em: <https://maua.br/files/032015/202840545-ESTUDO-DA-INFLUENCIA-DO-EMPACOTAMENTO-DE-PARTICULAS-NAS-PROPRIEDADES-DO-CONCRETO.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 9, n. 3, 2016, p. 357-394. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/zX5CrBchZQq8z8ZMSM3zzFG/?lang=en>. Acesso em: 03 maio 2023.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 10, n. 1, 2010, p. 77-90. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/fY6tZyRgJfYC8c4kPwTxxRw/?lang=pt>. Acesso em: 18 maio 2023.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Cajazeiras-PB
2023

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação da Prof.^a. Ma. Raquel Ferreira do Nascimento e Coorientação do Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2023

Ficha catalográfica a ser inserida no verso da folha de rosto (2ª folha deste documento) e deve ser providenciada APENAS junto à Biblioteca do *Campus*.

Catálogo da Publicação na Fonte. IFPB / Nome da Biblioteca

A large empty rectangular box with a thin black border, intended for the cataloging information. It occupies the lower half of the page.

LUCAS GONÇALVES BESERRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSA COM BAIXA POROSIDADE INCORPORADA COM CINZA DE
OLARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 14 de Julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Raquel Ferreira do Nascimento – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Robson Arruda dos Santos– IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador



Documento assinado digitalmente

LEONARDO DE SOUZA DIAS

Data: 27/07/2023 15:47:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo de Souza Dias– UFPB-*Campus* João Pessoa

Dedico este trabalho ao meu Deus, meus pais, amigos e familiares, pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem sirvo, por ter me ajudado e me guiado para chegar até aqui.

Aos meus pais, Luiz Beserra e Samara Alves, por sempre terem se esforçado para me proporcionar educação de qualidade, apoio e palavras de encorajamento.

Às minhas irmãs, Barbara Luísa, Beatriz, Manuela e Maria Luísa, por serem uma base firme e sólida na qual sempre pude confiar.

À Débora Fernandes, minha fiel companheira, por ser minha auxiliadora e sempre estar comigo, desde o primeiro ao último período, me motivando com palavras e ações de encorajamento.

Aos demais familiares que me prestaram apoio.

Agradeço a todos os professores que me ajudaram a chegar até aqui, em especial à Amanda Costa, por ter me incentivado a buscar os meus sonhos, mesmo quando tudo parecia impossível.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, me apoiando e motivando a chegar até o fim, em especial: Priscila Arruda, Yury Diniz, Gabriel Morais, Fernanda Rolim e Mel Andrade.

Ao Dr. Robson Arruda e à Ma. Raquel Nascimento, por terem contribuído de forma grandiosa em meu aprendizado, tanto na produção deste trabalho como na vida profissional.

Ao José, pela ajuda na execução dos ensaios nos laboratórios do Campus do IFPB.

RESUMO

A durabilidade é um aspecto fundamental em todas as etapas do processo construtivo, desde a fundação até o revestimento, a fim de garantir segurança e conforto. No entanto, estruturas de concreto podem sofrer degradação devido a ataques químicos, físicos e biológicos. Logo, se faz necessário o estudo de métodos que contribuam para um melhor desempenho das estruturas quanto a sua durabilidade. Também, o Brasil é o segundo maior produtor de cerâmica do mundo, e as olarias geram uma grande quantidade de resíduos durante o processo de produção, conhecidos como cinza de olaria, que muitas vezes são descartados de maneira inadequada. Dessa forma, com o intuito de amenizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado das cinzas provenientes de olarias e mitigar os danos acusados pelo ataque de sulfato nas estruturas, esse estudo analisou a influência da cinza como uma adição mineral. Para alcançar esse objetivo, um estudo experimental foi conduzido, o qual envolveu a caracterização dos materiais utilizados, uma avaliação das mudanças dimensionais de amostras de argamassa e uma análise da resistência mecânica. Desse modo, foram analisados traços de argamassas, utilizando o método de empacotamento de partículas, calculado pelo programa Q-mix, contendo 10% e 15% de substituição de massa de cimento por cinza de olaria, sendo submetidas a três ambientes, sendo eles a cura convencional, cura com sulfato de sódio e cura com sulfato de magnésio. Assim, percebeu-se que para a análise de expansão geométrica para 14, 21 e 28 dias as expansões não seguiram um padrão, visto que necessita mais tempo de análise, sendo o melhor traço o de empacotamento de partículas. Para a análise da resistência mecânica aos 7 e 28 dias verificou-se que o traço T10 o mais resistente.

Palavras-chave: Patologia; Ataque por sulfato; Empacotamento de partículas; Durabilidade.

ABSTRACT

Durability is a fundamental aspect in all stages of the construction process, from the foundation to the cladding, in order to guarantee safety and comfort. However, concrete structures can suffer degradation due to chemical, physical and biological attacks. Therefore, it is necessary to study methods that contribute to a better performance of structures regarding their durability. Also, Brazil is the second largest producer of ceramics in the world, and potteries generate a large amount of waste during the production process, known as pottery ash, which is often disposed of improperly. Thus, with the aim of mitigating the environmental impacts caused by improper disposal of ash from brickworks and mitigating the damage caused by sulfate attack on structures, this study analyzed the influence of ash as a mineral addition. To reach this objective, an experimental study was carried out, which involved the characterization of the materials used, an evaluation of the dimensional changes of mortar samples and an analysis of the mechanical resistance. Thus, mortar traces were analyzed, using the particle packing method, calculated by the Q-mix program, containing 10% and 15% of replacement of cement mass by pottery ash, being submitted to three environments, namely the conventional curing, sodium sulfate curing, and magnesium sulfate curing. Thus, it was noticed that for the geometric expansion analysis for 14, 21 and 28 days, the expansions did not follow a pattern, since it requires more analysis time, with the best trace being that of particle packing. For the analysis of the mechanical resistance at 7 and 28 days it was found that the T10 trait was the most resistant.

Keywords: Pathology; Sulphate attack; Particle packing; Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Migrografia de cristais monossulfato hidratado e cristais de etringita.....	22
Figura 2 - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	23
Figura 3 - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.	24
Figura 4 - Causas físicas da deterioração do concreto.	24
Figura 5 - Deterioração do concreto por Reações Químicas.....	25
Figura 6 - Granulometria do cimento CPV-ARI.	32
Figura 7 – Caracterização química do cimento CPV- ARI.....	32
Figura 8 - Granulometria da cinza de olaria.	34
Figura 9 - Faixas do agregado miúdo- Referência de norma.	35
Figura 10 - Faixas do agregado miúdo- Empacotamento de partículas.	35
Figura 11 - Faixas do agregado miúdo- T10 e T15.....	36
Figura 12 - Corpos de prova prismáticos.	39
Figura 13 – Resistências à compressão - traço de referência de norma.	42
Figura 14 – Resistência à compressão - traço empacotamento de partículas.....	43
Figura 15 – Resistência a compressão - traço T10.....	44
Figura 16 – Resistência à compressão - traço T15.....	45
Figura 17 - Expansão média em porcentagem das argamassas de referência da norma.	47
Figura 18 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com empacotamento de partículas.....	49
Figura 19 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T10....	50
Figura 20 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T15....	51
Figura 21 - Amostra de corpos de provas submetidos a cura em cal.	53
Figura 22 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de sódio.....	53
Figura 23 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de magnésio.....	54
Figura 24 - Amostra da formação de compostos oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.....	52
Figura 25 - Amostra da formação de cristais oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova	53

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.	30
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química do cimento Portland.	20
Quadro 2 – Normas utilizadas na caracterização dos materiais.	31
Quadro 3 - Caracterização química da cinza de olaria.....	33
Quadro 4 – Massa específica do agregado miúdo.....	36
Quadro 5 – Massa unitária do agregado miúdo.....	36
Quadro 6 – Medidas do traço TN.....	37
Quadro 7 - Traço de empacotamento de partículas.....	38
Quadro 8 – Medidas do traço TE0.	38
Quadro 9 – Medidas do traço T10.....	38
Quadro 10 – Medidas do traço T10.....	39
Quadro 11 – Normas utilizadas para a cura submersa.	40
Quadro 12 – Normas utilizadas para os ensaios.....	40
Quadro 13 – Esquema do que foi realizado em cada idade de cura.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

CAA – Classes de Agressividade Ambiental

CAD – Concreto com Alto Desempenho

CBV – Cinza de Biomassa Vegetal

DEF - *Delayed Ettringite Formation*

ISO - *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

Na^+ – Íon de sódio

K^+ – Íon de Potássio

Mg^{2+} – Íon de Magnésio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

% – Porcentagem

CO_2 – Dióxido de carbono

C_2S – Silicato bicálcio

C_3S – Silicato tricálcico

C_3A – Aluminato tricálcico

C_4AF – Aluminoferrato tetracíclico

CaO – Óxido de cálcio

SiO_2 – Dióxido de silício

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro(III)

MgO – Óxido de magnésio

SO_3 – Óxido sulfúrico

H_2O – Água

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – Alita

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – Belita

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – Aluminato tricálcio

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – Aluminoferrito de tetracálcio

→ - Indicação de transformação química que produz outras substâncias

SO_4^{2-} - Íons de sulfato

CaOH_2 - Hidróxidos de cálcio

AFm - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado

DS - Diâmetro Mínimo

DI - Diâmetro Máximo

q - Módulo de Distribuição

mm – Milímetro

g – Grama

L - Litro

NaSO_4 - Sulfato de sódio

MgSO - Sulfato de magnético

Ca(OH)_2 - Hidróxido de cálcio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	MICROESTRUTURA DO CONCRETO.....	20
3.1.1	Durabilidade.....	22
3.1.2	Efeito de íons sulfato no concreto	25
3.2	ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO.....	26
3.2.1	Cinza de olaria.....	27
3.3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	27
3.3.1	Método de furnas.....	28
3.3.2	Modelo de Andreasen e Andersen	28
3.3.3	Método de Alfred	29
4	METODOLOGIA	30
4.1	COLETA DE MATERIAIS.....	31
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	31
4.2.1	Cimento.....	31
4.2.2	Cinza de olaria.....	33
4.2.3	Agregado.....	34
4.2.4	Definição do traço	37
4.2.5	Moldagem	39
4.2.6	Cura submersa.....	39
4.2.7	Ensaio no estado endurecido	40
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	42

5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	42
5.2	EXPANSÃO GEOMÉTRICA	47
6	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIA.....	58

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil exerce uma importante função na sociedade, sendo o ramo capaz de imaginar, projetar e executar construções de todos os tamanhos, formatos e materiais possíveis. Dentre os materiais usados, destaca-se o concreto. Conforme Couto *et al.* (2013), o concreto é amplamente considerado o principal material utilizado na construção civil, sendo uma mistura heterogênea composta principalmente por cimento, água e agregados como pedra, areia e outros materiais similares. Além disso, é possível incorporar diversos aditivos para melhorar suas propriedades ou conferir características específicas ao concreto.

Ademais, é fundamental ressaltar que a segurança e o conforto dependem diretamente da seleção apropriada dos materiais de construção. De fato, essa escolha criteriosa representa um dos principais elementos que asseguram a longevidade e resistência da estrutura. Assim, a durabilidade é algo que deve estar presente em todas as etapas do processo construtivo (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Conforme Felipe (2013), a degradação das estruturas de concreto pode acontecer por meio de ataques químicos, físicos e biológicos. Os ataques químicos e físicos podem afetar diretamente a durabilidade da estrutura, podendo causar a degradação do material uma vez que a sua microestrutura é afetada de forma direta.

Também, segundo Mehta e Monteiro (2008), as fases que contêm alumina, bem como o hidróxido de cálcio, contidos no Cimento Portland, são mais vulneráveis ao ataque de íons sulfato, e ambos os hidratos que contêm alumina se convertem à forma altamente sulfata da etringita. Seguidamente, dependendo do tipo de cátion associado à solução de sulfato, Na^+ , K^+ ou Mg^{2+} , tanto o hidróxido de cálcio quanto o C-S-H, presentes na pasta de Cimento Portland hidratada, podem se converter em gipsita pelo ataque por sulfato. Assim, a gipsita e a etringita resultantes de reações químicas entre os compostos de sulfato e os produtos de hidratação do Cimento Portland, causando fissurações devido a expansão, redução de resistência e diminuição de massa devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento.

Paralelo a posição de destaque, Roth e Garcias (2013) falam que a indústria da construção civil ocupa posição de destaque na economia do Brasil, porém apresenta-se como grande geradora de impactos ambientais que resultam na formação de áreas degradadas. Diante disso, a engenharia civil, na mesma proporção que busca aumentar a durabilidade das suas construções, investiga formas para minimizar os danos causados a natureza e, sempre que possível, reaproveitar os insumos capazes de contribuir de forma positiva para o aumento das

propriedades dos materiais. Entre as matérias primas que podem ser utilizadas, encontram-se os resíduos provenientes da indústria de produção de cerâmica e da mineração, como a cinza de olaria.

Tem-se que o Brasil é o segundo maior produtor de cerâmica do mundo. Além disso, as olarias, locais onde os materiais cerâmicos são produzidos, também são conhecidas devido a grande quantidade de resíduos que são gerados durante o processo de produção. Assim, esses despojos são denominados como cinza de olaria, que muitas das vezes são descartados de forma irregular ao meio ambiente. Conforme Costa *et al.* (2020), o descarte inadequado da cinza de olaria pode acarretar graves danos ao meio ambiente, afetando a natureza, o solo, os recursos hídricos e comprometendo a saúde da população local.

Desta forma, para buscar um meio de mitigação do mal causado à natureza devido ao descarte da cinza, investiga-se a sua incrementação na produção de materiais construtivos. Embora os ensaios laboratoriais constatem que adicionar 10% da cinza de olaria no traço de blocos solo-cimento ajudaram a preencher os vazios do material, gerando uma boa viabilidade, ainda são necessários estudos mais aprofundados sobre o tema para mostrar uma efetividade dos benefícios que a adição desse resíduo pode causar em materiais argamassados (ASSUNÇÃO *et al.*, 2019).

Além disso, segundo Beserra (2019), a indústria cimentícia, sendo a produtora do principal componente do concreto, é responsável pela emissão de 88,6% a 92,2% de dióxido de carbono (CO₂). Dessa forma, é notória a sua contribuição para a degradação ambiental. Logo, é preciso realizar estudos nessa área para encontrar maneiras de reduzir a sua medida na produção do concreto.

Adicionalmente, um estudo realizado por Costa *et al.* (2020), na Cidade de Gramado-RS, verificou que as cinzas de olarias não possuem atividade pozolânica. Desta forma, esse material pode ser utilizado como filler, preenchendo vazios, proporcionando benefícios à resistência mecânica e ambientais com a sua reciclagem. No entanto, deve-se realizar mais pesquisas na área a fim de se obter respostas mais específicas quanto a resistência à tração, capacidade de absorção de água e ataques por sulfato.

Dessa forma, Beserra (2019) realizou um estudo com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto produzido com baixo teor de cimento e adição de cinza de olaria, no qual verificou-se que o concreto com adição, sob ataque de sulfato de sódio, obteve uma melhoria na resistência à atuação do sulfato de sódio em comparação ao concreto convencional.

Para o desenvolvimento desse trabalho, o capítulo 2 foi destinado a descrição dos

objetivos. O capítulo 3 está dedicado a revisão da literatura. O capítulo 4 irá apresentar a metodologia usada para a obtenção dos resultados. Seguidamente, o capítulo 5 explanará os resultados, bem como suas respectivas análises. Por fim, o capítulo 6 apresentará as conclusões da pesquisa.

Portanto, esse estudo terá seu foco na verificação dos benefícios que a incorporação da cinza de olaria pode originar em argamassas para concreto, avaliando a capacidade de suportar aos ataques químicos e solicitações físicas que podem ser submetidos durante toda a sua vida útil e como alternativa sustentável no desenvolvimento de concreto.

2 OBJETIVOS

Esse capítulo é destinado aos objetivos da pesquisa proposta.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassa para concreto com substituição parcial do cimento por cinza de olaria.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a influência da adição de cinza de olaria na resistência mecânica de argamassa, com e sem ataque por sulfato;
- compreender a influência da adição de cinza de olaria no controle de expansão da argamassa mediante ataque por sulfato;
- realizar comparação das propriedades das argamassas mediante exposição a ambientes agressivos contendo sulfato de sódio e de magnésio.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MICROESTRUTURA DO CONCRETO.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a microestrutura do concreto é constituída por fases que são de diferentes tipos, tamanhos, quantidades e distribuições, características que possuem influência direta nas propriedades mecânicas, físicas e químicas do material. Dessa forma, entende-se a importância de se realizar estudos nesse segmento, visando a melhoria, criação de novos materiais e técnicas construtivas.

De acordo com Duart (2008), a microestrutura do concreto é formada por três fases, que são: fase agregado, matriz da pasta de cimento e a zona de transição, as quais serão explicadas nos tópicos seguintes:

a) Agregado

A fase agregado é responsável pela massa unitária, modulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. Porém, mesmo sendo a mais resistente das fases, ela não irá possuir, na maioria das vezes, influência direta na resistência do concreto. A dimensão do agregado graúdo, contudo, irá interferir de forma indireta na resistência, visto que quanto mais alongado e achatado for o agregado, mais filme d'água irá ocorrer em sua superfície, enfraquecendo a zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

b) Matriz pasta de cimento

O Cimento Portland possui quatro constituintes principais, sendo eles: Silicato bicálcio (C_2S), silicato tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) e aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), (KIRCHHEIM, 2003).

O Quadro 1 mostra a composição química do Cimento Portland:

Quadro 1 - Composição química do cimento Portland.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
SiO ₂	S	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Al ₂ O ₃	A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Fe ₂ O ₃	F	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
MgO	M	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$	$C_4A_3\bar{S}$
SO ₃	\bar{S}	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	$C_3S_2H_3$

H ₂ O	H	CaSO ₄ .H ₂ O	C $\bar{5}$ H ₂
------------------	---	-------------------------------------	----------------------------

Fonte: Adaptado Mehta e Monteiro (2008)

Quando esses compostos químicos entram em contato com a água, ocorre o processo de hidratação, gerando a formação de cristais (SANTIAGO, 2011).

No entanto, o processo de hidratação do cimento dependerá do seu tipo, da sua finura, da relação água cimento (a/c), da temperatura de cura e dos aditivos usados. (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006).

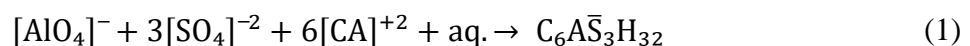
O processo será constituído por reações simultâneas dos compostos anidros com a água, porém, eles possuem velocidade de hidratação diferentes, sendo os aluminatos mais velozes que os silicatos. Assim, tem-se que a perda de consistência e a pega ocorrem devido as reações de aluminatos. Além disso, percebe-se que o resultado das reações químicas entre sulfatos, cálcio, aluminato e íons hidroxila são cristais de etringita primária (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ademais, tem-se que a matriz pasta de cimento é uma mistura heterogênea de partículas, filmes, micro cristais e elementos sólidos, sendo ligados por uma massa porosa que contém porções de alguns vazios e soluções, sendo essa fase a mais importante para o concreto, pois ela tem mais influência na sua durabilidade, visto que essa propriedade está diretamente relacionada com a permeabilidade da pasta de cimento hidratada (SANTIAGO, 2011).

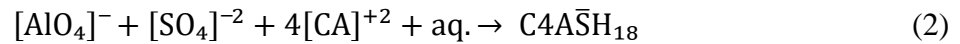
Sabendo disso, vale salientar que o sulfato afeta o mecanismo de hidratação do C₃A formado por dois compostos químicos. Primeiramente, a reação entre água, sulfato e C₃A formará etringita, posteriormente, devido ao teor de sulfato ter caído pela reação do C₃A que resta, reage com a água e a etringita, tendo como produto o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (GIROTTO, 2018).

As reações químicas da etringita e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado são escritas da seguinte forma:

- Etringita:

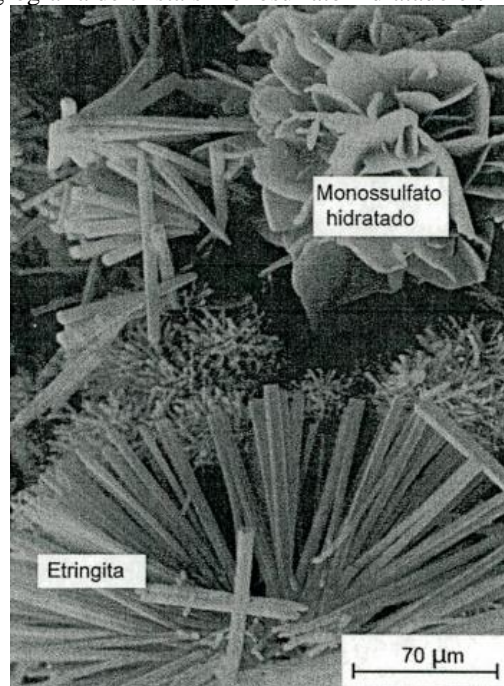


- Monossulfato:



Por meio de uma micrografia eletrônica é possível perceber a forma geométrica hexagonal que têm os cristais de monossulfato e a forma cilíndrica que têm os cristais de etringita, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Migrografia de cristais monossulfato hidratado e cristais de etringita.



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

c) Zona de transição

Por fim, a última fase da microestrutura do concreto diz respeito a zona de transição que, consoante a Castro (2008), corresponde a região que está localizada pela interface agregado-pasta e, conforme Mehta e Monteiro (2014), é o elo mais fraco do concreto.

3.1.1 Durabilidade

O conceito de durabilidade do concreto vem passando por modificações ao longo dos anos, segundo Almeida (2019), e os fatores que a influenciam são: as propriedades dos materiais, a interação destas propriedades com o meio ambiente no qual a estrutura está inserida

e o desempenho final observado pelo usuário. Dessa forma, a engenharia civil deve buscar meios para que a estrutura seja utilizada de forma segura pelo maior tempo possível e da melhor forma possível.

Também, a durabilidade do concreto pode ser influenciada por diversos fatores, por exemplo, o meio no qual esse material estará exposto, a forma de cura e ações de carregamentos, os quais podem ocasionar microfissuras ou fissuras na estrutura (VASCONCELOS; AKASAKI, 2010). Logo, entende-se que a durabilidade passa a ter uma visão mais ampla no que diz respeito ao desempenho da estrutura, sendo um assunto que engloba a interação da estrutura com o ambiente e com o indivíduo que a utiliza.

Dessa forma a NBR 6118 (ABNT, 2014), dispõe de uma tabela com classificações de agressividade ambiental, conforme o ambiente em que a estrutura se encontra, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

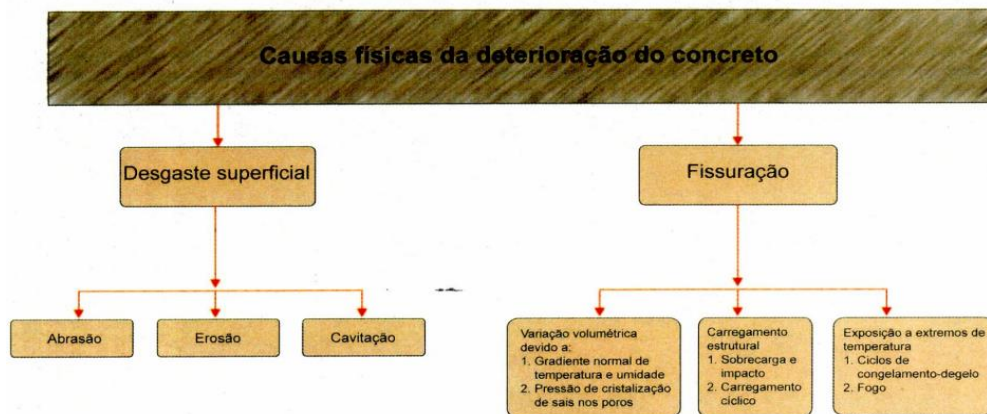
O processo de deterioração do concreto pode acontecer por diversas formas. Reis (2001) organizou esses mecanismos em uma tabela que será mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.

MECANISMO	AGENTES	AÇÃO	SINTOMATOLOGIA
1. Lixiviação	Águas puras, carbônicas agressivas e ácidas	Carrear compostos hidratados da pasta de cimento	- Superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial;- Eflorescência de carbonato;- Elevada retenção de fuligem / fungos
2. Expansão	Águas e solos contaminados por sulfatos	Reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado	- Superfície com fissuras aleatórias e esfoliação - Redução da dureza e do pH
3. Expansão	Agregados reativos	Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos	- Expansão geral da massa do concreto - Fissuras superficiais e profundas
4. Reações deletérias	Certos agregados	Transformações de produtos ferruginosos presentes nos agregados	- Manchas, cavidades e protuberância na superfície do concreto
5. Despassivação da armadura	Gás carbônico da atmosfera	Penetração por difusão e reação com os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução	- Requer ensaios específicos - Em casos mais acentuados, apresentam manchas, fissuras, destacamentos do concreto, perda da seção resistente e da aderência
6. Despassivação da armadura	Cloretos	Penetração por difusão, impregnação ou absorção capilar, despassivando a superfície do aço.	- Requer ensaios específicos - Ao atingir a armadura apresenta os mesmos sinais do item 5.

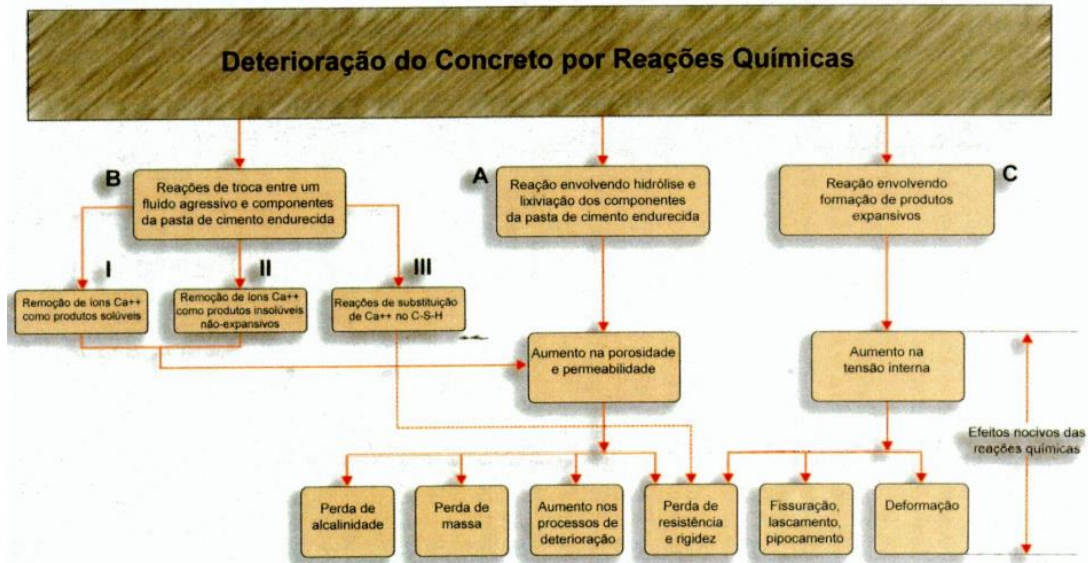
Fonte: Reis, 2001.

Além disso, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a deterioração do concreto se dá pelos ataques físicos e químicos, sendo as causas físicas desencadeadas pelo desgaste superficial e fissuração e as causas químicas dependendo do tipo de agressor. Valendo ressaltar que nesses ataques as reações não precisam ser precisamente entre os agentes externos e a pasta, pois existem reações que ocorrem entre minerais reativos e os álcalis. No entanto, sempre existirá a perda de resistência, conforme apresenta as Figuras 4 e 5, respectivamente:

Figura 4 - Causas físicas da deterioração do concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

Figura 5 - Deterioração do concreto por Reações Químicas.



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

3.1.2 Efeito de íons sulfato no concreto

De acordo com Tainara e Barreto (2018), denomina-se ataque por sulfato uma série de reações químicas que acontecem entre íons de sulfato e os produtos oriundos da hidratação do cimento Portland. Os íons de sulfato (SO_4^{2-}) são alguns dos fatores que acarretam a deterioração do concreto, possuindo diversas origens. Dessa forma, os íons provenientes do meio, ao entrarem em contato com a matriz farão com que ocorram reações químicas, com os hidróxidos de cálcio (CaOH_2), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) (HOPPE FILHO *et al.*, 2015).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o ataque por sulfato vindo de uma fonte externa poderá ter duas formas de atuação distintas entre si, sendo que a predominante dependerá da concentração, da fonte dos íons sulfato que estarão na água de contato e da composição da pasta de cimento que compõe o concreto.

De acordo com Hoppe Filho *et al.* (2015), as fases de atuação do processo de deterioração do concreto por ataque de sulfato são duas, sendo a primeira caracterizada por um período em que não ocorrem nenhum efeito resultante, denominado por período de dormência, e na segunda fase existirá uma significativa expansão.

A expansão oriunda do ataque de íons de sulfato está relacionada com a formação da etringita secundária, ocasionadas por uma fonte externa de sulfatos e também da etringita tardia, ocasionada por uma fonte interna de sulfatos (DEF – Delayed Etringite Formation). Conforme

Torres e Andrade (2016), esse fenômeno resultará em fissuras mapeadas ou direcionadas na superfície do concreto.

Segundo Bonifácio *et al.* (2022), os tipos de sulfatos mais comuns são: sulfato de sódio, sulfato de potássio, sulfato de magnésio e sulfato de cálcio. Assim, entre os sulfatos, o mais forte é o de magnésio, pois durante o ataque as reações químicas acontecerão dando origem a gipsita, devido a conversão do hidróxido de cálcio, e acompanhada dela ocorrerá a formação do hidróxido de magnésio. Esse composto é insolúvel e torna o concreto mais ácido ao reduzir a sua alcalinidade. Caso não exista hidroxilas na solução durante o ataque, o C-S-H se tornará instável (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2 ADIÇÕES NO CONCRETO

Conforme Bonifácio *et al.* (2022), os concretos conhecidos como especiais possuem em sua composição mais do que uma mistura comum de água, cimento e agregados, mas, sim, adições químicas e adições minerais, que oferecem inúmeros benefícios relativos à propriedade do concreto, acrescentando características especiais ao material.

Ademais, Fernandes *et al.* (2015), afirma que ao incorporar adições minerais em concretos, algumas de suas propriedades serão melhoradas e isso se deve ao refinamento dos poros e dos grãos, aumento da tortuosidade dos canais e aos poros que passam a ter uma interconectividade reduzida. Dessa forma, fazendo o controle de forma adequada, muitos dos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, por meio da adição mineral (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Rocha (2008) apresenta que a eficiência da adição mineral poderá variar conforme a quantidade utilizada, das condições de cura, da composição química, mineralógica e granulométrica, sendo as duas últimas características as principais responsáveis pela alteração do comportamento do concreto.

Mehta e Monteiro (2008), dividem as adições minerais em duas formas, são elas:

- a) Materiais naturais: sendo esses processados com o único intuito de produzir pozolana. O material passa por processo de britagem, moagem e separação por granulometria; e em alguns casos tem-se a necessidade de haver uma ativação térmica.
- b) Materiais de subproduto: eles são os subprodutos industriais que podem ou não exigir algum processamento.

Assim, as cinzas da casca de arroz, biomassa de cana de açúcar e o meta caulim são alguns dos minerais usados no concreto para incrementação do aumento das propriedades

(DINIZ *et al.*, 2018) Dessa forma, é necessário o estudo de novas fontes de minerais que possam ser usadas na composição do concreto a fim de melhorar suas características.

3.2.1 Cinza de olaria

Conforme Silva *et al.* (2020), durante a produção da cerâmica vermelha, uma grande quantidade de energia é empregada, além dos recursos naturais, tendo como subprodutos cinzas provenientes da queima da lenha. De acordo com a Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2015), existem cerca de 5.437 empresas do ramo no Brasil, sendo responsáveis pela produção de 1.869.231.000 telhas, 4.675.095.000 blocos cerâmicos e 6.048 toneladas tubos cerâmicos por ano.

Assim, tem-se que o Brasil, todos os anos, produz toneladas de cinza de olarias provenientes da queima da lenha para a produção de materiais cerâmicos. No entanto, Melo (2012) expõe que essa elevada quantidade de cinza muitas das vezes são descartadas de forma irregular ao meio ambiente, sendo jogadas em valas abertas no próprio terreno das olarias e sem nenhum fim comercial, poluindo, assim, o meio ambiente.

Um estudo realizado por Silva *et al.* (2020) caracterizou a cinza proveniente dos fornos de uma olaria da cidade de Presidente Epitácio - SP. Como resultado dessa caracterização, observou-se que a cinza de olaria apresentou a formação de material vítreo sem reatividade pozolânica, dando margem a estudos futuros sobre a utilização desse mineral como um agregado miúdo que produza o efeito de *filler*.

Por fim, vale ressaltar que, devido a cinza de olaria ser proveniente da queima de madeira, a sua propriedade pode ser diferente de acordo com o tipo de madeira usada. Assim, é necessário realizar a caracterização do material e analisar a sua influência como adição.

3.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Segundo Lopes (2019), o empacotamento de partículas irá consistir em otimizar composições com o emprego de partículas de diferentes tamanhos, tendo, assim, um refinamento dos poros que resultará na redução do volume de pasta necessário para envolver as partículas da mistura.

Conforme Castro e Pandolfelli (2009), o estudo do empacotamento de partículas envolverá a correta relação entre os tamanhos adequados das partículas dos materiais usados, assim, os espaços que as partículas maiores deixam são preenchidas por partículas menores e

os vazios ainda existentes são preenchidos por partículas muito menores e assim sucessivamente.

Assim, para produzir concretos com altos desempenhos (CAD), será necessário o estudo da engenharia de microestrutura. Dessa forma, a seleção e dosagem dos materiais que compõe o CAD devem ser cuidadosamente dosados. Entre os métodos de dosagem está o conceito de reologia e de empacotamento de partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Sarkar (2016), afirma que muitos pesquisadores já estudaram sobre a influência das diferentes granulometrias na composição do concreto, porém o método de furnas, o modelo de Andreasen e Andersen e o método de Alfred são os mais aceitos atualmente.

3.3.1 Método de furnas

Furnas desenvolveu, usando uma abordagem discreta, uma forma para calcular o volume aparente de misturas binárias ou de multicomponentes. Ele constatou que se todos os vazios fossem preenchidos, tinha-se o máximo empacotamento, e ao observar que as matérias-primas formam uma progressão geométrica, ele generalizou que sua teoria serviria para qualquer mistura poli modal (MACIEL *et al.*, 2018).

Assim, Furnas definiu a Equação 3 como resultado da sua teoria:

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_l^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

CPFT: Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p : Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s : Diâmetro da menor partícula em mm;

D_l : Diâmetro da maior partícula em mm;

r : Quociente entre o volume retido em uma malha e na imediatamente inferior.

3.3.2 Modelo de Andreasen e Andersen

Andreasen mostrou que, em uma composição granulométrica, todos os tamanhos de partículas podem estar presentes e, com isso, uma teoria de empacotamento deveria ser desenvolvida considerando a granulometria. Assim, para ele, o empacotamento ideal deve ser

obtido a partir da imagem de granulação, que seria uma hipótese de similaridade em torno de duas partículas específicas que possuem tamanhos muito diferentes. Dessa forma, o autor desenvolveu uma Equação 4 (MACIEL *et al.*, 2018).

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D}{D_1}\right)^q * 100 \quad (4)$$

Onde:

CPFT: Percentual acumulado de finos menor que “D” em volume;

D : Tamanho da partícula;

D₁ : Maior tamanho de partícula de distribuição.

q : Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

3.3.3 Método de Alfred

Após uma análise de comparação entre os modelos de Furnas e Andreasen, Dinger e Funk conseguiram provar que ambos os modelos convergem matematicamente para uma mesma equação (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Hermann *et al.* (2020) relata que, dentre os modelos disponíveis, o método de Alfred, conhecido como Andreasen modificado, se destaca por possuir maior eficiência no empacotamento de partículas e por ser mais condizente com a realidade. Conforme Castro e Pandolfelli (2009), o modelo de Alfred introduz o conceito do tamanho mínimo de partículas (DS) na equação de Andreasen, envolvendo também uma revisão matemática do modelo de Furnas, gerando assim a Equação 5.

$$\text{CPFT (\%)} = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_1^q - D_s^q}\right) * 100 \quad (5)$$

Onde:

CPFT: Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p;

D_p : Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s : Diâmetro da menor partícula em mm;

D₁ : Diâmetro da maior partícula em mm;

q : Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

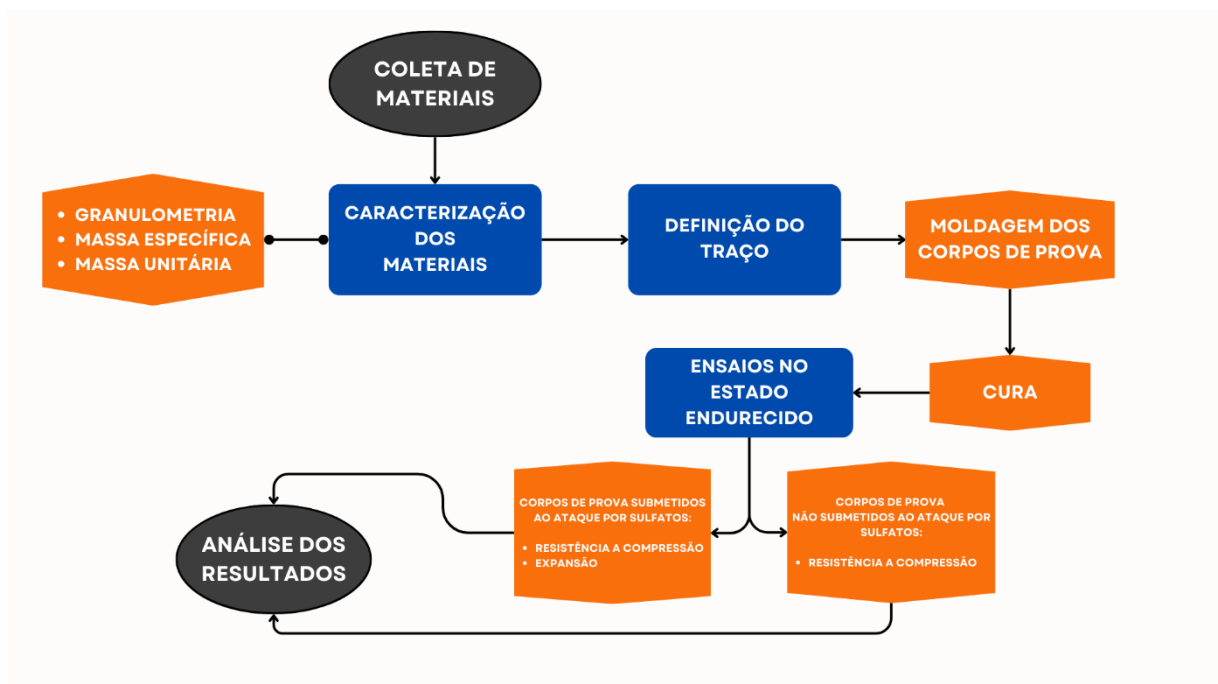
4 METODOLOGIA

Este capítulo dedica-se a mostrar todo o percurso metodológico que foi necessário para atingir o objetivo dessa pesquisa, descrevendo os métodos e materiais que foram usados.

Quanto à abordagem, essa pesquisa é quantitativa, visto que tem seu enfoque na análise de argamassa no estado fresco e endurecido. Quanto à natureza, ela é aplicada, pois tem por objetivo a mitigação ao ataque de NaSO_4 (Sulfato de sódio) e MgSO_4 (Sulfato de Magnésio) em argamassas para concreto. Quanto ao objetivo, a pesquisa é descritiva, uma vez que foi caracterizada a durabilidade de argamassa com substituição de cinza de olaria.

Por fim, esse trabalho será experimental, já que para obtenção dos dados necessários para a resolução dos problemas foi preciso usar de experimentos e reproduzir relações de causa e efeito. A pesquisa seguiu conforme indica o Fluxograma abaixo.

Fluxograma 1 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1 COLETA DE MATERIAIS

Essa etapa se destina a coleta dos materiais usados para o desenvolvimento da pesquisa.

São eles:

- a) Areia
- b) Sulfato de Sódio (NaSO_4)
- c) Sulfato de Magnésio (MgSO_4)
- d) Cinza de olaria

A cinza de olaria foi adquirida da empresa Irmãos Rolim Cerâmica, localizada na cidade de São João do Rio do Peixe – PB.

- e) Cimento CP V - ARI

O cimento usado foi comprado da empresa Churrasqueiras Fortaleza, localizada no município de Cajazeiras – PB.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais é de suma importância para as pesquisas, pois é por meio dessa análise que se pode verificar as suas propriedades físicas e químicas. Desta forma, com esses dados é possível analisar o seu comportamento frente ao que será estudado. Assim, os ensaios utilizados para a caracterização dos materiais desse estudo serão baseados nas normativas que serão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Normas utilizadas na caracterização dos materiais.

Norma	Ensaio	Material
ABNT NM 208:2003	Granulometria	Areia
ABNT NM 52:2009	Massa específica	Areia e Cinza de olaria
ABNT ISO 13320:2009	Granulometria a Laaser	Cinza de olaria
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária	Areia

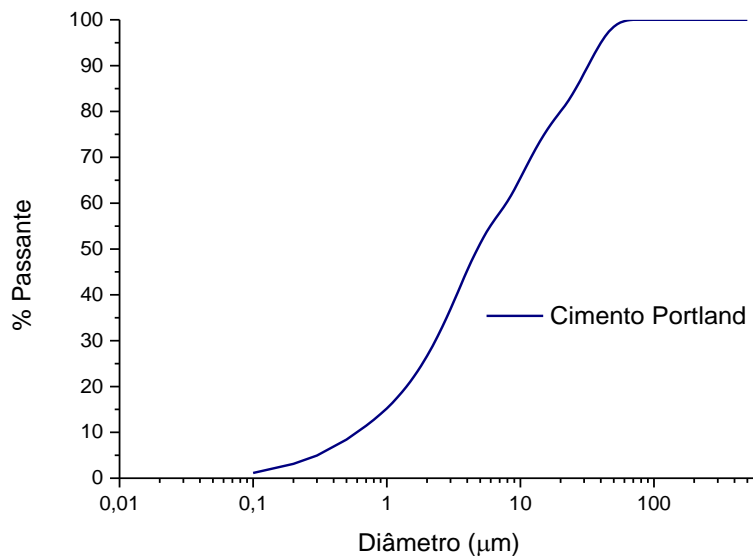
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CPV-ARI, sendo sua caracterização química fornecida pelo fabricante. Para os ensaios de granulometria, foi utilizado um granulômetro da marca CILAS,

modelo 1090, como mostrado na Figura 6. Esses ensaios foi conduzido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB-Campus João Pessoa.

Figura 6 - Granulometria do cimento cimento CPV-ARI.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a caracterização química do cimento CPV-ARI usou-se os dados ofertados pelo fabricante, como mostra a Figura 7.

Figura 7– Caracterização química do cimento CPV-ARI

3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÃO SOBRE OS INGREDIENTES		
Tipo de cimento: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente à Sulfatos CPV		
Número de reg.: CAS: 65997-15-1		
Descrição da constituição do produto:	O cimento Portland é constituído basicamente de clínquer Portland finamente moído e gesso, podem, ainda, ser adicionados outros materiais normalizados dependendo do tipo que se deseja. Tais adições podem ser: calcário com carbonato de cálcio acima de 85%, escórias granuladas de alto fornos, argilas pozolânicas e etc.	
Componente	Faixa de concentração (%)	Número CAS
Silicato tricálcico	20 – 70	12168-85-3
Silicato Dicálcico	10 – 60	10034-77-2
Ferro-aluminato tetracálcico	5 – 15	12068-35-8
Aluminato tricálcico	1 – 15	12042-78-3
Sulfato de cálcio	2 – 10	Vários
Carbonato de cálcio	0 – 5	1317-65-3
Óxido de magnésio	0 – 6	1309-48-4
Óxido de cálcio	0 – 2	1305-78-8

Fonte: Mizu, 2022.

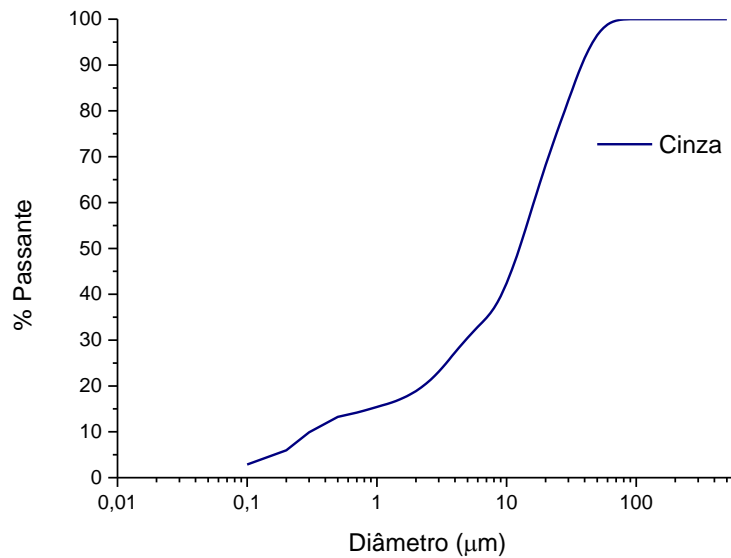
4.2.2 Cinza de olaria

A cinza usada foi disponibilizada pela empresa Irmãos Rolim Cerâmica, localizada na cidade de São João do Rio do Peixe – PB, e teve a sua caracterização feita no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB-Campus João Pessoa, onde foi utilizado um granulômetro da marca CILAS, modelo 1090, para as técnicas de granulometria a laser e espectrometria de fluorescência de raios X para análise química, como mostram o Quadro 3 e a Figura 8.

Quadro 3 - Caracterização química da cinza de olaria.

Composto	Porcentagem presente(%)
CaO	84,649
K ₂ O	6,611
SiO ₂	3,807
SO ₃	1,502
SrO	1,399
TiO ₂	0,775
Fe ₂ O ₃	0,743
MnO	0,151
P ₂ O ₅	0,139
Lu ₂ O ₃	0,069
CuO	0,066
V ₂ O ₅	0,037
ZnO	0,02
Rb ₂ O	0,017
Br	0,014

Fonte: Adaptado Beserra (2019).

Figura 8 - Granulometria da cinza de olaria.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a determinação da massa específica, foi realizada de acordo com a norma NBR 16605(ABNT, 2017) , resultando em um valor de 2,686 g/cm³

4.2.3 Agregado

Para esse estudo as classificações granulométricas do agregado miúdo foram definidas conforme as frações escolhidas para cada tipo de situação analisada, traço, denominado de TN, de referência da norma NBR 7214 (ABNT, 2015), traço com substituição de 10% de cimento por cinza de olaria, denominado de T10, traço com substituição de 15% de cimento por cinza de olaria, denominado de T15 e traço de empacotamento de partículas, denominado de TE0, seguindo a seguinte sequência:

a) Traço TN:

Para essa referência foram separadas quatro frações de areia para que se conseguisse chegar à areia normal. Dessa forma, foi utilizado a seguinte metodologia: a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa 1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm e retida na 0,15 mm correspondendo a faixa 3 e a passante da 0,15 mm correspondendo a faixa 4. Essas frações podem ser verificadas na Figura 9.

Figura 9 - Faixas do agregado miúdo- TN.



Fonte: Autoria própria, 2023.

b) Traço TE0:

Para os corpos de prova que foram dosados seguindo o empacotamento de partículas, foram usadas três frações de areia, seguindo a mesma metodologia do traço TN, a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa 1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm correspondendo a faixa 3. Essas frações podem ser verificadas na Figura 10.

Figura 10 - Faixas do agregado miúdo- TE0.



Fonte: Autoria própria, 2023.

c) Traços T10 e T15:

Os corpos de prova que tiveram a substituição parcial do cimento em 10% (T10) e 15% (T15) utilizaram 3 frações de areia, seguindo a mesma metodologia adotada no traço TE0, onde a areia passante da peneira 4,2 mm e retida na peneira 1,2 mm corresponde a denominada faixa

1, a passante da 1,2 mm e retida na 0,6 mm correspondendo a faixa 2 de areia, a passante da 0,6 mm correspondendo a faixa 3. Essas frações podem ser verificadas na Figura 11.

Figura 11 - Faixas do agregado miúdo- T10 e T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Vale ressaltar que para uma distribuição granulométrica mais detalhada foram utilizadas peneiras da série normal e intermediária.

Para a determinação da massa específica e massa unitária do agregado, foram observadas as recomendações dadas pelas normas descritas no Quadro 2. Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados, descritos respectivamente nos Quadros 4 e 5:

- Massa específica:

Quadro 4 – Massa específica do agregado miúdo.

Faixa 1	2,60 g /cm ³
Faixa 2	2,60 g /cm ³
Faixa 3	2,62 g /cm ³

Fonte: Autoria própria, 2023.

- Massa unitária:

Quadro 5 – Massa unitária do agregado miúdo.

Faixa 1	1,27 g /cm ³
Faixa 2	1,27 g /cm ³
Faixa 3	1,36 g /cm ³

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.4 Definição do traço

As argamassas foram formuladas de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13583 (ABNT, 2014). A proporção de ligante utilizada foi de 1,0:3,2 em massa, enquanto a proporção de água em relação ao ligante foi de 0,60.

a) Traço TN:

A NBR 13583 (ABNT, 2014) aconselha usar o traço 1,0:3,2, assim, para manter as proporções adequadas para as quatro faixas de areia, foi realizado uma divisão 3,2 por 4, dessa forma, se obteve a relação de 1,0:0,8:0,8:0,8:0,8.

O Quadro 6 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 6 – Medidas do traço TN.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/C
TN	1250	-	Faixa 1	1000	600	0,6
			Faixa 2	1000		
			Faixa 3	1000		
			Faixa 4	1000		

Fonte: Autoria própria, 2023.

b) Traço TE0 pelo software Q – mix:

Segundo Daminieli, Pileggi e John (2017), a teoria do empacotamento de partículas usa frações de tamanhos diferentes de partículas com a finalidade de haver uma diminuição dos vazios. Desta forma, para se obter um resultado que diminuísse ao máximo o número de vazios, foi usado o software desenvolvido por Arruda (2022), o Q – mix, para definição do traço de empacotamento.

Esse programa se utiliza do modelo teórico de e Andreassen Modificado (ou Alfred), gerando cálculos para a obtenção das porcentagens ótimas. Dessa forma, inicialmente o programa pede a inserção da granulometria feita dos agregados, como mostra a Figura 8, posteriormente se deve escolher os parâmetros de entrada.

Como o programa se utiliza da Equação 5 de Alfred, se faz necessário escolher o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem utilizados. A última etapa consiste em encontrar as porcentagens ótimas. Dessa forma foram

encontradas as seguintes porcentagens a serem usadas no traço de empacotamento para cada faixa de agregado, como mostra o Quadro 7.

Quadro 7- Traço de empacotamento de partículas

Faixa 1	42,64%
Faixa 2	16,17%
Faixa 3	41,17%

Fonte: Autoria própria, 2023.

O Quadro 8 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 8 – Medidas do traço TE0.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/C
TN	1250	-	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

c) Traço T10:

Para o traço T10, foi seguido as mesmas proporções calculada para o traço de empacotamento de partículas, porém, nesse caso, foi retirado 10% da massa de cimento e adicionado 10% da massa de cinza de olaria.

O Quadro 9 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 9 – Medidas do traço T10.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/F
TN	1125	125	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

d) Traço T15:

Para o traço 15 foi usada a mesma metodologia onde se utilizou as mesmas proporções calculadas do traço TE0, sendo a única diferença a porcentagem retirada de 15% de massa de cimento e adicionada de massa de cinza.

O Quadro 10 mostra as medidas usadas na composição dos corpos de prova.

Quadro 10 – Medidas do traço T10.

Traço	Cimento (g/m ³)	Cinza (g/m ³)	Areia (g/m ³)		Água (g/m ³)	A/F
TN	1062,5	187,5	Faixa 1	1704	600	0,6
			Faixa 2	648		
			Faixa 3	1648		

Fonte: Autoria própria, 2023

Para a mistura dos materiais, foi usada a argamassadeira do Laboratório de Técnicas Construtivas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras-PB*.

4.2.5 Moldagem

A moldagem dos corpos de provas seguiu a normativa da NBR 5738 (ABNT ,2015).

Para a pesquisa foram produzidos 18 exemplares de corpos de prova prismáticos 4x 4m x 16 (mm), como indica a Figura 12, para cada traço analisado. Sendo que 6 corpos de prova foram destinados a cura por cal, 6 corpos de prova destinados a cura por sulfato de sódio (NaSO₄) e 6 a cura por sulfato de magnético (MgSO₄).

Dessa forma, foram produzidos um total de 72 corpos de prova.

Figura 12 - Corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.6 Cura submersa

A cura submersa dos corpos de provas seguiu as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificada no Quadro 11.

Quadro 11 – Normas utilizadas para a cura submersa.

Norma	Tipo de cura
ABNT NBR 7215/2019	Saturada em Cal
ABNT NBR 13.583/2014	Cura submersa em NaSO ₄ e MgSO ₄

Fonte: Autoria própria, 2023.

Segundo a ABNT NBR 7215/2009:

Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova destinados a determinação da resistência em idades maiores que 24h devem ser retirados das formas, identificados e imersos, separados entre si no tanque de água (não corrente) saturada de cal, onde devem permanecer até o momento a ruptura. (ABNT, 2009, p. 3)

Dessa forma, seguiu a cura submersa dos corpos de prova destinado a cura em cal.

Para os corpos de prova destinados a cura em sulfato de sódio (NaSO₄) e sulfato de magnésio (MgSO₄), seguiu-se as orientações da norma NBR 13583 (ABNT, 2014), onde a cada 1L de água foram dissolvidos 100 gramas de sulfato, e vale ressaltar que a cada 20 dias foi trocado a solução.

4.2.7 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios dos corpos de prova seguiram a normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificadas no Quadro 12.

Quadro 12 – Normas utilizadas para os ensaios.

Norma	Ensaio realizado
ABNT NBR 13279/2005	Compressão
ABNT NBR 13583/2014	Determinação da variação dimensional de barras de argamassa.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a realização do ensaio, foi utilizado a prensa mecânica do Laboratório de Estruturas do IFPB, *Campus Cajazeiras*.

O material foi submerso em ambiente contendo solução por sulfato de sódio e outro sulfato de magnésio por um período de 28 dias. A verificação se deu da seguinte forma, como mostra o Quadro 13:

Quadro 13 – Esquema do que foi realizado em cada idade de cura.

Idade de cura	Análise
7	Rompimentos de corpos de prova.
14	Análise da expansão do corpo de prova.
21	Análise da expansão do corpo de prova.
28	Análise da expansão do corpo de prova e Rompimentos de corpos de prova.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para obter os resultados de resistência a compressão foi utilizado a seguinte equação:

$$Resistência = \frac{F}{A * 10} (MPA) \quad (6)$$

Para obter os dados de expansão foi utilizado um paquímetro, após a obtenção de todos os dados foi feito a comparação das dimensões dos corpos de prova com 14, 21 e 28 dias submetidos a cura, com a dimensão original da peça de 160x40x40 (mm).

Com a diferença para cada dia de cura foi verificado a porcentagem da expansão usando a seguinte fórmula:

$$\frac{160}{(x - 160)} = \frac{100}{y} \quad (7)$$

Onde:

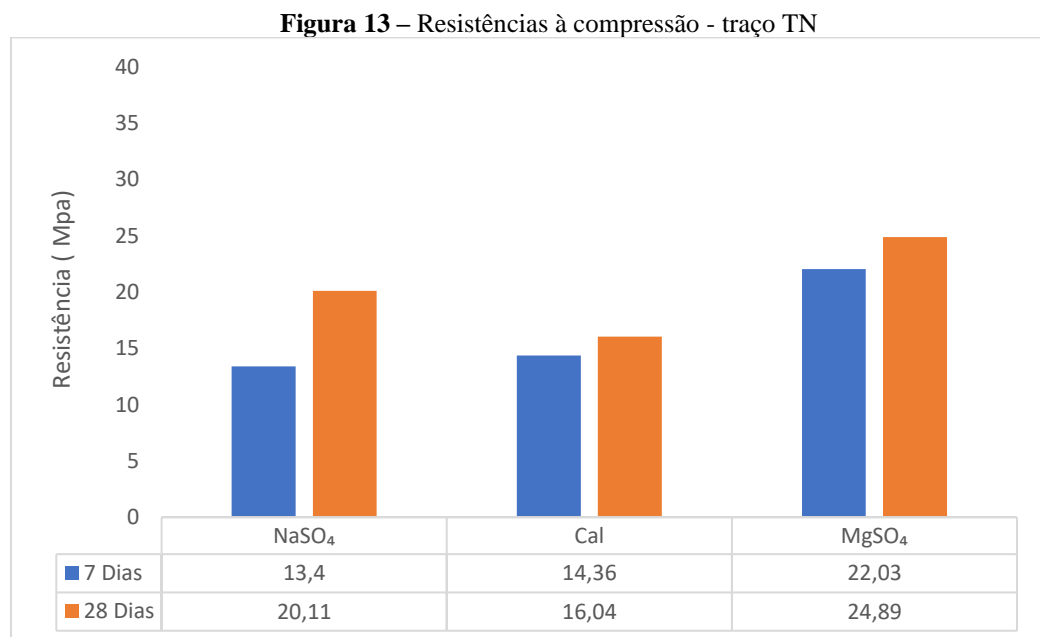
Y= porcentagem de expansão;

X= valor do comprimento medido para cada dia de cura.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam os resultados para o ensaio de compressão axial obtidos para os traços TN, TE0, T10 e T15, nos tipos de cura estudados, para as idades de 7 e 28 dias



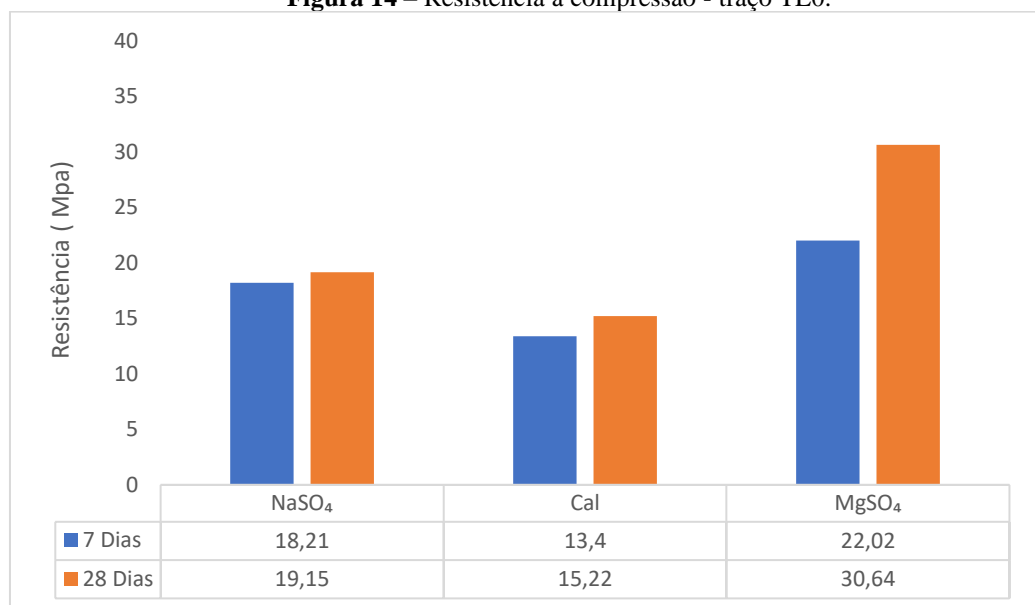
Fonte: Autoria própria, 2023.

Houve um aumento de resistência para as argamassas atacadas por sulfatos. Logo, entende-se que os produtos das reações químicas entre sulfato de sódio e a pasta e cimento, bem como o sulfato de magnésio e a pasta de cimento resultaram em um preenchimento dos poros acarretando um aumento de resistência inicial, e como indica a literatura, para idades mais avançadas espera-se que essas resistências diminuam. Sendo assim, é necessário a análise da resistência a compressão para mais dias de cura

SOUZA, D. D. *et al* (2020), em sua pesquisa no qual foi avaliado o ataque externo por sulfato de magnésio e sulfato de sódio em argamassa, verificaram que houve um aumento de resistência ao comparar as argamassas atacadas por sulfato com as de referência, para as idades de até 8 semanas, também eles explicam que isso se deve a presença dos poros que foram preenchidos por produtos provenientes das reações químicas entre o sulfato e os compostos do

cimento, como o gesso, etringita secundária e brucita. Devido a isso, os vazios passam a ser preenchidos por material sólido, resultando em um aumento de densidade e uma área maior para absorver carga, justificando assim o aumento de resistência. Vale ressaltar que esse aumento de resistência ocorreu para os dias iniciais de cura, havendo um início de perda de resistência para idades entre 8 e 12 semanas ocasionadas pelos efeitos negativos que o sulfato pode ocasionar no concreto. Essa perda de resistência se dá pela expansão que irá ocorrer, bem como o consumo de C-S-H, no caso do ataque por sulfato de magnésio.

Figura 14 – Resistência à compressão - traço TE0.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O mesmo princípio dissertado anteriormente vale para o traço TE0 que apresentou maiores resistências para os corpos de provas atacadas com sulfatos.

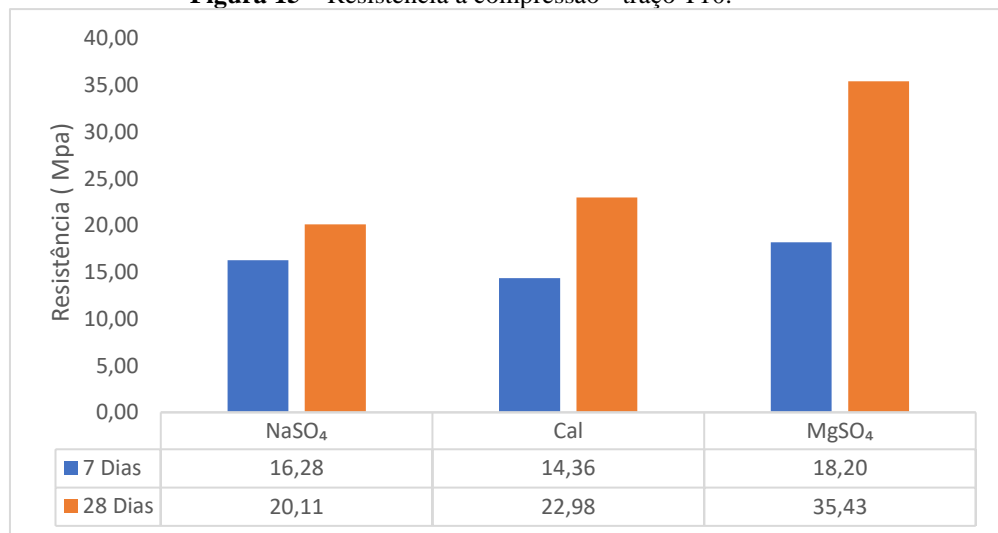
Os produtos oriundos das reações químicas entre os sulfatos de magnésio e de sódio preencheram os vazios, aumentando a sua resistência para as idades iniciais. Como falado anteriormente, segundo a literatura a resistência tenderá a diminuir, assim, esse traço deverá ser analisado para mais dias de cura e observado se existirá perda ou não de resistência.

As amostras desenvolvidas com empacotamento apresentam maior resistência quando atacadas por sulfato de sódio comparadas com a referência da norma para os 7 primeiros dias de cura, isso pode ter ocorrido devido a porosidade do material, sendo o traço TE0 menos poroso tenderá a possuir maior resistência, com o passar dos dias os produtos das reações químicas do sulfato com a pasta de cimento irá preencher os poros do material, isso pode

explicar o motivo que para 28 dias o corpo de prova atacado por sulfato de sódio para o traço TN ter maior resistência em comparação ao traço TE0 teve um leve aumento de resistência.

Para os corpos de prova curados em sulfato de magnésio com 7 dias ambos os traços tiveram resultados bem semelhantes, porém para 28 dias de cura o corpo de prova do traço TE0 possuiu uma resistência bem maior comparado ao traço TN, isso pode ter ocorrido pois o ataque por sulfato de magnésio, como agente mais agressivo que o sulfato de sódio, acarretará em mais agentes expansivos, como etringita secundária e brucita, preenchendo os poros do traço TE0 deixando-o mais resistente que o traço TN para as mesma condições, vale ressaltar que essa resistência tenderá a ser perdida para idades mais avançadas, principalmente em argamassas atacadas por sulfato de magnésio, visto que o hidróxido de magnésio consumirá o C-S-H do meio acarretando em perda de resistência. Assim, necessita-se observar como a patologia irá progredir para idades mais avançadas.

Figura 15 – Resistência a compressão - traço T10.



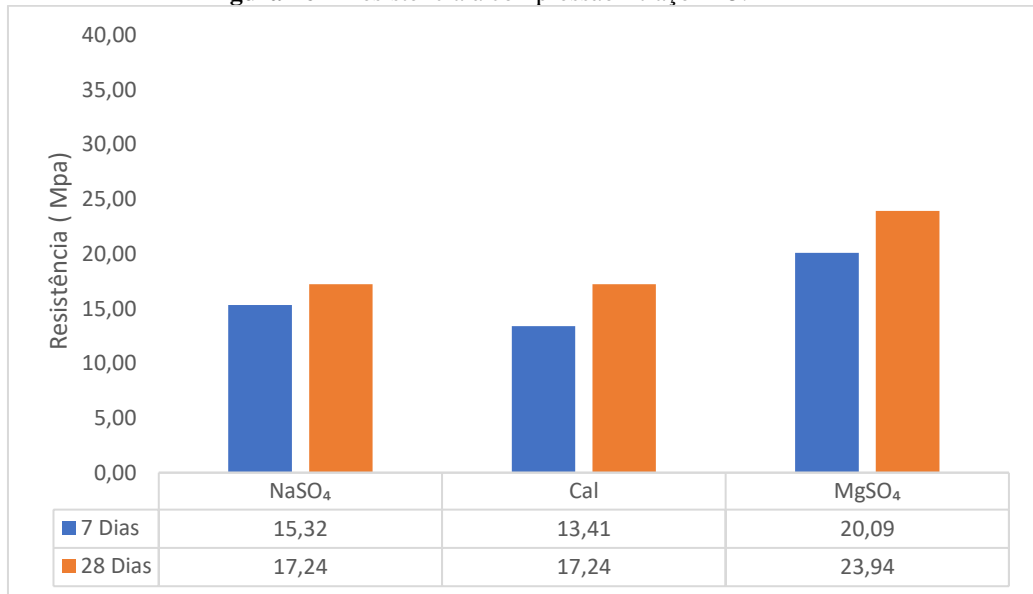
Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o traço T10, os corpos de prova atacados por sulfato também apresentaram uma alta resistência, podendo ser explicado pelo fato de os produtos oriundos das reações químicas entre os sulfatos preencheram os vazios acarretando uma maior resistência inicial. Vale ressaltar que esse aumento de resistência é temporário visto que na literatura verifica-se uma significativa perda de resistência devido as tensões internas oriundas dos compostos expansivos e do consumo de C-S-H pelo hidróxido de magnésio.

Ainda mais, verifica-se a eficiência da cinza como filler, uma vez que as resistências das argamassas curadas em cal são maiores para o traço T10 em comparação ao traço de TE0 e TN.

Para os corpos de prova curados em sulfato, observa-se que o traço T10 obteve mais resistência mecânica em comparação ao traço TE0 e de TN para idade de 28 dias de cura. Isso pode ser explicado pela ação da cinza, que, ao preencher os vazios, garantiu mais resistência. Esse efeito pode ser evidenciado uma vez que comparando os corpos de prova curados em cal de ambos os traços, o traço T10 teve maior resistência do que o traço TE0. Além disso, os produtos expansivos gerados pelo ataque por sulfato podem ter diminuído ainda mais a porosidade do material, resultando no ganho de resistência nas primeiras idades. Portanto, é necessário analisar a evolução da patologia em um período mais longo de cura para obter mais dados e verificar a progressão.

Figura 16 – Resistência à compressão - traço T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O traço T15 também possui uma resistência maior para os corpos de prova curados em sulfato de sódio e sulfato de magnésio. Essa explicação também consiste na acomodação dos produtos oriundos das reações químicas entre a pasta de cimento e os sulfatos. Nesse traço, percebe-se também a atuação da cinza de olaria como filler uma vez que a cura em cal apresentou resistência maior aos 28 dias de cura em comparação a TN e TE0, mesmo tendo 15% menos massa de cimento.

Em relação aos corpos atacados por sulfatos em comparação ao traço TE0 e TN verifica-se que houve uma menor resistência no traço T15, podendo ser justificada devido a porosidade do material, uma vez que os poros podem ser preenchidos por compostos expansivos oriundos das reações entre sulfato e cimento, o traço TE0 e TN tiveram seus poros preenchidos ocasionando maior resistência inicial, já o traço T15 por possuir menos cimento em sua

composição, as reações tendem a ser menos severas mitigando o processo de alta resistência inicial para ataques por sulfato. Isso se torna evidente uma vez que os corpos de prova curado com cal tiveram maiores resistências para o traço T15 em relação ao TE0 e TN.

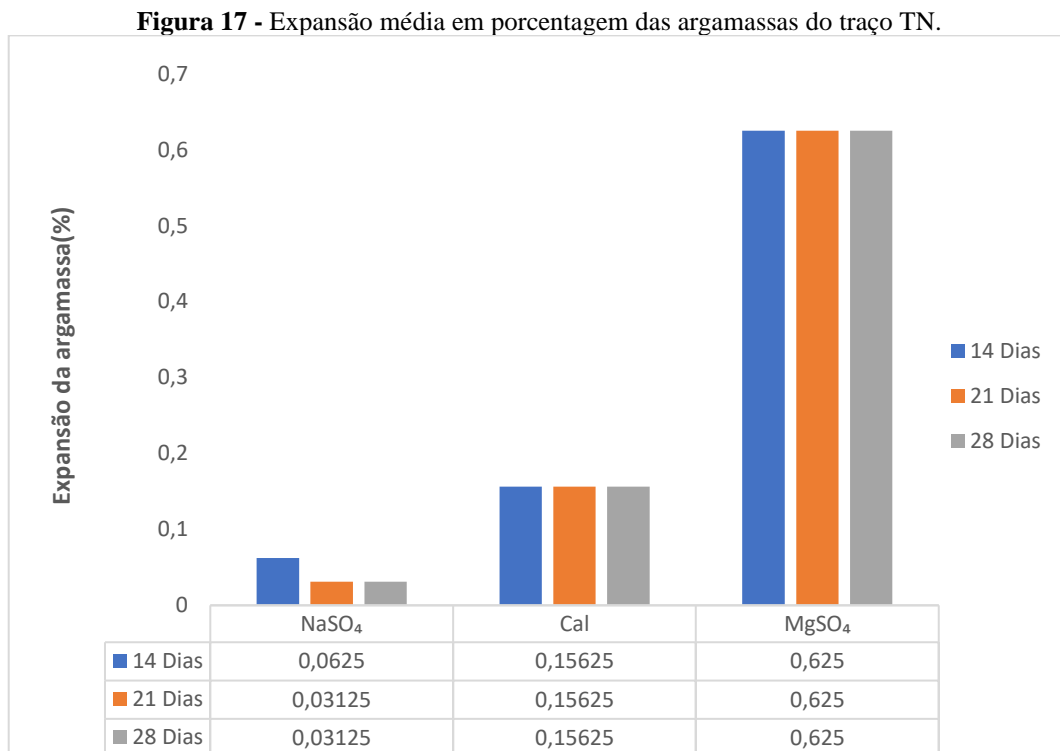
Dessa forma, tem-se que o traço T10 obteve maior resistência mecânica, em comparação ao traço T15. Uma explicação para essa maior resistência pode ser a quantidade de porcentagem de massa de cimento retirada de cada um, uma vez que no traço T10 possui mais C-S-H do que o traço T15 isso é evidente quando se observa maiores resistências nos corpos de prova curados em cal para o traço T10 em comparação ao traço T15. Também, por existir mais cimento no traço T10 conseqüentemente existirá mais C_3A , composto que reage com o sulfato produzindo compostos expansivos, que como falado anteriormente em idades iniciais de cura preenchem os poros dos corpos de prova provocando um aumento de resistência inicial, logo entende-se o motivo do traço T15 possuir menor resistência em comparação ao traço T10, para os corpos de prova atacados por sulfato.

Como já falado, a tendência do ataque por sulfato é de que para mais idades de cura exista uma diminuição da resistência pois os compostos expansivos ocasionarão uma tensão interna causando expansão, e no caso do sulfato de magnésio o C-S-H será consumido pelo hidróxido de magnésio. Dessa maneira, se necessita verificar a resistência a compressão desses traços para mais dias de cura e assim obter mais resultados verificando a progressão da patologia.

De forma geral, observou-se que para todos os traços, os corpos de prova atacados com sulfato de magnésio sempre teve os maiores valores de resistência em comparação aos atacados com sulfato de sódio. SOUZA, D. D. *et al* (2020), verificam que as argamassas contendo CPV-ARI mostraram uma degradação mais precoce devido à exposição à solução de sulfato de sódio e processos de danos mais lentos quando exposto ao ataque de sulfato de magnésio. Isso pode explicar o motivo das resistências das argamassas atacadas por sulfato de sódio terem resistências menores, uma vez que seu processo de degradação é mais rápida do que o processo de degradação de peças submetidas a ataque por sulfato de magnésio, porém vale ressaltar que segundo a literatura a tendência das peças atacadas por sulfato de magnésio é sofrer maior perda de resistência ao longo dos dias de cura, uma vez que a reação química gera hidróxido de magnésio que consumirá o C-S-H.

5.2 EXPANSÃO GEOMÉTRICA

Foram observadas expansões geométricas em corpos de prova de argamassas para cada traço feito, como mostram as Figuras 17, 18, 19, 20. As medições foram realizadas em três diferentes idades: 14, 21 e 28 dias. Os resultados obtidos foram registrados como a porcentagem das expansões médias para os corpos de provas curados em cal, sulfato de sódio e sulfato de magnésio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que os corpos de prova submetidos ao ambiente contendo sulfato de sódio tiveram menores expansões em comparação ao ambiente contendo cal, pode-se associar que para essas idades de cura os compostos expansivos oriundos do ataque de sulfato de sódio nas argamassas não foram o suficiente para gerar tensão interna capaz que promover expansão. Já os corpos de prova atacados por sulfato de magnésio possuíram as maiores expansões em comparação ao ambiente curado em cal, isso pode ter acontecido devido ao cátion de magnésio ser mais agressivo, em comparação ao cátion de sódio, causando maiores formações de compostos expansivos como etringita secundária, gipsita e taumasita.

Assim, analisando as Equações 8, 9 e 10 das reações químicas entre os sulfatos e os compostos do cimento e a água, verifica-se o motivo dos corpos de provas terem

comportamentos diferentes.

- Equação da reação entre sulfato de sódio e hidróxido de cálcio e água.

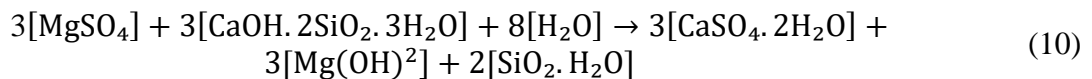


- Equação da reação entre sulfato de magnésio e hidróxido de cálcio e água.

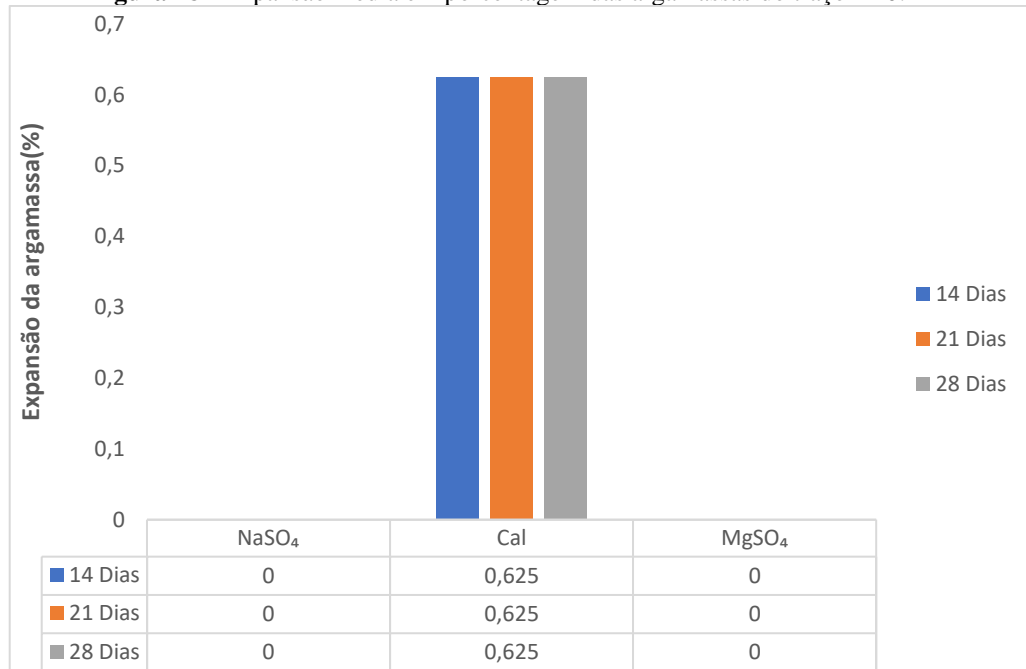


Conforme Mehta e Monteiro (2014), durante o ataque por sulfato de sódio se tem a formação do hidróxido de sódio como subproduto mantendo a alta alcalinização do sistema, que é essencial para a estabilidade do produto da hidratação, C-S-H. Já para os ataques por sulfato de magnésio, ocorrerá uma conversão do hidróxido de cálcio em gipsita e de forma simultânea o hidróxido de magnésio, que é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema. Na ausência de Íons hidroxila na solução, o C-S-H deixa de ser estável e é atacado pela solução de sulfato. O sulfato de magnésio, portanto, é mais severo no concreto.

-Equação química da reação entre sulfato de magnésio e o C-S-H.



De acordo com Zarzar, *et al.* (2010), o ataque por sulfatos resulta na formação de gesso, etringita e taumasita. Enquanto a formação de gesso e etringita secundária dependem de uma fonte de alumina, a taumasita requer uma fonte de sílica e carbonato. Assim, entende-se o motivo pelo qual o ataque por sulfato de magnésio teve uma maior expansão em relação aos corpos de prova curados apenas com cal.

Figura 18 - Expansão média em porcentagem das argamassas do traço TE0.

Fonte: Autoria própria, 2023.

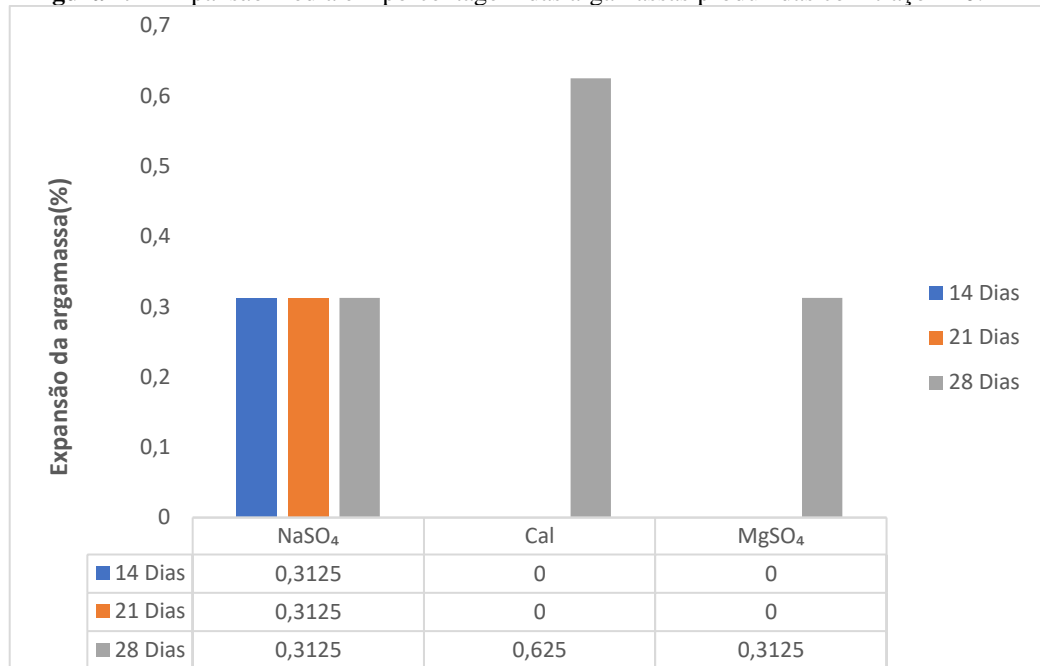
Verifica-se que para o traço TE0 não houve expansão dos corpos de prova em ambientes contendo sulfatos, para nenhuma idade analisada.

Ainda mais, como já falado, durante o processo de reações químicas os vazios presentes nos corpos de prova são preenchidos pelos produtos das reações dos sulfatos, isso pode explicar o motivo pelo qual não houve expansão dos corpos de prova para essas idades de cura, porém com o passar do tempo os compostos expansivos tenderão a produzir uma tensão interna no corpo de prova podendo ocasionar as expansões.

Isso também explica o motivo pelo qual os corpos de prova curados em cal terem expandido, uma vez que não possuem compostos que baixem sua porosidade, assim como os oriundos do ataque por sulfato.

Em comparação com o traço TN o traço TE0 teve uma menor expansão dos corpos de prova curados em sulfato, e como já mencionado isso se implica a porosidade do material, em relação aos corpos de prova curados em cal o traço TE0 teve uma maior expansão, assim supõe-se que o traço TN teve uma menor porosidade em relação ao de empacotamento, sendo necessário mais estudos para a comprovação da hipótese.

Porém, é necessário analisar a expansão dos corpos de provas para mais idades de cura, a fim de verificar a progressão da patologia, uma vez que ela tenderá a formar tensões internas causando expansões

Figura 19 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T10.

Fonte: Autoria própria, 2023.

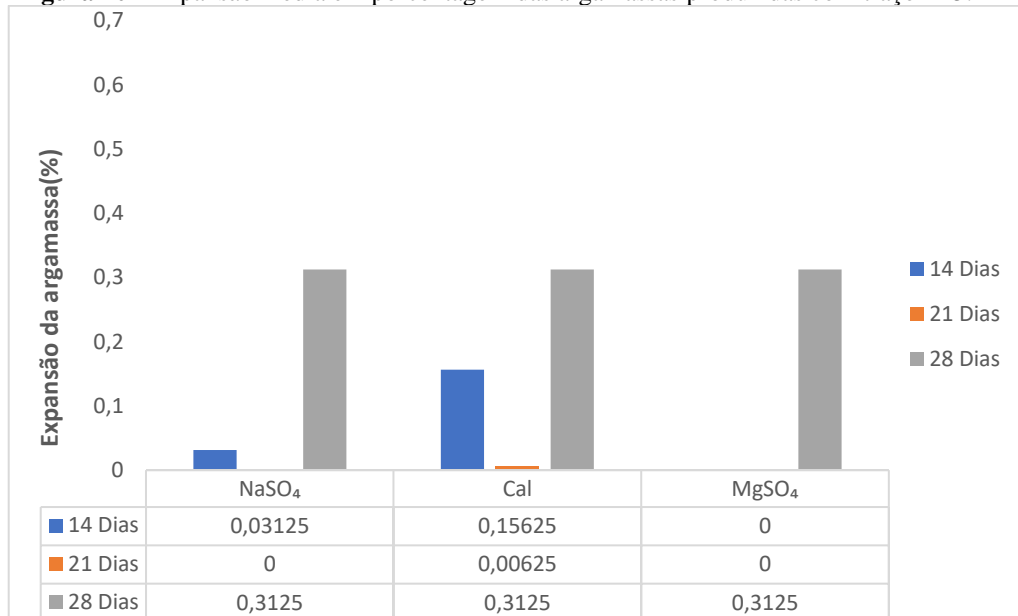
Para o traço T10, foi retirado 10% de massa de cimento que foi substituído pela mesma quantidade de massa de cinza de olaria. Assim, verifica-se que para esse traço os corpos de prova atacados por sulfato de sódio existiu expansão. De acordo com a Equação 8 o sulfato de sódio precisa do hidróxido de cálcio para realizar reação química que formará produtos expansivos, como a gipsita. Isso acontece pois mesmo com a retirada de massa de cimento que contém óxido de cálcio, forma anidra do hidróxido de cálcio, como mostra a Figura 7, a cinza adicionada possui 84,649% de óxido de cálcio como mostra o Quadro 3, em sua composição. Vale salientar que, o hidróxido de cálcio reage tanto com o sulfato de sódio quanto com o sulfato de magnésio formando compostos expansivos, porém como já falado as reações químicas contendo cátion de sódio podem ocorrer de forma mais rápida do que as contendo cátions de magnésio.

Isso pode explicar o motivo para qual o sulfato de magnésio expandir tão tardiamente em comparação ao sulfato de sódio.

Comparando os corpos de prova atacados por sulfatos com os corpos de prova curados em cal, para a idade de 28 dias, a expansão pode ter sido menor para o ataque por sulfatos devido a pouca idade de cura analisada, uma vez que os compostos expansivos das reações tendem a se acomodar nos poros e mais tardiamente causar tensões internas causando expansões graves, algo que não acontece na cura em cal, uma vez que os poros não tendem a ser preenchidos por compostos expansivos.

Comparando o traço T10 com o traço TE0 se observa que o traço TE0 não possui expansão para os corpos de prova curados em sulfato, diferente do que ocorreu com o traço T10, isso se deve a porosidade dos materiais, uma vez que o traço de empacotamento de partículas acomodou os compostos oriundos da reação de sulfato, causando menos expansão para as primeiras idades. Valendo salientar que a literatura evidencia que para mais idades de cura a tendência é que seja formada tensões internas que causem expansão nas peças atacadas por sulfatos. Assim é necessário que se observe para mais dias de cura e verifique a progressão da patologia para esse traço.

Figura 20 - Expansão média em porcentagem das argamassas produzidas com traço T15.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o traço T15 foi observado uma leve expansão, nas primeiras idades de cura, nos corpos de prova atacados com sulfato de sódio e nos corpos de prova curados com cal. Para a idade mais avançada, de 28 dias, todos os corpos de prova expandiram de forma semelhante.

Segundo Hoppe Filho *et al.* (2015) a adição de minerais ao material ligante em substituição parcial ao cimento causa mudanças na estrutura microscópica que afetam a porosidade e a distribuição dos poros. Isso pode influenciar a entrada de água com íons sulfato na estrutura, podendo ter impactos positivos ou negativos. Assim, é importante estudar e controlar essas alterações para garantir a durabilidade adequada da estrutura.

Silva Filho (1994), sustenta a ideia de que um maior número de poros é capaz de acomodar as etringitas formadas, diminuindo assim a probabilidade de expansões e fissurações, ao contrário do que ocorre em uma matriz densa e com poucos poros.

Beserra (2019), em sua análise de corpos de prova contendo 10%, 15% e 20% de adição de cinza de biomassa vegetal (CBV) afirmou que, o aumento no consumo de CBV está relacionado a um aumento na porosidade e uma acomodação das etringitas formadas. Isso pode ter resultado em uma maior densificação nos traços T10 e T15 em comparação com o T20, o que, por sua vez, levou a um melhor desempenho mecânico devido à redução do índice de vazios.

Assim, nessa pesquisa constatou-se que a expansão do traço T15 para os corpos de prova atacados por sulfato podem ter sido menores comparados ao traço T10 devido a acomodação dos compostos expansivos formados. Ainda mais, ao comprar os corpos e prova curados em cal dos traços T10 e T15 para a idade de 14 dias verifica-se que para o traço T15 existe expansão, o que não ocorreu com o traço T10, levando a hipótese de que a cinza de olaria preencheu os poros do traço T10 de melhor forma do que no traço T15, podendo confirmar o que foi dito anteriormente por Hoppe Filho *et al.* (2015).

De forma semelhante a comparação dos traços T15 e T10, ao comparar o traço T15 com o traço TN percebe-se que o traço T15 apresenta menores expansões para as primeiras idades de cura, para todos os ambientes. Para os ambientes curados com sulfatos é possível que os compostos expansivos se tenham acomodado nos poros dos corpos de prova gerando pouca expansão. Já em comparação ao traço TE0, observa-se que para os corpos de prova curados em cal o traço T15 expandiu menos, para as primeiras idades, isso pode ser explicado devido a cinza de olaria deixar a argamassa menos porosa em comparação ao traço TE0, já para ataques por sulfato devido a presença de mais cimento houve mais produtos de expansão para o traço TE0, acarretando menor porosidade e menor expansão, diferente do traço T15.

Segundo Beserra (2019), em sua pesquisa verificou-se expansão de corpos de prova contendo adição de 10% e 15% de cinza de biomassa vegetal (CBV) e notou-se que com 28 dias de cura iniciou-se uma proximidade de valores de expansão de corpos de provas e apenas com 42 dias de cura foi observado uma padronização das expansões.

Semelhante a esta pesquisa que analisou as expansões dos corpos de prova com substituição parcial de cimento por cinza de olaria para 14, 21 e 28 dias e observou-se que também houve uma aproximação dos valores de expansão a partir de 28 dias.

Para uma melhor análise das expansões e da influência de cada traço é necessário que haja verificação para mais dias de cura.

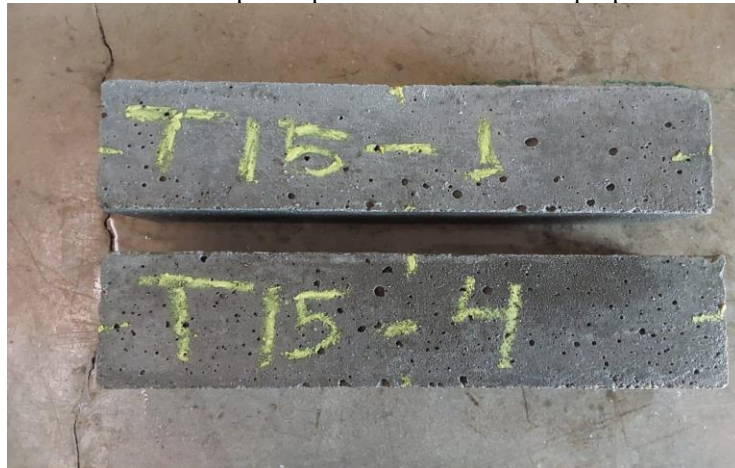
Conforme as amostras foram expostas aos ambientes agressivos por sulfato de sódio e magnésio analisou-se uma mudança de coloração nas suas superfícies, conforme mostras as Figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

Figura 21 - Amostra de corpos de provas submetidos a cura em cal.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 22 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de sódio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 23 - Amostra de corpos de provas submetidos a ataque por sulfato de magnésio.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 24 – Amostra da formação de compostos oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 25 – Amostra da formação de cristais oriundos do ataque por sulfato na superfície do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Segundo Costa (2004), quando o concreto é atacado pelo sulfato, ele pode adquirir uma coloração esbranquiçada externamente. Em seguida, podem se formar compostos expansivos em seu interior, levando à fissuração externa e, em casos mais graves, ao deslocamento, resultando em perda de resistência à compressão.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a análise das propriedades mecânicas e da durabilidade de argamassa para concreto com substituição parcial do cimento por cinza de olaria. Assim, foram feitas substituições de 10% e 15% da massa de cimento por cinza de olaria, a fim de compreender as propriedades mecânicas para ganho ou perda de resistência, para corpos de prova curados em de magnésio, sulfato de sódio e cal, foram realizados ensaios mecânicos de compressão axial e de expansão geométrica.

Dessa forma percebeu-se que para os traços contendo substituição parcial de cimento por cinza de olaria houve um acréscimo de resistência para o traço T10 em relação ao traço T15, para todos os ambientes analisados, tornando evidente que a substituição de 10% de massa de cimento por cinza de olaria possui um melhor desempenho em comparação a retirada de 15% de massa de cimento por cinza de olaria. Esse efeito positivo que a cinza causa é percebida também em relação aos corpos de prova, curados em cal, dos traços T10 e T15 em comparação aos traços TN e TE0 uma vez que possuem maiores resistências mecânicas.

Em relação a expansão, os corpo de prova do traço T10 apresentou expansão apenas na idade de cura para 28 dias, para os corpos de provas curados em cal, diferente do traço T15 que teve uma leve expansão a partir do 14º dia de cura, para os corpos de provas curados em cal, porém, o traço T15 observou-se uma menor expansão para 28 dias em comparação ao traço T10. Comparando os resultados dos traços, curados em cal, que tiveram a substituição do cimento por cinza de olaria com o traço TN e TE0 observou-se que o traço T10 obteve expansões semelhante, para 28 dias de cura, com o traço de empacotamento e houve uma expansão maior em comparação ao traço TN. Já o traço T15, para as mesmas condições, obteve menores expansões em comparação ao traço TE0, porém a expansão ainda foi um pouco maior em comparação ao traço TN.

Observou-se também que para a resistência a compressão axial comparando os corpos de provas atacados por sulfato de magnésio e sulfato de sódio apresentaram maiores resistências os curados em sulfato de magnésio, fato ocorrido para todos os traços analisados. Vale ressaltar que isso acontece para as idades iniciais de cura, e segundo a literatura e estudos citados por esse trabalho isso já era esperado uma vez que os cátions de magnésio produzem mais compostos expansivos que preenches os poros do material causando maior resistência mecânica em idades iniciais. Em relação a expansão geométrica observou-se que a somente a partir de 28 dias de cura houve um início de padronização dos valores de expansão para ambos os sulfatos

de sódio e de magnésio e como mostrado os estudos indicam que a padronização da expansão ocorrem a partir dos 42 dias de cura, sendo assim é necessário um estudo desses traços analisados para idades mais avançadas, uma vez que se estudou por 14, 21 e 28 dias. Vale ressaltar que o traço TEO não evidenciou expansão para as idades analisadas, sendo necessário observar para maiores idades de cura.

Assim, verificou-se que para essas idades iniciais de cura não houve grandes expansões geométricas necessitando de uma análise dos corpos de prova por mais tempo afim de verificar a progressão da patologia. Em relação as resistências mecânicas percebeu-se que a cinza de olaria teve uma influência positiva, dessa forma podendo ser aplicada na prática.

Logo, constata-se que o empacotamento de partículas na prática se mostra viável, uma vez que emprega técnicas simples para a composição final do traço, sendo necessário apenas a granulometria e dados de massa unitária e específica do agregado, apresentando bons resultados de expansão e resistência para argamassas para concreto.

De igual forma, associando o empacotamento de partículas com a substituição parcial do cimento por cinza de olaria, atende-se as duas problemáticas dadas na introdução desse trabalho, uma vez que ela contribui para o controle de porosidade do material, dando, assim, um uso para esse mineral. Ademais, verificou-se resistência aos ataques por sulfatos.

Sendo assim, visando aprofundar os conhecimentos sobre argamassas para concreto com baixo teor de cimento e adição de cinza, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Verificação da resistência mecânica para os traços dados nesse trabalho por mais dias de cura.
- Verificação da expansão para os traços dados nesse trabalho por mais dias de cura.
- Verificação da resistência mecânica (flexão) para os traços dados nesse trabalho.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, D. M. de. **Análise de variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e de estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- ARRUDA, R., MEIRA, G., BRAGA, F., FERREIRA, K., & ALVES, A Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/hwYkKxdsKZWmBq7jsjCH4gP/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 23 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13583**: Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: Concreto e — Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSUNÇÃO, M. S. L.; MACEDO, G. C.C.; SILVA, A. C.C.; QUIRINO, R. G. B. Estudo da adição de cinza de olaria em blocos modulares de solo-cimento. In: X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 10., 2019, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: Ibeas, 2019. p. 01-06. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/III-130.pdf>. Acesso em 23 out. 2022.

BESERRA, A. V. S. **Análise do comportamento de concreto com baixo teor de cimento e adição de biomassa vegetal submetido ao ataque de íons sulfato**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

BONIFÁCIO, D. R., LUZ, T. M., de MATOS, A. C. T., dos SANTOS SILVA, E., de PAULA CORDEIRO, M. L., FONGARO, M. H. O., & de OLIVEIRA SILVA, T. Análise sobre ataques por sulfatos ao concreto de fundações. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ji-Paraná, v. 14, n. 4, 2022, p. 114-127. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20653>. Acesso em: 03 maio 2023.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 55, n. 333, mar. 2009, p. 18-32.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 15., 2003, João Pessoa. **Anais [...]** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2003, p. 2171-2181.

da COSTA, N. T., da SILVA, R. F., da SILVA, R. N., de SOUZA, J., & AVELINO, V. K. G. R. Efeitos da adição da cinza de olaria (czo) nas propriedades do concreto não estrutural. In: 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 3., 2020, Gramado. **Anais [...]** Gramado: Ibeas, 2020. p. 01-08. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/III-130.pdf>. Acesso em 23 out. 2022.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L. ; NUNES, R. R. A., MOURA, R. C. A. O CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, out. 2013

- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, [s.l.], v. 10, n. 5, set. 2017, p. 998-1024.
- DINIZ, H. A. A., de OLIVEIRA, J. N., da SILVA, L. P., de MACÊDO, M. S., & de SOUZA, M. M. Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento. **HOLOS**, [s.l.], v. 5, 2018, p. 51-64.
- DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição da cinza da casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7693/MARCELOADRIANODUART.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- FELIPE, M. C. Durabilidade, vida útil, e principais causadores da degradação das estruturas de concreto. In: IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN, 9., 2013, Currais Novos. **Anais [...]** Currais Novos: IFRN, 2013. p. 2505-2508. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1369/149>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- FERNANDES, S. E., TASHIMA, M. M., Moraes, J. C. B. D., ISTUQUE, D. B., FIORITI, C. F., MELGES, J. L. P., & AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, dez. 2015, p. 909-923. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/CmbqPSvvZDNBCMJgzhRV46R/?lang=pt>. Acesso em: 03 maio 2023.
- GIROTTI, L. S. **Cinética da hidratação do aluminato tricálcico cúbico e ortorrômbico na primeira hora: estudo com fases cristalinas sintéticas e extraídas do clínquer Portland**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/205352/001111406.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 6, n. 4, 2008, p. 83–94. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3721>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- HERMANN, A., BILCATI, G. K., AMES, I., SILVA, A. G. C. D., GROSSMAN, D. D. A., & FAUSTO, T. B. A Using a particle packing model considering cement as part of the. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020.
- HOPPE FILHO, J., SOUZA, D. J., MEDEIROS, M. D., PEREIRA, E., & PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, 2015, p. 168-177. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/crzQLMfRtvsd4p3b8p8DP8Q/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 maio 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis — Laser diffraction methods. Genebra, 2009.

KACZAM, F. **Avaliação do processo produtivo de uma indústria de cerâmica vermelha do oeste paranaense por meio da aplicação de ferramentas da qualidade**. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12891/1/avaliacaoprocessoprodutivoceramica.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Avaliação da carbonatação e absorção capilar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4460/000411974.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 maio 2023.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de aplicação de partículas na otimização de dosagem de concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-04072019-123140/publico/ME2019_HerbertMedeirosTorresLopes.pdf. Acesso em: 04 maio 2023.

MACIEL, M. H., BERNARDO, H. M., SOARES, G. S., ROMANO, R. C. D. O., CINCOTTO, M. A., & PILEGGI, R. G. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 18, n. 1, 2018, p. 245-259. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/hQ9CtgbtCC8pt3xvDjvbqSc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 maio 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, F. C. A. C. **Análise de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinza Residual de Lenha de Algaroba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14842/1/FellipeCACM DISSERT.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

Mizu Cimentos Especiais. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico** – FISPQ Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente à Sulfatos CPV. 2022.

NUNES JUNIOR, J. J. **Efeito do pó de pedra em argamassa para alvenaria estrutural**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

OLIVEIRA, C. O., MACIEL, G. D. F., CASTRO, A. L. D., BARBOSA, M. P., & CAMPOS,

R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/PTrk3PVCJc6rkMWLWtB5RCL/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 05 maio 2023.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-científica**, Paraná, n. 1, 2013, p. 1-14.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. “**Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Rio Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

ROCHA, C. A. A. **Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008. Disponível em: <https://uenf.br/cct/leciv/files/2015/01/5.pdf>. Acesso em: 03 maio 2023.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção civil e a degradação ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, [s.l.], v. 7, n. 13, 2009, p. 111-128.

SANTIAGO, W. C. Estudo da não conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural. **Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos**, 2011.

SARKAR, R. Particle size distribution for refractory castables: a review. **Interceram: International ceramic review**, v. 65, n. 3, 2016.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, L. H. P., TAMASHIRO, J. R., ANTUNES, P. A., & PEREIRA, D. R. Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, set. 2020.

SOUZA, DJ DE; MEDEIROS, MHF; HOPPE FILHO, J. Avaliação do ataque externo por sulfato (Na_2SO_4 e MgSO_4): Argamassas de cimento Portland contendo fíleres. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, p. 644-655, 2020.

TAINARA, A. C. J.; BARRETO, M. F. F. M. Análise Comparativa dos Sistemas Construtivos em Alvenaria Convencional, Alvenaria Estrutural e Moldes Isolantes para Concreto (Icf). **E&S Engineering and Science**, [s.l.], v. 7, n. 3, 2018, p. 12-27.

TEIXEIRA, C. S.; CORDON, H. C. F. **Estudo da influência do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto**. Mauá: Escola de Engenharia de Mauá, 2015. Disponível em: <https://maua.br/files/032015/202840545-ESTUDO-DA-INFLUENCIA-DO-EMPACOTAMENTO-DE-PARTICULAS-NAS-PROPRIEDADES-DO-CONCRETO.pdf>. Acesso em: 04 maio 2023.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 9, n. 3, 2016, p. 357-394. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/zX5CrBchZQq8z8ZMSM3zzFG/?lang=en>. Acesso em: 03 maio 2023.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 10, n. 1, 2010, p. 77-90. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/fY6tZyRgJfYC8c4kPwTxxRw/?lang=pt>. Acesso em: 18 maio 2023.