

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**RAFAEL SCHAFFER DE SOUZA DOS SANTOS**

**RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM  
ADIÇÃO DE METACAULIM**

**São Leopoldo**

**2019**

RAFAEL SCHAFER DE SOUZA DOS SANTOS

**RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM  
ADIÇÃO DE METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, pelo Curso de  
Engenharia Civil da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2019

Dedico este trabalho a minha irmã Tamiris Schafer de Souza dos Santos (in memoriam), por ser a pessoa mais importante da minha vida e me ensinar o significado de amar, ser gentil e fazer o bem ao próximo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me dar forças para superar todos os obstáculos que houve durante este período.

À minha família pelo apoio incondicional, dedicação e todos os ensinamentos ao longo da vida, sempre fazendo o máximo para que eu pudesse chegar até aqui. Vocês são meu exemplo de superação e me motivam a buscar meus objetivos, mesmo que haja inúmeros obstáculos no caminho.

À minha orientadora, professora Marlova P. Kulakowski, por todo o auxílio, retirando dúvidas, enriquecendo o trabalho com ideias e me acalmando nos momentos em que as coisas pareciam não dar certo.

Aos colegas e amigos que fiz durante as práticas de laboratório, pela parceria, amizade e troca de ideias que ajudaram muito no desenvolvimento da pesquisa e realização dos ensaios.

A todas as pessoas que me apoiaram e motivaram a seguir em frente apesar de toda a dificuldade. Que Deus abençoe cada um de vocês.

“Faça da sua vida um grande desafio e um eterno aprendizado. Agradeça a Deus a oportunidade de existir e caminhar.”  
(Augusto Cury).

## RESUMO

O grande consumo mundial de cimento vem motivando a busca por materiais que prejudiquem menos o meio ambiente, visto que o processo de produção do cimento gera grandes quantidades  $\text{CO}_2$ . A utilização de metacaulim como substituto parcial do cimento Portland apresenta diversas melhorias nas propriedades mecânicas da matriz cimentícia endurecida, além de possuir um processo de fabricação menos prejudicial ao meio ambiente se comparado ao cimento. Desta forma, este estudo busca verificar a capacidade do metacaulim de mitigar a degradação causada por íons sulfato na matriz cimentícia, aumentando assim a vida útil do material. Foram moldados corpos de prova com três teores de substituição de cimento Portland por metacaulim (0%, 8% e 15%), submetidos a duas idades de cura (14 dias e 28 dias) e duas soluções de exposição ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e água saturada com cal). As medidas foram realizadas aos 14, 28 e 42 dias de exposição na solução, analisando a influência do metacaulim e a degradação causada por íons de sulfato de sódio ao longo do tempo. Ao fim do estudo, verificou-se após a imersão em sulfato, um aumento de resistência mecânica em relação aos corpos de prova submetidos a água. Este ganho provavelmente deve-se ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia com produtos oriundos da reação com sulfatos. Por outro lado, o traço com 15% de metacaulim e cura inicial de 28 dias apresentou os menores valores de variação na resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial. Relacionando sua resistência com a porosidade total, constatou-se que estas amostras não apresentaram microfissurações ao longo das 6 semanas de exposição ao sulfato de sódio. Para os resultados de variação dimensional linear, os resultados das amostras submetidas a cura de 28 dias, comprada com a cura de 14 dias recomendada no método empregado, não retornou melhorias. Nos ensaios de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade, os corpos de prova com metacaulim apresentaram resultados melhores para as amostras curadas por 28 dias, em comparação às amostras curadas por 14 dias.

**Palavras-chave:** Metacaulim. Sulfato de sódio. Adição mineral.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Poros capilares conectados por grandes aberturas (alta permeabilidade). .....	19
Figura 2 - Poros capilares segmentados e parcialmente conectados (baixa permeabilidade).....	19
Figura 3 – Variação na resistência a compressão de corpos de prova imersos em água e em solução de sulfato de sódio com diferentes pH. ....	22
Figura 4 – Porcentagem de expansão dos corpos de prova com imersão em sulfato de sódio com diferentes pH.....	23
Figura 5 - Reações entre solução de sulfato de sódio e os produtos de hidratação do cimento Portland. ....	24
Figura 6 - Difratoograma de raios X da pasta de cimento CP V – ARI, 28 dias de cura. .....	30
Figura 7 - Difratoograma de raio-X da pasta de cimento CP V – ARI com adição de metacaulim, 28 dias de cura.....	30
Figura 8 – Gráfico da influência do teor de metacaulim na resistência à compressão relativa.....	33
Figura 9 - Fluxograma das variáveis da pesquisa. ....	38
Figura 10 – Quatro frações da areia normal.....	40
Figura 11 – Verificação do pH da solução de sulfato de sódio.....	42
Figura 12 – Verificação do nível de solução de sulfato de sódio. (A) Corpos de prova do grupo 1. (B) Corpos de prova do grupo 2. ....	43
Figura 13 – Ensaio de tração na flexão.....	47
Figura 14 – Dimensões do corpo de prova submetido ao Método de Rilem adaptado. .....	49
Figura 15 – Preparo dos corpos de prova para método de Rilem. (A) Aplicação de tinta impermeabilizante. (B) Colocação de fita nas laterais e cobertura superior. ....	50
Figura 16 – Procedimento para ensaio de absorção de água através do método de Rilem adaptado. ....	50
Figura 17 – Índice de desempenho do metacaulim. ....	53
Figura 18 – Variação dimensional linear com 14 dias de cura inicial. ....	54
Figura 19 - Variação dimensional linear com 28 dias de cura inicial. ....	55
Figura 20 – Fissuras nos corpos de prova do grupo 1. ....	56

Figura 21 – Resistência à tração na flexão com 14 dias de cura inicial. ....	57
Figura 22 – Resistência à tração na flexão com 28 dias de cura inicial. ....	58
Figura 23 – Variação na resistência à tração na flexão.....	59
Figura 24 – Resistência à compressão axial com 14 dias de cura inicial. ....	61
Figura 25 - Resistência à compressão axial com 28 dias de cura inicial.....	63
Figura 26 – Variação na resistência à compressão axial. ....	64
Figura 27 – Taxa de absorção de água com 14 dias de cura inicial e 42 dias de exposição ao sulfato de sódio. ....	66
Figura 28 – Porosidade total dos corpos de prova ao longo do tempo - 14 dias de cura inicial. ....	67
Figura 29 - Taxa de absorção de água com 28 dias de cura inicial e 42 dias de exposição ao sulfato de sódio. ....	68
Figura 30 - Porosidade total dos corpos de prova ao longo das 6 semanas de exposição, com 28 dias de cura inicial. ....	69
Figura 31 – Comparativo entre solução padrão e solução de hidróxido de sódio. ....	79
Figura 32 – Comparativo entre solução padrão e água na primeira lavagem. ....	79
Figura 33 – Água da segunda lavagem da areia. ....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classe de agressividade ambiental (CAA).....	18
Quadro 2 - Transformações térmicas do caulim (caulinita – $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). .....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para concreto exposto a sulfato.....	20
Tabela 2 - Solubilidade entre sulfato de sódio e sulfato de cálcio. ....	20
Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos do metacaulim. ....	27
Tabela 4 – Composições granulométricas da areia normal.....	39
Tabela 5 – Propriedades físicas do metacaulim Ultra HP. ....	40
Tabela 6 – Propriedades químicas do metacaulim Ultra HP. ....	41
Tabela 7 – Quantidade de aditivo para moldar os corpos de prova. ....	41
Tabela 8 - Quantidade de material necessário para ensaio de atividade pozolânica do metacaulim. ....	44
Tabela 9 – Nomenclatura atribuída para os tipos de concreto estudados.....	45
Tabela 10 – Dimensões dos corpos de prova utilizados. ....	45
Tabela 11 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de variação dimensional. ....	46
Tabela 12 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de resistência mecânica. ....	47
Tabela 13 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de absorção de água. ....	49
Tabela 14 – Requisitos físicos e químicos da areia normal brasileira. ....	78
Tabela 15 – Dimensão linear dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.....	81
Tabela 16 - Dimensão linear dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial. ....	82
Tabela 17 - Dimensão linear dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial. ....	84
Tabela 18 – Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.....	86
Tabela 19 - Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial.....	86
Tabela 20 - Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial.....	87
Tabela 21 – Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.....	87
Tabela 22 - Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial.....	88

Tabela 23 - Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial.....88

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Ataque por sulfato de sódio</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Adição Mineral</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Metacaulim</b>	<b>26</b>
2.3.1	Processo de produção do metacaulim	28
2.3.2	Efeitos da adição de metacaulim no concreto	29
2.3.3	Uso de metacaulim para mitigar os efeitos do ataque de sulfato sódio	33
<b>2.4</b>	<b>Métodos de avaliação da resistência aos íons de sulfato</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Variáveis da pesquisa</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais</b>	<b>38</b>
3.2.1	Cimento	39
3.2.2	Agregado miúdo	39
3.2.3	Água	40
3.2.4	Metacaulim	40
3.2.5	Aditivo	41
3.2.6	Solução de sulfato de sódio	42
<b>3.3</b>	<b>Produção dos corpos de prova</b>	<b>43</b>
3.3.1	Determinação do índice de desempenho do metacaulim	43
3.3.2	Relação água/cimento (a/c)	44
3.3.3	Moldagem dos corpos de prova	44
<b>3.4</b>	<b>Métodos de ensaio</b>	<b>45</b>
3.4.1	Variação dimensional linear	45
3.4.2	Resistência mecânica	47
3.4.3	Absorção de água	48
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do metacaulim</b>	<b>52</b>

4.1.1	Determinação do índice de atividade pozolânica do metacaulim .....	52
4.1.2	Determinação do índice de desempenho do metacaulim.....	52
<b>4.2</b>	<b>Resistência mecânica .....</b>	<b>56</b>
4.2.1	Resistencia à tração na flexão com 14 dias de cura inicial .....	56
4.2.2	Resistencia à tração na flexão com 28 dias de cura inicial .....	58
4.2.3	Resistencia à compressão axial com 14 dias de cura inicial .....	60
4.2.4	Resistencia à compressão axial com 28 dias de cura inicial .....	62
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – AREIA NORMAL .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A grande demanda de concreto utilizado em todo o mundo causa preocupação com o meio ambiente, pois a produção de cimento gera um grande impacto ambiental devido à quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) liberado no processo de queima (SCRIVENER, 2014). Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), no ano de 2016 foram produzidos 57 milhões de toneladas de cimento no Brasil e a cada tonelada são emitidos aproximadamente 600kg de  $\text{CO}_2$ .

Nos últimos anos foram realizadas diversas pesquisas com o intuito de encontrar materiais sustentáveis para substituir o cimento na produção do concreto e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental causado pelas diversas obras executadas com esse produto. O metacaulim é uma adição mineral muito utilizada como substituto parcial do cimento Portland. Este material reage com hidróxido cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) produzido na hidratação do cimento, através da reação pozolânica, dando origem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal componente da matriz cimentícia endurecida (DAL MOLIN, 2011).

O metacaulim é uma pozolana de alta reatividade produzida através da calcificação de argilas que possuem alto teor de caulinita. O Brasil possui grandes reservas naturais deste argilomineral e grandes indústrias que realizam seu beneficiamento para comercialização e exportação. O processo de fabricação do metacaulim emite cerca de 90% menos  $\text{CO}_2$  que o processo de fabricação do cimento, tornando este material uma grande opção de substituto parcial do cimento Portland, pois além de serem originado das argilas que são encontradas com facilidade, reduz consideravelmente a emissão de poluente na atmosfera (BARATA; ANGELICA, 2012, METACAULIM DO BRASIL, 2019).

A adição de material pozolânico melhora as propriedades do concreto, como durabilidade à fissuração térmica, diminuindo o calor de hidratação, melhoria na trabalhabilidade do concreto fresco, e aumento da durabilidade a ataques químicos, refinando os poros do concreto que são os grandes responsáveis por transportar agentes agressivos para dentro do material, causando a degradação do mesmo (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 314-316; NEVILLE, 2016. p.503).

Todos esses benefícios ambientais, econômicos e técnicos proporcionados pela adição de material pozolânico no concreto motivaram a realização desta pesquisa, que visa à utilização de metacaulim como substituto parcial do cimento

Portland em uma matriz cimentícia submetida ao ataque de sulfato de sódio. Para compreender melhor os benefícios da reação pozolânica para as propriedades do concreto ligadas à durabilidade, serão realizados ensaios para a caracterização físico-química do metacaulim e moldado corpos de prova com diferentes teores de adição que serão submetidos a um ataque acelerado de sulfato de sódio, verificação da resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água por capilaridade.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a durabilidade de matriz cimentícia com adição de metacaulim sob os efeitos do ataque de sulfato de sódio.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Caracterizar a pozolanicidade do metacaulim;
- b) Avaliar o efeito do teor de metacaulim na resistência à ação de sulfatos;
- c) Avaliar o efeito do tempo de cura das argamassas com metacaulim na resistência ao ataque por sulfatos;
- d) Relacionar a porosidade capilar da matriz cimentícia com a resistência a compressão na avaliação da resistência ao ataque por sulfatos de sódio.

## **1.2 Justificativa**

Nos últimos anos houve grande progresso em estudos voltados à durabilidade de estruturas de concreto, isso se deve ao avanço da tecnologia e o conhecimento adquirido que permite avaliar melhor o mecanismo de transporte de gases e líquidos agressivos através dos poros do material. Com esses novos dados passou a ser possível projetar uma estrutura pensando em uma vida útil expressa em anos e não apenas analisando a classe de agressividade a qual estará exposta (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A adição de metacaulim no concreto modifica a estrutura interna do material através da reação pozolânica. Esta reação melhora as propriedades mecânicas do material, além de proporcionar um refinamento dos poros do concreto, diminuindo a permeabilidade, o que é muito importante para mitigar a entrada de agentes agressores externos que causam danos severos para a estrutura. (MEHTA, MONTEIRO, 2014, p. 249).

A grande maioria dos cimentos produzidos no Brasil possuem adições minerais na sua composição. Gallo (2012) ressalta que 75% das indústrias cimentícias do país utilizam metacaulim e esse material apresenta uma grande relação custo-benefício, pois em média é necessário utilizar, para alcançar os mesmos patamares de resistência, 3 vezes menos metacaulim do que outras pozolanas em concreto. Além disso, o menor consumo de metacaulim o torna um produto mais competitivo, pois o volume necessário de material a ser transportado é muito menor. Esse avanço na produção do concreto busca melhorar a resistência do material e sua durabilidade, pois os custos para manutenção das construções com estruturas de concreto são elevados em relação ao custo necessário para executar uma obra com a vida útil maior. Sendo assim, é mais vantajoso realizar um planejamento voltado para vida útil desde a etapa de projeto, pois haverá grande economia de mão de obra e reparos futuros (RIBEIRO; CASCUDO, 2018)

Os íons de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) são grandes responsáveis por diversos problemas de degradação das estruturas de concreto. Estes íons podem ser encontrados no solo, em águas industriais, naturais e em esgotos, penetrando no material através da estrutura de poros, onde reage com os componentes do cimento na presença de umidade, modificando a estrutura e formam produtos expansivos como a etringita e a gipsita (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.166). Os sulfatos mais comuns encontrados nos solos e em águas subterrâneas são sódio, potássio, magnésio e cálcio. Em solução, os íons de sulfato atacam a matriz cimentícia gerando produtos que causam tensões internas na estrutura, ocorrendo aumento de volume do material, perda de resistência, fissuração e ruptura (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Este estudo busca compreender melhor as propriedades do metacaulim e seus efeitos no concreto submetido a um ataque de íons de sulfato de sódio, assim, serão produzidos corpos de prova com diferentes teores de metacaulim para uma comparação com o concreto de referência (sem adição), verificando a sua porosidade,

resistência à compressão, resistência à tração e se a adição mineral foi capaz de mitigar o efeito agressivo dos íons de sulfato de sódio, aumentando assim a expectativa de vida útil de uma estrutura de concreto exposta a um ambiente de alta agressividade.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão apresentados os efeitos de ataque químico por sulfato de sódio em estruturas de concreto, os efeitos da adição de metacaulim nas propriedades da matriz cimentícia, dados obtidos por pesquisas realizadas na área e métodos de análise.

### 2.1 Ataque por sulfato de sódio

As águas subterrâneas ou poluídas, por esgotos ou rejeitos industriais, são grandes fontes de íons sulfato que atacam as estruturas de concreto. Esses íons podem ser encontrados em grande parte dos solos e no esgoto, mas também, em concentrações menores ou produzidos a partir da decomposição de matéria orgânica, em rio e lagos. As reações químicas entre os íons de sulfato e o cimento Portland hidratado geram grandes problemas para a estrutura de concreto como expansão, fissuração e diminuição progressiva da resistência do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.166).

Diversas estruturas estão localizadas em regiões com exposição a água com sulfatos, como estações de tratamento de esgotos, tubulações de concreto, galerias, entre outras. Atualmente o tratamento de esgoto no país é precário, o que influencia muito na vida útil das estruturas devido ao alto percentual de resíduos sólidos e produtos agressivos, como detergentes, que estão presentes no esgoto. Segundo estudo realizado pelo Instituto Trata Brasil (2018) analisando as 100 maiores cidades do país, 73,16% do esgoto produzido é coletado e 54,33% recebe o tratamento adequado, valor superior a pesquisas de anos anteriores, mas muito inferior ao desejado, pois pouco mais da metade do esgoto gerado no Brasil é tratado corretamente.

Estruturas de concreto localizadas próximo ao mar ou em ambientes industriais com presença de agentes agressivos são classificadas pela norma NBR 6118 (2014), conforme Quadro 1, como ambientes de alta agressividade (classe IV), com elevado risco de degradação da estrutura devido aos ataques químicos. Para execução de obras em ambientes de classe de agressividade IV são especificados o uso de concreto com fck mínimo de 40 MPa, cobrimento mínimo de 45 mm e relação água/cimento igual ou menor que 0,45.

Quadro 1- Classe 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 <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>a</sup> 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).

<sup>b</sup> 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.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (2014).

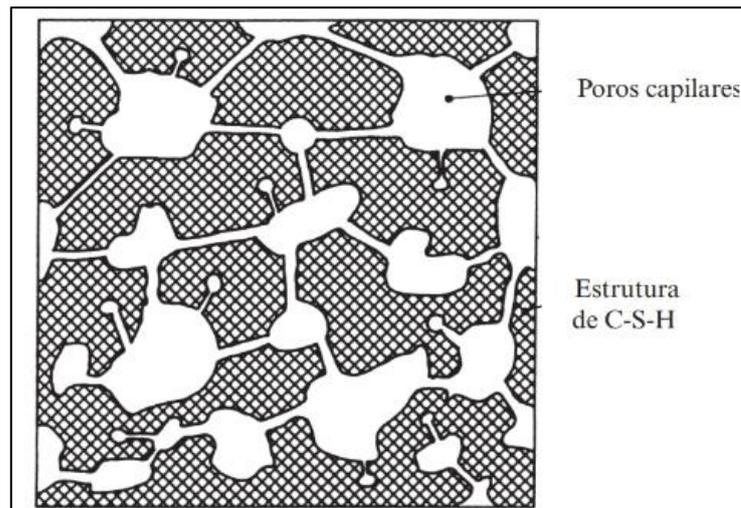
Os sulfatos reagem com os componentes do concreto formando a etringita e a gipsita que são responsáveis por expansões do material. A formação da etringita está ligada às fases do cimento que possuem alumina e reagem com os íons de sulfato, já a gipsita é resultado de uma troca catiônica do cimento endurecido, que primeiro reduz seu pH, diminui a rigidez e resistência, causando fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.167).

Segundo Ribeiro e Cascudo (2018), a agressividade do ataque depende da quantidade de sulfato dissolvido no ambiente e das características do concreto. A relação água/cimento do concreto está diretamente ligada à porosidade total do material, portanto, concretos com relação água/cimento maior, estão mais sujeitos a sofrer um ataque por íons de sulfato.

Neville (2016, p.503-504) ressalta que a durabilidade do concreto está diretamente ligada à sua permeabilidade, em outras palavras, na facilidade que agentes agressivos, como a água, gás carbônico e oxigênio, têm de se deslocar entre os poros do material. Os poros do concreto endurecido contínuos (Figura 1) e com diâmetro mínimo entre 120 a 160 nm são muito importantes, pois são os responsáveis por transportar os agentes agressivos para dentro do material, causando diversos

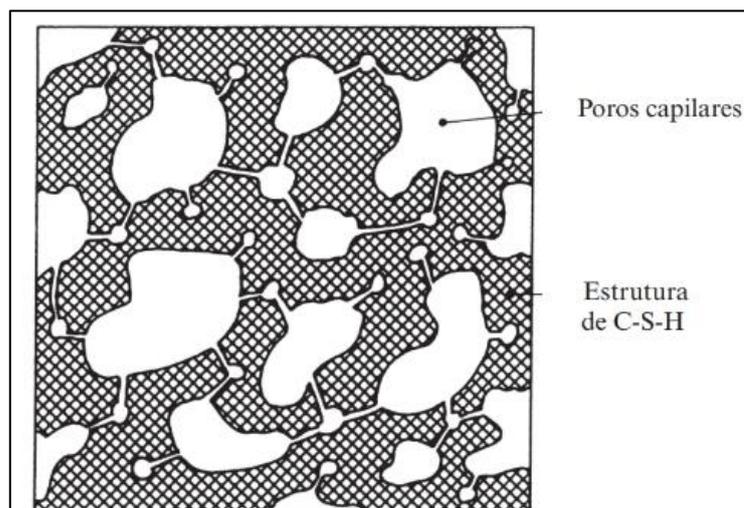
problemas de degradação, este efeito diminui quando ocorre um refinamento dos poros (Figura 2), tornando-os descontínuos e dificultando o deslocamento dos agentes agressores. Os agregados não possuem uma grande relevância na permeabilidade do concreto, apesar de possuir uma porosidade diferente, seus poros são descontínuos e estão envolvidos pela pasta de cimento.

Figura 1 - Poros capilares conectados por grandes aberturas (alta permeabilidade).



Fonte: Neville e Brooks (2013, p. 261).

Figura 2 - Poros capilares segmentados e parcialmente conectados (baixa permeabilidade).



Fonte: Neville e Brooks (2013, p.261).

A NBR 12655 (2015) determina que concreto exposto a sulfato deva seguir os requisitos da Tabela 1 e a ABNT NBR 16697 (2018).

Tabela 1 - Requisitos para concreto exposto a sulfato

<b>Condição de exposição em função da agressividade</b>	<b>Sulfato solúvel em água (SO<sub>4</sub>) presente no solo (% em massa)</b>	<b>Sulfato solúvel (SO<sub>4</sub>) presente na água (ppm)</b>	<b>Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal</b>	<b>Mínimo <math>f_{ck}</math> (para concreto com agregado normal ou leve) (MPa)</b>
Leve	0,00 a 0,10	0 a 150	--	--
Moderada	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

Fonte: NBR 12655 (2015).

Com a definição da condição de exposição do concreto é necessário tomar medidas para melhorar seu desempenho contra o ataque dos íons sulfato. Neville (2016, p.532) apresenta a possibilidade de utilizar cimentos resistentes a sulfatos ou a adição de pozolanas como substituto parcial do cimento Portland, pois a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , impossibilitando sua reação com o sulfato.

O sulfato de sódio possui solubilidade de 4,76 g/100mL de água a 0 °C de temperatura, valor muito superior ao sulfato de cálcio (Tabela 2), portanto, é mais agressivo por possuir mais íons de  $\text{SO}_4^{2-}$  por litro de água. A reação deste sulfato ocorre com hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio hidratado (SOUZA, 2016).

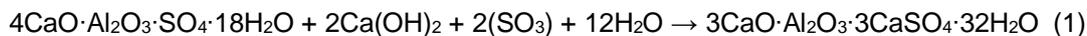
Tabela 2 - Solubilidade entre sulfato de sódio e sulfato de cálcio.

<b>Molécula</b>	<b>Massa molar (g/mol)</b>	<b>Cátion (%)</b>	<b>Ânion (%)</b>	<b>Solubilidade à 0 °C (g/100mL de H<sub>2</sub>O)</b>	<b>Teor máximo em 100 mL de H<sub>2</sub>O a 0 °C (g)</b>	
					<b>Cátion</b>	<b>Ânion (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142,04	32,37	67,63	4,76	1,54	3,22
CaSO <sub>4</sub>	136,14	29,44	70,56	0,19	0,06	0,13

Fonte: Adaptado de Souza (2016).

Segundo Souza (2006) quando uma matriz cimentícia entra em contato com uma solução contendo íons de sulfato de sódio, ocorre uma desestabilização do material e os monossulfoaluminatos são convertidos em etringita. Essa reação é inversa à reação de hidratação do cimento que por sua vez transforma a etringita em monossulfoaluminato, como pode ser observado nas equações 1 e 2.

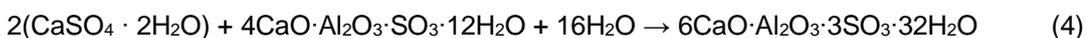
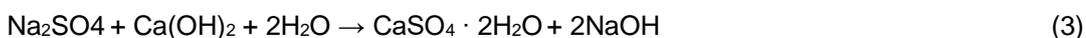
Monossulfoaluminato convertido em etringita (reação do concreto endurecido com íons de sulfato de sódio):



Etringita convertida em monossulfoaluminato (reação final da hidratação cimento):



A reação entre o sulfato de sódio e hidróxido de cálcio, produz gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e o hidróxido de sódio ( $2\text{NaOH}$ ), também conhecido como soda cáustica (equação 3). A gipsita produzida por essa reação, interage com os aluminatos de cálcio hidratados, dando origem a um novo elemento, a etringita ( $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), como pode ser observado na equação 4 (SOUZA, 2006). Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 167) a produção de hidróxido de sódio é essencial para manter o pH alcalino do sistema, desta forma, estabilizar C-S-H.

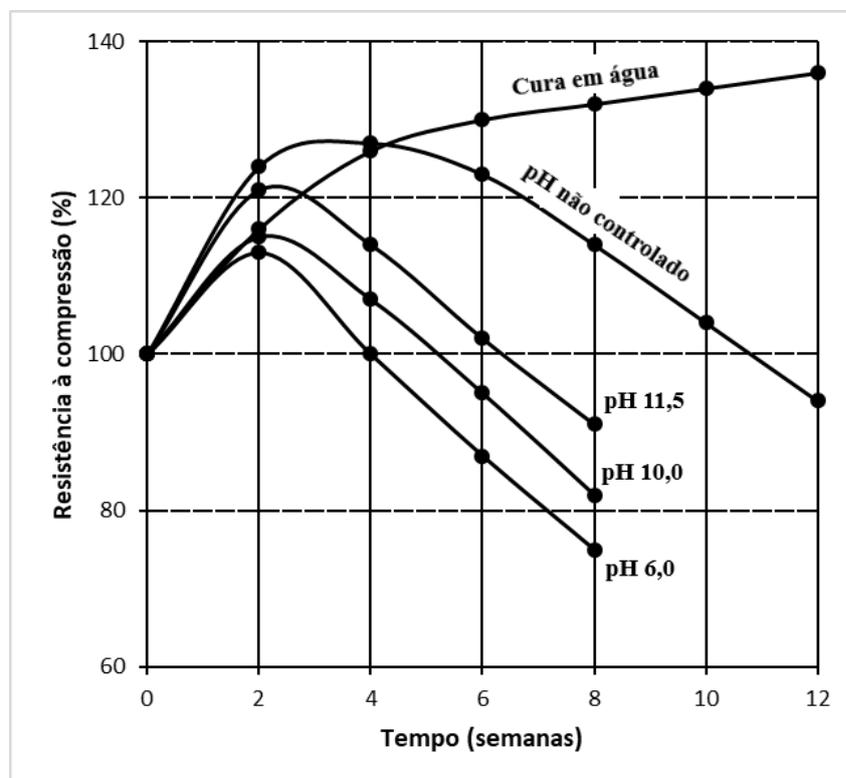


Skalny, Marchand e Odler (2002) afirmam que a interação dos sulfatos alcalinos com a pasta do cimento Portland produz etringita que preenche os poros do concreto, gerando um aumento na resistência mecânica do material por um curto período de tempo. Esse efeito ocorre devido ao preenchimento dos poros do concreto, tornando a área superficial do corpo de prova maior.

O aumento de resistência mecânica dos corpos de prova submetido ao ataque de sulfatos foi observado por Ouyang et al (2014) que verificou a dureza superficial de amostras de argamassa expostas a uma solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  por 330 dias. Em seus resultados foi possível dividir o ataque de sulfato de sódio em duas etapas, na primeira observou-se um aumento da dureza superficial, devido ao preenchimento dos poros por etringita e na segunda etapa, uma queda considerável da dureza, tornando-se menor que a dureza inicial.

A interação entre os íons sulfato e os íons alcalinos alteram o pH da solução nos poros da matriz cimentícia. Desta forma, utilizado um ataque acelerado em laboratório, os íons  $\text{OH}^-$  que migram do interior dos corpos de prova, tendem a elevar o pH da solução de sulfato de sódio, diminuindo a taxa de degradação. Essa alteração do pH não reflete as condições de campo, onde o pH permanece estabilizado com valores inferiores (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002). A influência do pH foi analisada por Brown (1981), estudando corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio sem controlar o pH e o controlando com valores de 6, 10 e 11,5. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 3, mostraram que os corpos de prova imersos em solução com pH controlado apresentaram quedas de resistência antes que os corpos de prova imersos em solução sem controle de pH. Desta forma, soluções de sulfato de sódio sem controle de pH tendem a ser menos agressivas devido a estabilização do mesmo.

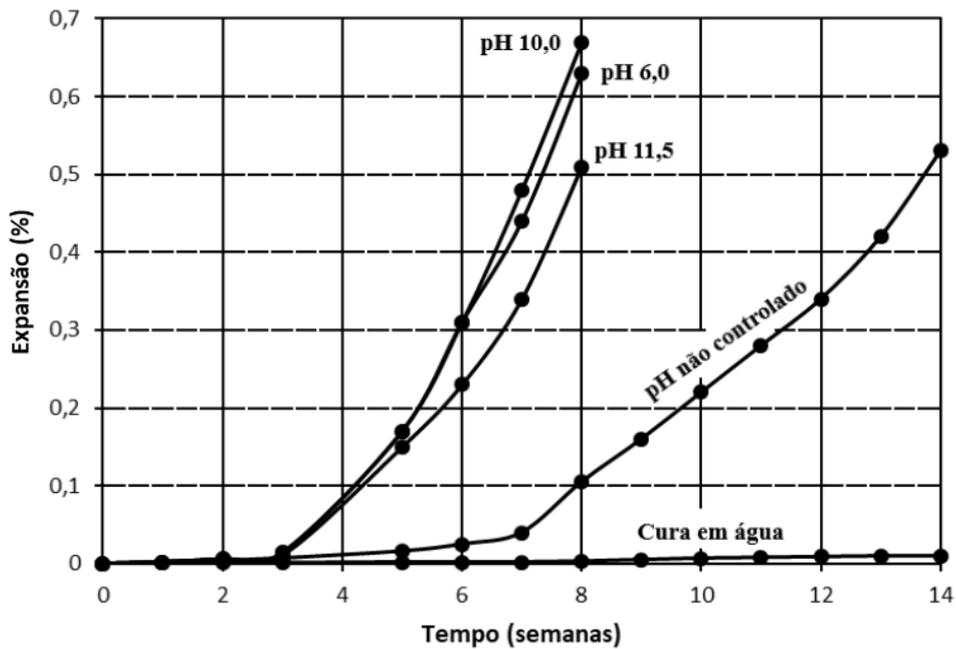
Figura 3 – Variação na resistência a compressão de corpos de prova imersos em água e em solução de sulfato de sódio com diferentes pH.



Fonte: Adaptado de Brown (1981).

Além da resistência à compressão, a expansão linear dos corpos de prova também foi analisada por Brown (1981). O autor observou em seus estudos que as amostras imersas em soluções de sulfato de sódio com pH controlado apresentaram uma expansão superior em relação as amostras imersas em solução sem o controle de pH, como pode ser verificado na Figura 4.

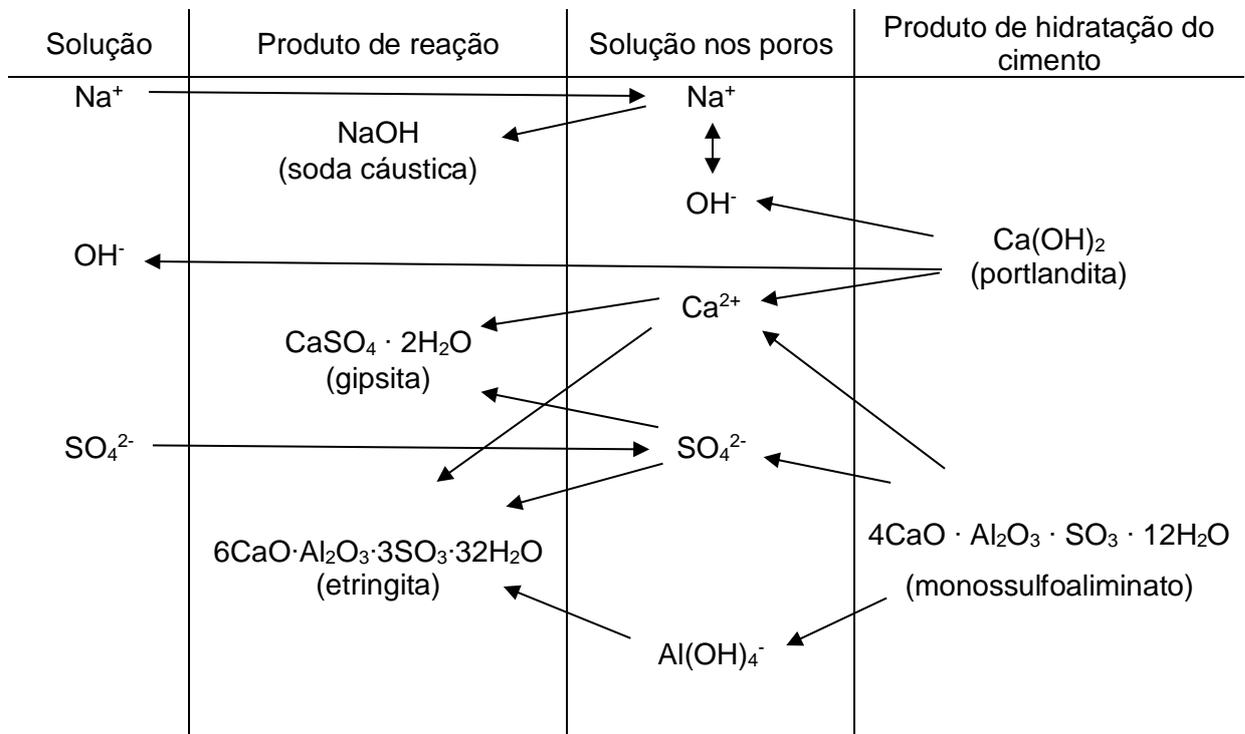
Figura 4 – Porcentagem de expansão dos corpos de prova com imersão em sulfato de sódio com diferentes pH.



Fonte: Adaptado de Brown (1981).

Para melhor entendimento das reações entre o sulfato de sódio e produtos de hidratação do cimento Portland, a Figura 5 apresenta de forma esquemática as possibilidades de reações químicas que ocorrem nos poros da matriz cimentícia.

Figura 5 - Reações entre solução de sulfato de sódio e os produtos de hidratação do cimento Portland.



Fonte: Adaptado de Skalny, Marchand e Odler (2002).

Estruturas de concreto enterradas, como estacas, tendem a ter menos problema que estruturas expostas à solução de sulfato. Ciclos de secagem e molhagem ou total imersão aceleram as reações dos íons de sulfato com os componentes do concreto endurecido. Além dos problemas de fissuração e expansão mencionados anteriormente, as estruturas de concreto apresentam aparência esbranquiçada, perda da coesão na pasta do cimento hidratada e perda da adesão com os agregados, resultando na perda de resistência do material (NEVILLE, 2015, p.531-532).

Outra reação que pode ser observada em concretos expostos a sulfatos é a formação de etringita tardia. Neste caso a fonte de íons de sulfato é interna, diferentes dos casos citados anteriormente, onde os íons de sulfato migravam de fora do material pelos poros do concreto. Essa reação necessita de uma temperatura interna de 65 °C e pode ser ocasionada pelo uso de cimentos com alto teor de sulfatos ou por agregados contaminados com gipsita. Devido à temperatura necessária ser elevada, normalmente problemas relacionados a etringita tardia são observados em concretos que utilizam cura térmica por vapor com temperaturas superiores a 65 °C. A etringita tardia possui uma formação lenta e pode causar severos problemas para o concreto

como fissuração, expansão, perda de resistência e diminuição do módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 169; NEVILLE, 2015, p. 530).

## 2.2 Adição Mineral

O grande consumo de energia durante a produção do cimento Portland motivou mundialmente a busca por uma opção sustentável para diminuir os impactos ambientais. Materiais pozolânicos surgiram como uma boa alternativa, pois além de diminuir o consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na reação de hidratação do clínquer, melhorando as propriedades do cimento (BATTAGIN, 2011, p.202).

A utilização de minerais como substituto parcial do cimento Portland altera a estrutura interna da pasta do cimento hidratada e da zona de transição da matriz cimentícia, reduzindo o calor de hidratação e a porosidade capilar do concreto. Estas alterações das características melhoram o desempenho do material, diminuindo as fissuras de origem térmica e aumentando a resistência a ataques de sulfatos (DAL MOLIN, 2011, p.262).

A reação entre Ca(OH)<sub>2</sub> e o material pozolânico é denominada de reação pozolânica. Essa reação consome o hidróxido de cálcio, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que é muito importante para a durabilidade do concreto submetido a ambientes agressivos. Outros aspectos importantes da reação pozolânica são a sua reação lenta, como indicado as equações 5 e 6, e a eficiência em preencher os poros do concreto, melhorando assim a permeabilidade e resistência do material (MEHTA, MONTEIRO, 2014, p. 249).

Cimento Portland (reação rápida):



Cimento Portland Pozolânico (reação lenta):



A norma NBR 12653 (2014) classifica as pozolanas como materiais silico-aluminosos que não possuem capacidade aglomerante, mas quando são submetidos a um processo de moagem até a finura adequada e com a presença de hidróxido de cálcio e água, reagem gerando produtos com propriedades cimentícias. Os principais

materiais pozolânicos utilizados como substituto parcial do cimento Portland podem ser divididos em materiais de subprodutos e materiais naturais. Os subprodutos são resíduos de indústrias, como usinas de energia que utilizam carvão como combustível ou alto-forno metalúrgico. Já os materiais naturais são vidros vulcânicos, tufos vulcânicos ou argilas, esses materiais normalmente são processados através de queima, britagem e moagem, até adquirirem as características necessárias de material pozolânico (MEHTA, MONTEIRO, 2014, p. 308).

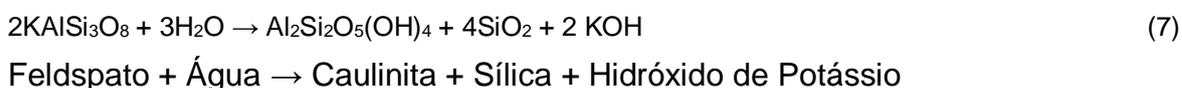
### **2.3 Metacaulim**

A matéria-prima para a produção de metacaulim são argilas com teor superior a 50% de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Esse argilomineral pode ser obtido de fontes naturais ou do rejeito das indústrias de papel. Os depósitos de indústrias de mineração de caulim de alta qualidade que possuem caulinita de baixa granulometria gerada nos processos de beneficiamento do caulim, são grandes fontes desta matéria-prima. Por sua vez, o caulim de rejeito da indústria de papel provém do processo de branqueamento do papel. (LACERDA, 2005; BARATA; ANGELICA, 2012; RASHAD 2013).

O Brasil possui grandes usinas de beneficiamento de caulim no norte do país e jazidas com ampla capacidade de extração. Contudo este processo gera grande volume de resíduos cauliniticos que são depositados em aterros, tornando-se um problema devido ao custo e danos ao meio ambiente. A possibilidade de utilização deste sub-produto como adição pozolânica no concreto proporciona vantagens ecológicas, econômicas e técnicas, devido ao grande volume de material e seu baixo custo/benefício. Em 2008 foram beneficiados 2,5 Mt toneladas de caulim no Brasil para utilização em diversos segmentos da indústria e estima-se que em 2022 serão beneficiados 4,52 Mt, com exportação para Europa, Ásia e América do Norte. (BRASIL, 2011; BARATA; ANGELICA, 2012).

Qualquer argila que possua teores de caulinita, conforme já citado, pode sofrer o processo de calcinação e ser utilizado como metacaulim. Contudo, existem metacaulins de diferentes níveis de reatividade, pois esse fator depende da composição química e mineralógica, bem como das características físicas do material. O tipo de caulim utilizado no processo afeta diretamente a reatividade e cor do metacaulim. Caulim de alta pureza possui elevada porcentagem de sílica e alumínio,

superior a 80%, produzindo um metacaulim mais reativo e mais branco. O caulim encontrado na natureza é produzido por processos geológicos da decomposição do feldspato, como mostra a equação 7. (ROCHA, 2005; DAL MOLIN, 2011, p. 274).



O metacaulim é um material com pouca ou nenhuma organização cristalina, classificado pela norma NBR 12653 (2014) como uma pozolanas de tipo N. Esse mineral sozinho não possui propriedades aglomerantes, mas com a granulometria adequada, ao entrar em contato com a água, reage com o Ca(OH) do cimento hidratado, produzindo produtos ligantes e melhorando as propriedades do concreto. A norma NBR 15894 (2010) estabelece requisitos para uso de metacaulim como substituto parcial do cimento Portland em argamassas e concretos, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos do metacaulim.

<b>Componentes</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite</b>
SiO <sub>2</sub>	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0
CaO + MgO	%	≤ 1,5
SO <sub>3</sub>	%	≤ 1,0
Na <sub>2</sub> O	%	≤ 0,5
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	%	≤ 1,5
Umidade	%	≤ 2,0
Perda ao fogo	%	≤ 4,0
Resíduo na peneira com abertura de malha 45um	%	≤ 10,0
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	Mgcal(OH) <sub>2</sub> /g <sub>material</sub>	≥750
Área específica B.E.T (opcional)	M <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	≥ 15

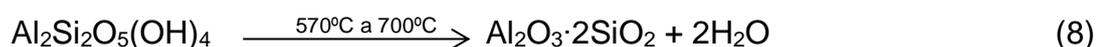
Fonte: NBR 15894-1 (2010).

### 2.3.1 Processo de produção do metacaulim

A produção do metacaulim consiste na calcificação de argilas com alto teor de caulinita. Argilas com teor superior a 90% são raras, portanto, é necessário que o material passe por um processo de beneficiamento para aumentar a sua pozolanicidade. Esse processo consiste na diminuição das impurezas existentes na argila e remoção de grãos muito grossos. Argilas com teor inferior a 50% de caulinita tornam o processo inviável devido ao custo de beneficiamento (BARATA; ANGELICA, 2012; TEODORO, 2016).

O processo de queima da argila inicia com temperatura baixa, em torno de 100 °C a 250 °C, para a retirada da umidade e posteriormente é levado para o forno, onde ocorre a calcificação com temperatura de 600 °C a 850 °C. Com o emprego de altas temperaturas ocorre o processo químico de desidroxilação da argila, retirando a água de constituição da caulinita, modificando sua estrutura e dando origem ao metacaulim ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), um material amorfo, com elevada área superficial e alta reatividade. O tempo de duração deste processo de calcificação é de 1 a 12 horas e depende principalmente da composição química do metacaulim. Após esse processo, o material é resfriado e posteriormente moído até a finura entre 700  $\text{m}^2/\text{kg}$  e 900  $\text{m}^2/\text{kg}$  (LACERDA, 2005; RASHAD, 2013; NEVILLE, 2016, p. 860).

Pesquisa realizada por Shvarzman et al. (2003) para terminar o grau de desidroxilação de argila caulínica verificou que a desidroxilação completa do material ocorre com temperaturas de 570 °C e 700 °C, como mostra a equação 8, havendo uma redução de 13,76% de massa do material. Valores próximos foram obtidos por Medina (2011) que observou redução de 13,95% e Rashad (2013) redução de 14% de massa da argila durante o processo de calcificação.



Neville (2015, p.85) ressalta que os materiais pozolânicos possuem sílica reativa em sua composição. A sílica precisa ser amorfa, pois sílica cristalina possui pouca atividade pozolânica. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 334), a argila calcinada adquire propriedades pozolânicas após sofrer um processo de queima entre 600°C e 900°C. Esse processo é muito importante, pois ocorrem transformações eletroquímicas dando origem a uma estrutura amorfa e desordenada dos

aluminossilicatos da argila. Com processos de calcificação utilizando temperatura superior a 900 °C ocorre a recristalização, como pode ser observado no Quadro 2, dando origem a um material que possui baixa reatividade, desta forma, não recomendado para ser utilizado como substituto parcial do cimento Portland, pois não possui capacidade aglomerante.

Quadro 2 - Transformações térmicas do caulim (caulinita –  $Al_4Si_4O_5(OH)_4$ ).

Temperatura (°C)	Retração	Porosidade	Efeitos térmicos	Perda de massa	Análise petrográfica	Análise por difr. Raios x
20–100	nula	alta	Nenhum	pequena	cristais de caulinita	cristais de caulinita
100-400	nula	alta	Nenhum	pequena	cristais de caulinita	cristais de caulinita
400-500	pequena	alta	grande absorção	muito grande	quebra de cristais	quebra de cristais
500-900	média	alta	Nenhum	pequena	cristais invisíveis	metacaulinita
900-1000	alta	média	grande evolução	nenhuma	cristais invisíveis	aparecimento de mulita e $\alpha$ -alumina
1000-1150	nula	média	Nenhum	nenhuma	crescimento de mulita	crescimento de mulita
1150-1200	alta	redução rápida	pequena evolução	nenhuma	crescimento de cristobalita	mulita e cristobalita

Fonte: CASCUDO; CARASEK; HASPARYK (2010, p.347).

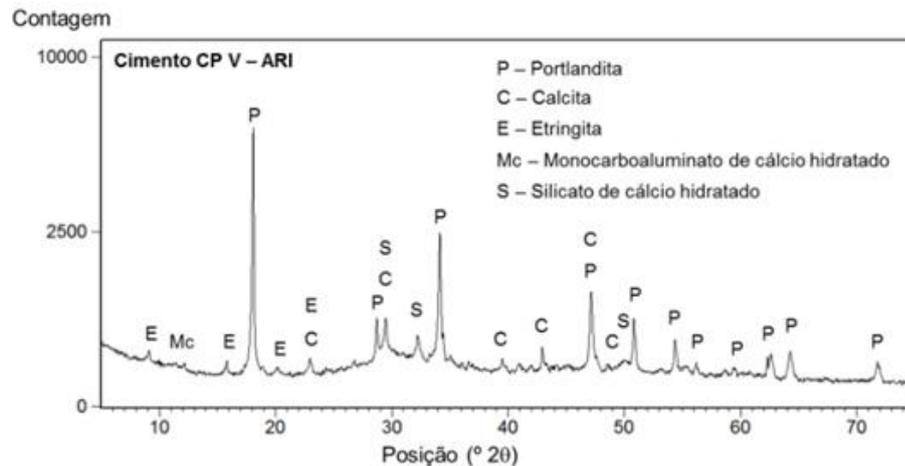
A produção de metacaulim emite 90% menos  $CO_2$  que a produção de cimento Portland, proporcionando grandes benefícios ambientais. Os equipamentos utilizados no processo de beneficiamento do caulim, como forno rotativo e moinho, não geram resíduos agressivos para o meio ambiente, apenas vapor de água e areia que possui diversas aplicações na engenharia civil (ROCHA, 2005; METACAU LIM DO BRASIL, 2019).

### 2.3.2 Efeitos da adição de metacaulim no concreto

O metacaulim é composto por sílica ( $SiO_2$ ) e alumina ( $Al_2O_3$ ) na fase amorfa. Por ser um material pozolânico é capaz de reagir com o  $Ca(OH)_2$  e melhorar as propriedades do concreto, como visto no item 2.2. Medina (2011) caracterizou os componentes da fase amorfa do metacaulim e verificou que a existência de 52,7 % de sílica, 38,4% de alumina e 4,33% de ferro. Segundo estudo realizado por Hoppe Filho et al. (2017) a fase amorfa do metacaulim aumenta a quantidade de alumina dissolvida

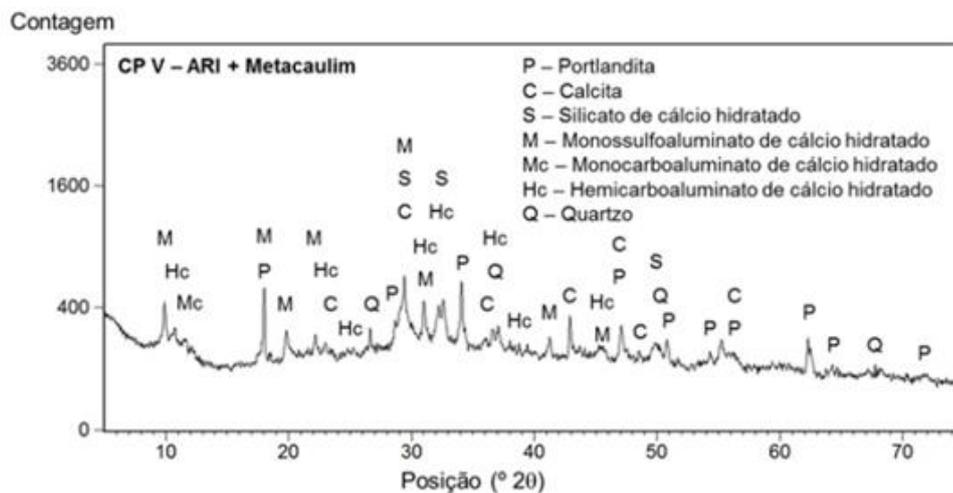
nos poros do concreto, facilitando a conversão de etringita em monossulfoaluminato de cálcio hidratado, esse efeito pode ser observado na Figura 6 e na Figura 7 que apresentam a composição de um cimento com e sem adição de metacaulim.

Figura 6 - Difratoograma de raios X da pasta de cimento CP V – ARI, 28 dias de cura.



Fonte: Hoppe Filho et al (2017).

Figura 7 - Difratoograma de raio-X da pasta de cimento CP V – ARI com adição de metacaulim, 28 dias de cura



Fonte: Hoppe Filho et al (2017).

Estudo realizado por Figueiredo et al. (2014) obteve resultados relevantes para verificar a atividade pozolânica da adição de metacaulim ao concreto. Em seus ensaios foram moldados corpos de prova com CP V-ARI RS resistente a sulfatos como concreto de referência (Mref) e outros dois concretos com adição de 10% de metacaulim e mudança na relação a/c (M1 com a/c igual ao Mref e M2 a/c superior).

Foi possível verificar que concreto com adição de metacaulim (M1) obteve ganho de 20% de resistência à compressão em relação ao concreto de referência (Mref), provavelmente devido às reações pozolânicas entre o metacaulim e hidróxido de cálcio. M2 apesar de possuir uma relação a/c maior, obteve resistência à compressão próxima de Mref, devido à adição do material pozolânico. Os valores obtidos de porosidade dos concretos comprovam que a permeabilidade do material está diretamente ligada à resistividade contra agentes agressores, como vimos no item 2.1. O concreto M1 obteve menor índice de porosidade em relação a Mref devido à capacidade do metacaulim de refinar os poros do concreto. O concreto M2 obteve o maior índice de porosidade devido à relação de a/c maior do que os outros concretos estudados, mas seus poros foram refinados, gerando um sistema de micro poros (menor que 50nm) o que é desejável para um concreto sob os efeitos de agentes químicos externos, como visto anteriormente no item 2.1.

A porcentagem de metacaulim que irá substituir o cimento Portland tem influência direta nas propriedades do concreto. Mota et al. (2011) estudou concretos com substituição de 5%, 8% e 10% de cimento Portland e realizou ensaios aos 7, 28 e 90 dias de cura para verificar as propriedades mecânicas de cada concreto estudado. Todos os concretos com adição de metacaulim apresentaram melhoras nas propriedades físicas, em todas as idades, em relação ao concreto sem adição, entretanto, o concreto com 8% de adição apresentou melhores resultados de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção total, em relação ao concreto com 10% de adição, mostrando que a melhor porcentagem de substituição de cimento Portland por metacaulim é 8%.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Souza, Camara e Akasaki (2016) realizaram estudo empregando teores de substituição de metacaulim de 5%, 10%, 15% e 20% para ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, absorção e módulo de elasticidade para idades de 7, 28, 60 e 90 dias. Conforme o teor de metacaulim aumentou, o concreto apresentou menos absorção de água, algo desejado para o aumento da durabilidade do material, mas no ensaio de resistência à compressão houve aumento de resistência até o teor de 15% de substituição e no ensaio de resistência à tração houve um acréscimo até 10% de substituição. Os ensaios de módulo de elasticidade apresentaram pouca variação para todos os teores de substituição, mas os valores estavam dentro do esperado para o concreto

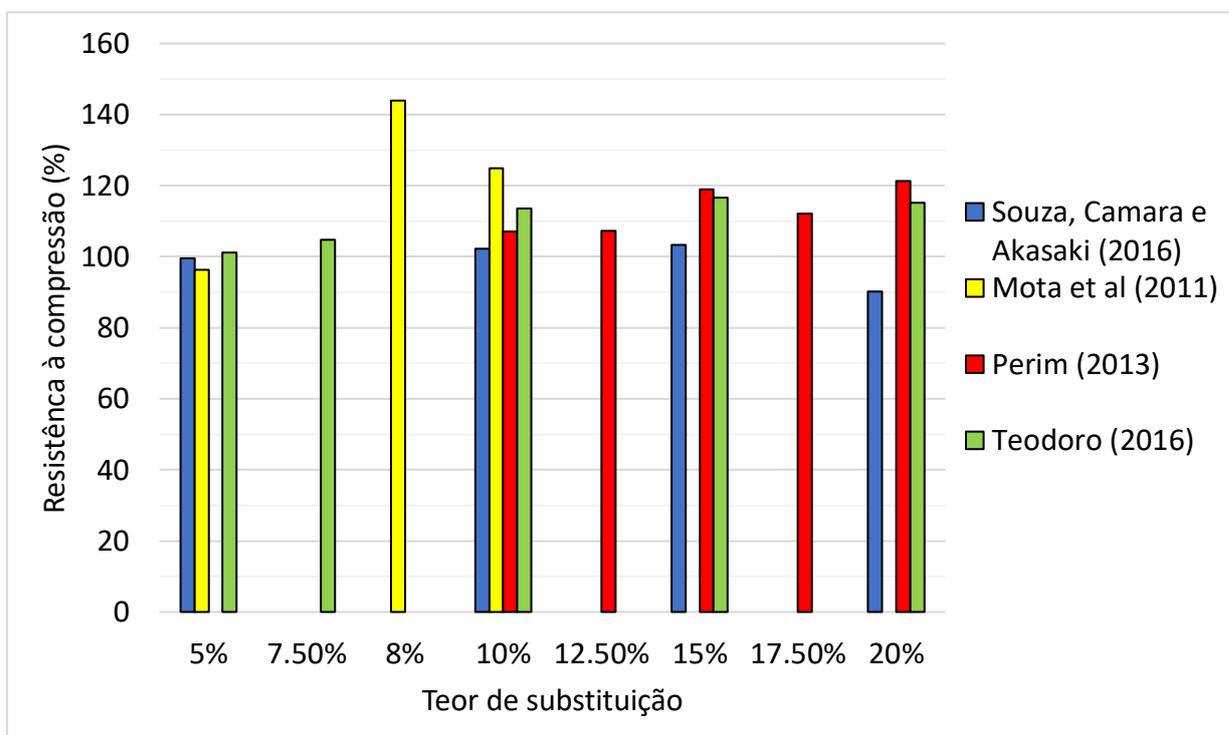
estudado. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que o melhor teor de substituição de metacaulim para concreto é 10%, pois com teores maiores o metacaulim não conseguiu suprir a falta de cimento na mistura.

Pesquisa realizada por Perim (2013) utilizou teores de 10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20% de metacaulim com substituto parcial do cimento Portland. Realizando ensaios de resistência à compressão aos 3 dias de cura, verificou-se que todos os concretos com adição de metacaulim possuem resistência menor que o concreto de referência. A reação pozolânica é lenta e para o efeito de resistência, Medina (2011) afirma que a adição de metacaulim nas primeiras idades pode ser considerada como uma adição inerte do ponto de vista ligante, pois necessita de água e de hidróxido de cálcio das reações de hidratação do cimento para iniciar. Aos 7 dias boa parte das reações pozolânicas já ocorreram e todos os concretos com adição apresentam resistência à compressão superior ao concreto de referência. Além disso, verificou-se uma redução na porosidade total do concreto com substituição de 10% e 15% e um refinamento no tamanho dos poros, o que favorece a durabilidade do concreto exposto a um ambiente de alta agressividade.

Para determinar a porcentagem de substituição de metacaulim em sua pesquisa, Teodoro (2016) realizou um estudo preliminar com teores de 0%, 5%, 7,5%, 10%, 15% e 20%, além de utilizar dois tipos de metacaulim. Realizando os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, onde foi possível verificar um aumento significativo de resistência a partir do teor de 7,5% até 15%, com substituição de 20% o concreto apresentou valor inferior a 15%. Adotando o teor de 10% de substituição, o autor utilizou relação a/c de 0,4 e 0,6 em seu estudo, verificando que o metacaulim modificou a estrutura interna do concreto, reduzindo a porosidade e refinando os poros, além da grande importância da relação a/c para as propriedades de durabilidade do concreto, pois um valor de a/c menor proporciona um concreto menos poroso.

Para melhor compreensão dos teores de substituição de metacaulim, a Figura 8 apresenta valores da resistência à compressão de concretos com diferentes teores de substituição aos 28 dias de cura. Pode ser observado uma grande variação nos resultados, pois cada autor utilizou um tipo de traço, de acordo com sua pesquisa, portanto é necessário analisar individualmente os valores de cada estudo realizado.

Figura 8 – Gráfico da influência do teor de metacaulim na resistência à compressão relativa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Através dos resultados obtidos por diversos autores citados anteriormente, os teores de 8% a 15% de metacaulim como substituto parcial do cimento Portland, apresentaram melhoras significativas nas propriedades da matriz cimentícia. Esse valor vai de encontro com a norma NBR 15894-2 (2010) determina o método de ensaio utilizando 15% de metacaulim para verificar sua atividade pozolânica aos 7 dias de cura.

### 2.3.3 Uso de metacaulim para mitigar os efeitos do ataque de sulfato de sódio

Pesquisa realizada por Gomes e Godinho (2016) utilizou 10% de metacaulim como substituto parcial do cimento Portland em concretos submetidos a um ataque acelerado por sulfato de sódio. Para simular uma situação real de ambiente de alta agressividade, alguns corpos de prova foram levados para uma estação de tratamento de esgoto, permanecendo expostas aos diversos tipos de sulfatos existentes no ambiente e outros corpos de prova foram submetidos a um ciclo acelerado de sulfato de sódio, sendo imersos por 7 dias em solução contendo 200 mg/L de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,

secagem por 4 dias em estufa, novamente imersão na solução de sulfato de sódio e medição do nível de potencial de corrosão. As autoras previam um ciclo de 90 a 120 dias para o ensaio acelerado de sulfato de sódio, mas aos 60 os corpos de prova mostraram grande degradação e não foi possível seguir com o ensaio. Na discussão dos resultados, foi proposto para trabalhos futuros utilizarem diferentes concentrações na solução de sulfato de sódio e diferentes percentuais de metacaulim.

Para comparar a concentração de sulfatos existentes em uma ETE com os valores determinados em norma, Kulisch (2011) baseou-se na NBR 13583 (1996). Em seus levantamentos observou uma concentração de 45,35 mg/L de sulfatos na estação de tratamento de esgoto estudada, valor muito inferior ao determinado pela norma de 100 mg de sulfato de sódio por litro de água. A autora realizou os ensaios aos 12, 24 e 36 dias de exposição ao sulfato de sódio e verificou uma expansão linear média de 0,043%, valor superior ao 0,03% considerado como resistente. Vale ressaltar que a norma determina um teor de 100 mg de sulfato de sódio por litro de água por se tratar de um ataque acelerado e o período de ensaio ser de 42 dias de exposição à solução de sulfato.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Souza (2016) realizou estudo com diferentes adições minerais como substituto parcial do cimento Portland para verificar a durabilidade da argamassa após um ensaio acelerado de sulfato de sódio e sulfato de magnésio, seguindo as recomendações da NBR 13583 (2014). O tempo de exposição foi de 140 dias para comparar os resultados com os valores de 42 dias como a norma determina. O autor observou que a argamassa com adição de metacaulim apresentou expansão de aproximadamente 0,037%, valor superior ao permitido pela norma após 42 dias de exposição e um dos piores valores dentre as diversas adições estudadas, mas após 140 dias de exposição, o traço com metacaulim apresentou um dos melhores resultados se comparado as demais adições. Isso se deve ao fato de cimentos com adição mineral apresentarem melhores resultados em longos períodos de tempo. Utilizando outros métodos na pesquisa como variação volumétrica, resistência à compressão e resistência à tração, o autor concluiu que os resultados encontrados seguindo as determinações da NBR 13583 (2014) eram pouco satisfatórios, pois devido ao curto período de ensaio os cimentos com adição de mineral não apresentaram bom desempenho.

Utilizando a norma ASTM C1012/C1012M-15 (2015) para verificação da resistência ao sulfato de sódio, Akasha e Abdullah (2018) realizaram a verificação

dimensional linear ao longo de 12 meses e ensaio de resistência à compressão. Os autores verificaram que teores de adição de 10% a 20% apresentaram os melhores resultados, diminuindo a degradação causada pelos íons sulfato, aumentando a resistência à compressão dos corpos de prova e menor expansão dimensional linear.

#### **2.4 Métodos de avaliação da resistência aos íons de sulfato**

A NBR 13583 (2014) especifica os métodos de ensaio para verificar se a matriz cimentícia é resistente ao sulfato de sódio. Os corpos de prova devem ter seção quadrada de 25 mm e comprimento de 285 mm, ambiente com temperatura  $40 \pm 2$  °C durante o ensaio, solução com 100g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  por litro de água com pH de 6 a 8 e traço da argamassa 1:3,2. A verificação do comprimento das barras deve ser realizada com um extensômetro com relógio de resolução 0,001 mm e sempre com a mesma face da barra voltada para cima. As medidas são verificadas antes da exposição à solução de sulfato de sódio e posteriormente aos 14, 28 e 42 dias de exposição. A norma não especifica o valor limite para considerar a matriz cimentícia resistente ou não ao ataque de sulfato de sódio, mas diversas pesquisas utilizam 0,03% como limite máximo de expansão para determinar a mitigação dos íons sulfato.

A norma ASTM C1012/C1012M-15 (2015) apresenta um ensaio similar a NBR 13583 (2014) para verificar a variação dimensional das barras de cimento Portland expostas a uma solução de sulfato de magnésio e sulfato de sódio, com uma concentração de 50mg de sulfato de sódio por litro de água e medições do comprimento dos corpos de prova realizadas após 1, 2, 3, 4, 8, 13 e 15 semanas e posteriormente a 4, 6, 9 e 12 meses de exposição. É possível observar que a norma ASTM C1012/C1012M-15 (2015) possui um tempo de exposição muito superior se comparado com a NBR 13583 (2014), além de um ataque de sulfato de sódio mais moderado, esses fatores geram uma dificuldade devido ao grande período necessário para obter os resultados.

A resistência à compressão pode ser um dado importante para verificar a durabilidade da matriz cimentícia. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.196) o ataque de sulfatos gera uma deterioração lenta do concreto e nas primeiras idades não é possível notar visualmente os problemas causados. Os produtos gerados pelas reações químicas entre íons de sulfato e componentes da pasta do cimento endurecido, causando expansão e fissuração do material, desta forma, uma perda de

estanqueidade de forma gradual. Com a degradação parcial da matriz cimentícia, há possibilidade de entrada de diversos outros agentes agressores através das fissuras, assim ocorrem vários tipos de reações deletérias no interior do material, consumindo os componentes da pasta endurecida, resultando em perda de aderência e da resistência.

Segundo Irassar (1990), o ensaio de tração na flexão é um importante parâmetro para verificar se a matriz cimentícia é resistente ao ataque de sulfatos. As tensões internas causadas por produtos expansivos, provenientes da interação dos corpos de prova com a solução de sulfato de sódio, geram fissuras assim que esta tensão supera a taxa de ganho de resistência à tração. Desta forma, nas primeiras idades de imersão na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  os corpos de prova apresentam uma resistência maior devido ao preenchimento dos poros por etringita e gesso, mas esse ganho de resistência chega em um valor limite e posteriormente sofre uma queda, neste ponto podemos verificar o surgimento de fissuras nas amostras.

Como mencionando anteriormente, a permeabilidade da matriz cimentícia é um fator muito importante para concretos expostos a ambientes de alta agressividade, pois os agentes agressores penetram pelos poros do material, causando a deterioração do mesmo (NEVILLE, 2016, p.503-504). Analisando esse fator nos corpos de prova de argamassa com e sem adição de metacaulim, expostos a dois tipos de solução, será possível verificar se a adição mineral gerou um refinamento dos poros do material e se os íons de sulfato de sódio provocaram fissurações na matriz cimentícia e a degradação da mesma.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para a produção dos corpos de prova e os métodos de ensaios para a avaliação do desempenho do metacaulim em mitigar os efeitos dos íons sulfato.

#### 3.1 Variáveis da pesquisa

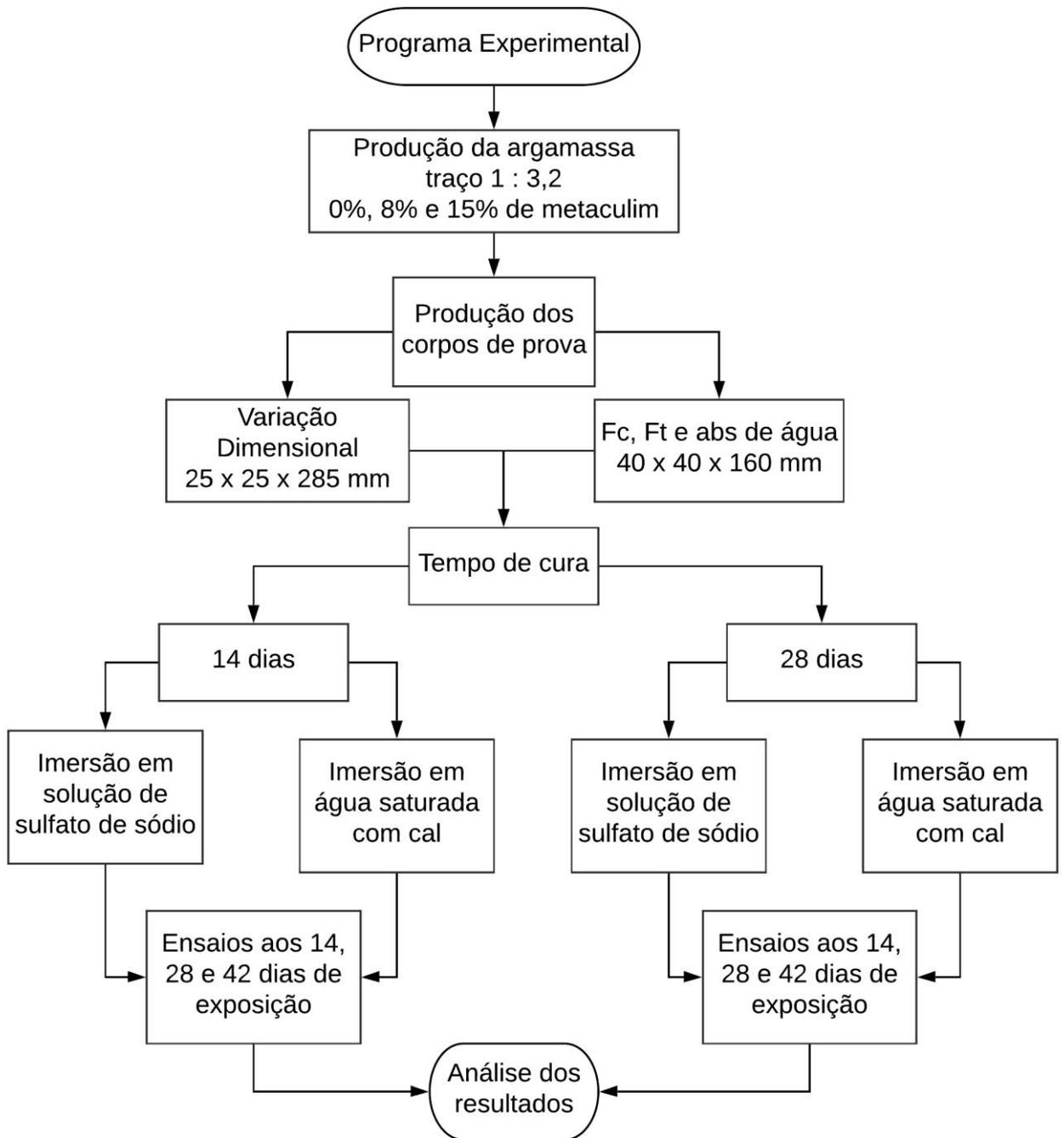
Estudos utilizando adição mineral na argamassa conforme as determinações da NBR 13583 (2014) para verificação da durabilidade sob os efeitos de ataque acelerado de sulfato de sódio, não encontram resultados satisfatórios devido ao curto período de ensaio, como foi abordado no capítulo 2 desta pesquisa. Seguindo esta linha de raciocínio, foi proposto um tempo de cura superior ao especificado em norma. Desta forma, foram moldados corpos de prova de argamassa para seguir as recomendações da NBR 13583 (2014), com 14 dias de cura e posteriormente imersos em solução de sulfato de sódio e corpos de prova submetidos a um tempo de cura de 28 dias e em seguida imersos na solução de sulfato de sódio com as mesmas características dos demais. Analisando os dois tempos de cura foi possível verificar a sua influência na durabilidade da matriz cimentícia exposta a um ambiente com alta concentração de sulfato de sódio.

A adição mineral tem grande influência na durabilidade da matriz cimentícia, portanto, foram moldados corpos de prova de argamassa com 8% e 15% de metacaulim como substituto do cimento Portland, a fim de verificar qual taxa de substituição apresenta melhores resultados. Para um valor de referência, foram moldados corpos de prova de argamassa sem adição mineral.

Por fim, para verificar a influência da solução de sulfato de sódio nas propriedades da matriz cimentícia, foram comparados os resultados obtidos entre os corpos de prova imersos em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com os corpos de prova imersos em água com cal.

A argamassa foi produzida com traço 1:3,2 (cimento : areia normal) e relação água/cimento 0,6. Portanto, para desenvolvimento dos métodos de estudo, foram moldados corpos de prova com 3 teores de metacaulim, utilizando 2 tipos de cura e 2 soluções de exposição, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma das variáveis da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 3.2 Materiais

Descrição dos materiais necessários para a produção de corpos de prova de concreto com adição de metaculim e corpos de prova de concreto de referência.

### 3.2.1 Cimento

Através de contato com uma empresa produtora de tubos de concreto e galerias, localizada na região do Vale dos Sinos, foi verificado que os produtos citados são fabricados com cimento Portland CP-V-ARI devido a sua alta resistência inicial. Com isso, foi definido a utilização do mesmo cimento para buscar simular uma situação real.

O cimento Portland CP-V-ARI não possui adição de material pozolânico e menor adição de material carbonático. Estes fatores são muito importantes para análise dos resultados, pois não interferirão na comparação entre o cimento com e sem adição de metacaulim.

### 3.2.2 Agregado miúdo

Para a produção dos corpos de prova foi utilizado areia normal como determina a NBR 13583 (2014). Essa areia é uma mistura homogeneizada de 4 composição granulométrica, divididas igualmente em massa. A NBR 7214 (2015) especifica a granulometria de cada fração da areia normal, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Composições granulométricas da areia normal.

<b>Denominação</b>	<b>Material retido entre as peneiras de abertura nominal</b>	<b>Porcentagem em massa %</b>
16	2,4 mm e 2,0 mm	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	≥ 95

Fonte: Adaptado da norma NBR 7214 (2015).

A areia proveniente da bacia do Rio Jacui/RS passou por um procedimento de lavagem, descrito no APÊNDICE A – AREIA, um processo de secagem em estufa aos 100 °C e posteriormente peneiramento em agitador mecânico, até a obtenção das quatro frações necessárias, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Quatro frações da areia normal.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

### 3.2.3 Água

Utilizado água potável disponibilizada pela rede pública da cidade de São Leopoldo/RS para a produção dos corpos de prova e água destilada para a produção da solução de sulfato de sódio, água saturada com cal e ensaio de absorção.

### 3.2.4 Metacaulim

Utilizado metacaulim Ultra HP com propriedades físicas (Tabela 5) e químicas (Tabela 6) fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5 – Propriedades físicas do metacaulim Ultra HP.

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Resultado</b>	<b>Típico</b>	<b>Limite (NBR 15894)</b>
<i>Finura (&lt;#325 – 44 μm)</i>	8,4%	5,0%	< 10,0%
<i>Área Específica (BET, cm<sup>2</sup>/g)</i>	217.000	230.000	> 150.000
<i>Massa Específica (kg/dm<sup>3</sup>)</i>	2,54	2,55	
<i>Massa Unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</i>	0,68	0,60	
<i>Propriedades adicionais</i>	<i>Poz. Act. Index (7 days): 118%</i>		

Fonte: Adaptado dos dados fornecidos pelo fabricante (2019).

Tabela 6 – Propriedades químicas do metacaulim Ultra HP.

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Resultado</b>	<b>Típico</b>	<b>Limite (NBR 15894)</b>
SiO <sub>2</sub>	58,3%	55,5%	44,0% a 65,0%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,5%	36,5%	26,0% a 46,0%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9%	2,0%	-
TiO <sub>2</sub>	1,0%	1,0%	-
CaO	0,2%	0,5%	CaO + MgO < 1,5%
MgO	0,3%	0,5%	-
K <sub>2</sub> O	1,8%	1,5%	0,658 K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O < 1,5%
Na <sub>2</sub> O	0,2%	0,1%	< 0,5%
SO <sub>3</sub>	0,2%	0,1%	< 1,0 %
Perda ao fogo	2,8%	2,0%	< 4,0%

Fonte: Adaptado dos dados fornecidos pelo fabricante (2019).

A Determinação do índice de atividade pozolânica do metacaulim foi realizado utilizando o método de Chapelle modificado, seguindo as recomendações da norma NBR 15895 (2010) para a determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado nos materiais pozolânicos, além do índice de desempenho do metacaulim aos 7 dias, segundo as recomendações da norma NBR 15894-2 (2010).

### 3.2.5 Aditivo

Utilizado o aditivo ADVA CAST 718 que é classificado pela norma NBR 11768 (2011) como superplastificante do tipo II. Esse aditivo foi empregado nos corpos de prova com teores de substituição do cimento Portland por metacaulim, com intuito de manter a mesma consistência da argamassa de referência.

Foram realizados ensaios para a determinação do índice de consistência dos 3 tipos de argamassa produzidos, seguindo as determinações da NBR 13276 (2016) e adicionado aditivo até alcançar a mesma consistência de referência. A Tabela 7 apresenta a quantidade de aditivo utilizado em cada argamassa produzida de acordo com o traço determinado na NBR 13583 (2014).

Tabela 7 – Quantidade de aditivo para moldar os corpos de prova.

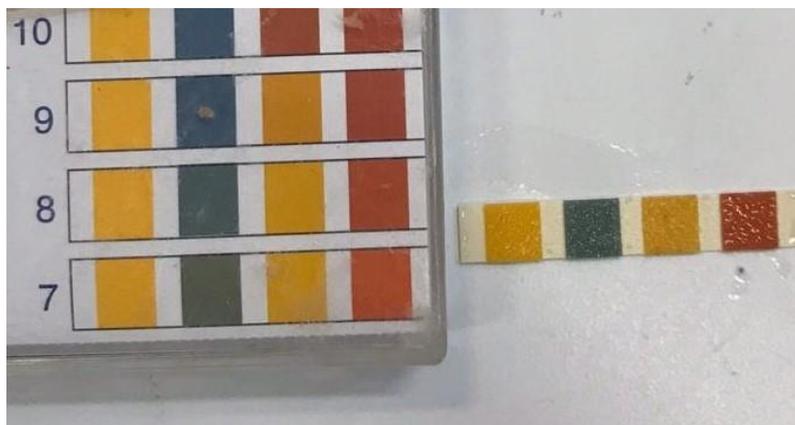
<b>Argamassa</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Teor (%)</b>
Referência	0	0%
8% de metacaulim	0,370	0,074%
15% de metacaulim	0,700	0,14%

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 3.2.6 Solução de sulfato de sódio

Conforme a norma NBR 13583 (2014) foi produzido uma solução de sulfato de sódio com 100 mg de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  por litro de água, com pH igual a 8,0. A solução foi homogeneizada utilizando um bastão de vidro e produzida um dia antes da imersão dos corpos de prova, em ambiente controlado com temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Para controle do pH, empregou-se fita indicado de pH, conforme Figura 11.

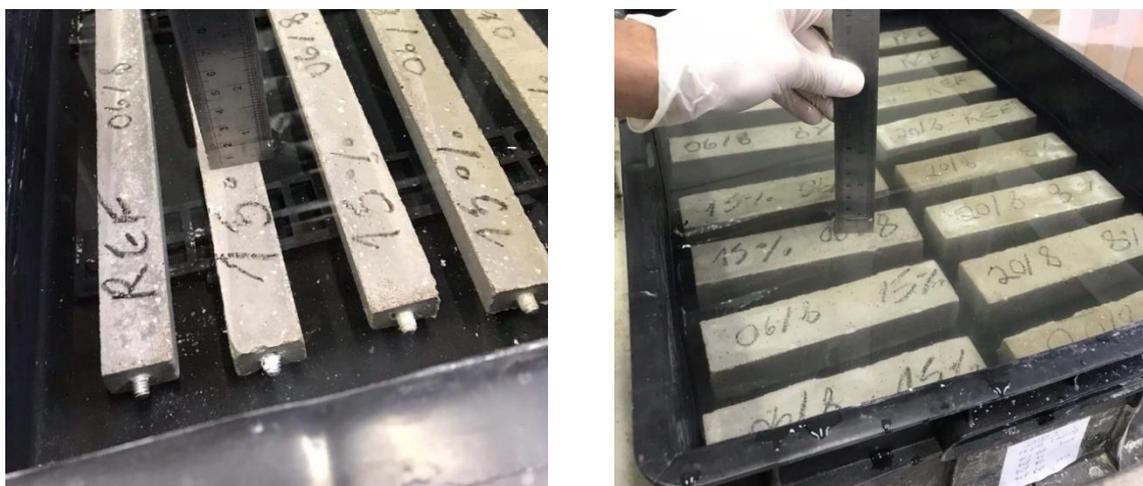
Figura 11 – Verificação do pH da solução de sulfato de sódio.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Após a imersão dos corpos de prova na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , o recipiente contendo o material foi colocado na estufa com temperatura controlada de 40 °C, onde permaneceu até a data dos ensaios. Todos os corpos de prova ficaram totalmente imersos na respectiva solução, com uma camada livre de solução superior a 1,5 cm para garantir a imersão completa, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Verificação do nível de solução de sulfato de sódio. (A) Corpos de prova do grupo 1. (B) Corpos de prova do grupo 2.



(A)

(B)

Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Para realizar o controle do pH da solução ao longo das 6 semanas de ensaio foi utilizado um total de 7,3 g de ácido sulfúrico para cada litro de sulfato de sódio.

### 3.3 Produção dos corpos de prova

Descrição dos procedimentos para a produção dos corpos de prova para cada tipo de concreto em estudo.

#### 3.3.1 Determinação do índice de desempenho do metacaulim

A norma NBR 15894-2 (2010) determina o método de ensaio para verificar a atividade pozolânica para adição de pozolanas de alta reatividade. Seguindo as recomendações da norma, foram moldados seis corpos de prova para argamassa de referência composta por cimento CP II-F-32, areia normal e água, além de seis corpos de prova para argamassa com 15% em massa de cimento Portland substituído por metacaulim, areia normal e água.

Os corpos de prova cilíndricos possuem dimensões de 50 x 100mm. A mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova, condições de cura e ensaios para determinar a carga de ruptura à compressão serão realizadas conforme a norma NBR 7215 (2019). Os corpos de prova com adição de metacaulim devem alcançar 105% de resistência em relação à referência aos 7 dias. A Tabela 8 apresenta a quantidade

de materiais utilizados para a moldagem dos 12 corpos de prova empregados nos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 8 - Quantidade de material necessário para ensaio de atividade pozolânica do metacaulim.

<b>Material</b>	<b>Massa (g)</b>	
	<b>Argamassa A</b>	<b>Argamassa B<sup>a</sup></b>
<i>Cimento CP II-F-32</i>	624,0	530,4
<i>Material pozolânico</i>	-	93,6
<i>Areia normal<sup>b</sup></i>	1872,0	1872,0
<i>Água</i>	300,0	300,0
<i>Aditivo</i>	0	1,4

Fonte: Adaptado da norma NBR 15894-2 (2010).

### 3.3.2 Relação água/cimento (a/c)

A norma NBR 13583 (2014) determina uma relação a/c de 0,6, portanto, todos os corpos de prova do estudo foram moldados com esse valor.

### 3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Para a produção das argamassas foi utilizada a argamassadeira do laboratório de materiais da Unisinos que possui capacidade de 5 litros, seguindo as recomendações da NBR 7215 (2019) e NBR 13279 (2005) para mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova.

Como citado anteriormente, foram produzidas argamassas com dois teores de adição de metacaulim e argamassa de referência sem adição mineral, como pode ser verificado na Tabela 9. Foram moldados corpos de prova de dois grupos (Tabela 10), o grupo 1 com dimensões de 25 x 25 x 285 mm como determina a norma NBR 13583 (2014) para a verificação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio e grupo 2 com dimensões de 40 x 40 x 160 mm como determina a NBR 13279 (2005) para corpos de prova de argamassa submetidos aos ensaios de resistência à compressão. Utilizando corpos de prova do grupo 2 também foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e absorção de água pelo método de Rilem adaptado.

Tabela 9 – Nomenclatura atribuída para os tipos de concreto estudados.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Cimento</b>	<b>Metacaulim</b>	<b>a/c</b>
<i>A ref</i>	100%	-	0,6
<i>A M8</i>	92%	8%	0,6
<i>A M15</i>	85%	15%	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 10 – Dimensões dos corpos de prova utilizados.

<b>Grupo</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Dimensões(mm)</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Número de CP</b>
1	<i>Variação dimensional linear</i>	25 x 25 x 285	<i>A ref</i>	12
			<i>A M8</i>	12
			<i>A M15</i>	12
2	<i>Resistência à compressão para argamassa e absorção de água</i>	40 x 40 x 160	<i>A ref</i>	44
			<i>A M8</i>	44
			<i>A M15</i>	44

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 3.4 Métodos de ensaio

#### 3.4.1 Variação dimensional linear

Os corpos de prova do grupo 1 foram submetidos aos ensaios determinados pela norma NBR 13583 (2014), portanto, utilizou-se 4 corpos de prova para cada teor de adição e para cada tempo de cura. A verificação da variação dimensional foi realizada sempre no mesmo ponto da amostra, com a mesma fase virada para cima, em ambiente controlado com temperatura de  $23 \pm 2$  °C.

Utilizou-se um estrado plástico como apoio nas extremidades dos corpos de prova para garantir um afastamento de 1,5 cm do fundo do recipiente, caixas plásticas como vedação para o processo de cura em água saturada com cal e sulfato de sódio, evitando a evaporação da solução e garantindo que o nível não fosse inferior a 1,5 cm. Durante o período dos ensaios foram verificados os níveis de solução de cada caixa e o seu pH.

Para 12 corpos de prova do grupo 1, foi realizado uma cura inicial de 48 horas em temperatura controlada de 23 °C e protegido contra a perda de umidade, posteriormente, uma cura úmida por 12 dias imersos em água saturada com cal na sala de cura. Ao fim desses 14 dias de cura, os corpos de prova foram imersos em uma solução de sulfato de sódio, descrita no item 3.2.6, permanecendo por 42 dias,

com as medidas de variação dimensional sendo realizadas aos 0, 14, 28 e 42 dias de exposição.

Para verificar a influência do tempo de cura na durabilidade da matriz cimentícia, outros 12 corpos de prova do grupo 1 foram submetidos a mesma cura inicial de 48 horas e posteriormente, uma cura úmida por 26 dias imersos em água saturada com cal na sala de cura. Ao fim desses 28 dias, realizou-se os mesmos procedimentos mencionados acima.

Por fim, os 12 corpos de prova restantes do grupo 1 foram submetidos a mesma cura inicial de 48 horas, 12 dias imersos em água saturada com cal na sala de cura e posteriormente, imersos em água saturada com cal em temperatura de 40 °C até o fim dos ensaios, aos 70 dias, com as medidas sendo realizadas as 14, 28, 42, 56 e 70 dias de cura. Desta forma, possível calcular a variação resultante (equação 9) entre as barras de argamassa afetadas pelo ataque acelerado de sulfato de sódio e as barras de argamassa que não foram expostas à solução agressiva.

$$Ae = Es - Ea \quad (9)$$

Onde:

Es - é a expansão média das barras de argamassa submetidas ao ataque acelerado de sulfato de sódio, expressão em %;

Ea - é a expansão média das barras de argamassa imersas em água saturada com cal, expressão em %;

Ae - é a expansão resultante, expressa em %.

A Tabela 11 apresenta a quantidade de corpos de prova que foram moldados para o ensaio de variação dimensional linear de barras de argamassa submetidas ao ataque de sulfato de sódio.

Tabela 11 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de variação dimensional.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Tempo de cura</b>	<b>Tempo de Exposição</b>	
		<b>0, 14, 28 e 42 dias - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>14, 28, 42 e 56 dias - água com cal</b>
A ref	14	4 CP	4 CP
A M8	14	4 CP	4 CP
A M15	14	4 CP	4 CP
A ref	28	4 CP	-
A M8	28	4 CP	-
A M15	28	4 CP	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 3.4.2 Resistência mecânica

Para estes ensaios foram utilizados os corpos de prova do grupo 2, sendo 3 corpos de prova para cada teor de adição, para cada idade de cura e tempo de exposição, totalizando 99 corpos de prova para os ensaios de resistência à tração na flexão na flexão e resistência à compressão axial, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de resistência mecânica.

Corpo de prova	Tempo de cura	Tempo de Exposição						
		0 dias	14 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14 dias água com cal	28 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	28 dias água com cal	42 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42 dias água com cal
A ref	14	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP
A M8	14	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP
A M15	14	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP	3 CP
A ref	28	-	3 CP	-	3 CP	-	3 CP	3 CP
A M8	28	-	3 CP	-	3 CP	-	3 CP	3 CP
A M15	28	-	3 CP	-	3 CP	-	3 CP	3 CP

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os Corpos de prova foram submetidos aos mesmos procedimentos descritos no ensaio de variação dimensional linear, possuindo duas idades de cura e imersão em duas soluções distintas, realizando os ensaios aos 0, 14, 28 e 42 dias de exposição. Os procedimentos seguiram as determinações da norma NBR 13279 (2005) para ensaios de compressão e tração na flexão para corpos de prova de argamassa. A Figura 13 apresenta o ensaio de resistência à tração na flexão realizado nos corpos de prova do grupo 2.

Figura 13 – Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Os valores de resistência à tração na flexão foram calculados utilizando a equação 10.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (10)$$

Onde:

$R_f$  é a resistência à tração na flexão, em MPa;

$F_f$  é a carga aplicada verticalmente, em N;

$L$  é a distância entre os apoios, em mm.

Os valores de resistência à compressão axial foram calculados utilizando a equação 11.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (11)$$

Onde:

$R_c$  é a resistência à compressão axial, em MPa;

$F_c$  é a carga aplicada, em N;

1600 é a área da seção considerada quadrada para os corpos de prova de 40mm x 40mm, em mm<sup>2</sup>.

Para análise dos dados foi calculada a média dos corpos de prova e posteriormente, o desvio relativo máximo, caso o resultado fosse superior a 6%, o valor era descartado e calculada uma nova média com os valores restantes, conforme especifica a norma NBR 7215 (2019).

### 3.4.3 Absorção de água

Para realização deste ensaio utilizou-se os corpos de prova do grupo 2, sendo 1 corpo de prova para cada teor de adição, cada tempo de cura e tempo de exposição, totalizando 33 corpos de prova para ensaio de absorção de água por capilaridade, conforme a Tabela 13.

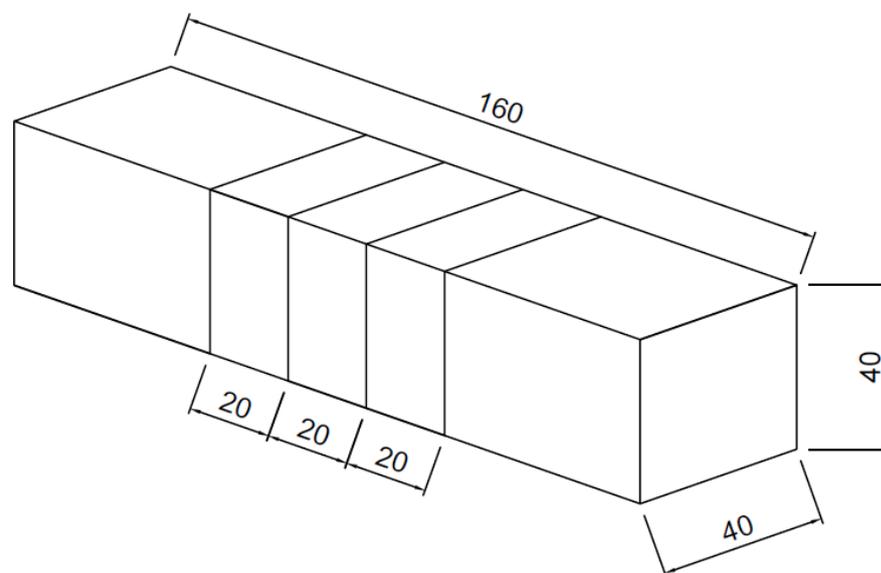
Tabela 13 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de absorção de água.

Corpo de prova	Tempo de cura	Tempo de Exposição						
		0 dias	14 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14 dias água com cal	28 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	28 dias água com cal	42 dias Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42 dias água com cal
A ref	14	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP
A M8	14	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP
A M15	14	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP	1 CP
A ref	28	-	1 CP	-	1 CP	-	1 CP	1 CP
A M8	28	-	1 CP	-	1 CP	-	1 CP	1 CP
A M15	28	-	1 CP	-	1 CP	-	1 CP	1 CP

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Cada corpo de prova foi serrado para obtenção de três amostras de 2 cm de espessura, resultando em 99 amostras que foram submetidas aos métodos determinados por RILEM TC 116 PCD (1999) para absorção de água por capilaridade (Figura 14).

Figura 14 – Dimensões do corpo de prova submetido ao Método de Rilem adaptado.

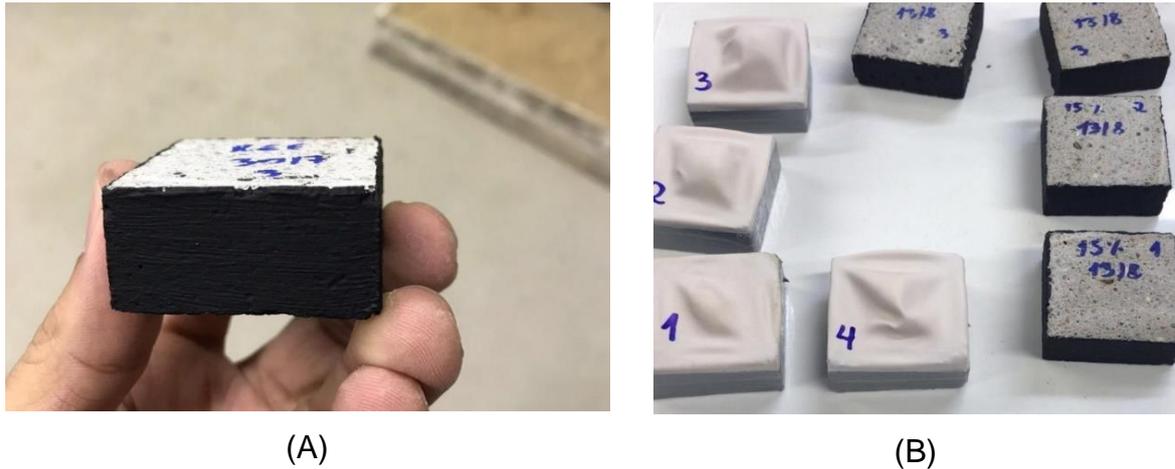


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As 3 amostras obtidas passaram por um processo de secagem na estufa com temperatura de 40 °C para retirada da umidade, evitando influência na análise dos resultados. A Figura 15 apresenta o procedimento de preparo dos corpos de prova,

aplicando tinta impermeabilizante nas faces laterais, cobertura com balão na parte superior da amostra para evitar interferência da umidade do ambiente no ensaio e posteriormente uma camada de fita adesiva nas laterais para garantir a impermeabilização desta área.

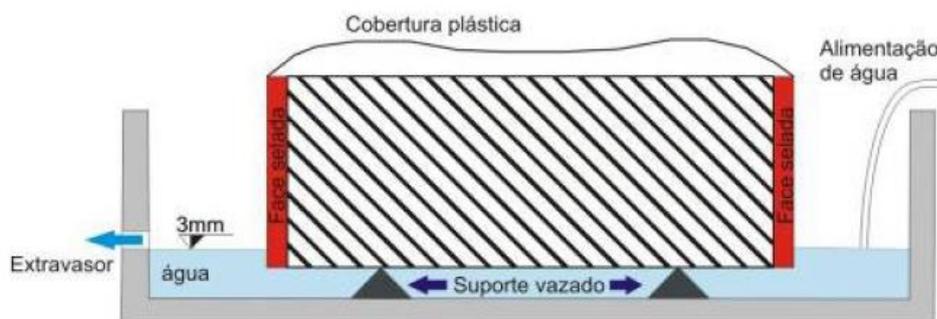
Figura 15 – Preparo dos corpos de prova para método de Rilem. (A) Aplicação de tinta impermeabilizante. (B) Colocação de fita nas laterais e cobertura superior.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Os ensaios foram realizados em um recipiente com água corrente, permanecendo apoiadas em um estrado para evitar o contato com o fundo. A Figura 16 representa a execução dos procedimentos, em que a face inferior das amostras estava em contato com uma lâmina d'água de 3mm e as leituras de peso das amostras foram realizadas 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas de ensaio.

Figura 16 – Procedimento para ensaio de absorção de água através do método de Rilem adaptado.



Fonte: Werle (2010).

Através da Equação 12 foi possível calcular a taxa de absorção de água por capilaridade da amostra da matriz cimentícia.

$$S = \frac{\text{Reta 1}}{a} \quad (12)$$

Onde:

S = Taxa de absorção capilar (g/cm<sup>2</sup>/h<sup>1/2</sup>);

Reta1 = inclinação da reta referente à fase de absorção;

a = área efetiva do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em diversos ensaios de laboratório, a fim de responder os objetivos propostos na pesquisa.

### 4.1 Caracterização do metacaulim

#### 4.1.1 Determinação do índice de atividade pozolânica do metacaulim

Após a execução dos procedimentos descritos no item 3.2.4 desta pesquisa, foram encontrados os seguintes valores:

Consumo de HCl, indicador laranja de metil:  $V_s = 26\text{mL}$ ;

Fator de correção da concentração de ácido clorídrico:

$$F_c = \frac{25}{V_s} = \frac{25}{26} = 0,962 \quad (13)$$

Consumo de HCl, amostra de metacaulim:  $V_2 = 37\text{mL}$ ;

Consumo de HCl, amostra referência:  $V_3 = 57\text{mL}$ ;

Aplicando os valores encontrados no ensaio, obtemos o resultado apresentado na equação 19.

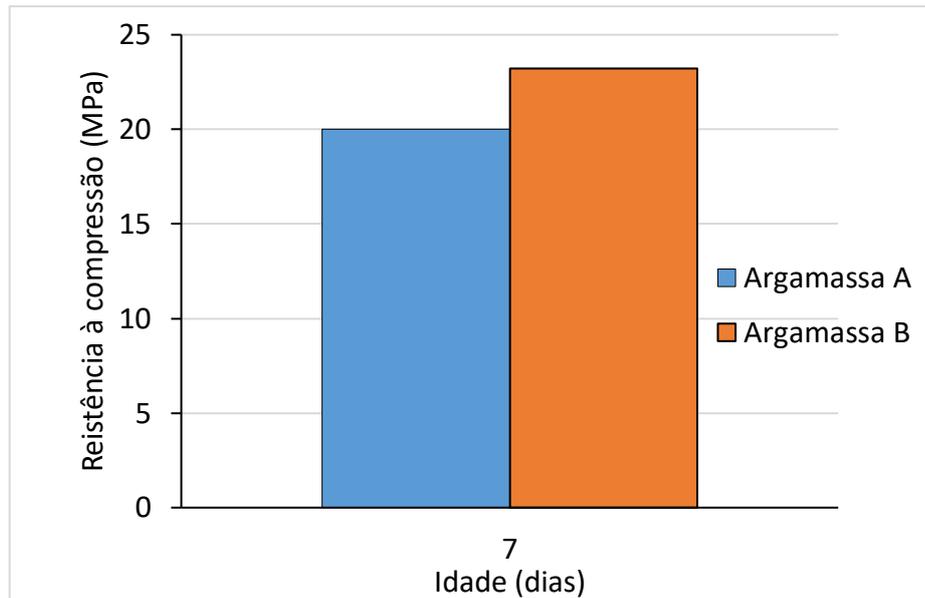
$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{28 \times (57-37) \times 0,962}{1} \times 1,32 = 711,11 \frac{\text{mg Ca(OH)}_2}{\text{g poz.}} \quad (14)$$

A norma NBR 15894-2 especifica um valor mínimo de  $750 \text{mgCa(OH)}_2 / \text{g poz.}$  Desta forma, o resultado obtido não está de acordo com o determinado pela norma, mas devido ao procedimento de titulação dos reagentes ser realizado manualmente, muitos fatores podem causar uma variação no resultado, apresentando um valor com baixa precisão.

#### 4.1.2 Determinação do índice de desempenho do metacaulim

Seguindo as recomendações da norma NBR 15894-2 (2010) foram moldados 6 corpos de prova da argamassa A sem adição e 6 corpos de prova da argamassa B, com 15 % de substituição de cimento Portland por metacaulim. A Figura 17 apresenta os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão após cura de 7 dias.

Figura 17 – Índice de desempenho do metacaulim.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A utilização de 15% de metacaulim resultou em um ganho de resistência à compressão, resultando em 116%, valor superior aos 105% estipulado pela norma NBR 15894-2 (2010). Esse valor está de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante que informa uma resistência de 118% aos 7 dias de cura.

## 4.2 Variação dimensional linear

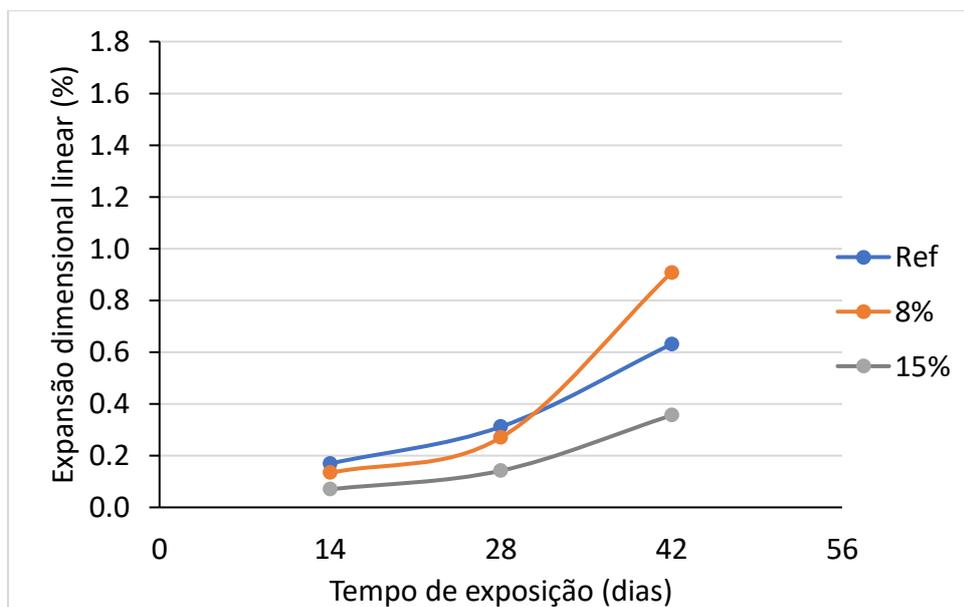
Os resultados obtidos conforme NBR 13583 (2014) são apresentados na sequência.

### 4.2.1 Variação dimensional linear com 14 dias de cura inicial

A norma NBR 13583 (2014), determina uma cura inicial seca, em ambiente controlado de aproximadamente 23 °C e 12 dias de cura úmida, com imersão em água saturada com cal.

A Figura 18 apresenta a variação dimensional linear, dividindo o valor da respectiva idade pelo valor obtido antes da imersão na solução de sulfato de sódio.

Figura 18 – Variação dimensional linear com 14 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Através deste ensaio nenhum traço apresentou valores positivos, em todas as idades de imersão na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  os corpos de prova apresentaram variações muito superiores a 0,03%.

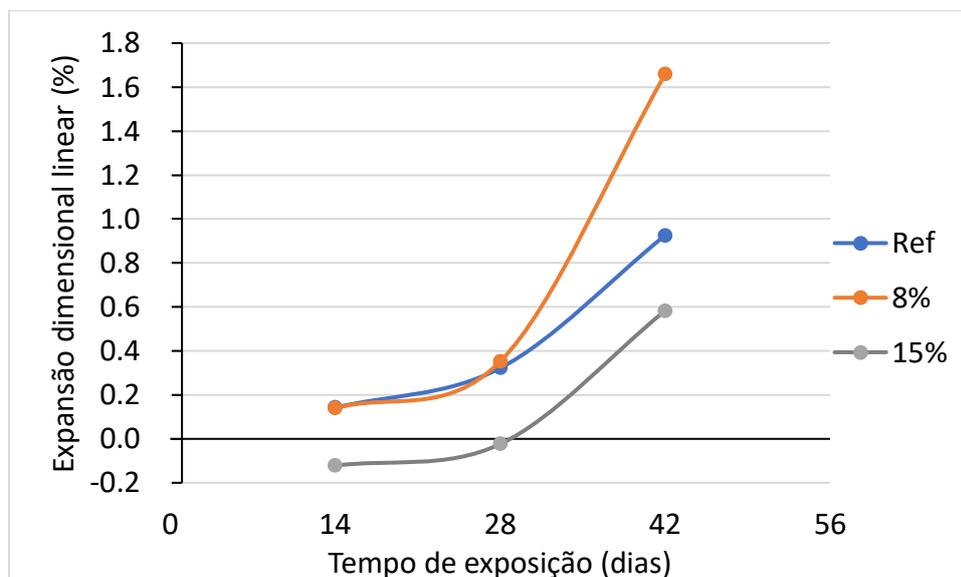
Nas duas primeiras semanas de imersão, os corpos de prova com substituição parcial de cimento Portland por metacaulim apresentaram valores melhores que o traço de referência, mas este efeito não foi suficiente para atingir o valor considerado resistente ao sulfato de sódio.

#### 4.2.2 Variação dimensional linear com 28 dias de cura inicial

A pesquisa apresentou uma nova hipótese de cura, para ser possível comparar a influência do tempo de cura inicial nos resultados do ensaio. Desta forma, os corpos de prova sofreram uma cura seca em ambiente controlado de 23 °C por dois dias e 26 dias de cura úmida, imerso em água saturada com cal.

A Figura 19 apresenta os valores de variação dimensional linear, dividindo o valor da respectiva idade pelo valor obtido antes da imersão na solução de sulfato de sódio.

Figura 19 - Variação dimensional linear com 28 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com uma cura inicial de 28 dias, os resultados também não foram aprovados, pois a expansão linear dos 3 traços na última idade foi muito superior a 0,03%.

Neste ensaio, novamente foi possível observar que o traço com 15% de metacaulim apresentou melhores resultados que os demais. Na segunda semana de exposição, observou-se uma retração, na quarta semana uma pequena expansão, inferior a 0,03%, mas na sexta semana a variação apresentou um valor muito superior ao permitido. Desta forma, os valores obtidos neste ensaio mostram que o metacaulim não foi capaz de mitigar os efeitos do sulfato de sódio.

#### 4.2.3 Influência do tempo de cura na variação dimensional linear

A cura inicial de 28 dias não apresentou grande diferença no resultado final deste ensaio, nos dois períodos de cura inicial os valores obtidos não foram aprovados como resistentes a sulfatos de sódio. Vale ressaltar que a expansão nos corpos de prova com cura inicial prolongada, apresentaram uma expansão linear superior aos com cura inicial de 14 dias.

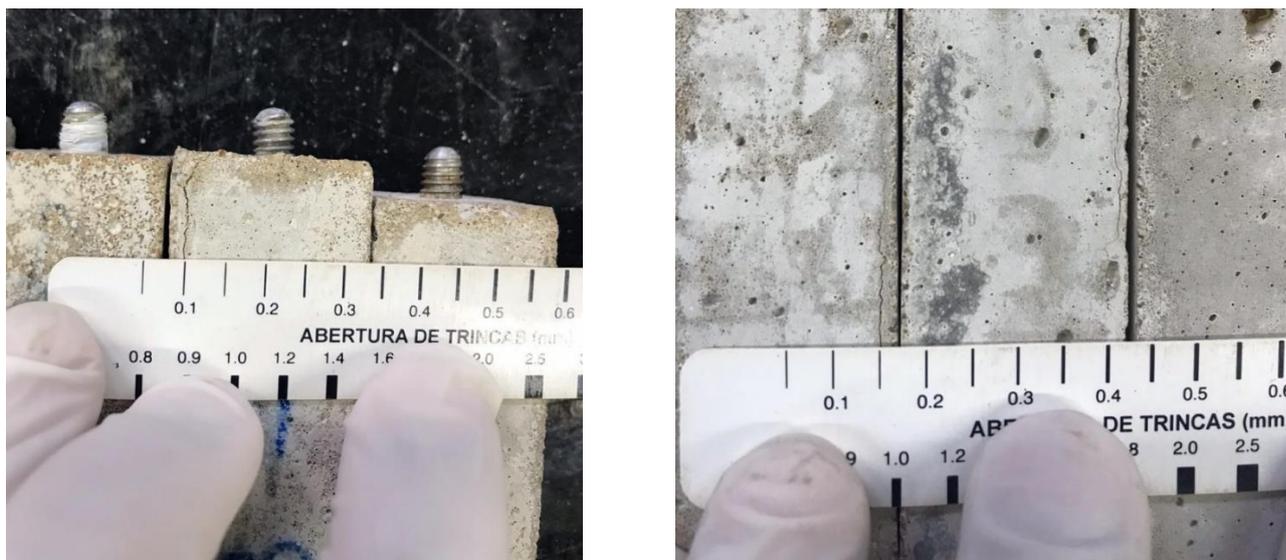
Pesquisas realizadas na área por Kulisch (2011) e Souza (2016) apresentaram valores não satisfatórios utilizando metacaulim e o ensaio prescrito na NBR 13583 (2014).

Os 3 traços utilizados no ensaio, 0%, 8% e 15% de substituição de cimento Portland por metacaulim apresentaram fissuras após 6 semanas de exposição. Vale

ressaltar que o pH da solução foi controlado em 8, desta forma, favorece o surgimento de produtos expansivos, ocasionando a degradação do material de forma mais agressiva, como foi estudado por Brown (1981) e discutido no capítulo 2.

A Figura 20 apresenta as fissuras observadas nos corpos de prova do grupo 1, após 6 semanas de imersão na solução de sulfato de sódio.

Figura 20 – Fissuras nos corpos de prova do grupo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

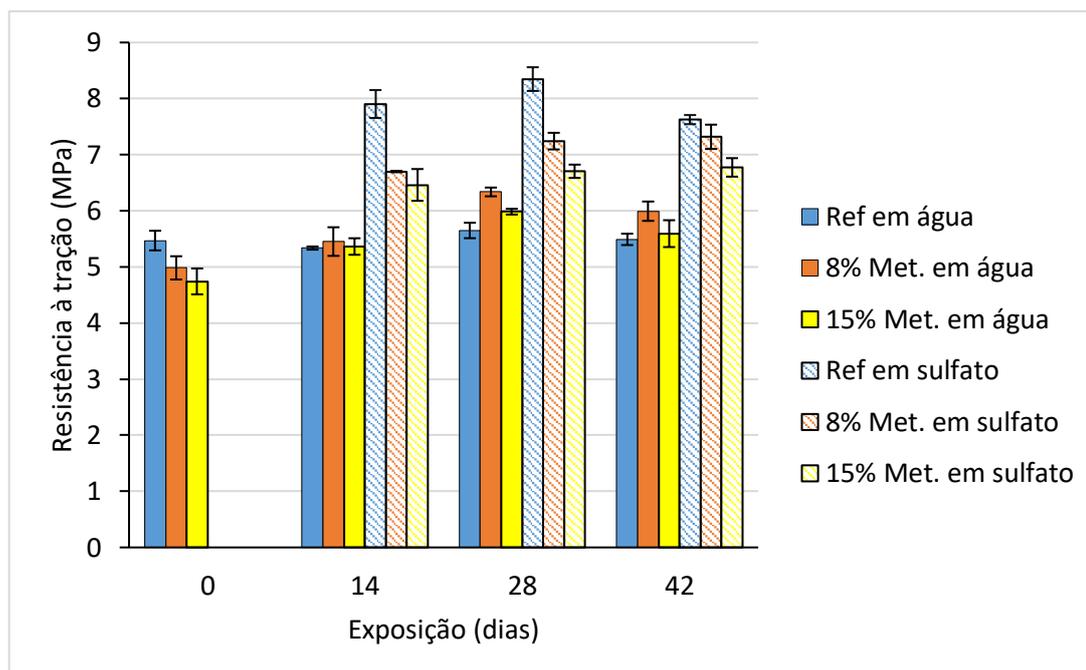
### 4.3 Resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica dos corpos de prova foram realizados em 4 idades de cura distintas, para os 3 teores de adição e duas soluções de exposição.

#### 4.3.1 Resistência à tração na flexão com 14 dias de cura inicial

Após o processo de 2 dias de cura seca, em ambiente controlado de 23 °C e 12 dias de cura úmida utilizando água saturada com cal, os corpos de prova foram ensaiados para a verificação da resistência à tração na flexão. Este ensaio foi realizado com idades de 14 dias, 28 dias, 42 dias e 56 dias de cura, comparando os valores obtidos entre os corpos de prova imersos em água com cal, com os imersos em solução de sulfato de sódio, como pode ser verificado na Figura 21.

Figura 21 – Resistência à tração na flexão com 14 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Analisando os valores obtidos é possível observar que os corpos de prova com metacaulim apresentaram uma resistência inferior aos corpos de prova de referência após a cura inicial de 14 dias. Esse efeito é justificado pela reação pozolânica ser lenta, como foi discutido no capítulo 2 desta pesquisa, portanto, a maior taxa de substituição de cimento Portland por metacaulim, apresentou o menor valor de resistência à tração na flexão.

Após a cura inicial, os corpos de prova foram expostos em duas soluções distintas. Pode-se observar que a solução de sulfato de sódio gerou um ganho de resistência inicial em todos os traços. Os corpos de prova com substituição 8% e 15% por metacaulim, apresentaram um ganho de aproximadamente 22% e 20%, respectivamente. O traço de referência apresentou um ganho superior, cerca de 48% maior que os imersos em água saturada com cal.

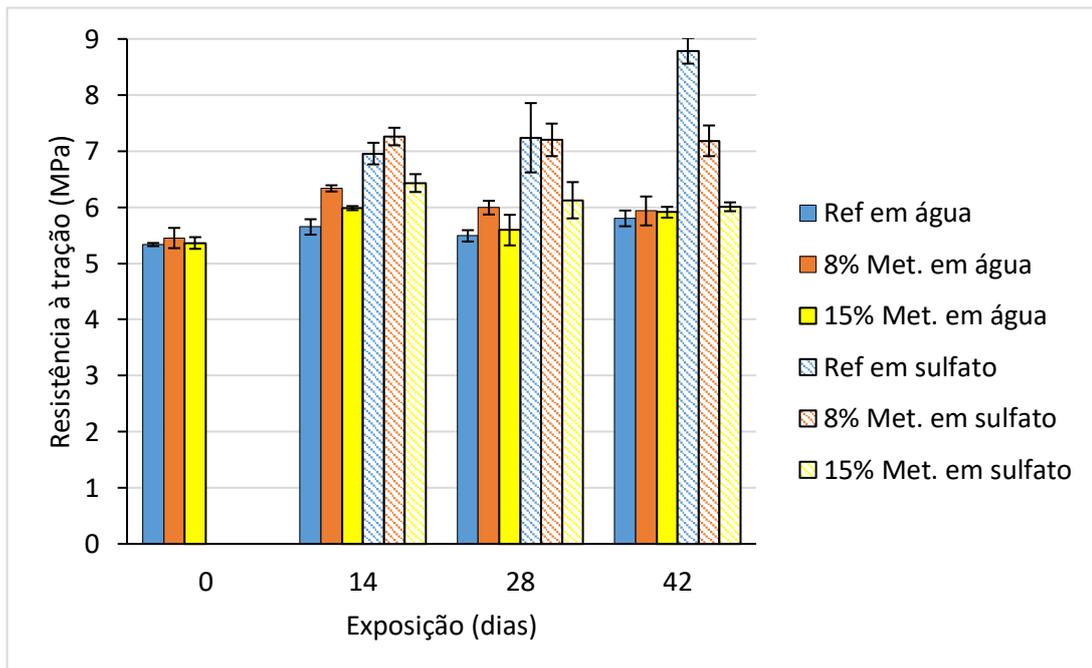
Esse resultado é explicado pelo preenchimento dos poros do material devido a imersão em solução de sulfato de sódio, que favorece a formação de etringita (SKALNY, MARCHAND E ODLER, 2002). Desta forma, os corpos de prova com substituição de cimento Portland por metacaulim apresentaram um ganho de resistência inferior, pois o metacaulim preenche os poros dos corpos de prova, melhorando sua permeabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2014, p. 249).

Na última idade de exposição ao sulfato de sódio os corpos de prova com metacaulim apresentaram valores similares a idade anterior, porém o traço de referência apresentou uma perda de resistência à tração de aproximadamente 9% em relação a idade anterior.

#### 4.3.2 Resistência à tração na flexão com 28 dias de cura inicial

Como a reação pozolânica apresenta melhores resultados com idades mais avançadas, foi proposto um tempo de cura inicial de 28 dias para que fosse possível verificar a capacidade do metacaulim em mitigar os efeitos do ataque de íons sulfato em idades mais avançadas. A Figura 22 apresenta os valores obtidos após 2 dias de cura seca em ambiente controlado de 23 °C e 26 dias de cura úmida utilizando água saturada com cal.

Figura 22 – Resistência à tração na flexão com 28 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com os 28 dias de cura inicial, verificou-se que traço de referência e os traços com metacaulim apresentaram valores similares de resistência à tração na flexão.

Em contato com a solução de sulfato de sódio, inicialmente os corpos de prova com 8% de metacaulim apresentaram um ganho de 14%, mas nas idades seguintes, não ocorreram quedas de resistência, o que caracteriza o início da fissuração.

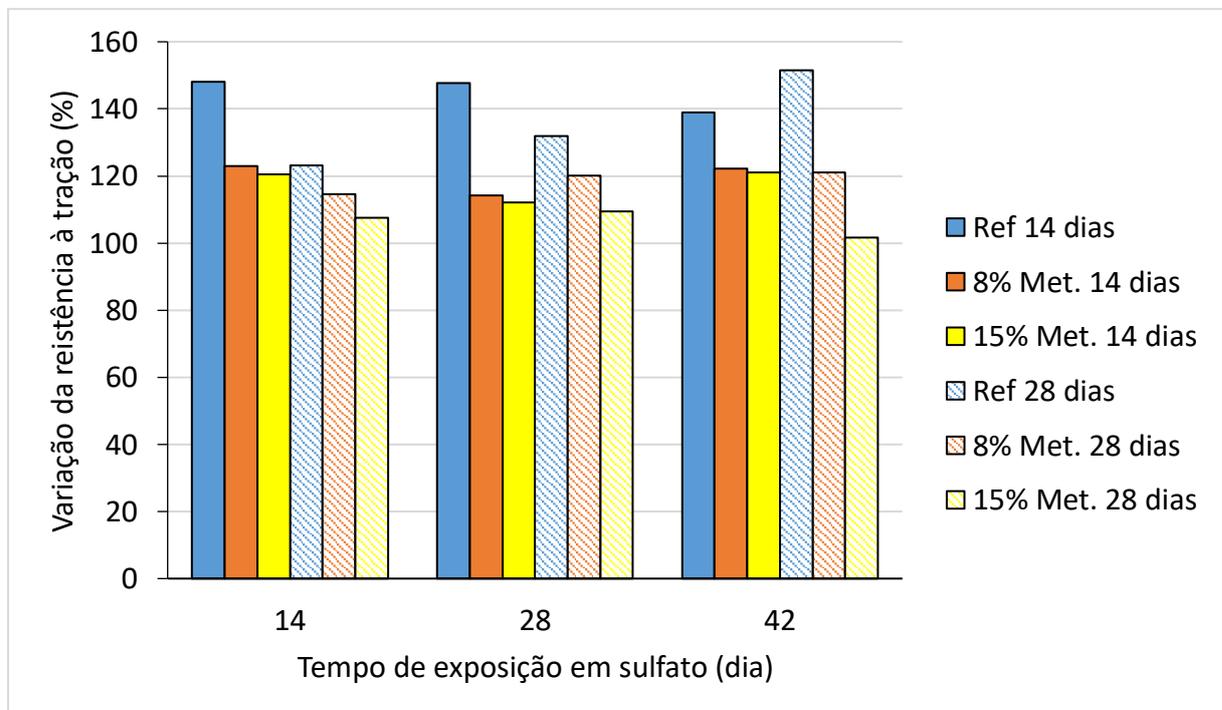
Analisando o traço com 15% de metacaulim é possível observar que não ocorreram grandes variações, os corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio mantiveram a resistência similar aos corpos de prova imersos em água com cal. Esse efeito se deve a quantidade de poros do material ser inferior os outros dois traços, pois a quantidade de metacaulim é superior.

Com a cura inicial superior, não foi possível observar uma queda de resistência no traço de referência em contato com a solução de sulfato de sódio. Ao longo das 6 semanas de exposição, os corpos de prova apenas adquiriram resistência, apresentando um valor 51% superior aos corpos de prova imersos em água com cal aos 70 dias.

#### 4.3.3 Influência do tempo de cura inicial na resistência à tração na flexão

A Figura 23 apresenta a variação na resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos na solução de sulfato de sódio, em relação ao mesmo traço curado em água saturada com cal, na respectiva idade.

Figura 23 – Variação na resistência à tração na flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

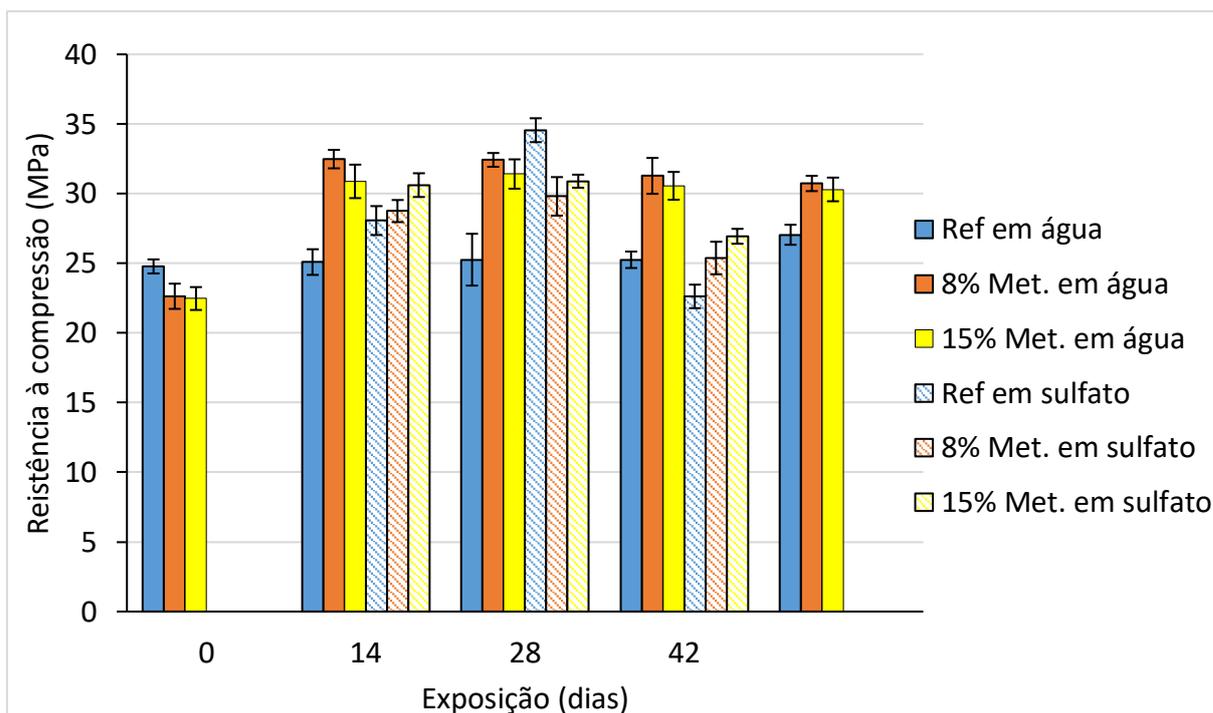
O tempo de cura inicial não influenciou o desempenho dos corpos de prova com 8% de metacaulim imersos na solução de sulfato de sódio, nos dois casos o ganho de resistência na última idade foi de aproximadamente 22% em relação aos corpos de prova imersos em  $\text{Ca(OH)}_2$ . Por outro lado, o traço com 15% de metacaulim apresentou resultados melhores após uma cura inicial de 28 dias, pois sua resistência se manteve similar nos corpos de prova imersos nas duas soluções ao longo dos 42 dias de imersão, como pode ser observado na Figura 23, a variação se manteve sempre próxima aos 100%, algo que não ocorreu com uma cura inicial de 14 dias.

Analisando os resultados obtidos com o traço de referência, não foi possível verificar a queda de resistência como ocorreu com a cura inicial menor. Segundo Irassar (1990) os corpos de provas imersos em solução de sulfato adquirem resistência à tração devido ao preenchimento dos poros por etringita e posteriormente sofrem uma queda, caracterizando o início das fissurações. Desta forma, acredita-se que os corpos de prova de referência com 28 dias de cura inicial não apresentaram quedas de resistência nesse cenário devido ao curto período de ensaio, mas em um período maior de análise, este efeito teria ocorrido, pois não possuem nenhuma adição mineral capaz de mitigar os efeitos dos íons sulfato.

#### 4.3.4 Resistência à compressão axial com 14 dias de cura inicial

Após a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. A Figura 24 apresenta os resultados obtidos como os corpos de prova após 14 dias de cura inicial.

Figura 24 – Resistência à compressão axial com 14 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Analisando os resultados verificou-se a influência do metacaulim para as propriedades mecânicas da matriz cimentícia. Com 14 dias de cura, os traços com 8% e 15% metacaulim apresentaram uma resistência inferior de aproximadamente 9% em relação ao traço de referência, mas após 2 semanas apresentaram, respectivamente, uma resistência de 29% e 23% superior.

Com a imersão das amostras na solução de sulfato de sódio, assim como no ensaio de resistência à tração na flexão, foi possível observar o aumento de resistência dos corpos de prova de referência, valores em torno de 12% na primeira idade e 37% na segunda idade, superiores aos obtidos nos corpos de prova do mesmo traço imersos em água com cal. Na última idade, a imersão na solução de sulfato resultou numa queda de 11% nos corpos de prova de referência se comparado aos imersos em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 35% menor se comparado a ele mesmo na idade anterior. Essa perda de resistência durante o período de exposição ao sulfato de sódio pode ser decorrente do início da fissuração dos corpos de prova devido ao surgimento de produtos expansivos como a etringita e gesso (AKASHA; ABDULLAH, 2018).

As amostras com metacaulim não obtiveram ganho de resistência devido à imersão na solução de sulfato. Diferente do que ocorreu nos ensaios de resistência à tração na flexão, os valores de resistência à compressão axial não ultrapassaram os

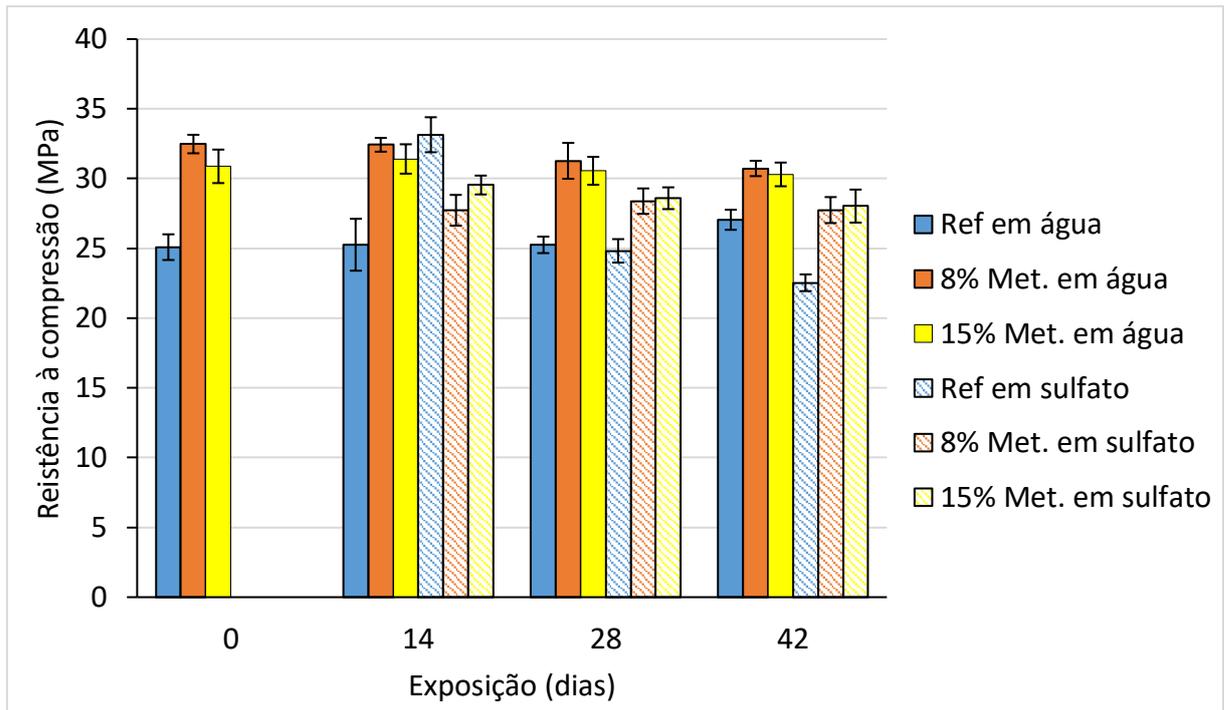
valores obtidos nos corpos de prova imersos em água com cal. Na última idade de exposição na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  observou-se uma queda de resistência nas amostras, com valores de 15% inferior para o traço com 8% de metacaulim e 13% inferior para o traço com 15% de metacaulim, comparados com a idade anterior. Apesar desta queda de resistência à compressão na última idade, os valores são inferiores aos 35% de perda de resistência observado nos corpos de prova de referência.

Esses resultados vão ao encontro dos obtidos por Souza (2016) que obteve uma perda de resistência de 13,867% em seu estudo, após uma exposição de 42 dias em sulfato de sódio, utilizando 10% de substituição de cimento Portland CP V ARI por metacaulim e uma cura inicial de 14 dias.

#### 4.3.5 Resistência à compressão axial com 28 dias de cura inicial

Conforme comentado anteriormente, realizou-se uma cura de 28 dias para verificar o comportamento das amostras com uma cura maior antes de serem expostas a solução de sulfato de sódio. A Figura 25 apresenta os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial após 2 dias de cura seca em ambiente controlado de 23 °C e 26 dias de cura úmida utilizando água saturada com cal.

Figura 25 - Resistência à compressão axial com 28 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

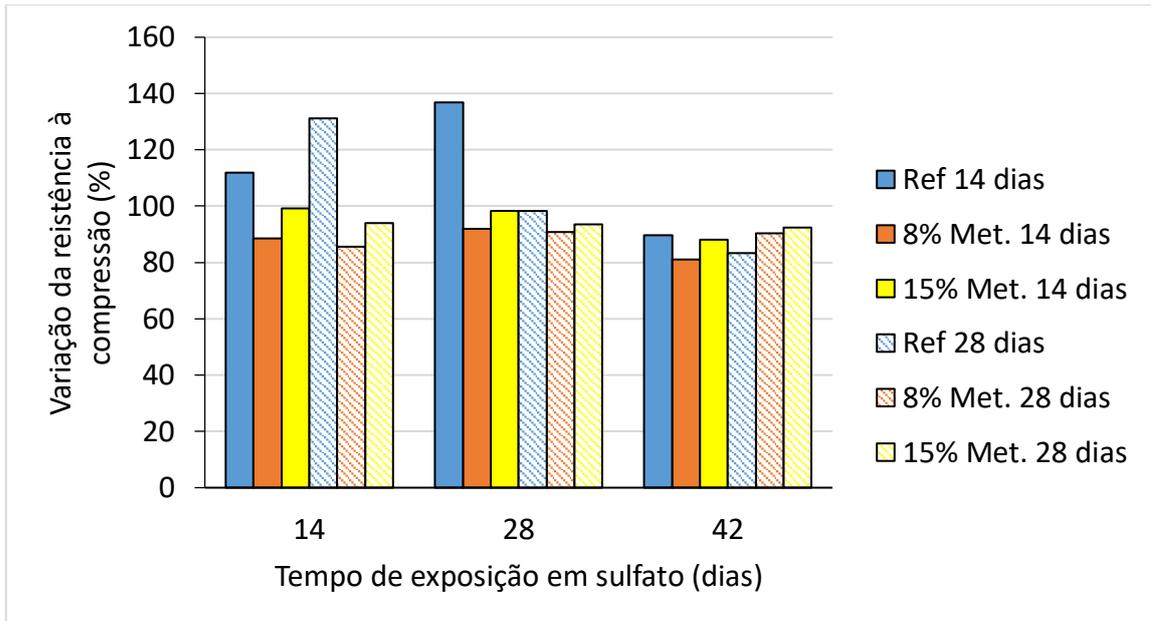
Neste ensaio foi observado novamente o ganho de resistência dos corpos de prova de referência imersos na solução de sulfato de sódio, mas a partir da segunda semana de exposição verificou-se uma queda de resistência à compressão, resultando em uma resistência 17% inferior aos corpos de prova imersos em  $\text{Ca(OH)}_2$ , na última semana de exposição. Segundo Skalny, Marchand e Odler (2002) esse efeito ocorre devido a formação de etringita que preenche os poros do material, gerando um ganho de resistência nas primeiras idades e posteriormente uma queda brusca, tornando a resistência inferior ao valor inicial.

Com a cura inicial de 28 dias, a resistência à compressão axial dos corpos de prova com metacaulim não sofreu grandes variações, apresentando valores similares durante todo o período de exposição aos sulfatos, cerca de 10% inferior para 8% de substituição e 7% para o traço de 15% de substituição, em comparação aos corpos de prova imersos em água saturada com cal.

#### 4.3.6 Influência do tempo de cura inicial na resistência à compressão axial

A Figura 26 apresenta a variação na resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos na solução de sulfato de sódio, em relação ao mesmo traço curado em água saturada com cal, na respectiva idade.

Figura 26 – Variação na resistência à compressão axial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Através deste ensaio foi possível constatar as duas fases que os corpos de prova apresentam em contato com uma solução de sulfato de sódio, como foi verificado por Ouyang et al (2014). Inicialmente, em contato com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , a resistência é elevada, devido ao preenchimento dos poros por produtos expansivos, a segunda fase consiste em uma queda brusca na resistência do material, decorrendo do início da degradação das amostras.

Analisando a variação de resistência à compressão de todos os corpos de prova, observou-se uma grande perda nas amostras de referência com uma cura inicial de 14 dias. Devido ao período de 6 semanas de exposição, não foi possível verificar uma resistência muito inferior à inicial na última semana, mas levando em consideração a grande diferença de resistência entre a quarta e sexta semana, é possível projetar para um tempo de exposição superior, os corpos de prova sofreriam degradações severas, tornando sua resistência muito inferior em relação a inicial.

As amostras ficaram imersas em solução com pH controlado em 8, desta forma, verificou-se uma queda de resistência nos corpos de prova a partir da segunda semana de exposição ao sulfato de sódio. Esses resultados foram distintos dos obtidos por Souza (2016) que observou perda de resistência a partir de oitava semana de exposição, pois em seus experimentos o pH da solução não foi controlado, sofrendo uma elevação rápida, devido à interação com os corpos de prova de argamassa. Dessa maneira, é possível confirmar a grande influência do pH em um ataque acelerado de sulfatos de sódio em laboratório, como foi estudado por Brown (1981), que constatou que corpos de prova imersos em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com pH controlado, apresentaram degradação anterior aos corpos de prova imersos na mesma solução sem o controle do pH.

Nos corpos de prova do grupo 2 não foram observadas fissuras após as 6 semanas de exposição ao sulfato de sódio, diferente dos corpos de prova do grupo 1 que as fissuras eram visíveis. As quedas de resistência verificadas nos ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial podem estar relacionadas as microfissurações que não foram verificadas a olho nu. Essas fissurações observadas apenas em algumas amostras podem estar vinculadas ao tipo de moldagem, pois os corpos de prova do grupo 1 foram moldados seguindo as recomendações da NBR 13583 (2014) e os corpos de prova do grupo 2 foram moldados seguindo as recomendações da NBR 13279 (2005), desta forma, os dois grupos possuem uma porosidade diferente, o que é significativo para os feitos da degradação causada pelos íons sulfato.

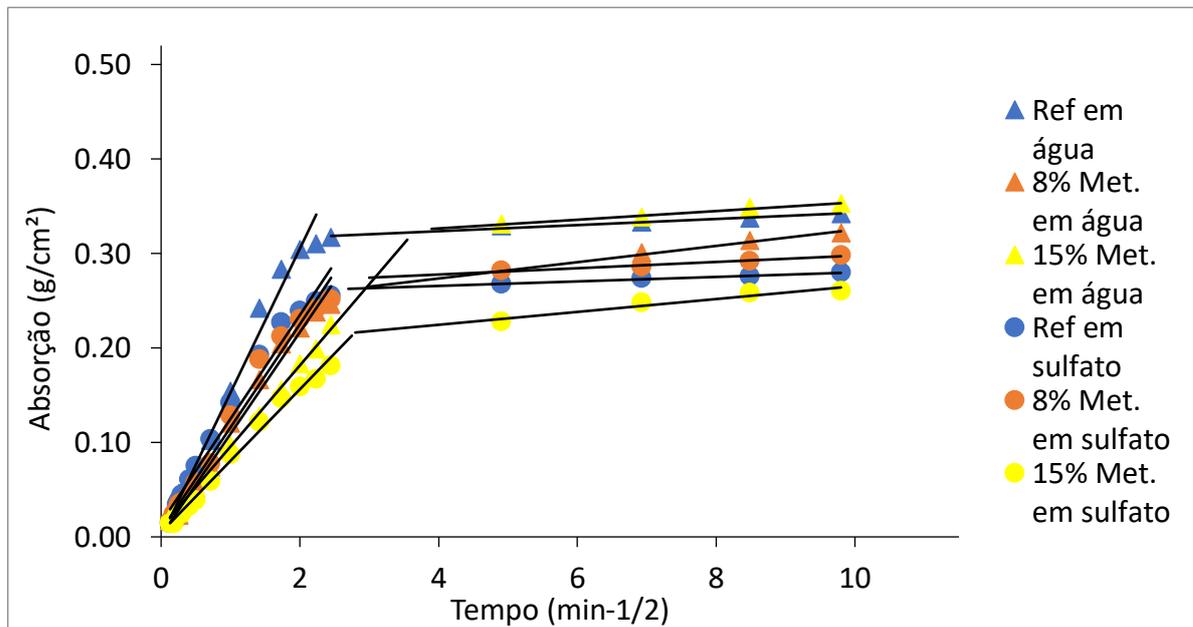
#### **4.4 Absorção de água por capilaridade**

Através do método de Rilem adaptado, foram utilizadas 99 amostras para a verificação da absorção de água por capilaridade, realizando ensaios aos 0, 14, 28 e 42 dias de exposição para verificar a influência dos íons sulfato na porosidade dos corpos de prova e relacionar este valor com a resistência à compressão na respectiva idade.

#### 4.4.1 Absorção de água por capilaridade com 14 dias de cura inicial

Após uma cura inicial de 14 dias, os corpos de prova foram imersos na solução de sulfato de sódio. A Figura 27 apresenta a taxa de absorção de água dos corpos de prova na última semana de exposição aos íons de sulfato de sódio.

Figura 27 – Taxa de absorção de água com 14 dias de cura inicial e 42 dias de exposição ao sulfato de sódio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

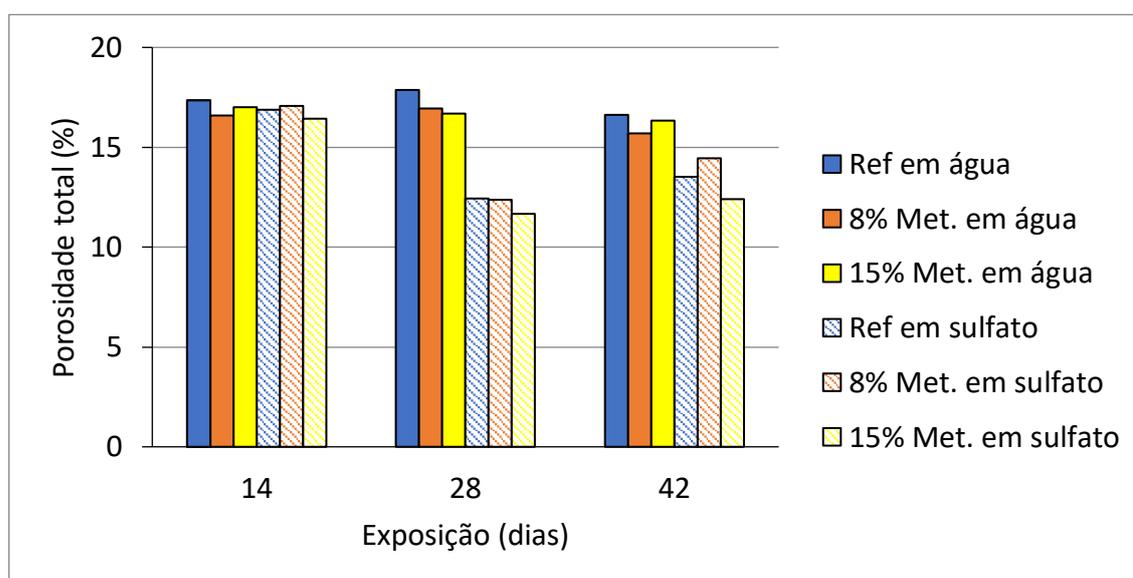
Analisando os valores obtidos é possível constatar que os corpos de prova com maior percentual de metacaulim apresentaram uma taxa de absorção menor, devido às características do material pozolânico de alterar a estrutura interna da pasta do cimento hidratada e zona de transição, reduzindo a porosidade capilar da matriz cimentícia (DAL MOLIN, 2011, p.262).

Os corpos de prova imersos na solução de sulfato de sódio apresentaram uma absorção menor que os corpos de prova imersos em água saturada com cal. Esse efeito se deve ao preenchimento dos poros do material por produtos expansivos, como a etringita. Vale ressaltar que as amostras com 15% de metacaulim imersas em água saturada com cal apresentaram uma taxa de absorção menor nas primeiras horas de ensaio, mas após 24 horas os resultados foram superiores ao traço de referência. Esse resultado não era esperado, após a adição mineral tem como característica refinar os poros do material, diminuindo a taxa de absorção, portanto, podemos

relacionar esse resultado com alguma falha nas leituras desta amostra ou na moldagem do corpo de prova.

A Figura 28 apresenta a porosidade total dos corpos de prova ao longo das 6 semanas de ensaio, comparando os resultados entre as amostras imersas em solução de sulfato de sódio e água saturada com cal.

Figura 28 – Porosidade total dos corpos de prova ao longo do tempo - 14 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os corpos de prova imersos em  $\text{Ca(OH)}_2$  apresentaram valores esperados, pois as amostras com substituição de cimento Portland por metacaulim apresentaram os menores resultados e a porosidade não sofreu grandes variações, assim como a resistência a compressão ao longo das 6 semanas de ensaio.

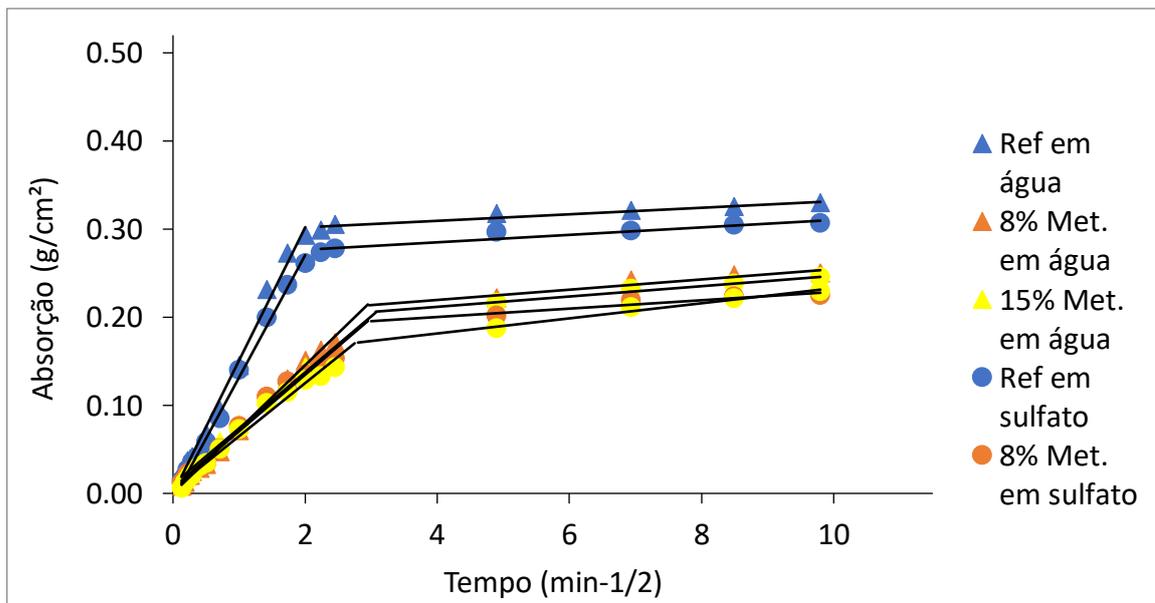
Por outro lado, os corpos de prova imersos em sulfato de sódio apresentaram valores similares aos imersos em  $\text{Ca(OH)}_2$  nas primeiras duas semanas, mas na quarta semana apresentaram um valor de porosidade total muito inferior, esse efeito se deve ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia e pode ser relacionado com o ganho de resistência observado no ensaio de compressão axial. Na sexta semana de imersão em sulfato de sódio, observou-se um aumento na porosidade total, desta forma é possível supor que houve as primeiras microfissuras nos corpos de prova, levando a uma queda de resistência, como observado no ensaio de compressão axial. Esses resultados vão ao encontro da pesquisa de Ouyang et al (2014) que verificou um ganho de resistência inicial devido ao preenchimento dos

poros da matriz cimentícia, posteriormente, uma queda brusca, devido à fissuração das amostras.

#### 4.4.2 Absorção de água por capilaridade com 28 dias de cura inicial

Realizando uma cura inicial de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos aos mesmos procedimentos mencionados anteriormente. A Figura 29 apresenta a taxa de absorção de água dos corpos de prova após uma cura inicial de 28 dias e 42 dias de imersão na solução de sulfato de sódio.

Figura 29 - Taxa de absorção de água com 28 dias de cura inicial e 42 dias de exposição ao sulfato de sódio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

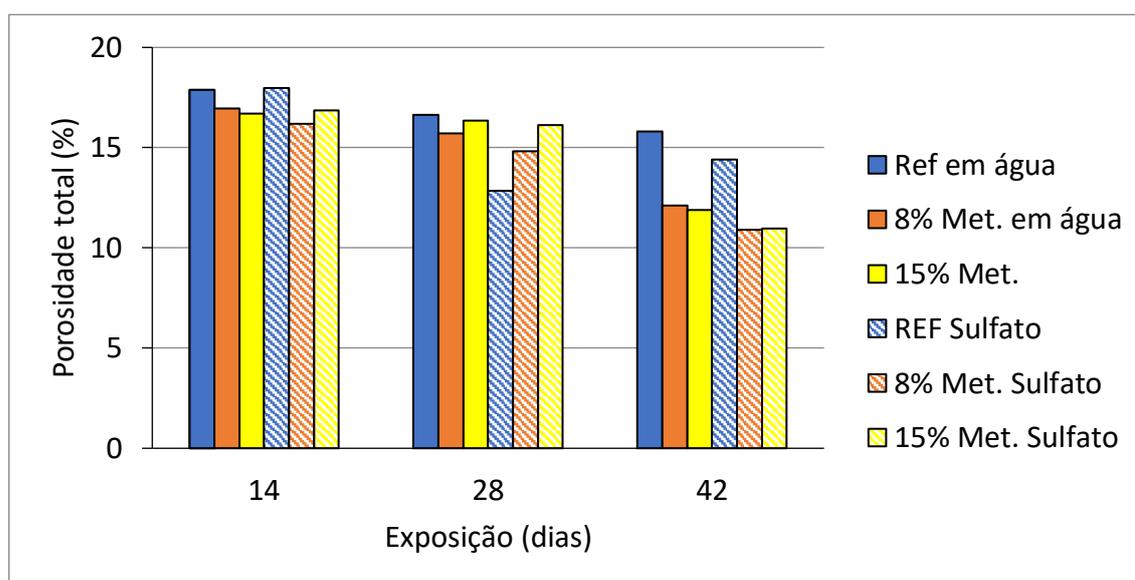
Através da Figura 29 podemos observar novamente a eficiência do metacaulim em refinar os poros da matriz cimentícia e diminuir a sua absorção. A maior taxa de substituição de cimento Portland por metacaulim apresentou os menores valores de absorção, como era esperado. Os corpos de prova imersos em sulfato de sódio apresentaram menor taxa de absorção de água devido ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia com produtos expansivos.

Neste ensaio é possível observar que as amostras com 15% de metacaulim imersos em água saturada com cal apresentaram valores coerentes, sendo possível

verificar a existência de um erro de laboratório no mesmo ensaio realizado com a cura inicial de 14 dias.

A Figura 30 apresenta a porosidade total dos corpos de prova ao longo das 6 semanas de ensaio, comparando os resultados entre as amostras imersas em solução de sulfato de sódio e água saturada com cal.

Figura 30 - Porosidade total dos corpos de prova ao longo das 6 semanas de exposição, com 28 dias de cura inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Utilizando uma cura inicial de 28 dias foi possível observar que os corpos de prova com metacaulim imersos em sulfato de sódio apresentaram sempre valores similares aos imersos em água saturada com cal. Desta forma, foi possível verificar apenas o preenchimento dos poros e início da microfissuração nos corpos de prova de referência.

Nos ensaios de resistência à compressão axial, os corpos de prova com adição de metacaulim apresentaram valores similares ao longo das 6 semanas de exposição nas duas soluções, desta forma, os valores obtidos de porosidade também não sofreram alterações. Em contrapartida, na quarta semana de exposição ao sulfato de sódio, a resistência à compressão axial nos corpos de prova de referência sofreu uma queda e na sexta semana novamente este efeito foi observado. Desta forma, podemos verificar o início da microfissuração nos corpos de prova de referência, devido a alteração de resistência e aumento da porosidade.

#### 4.4.3 Influência do tempo de cura inicial na absorção de água por capilaridade

A proposta de cura inicial de 28 dias se mostrou eficiente para análise da absorção de água por capilaridade. Os corpos de prova com 8% e 15% de substituição de cimento Portland por metacaulim apresentaram valores superiores aos corpos de prova do mesmo traço com 14 dias de cura inicial.

Vale ressaltar que não é possível afirmar que uma cura inicial de 28 dias seja capaz de melhorar o desempenho da adição mineral ao ponto de mitigar completamente os efeitos dos íons sulfato, pois o período de estudo foi de 6 semanas de exposição. Apesar dos resultados de porosidade total não terem sofrido alterações após uma cura inicial maior, seria necessário um tempo de estudo maior, para verificar o comportamento dos corpos de prova.

Desta forma, vale destacar que o período de ensaio da norma é curto para ser capaz de concluir se a matriz cimentícia é resistente ou não aos íons sulfato, pois a norma ASTM C1012/C1012M-15 (2015) estabelece um período de 12 meses para o mesmo ensaio, com uma concentração de sulfatos de sódio por litro inferior. Apesar de a norma americana possuir uma grande desvantagem devido ao longo período de ensaio, ela oferece um resultado mais seguro, pois realizando um ensaio de longo período podemos descartar muitas variáveis de laboratório, como erros de medições ou falhas no equipamento, além da certeza que as adições minerais tiveram o tempo adequado para interagir com os componentes da pasta hidratada através da reação pozolânica que é lenta.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais da pesquisa e sugestão para trabalhos futuros.

### 5.1 Considerações finais

O ensaio de variação dimensional linear determinado pela norma brasileira não apresentou valores positivos para nenhum dos traços estudados, devido a expansão superior 0,03%, assim como outros pesquisadores que utilizaram a mesma norma para verificar a resistência aos íons de sulfato de sódio.

Os resultados obtidos apresentaram a grande influência do pH da solução, pois controlando esse fator em torno de 8, favorece o surgimento de produtos expansivos, tornando o ataque de sulfato de sódio mais agressivo, conseqüentemente degradando os corpos de prova mais rápido. A realização do ensaio sem o controle do pH pode gerar um resultado não condizente com o que ocorre em uma situação real, pois em laboratório os corpos de prova tendem a estabilizar o pH da solução em torno de 13, tornando o ataque de sulfato de sódio mais leve. Desta forma, baseando-se apenas na norma NBR 13583 (2014) não é possível afirmar que a matriz cimentícia é resistente aos íons sulfato.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão axial foram de grande importância para verificar o preenchimento dos poros dos corpos de prova e o início da fissuração dos mesmos, relacionando a queda de resistência à compressão com o aumento da porosidade total, obtida pelo método de Rilem adaptado. Assim foi possível analisar a influência do metacaulim na matriz cimentícia e sua eficiência em mitigar os efeitos dos íons sulfato.

A proposta da pesquisa de realizar uma cura inicial de 28 dias para comparar sua influência com a cura inicial de 14 dias determinada pela norma se mostrou eficaz. Os corpos de prova com 8% e 15% de substituição de cimento Portland por metacaulim apresentaram valores melhores de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade utilizando uma cura inicial superior. Esse efeito não foi observado no ensaio de variação dimensional linear, onde todas as amostras foram reprovadas e os corpos de prova com cura inicial de 28 dias apresentaram os piores resultados.

A partir dos dados obtidos nesta pesquisa, o traço com 15% de metacaulim e cura inicial de 28 dias apresentou os melhores resultados tanto para resistência à compressão axial, como para resistência à tração na flexão. Verificando a variação de resistência entre os corpos de prova imersos em água saturada com cal e imersos em sulfato de sódio, esse traço apresentou valores próximos ao 100% nos dois ensaios, não havendo grande aumento ou perda de resistência, o que significa que não houve microfissurações nos corpos de prova. Desta forma, pode-se afirmar que o traço com 15% de metacaulim e 28 dias de cura inicial apresentou a maior resistência aos íons sulfato, pois não apresentou as degradações características causadas por sulfato de sódio ao longo do período de 6 semanas de exposição.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Ao longo desta pesquisa surgiram questões que podem ser abordadas em pesquisas futuras:

- Utilização de outros teores de substituição de cimento Portland por metacaulim;
- Realizar a imersão em solução de sulfato de sódio com diferentes níveis de pH;
- Influência da temperatura da estufa na degradação dos corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio.
- Moldagem dos corpos de prova para ensaio de resistência mecânica com a mesma metodologia dos corpos de prova de expansão dimensional linear, assim todos teriam a mesma porosidade.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT: 12 p. 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT: 23 p. 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 – Materiais pozolânico – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT: 10 p. 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro: ABNT: 10 p. 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-1 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT: 8 p. 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-2 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 2: determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias**. Rio de Janeiro: ABNT: 3 p. 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT: 238 p. 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49 – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro: ABNT: 3 p. 2001.

\_\_\_\_\_. **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: ABNT: 14 p. 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT: 6 p. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT: 19 p. 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT: 4 p. 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT: 12 p. 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT: 9 p. 2005.

AKASHA, A.M; ABDULLAH, J.M. Sulfate Resistance of Cement Mortar Containing Metakaolin. In: MARTIRENA, F; FAVIER, A; SCRIVENER, K. (eds). **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, 2018, vol 16. Springer, Dordrecht.

ASTM C1012/C1012M-15. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. **Annual Book of ASTM Standard**, v. 11, p. 5-9, 2015.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. **Cerâmica**, v. 58, n. 345, p. 36-42, 2012.

BATTAGIN, A. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. P.185-232.

BRASIL, M. D. M. E. E. **Plano Nacional de Mineração 2030 – Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Brasília: 2011. 180 p.

BROWN, P. B. An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment. **Cement and Concrete Research**, n. 11, p. 719-727, 1981.

CASCUDO, O; CARASEK, H; HASPARYK, N. P. Microestrutura dos Materiais Cerâmicos. In ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. P. 325-354.

CASTRO, A. L. et al. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 65-76, 2017.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerai In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. P.261-310.

FIGUEIREDO, C. P. et al. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014.

GALLO, G. Aliado do cimento, metacaulim expande mercado no brasil. [Entrevista cedida a] Altair Santos. **ITAMBÉ: cimento para toda obra**. 5 set. 2012. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/aliado-do-cimento-metacaulim-expande-mercado-no-brasil/>. Acesso em: 15 de abr. 2019.

GOMES, C. F.; GODINHO, D. S. S. **Análise do efeito da adição de metacaulim em concretos submetidos a ambientes de alta agressividade**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2016.

HOLANDA, R. M. DE; SILVA, B. B. DA. Cerâmica Vermelha – Desperdício na Construção Versus Recurso Natural Não Renovável: Estudo de Caso nos Municípios de Paudalho/PE e Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 872-890, 2011.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozolânica de adições minerai para cimento Portland (Partell): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do saneamento 2018**. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/estudos/estudos-itb/itb/ranking-do->

saneamento-2018. Acesso em: 27 de abr. 2019.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos cerâmicos. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. P.565 – 588.

KULISCH, D. **Ataque por sulfatos em estruturas de concreto**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LACERDA, C. S. **Estudo da Influência da substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. 2005. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MEDEIROS JR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento**. Revista ALCONPAT, 2014. V. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.

MEDEIROS, M.H.F, ANDRADE, J.J.J, HELENE,P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. P.773 – 808.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

METACAULIM DO BRASIL. **Sustentabilidade**. [2019?]. Disponível em: <http://www.metacaulim.com.br/sustentabilidade-metacaulim-do-brasil.html>. Acesso em: 21 abr. 2019.

MOTA, J. M. F. et al. **Concretos Adicionados com Metacaulim como agente de mitigação da RAA**. In Congresso brasileiro do concreto, 53, 2011, Florianópolis. **Anais do 53º congresso brasileiro do concreto**. IBRACON. Nov. 2011.

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

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OUYANG, W.; CHEN, J.; JIANG, M. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials**, Vol. 53, p. 419 – 424, 2014.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. 2013. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

PINHO, S. A. C.; LORDSLEEM JR. A. C. O custo da perda de blocos/tijolos e argamassa da alvenaria de vedação: estudo de caso na construção civil. **XVI Congresso Brasileiro de Custos**, p.15, 2009.

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 303-318, 2013.

RIBEIRO, D.V.; CASCUDO, O. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: SALES, A. et. Al. RIBERIRO, D. V. [org]. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. E-book. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=hHJgDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP4&dq=Durabilidade+do+Concreto:+bases+cient%C3%ADficas+para+formula%C3%A7%C3%A3o+de+concretos+dur%C3%A1veis+de+acordo+com+o+ambiente&ots=T\\_OWCXmudR&sig=wy9d7eKMXxdmTCpOcrKgh8RN-zw#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=hHJgDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP4&dq=Durabilidade+do+Concreto:+bases+cient%C3%ADficas+para+formula%C3%A7%C3%A3o+de+concretos+dur%C3%A1veis+de+acordo+com+o+ambiente&ots=T_OWCXmudR&sig=wy9d7eKMXxdmTCpOcrKgh8RN-zw#v=onepage&q&f=true). Acesso em: 1 abr. 2019.

RILEM, C. **Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete: TC 166 PCD**. Materials and Structures / Materiaux ET constructions, vol. 32, p. 178-179, abr. 1999.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SCRIVENER, K. L. **Option for the future of cement**. The Indian Concrete Journal v.88, issue 7, p. 11 – 21, July 2014.

SEBRAE. Cerâmica Vermelha. **Boletim de Inteligência**, p. 1-5, 2015.

SHVARZMAN, A. et al. The effect of 76ihydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 405-416. 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Indicadores**. Rio de Janeiro, [2014?]. Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php>. Acesso em: 05 abr. 2019.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate Attack on Concrete**. 1. Ed. Londres: SPON PRESS, 2002.

SOUZA, D, J. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento portland**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOUZA, M. M.; CAMARA, T. A.; AKASAKI, J L. Estudo do Teor de Metacaulim em Concretos de Alto Desempenho. **Revista Científica ANAP Brasil**, [S.I.], v. 9, n. 17, dez. 2016.

SOUZA, R. B. de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. São Paulo, 2006. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 2016. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com Agregados Reciclados de concreto, com ênfase na Carbonatação**. 2010. 162 p. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2010.

## APÊNDICE A – AREIA NORMAL

Para produzir um padrão secundário de areia normal que foi utilizado na produção dos corpos de prova, seguiu-se as determinações da norma NBR 7214 (2015) que estabelece as propriedades físicas e químicas da areia normal brasileira, como pode ser observado na Tabela 14.

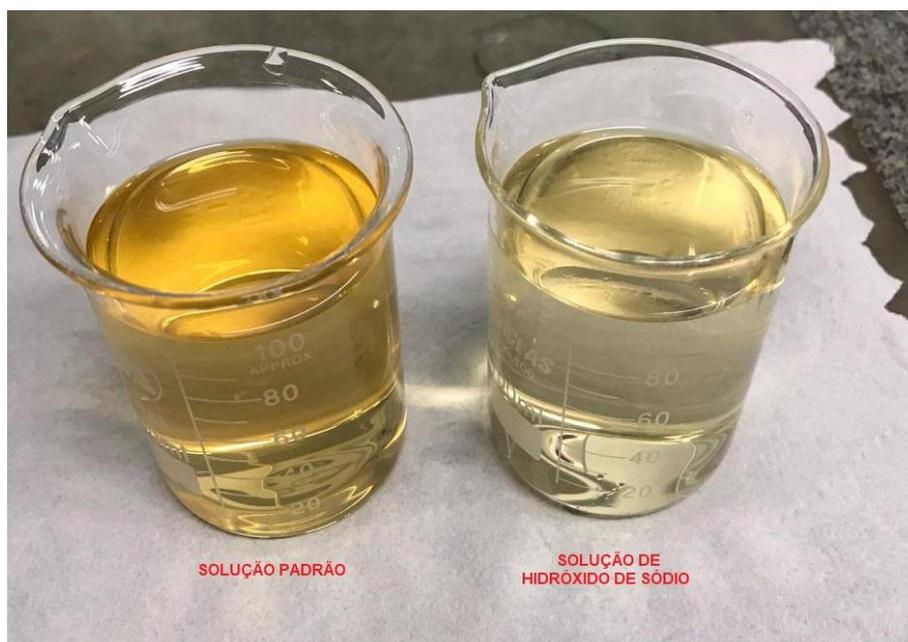
Tabela 14 – Requisitos físicos e químicos da areia normal brasileira.

<i>Propriedades</i>	<i>Requisitos</i>	<i>Métodos de ensaio</i>	<i>Amostra ou fração de controle</i>
<i>Teor de sílica</i>	$\geq 95\%$ , em massa	ABNT NBR 13956	Amostra composta
<i>Granulometria</i>	Tabela 4	ABNT NM 248	Por fração
<i>Umidade</i>	$\leq 0,2\%$ , em massa	-	Amostra composta
<i>Matéria orgânica</i>	$\leq 100$ ppm	ABNT NBR NM 49	Amostra composta

Fonte: Adaptado pelo autor (2019).

Conforme a norma NBR NM 49 (2011) é possível verificar a quantidade de matéria orgânica da areia através de uma comparação da coloração da solução padrão, composta por 90 cm<sup>3</sup> de água, 10 cm<sup>3</sup> de álcool e 2 g de ácido tânico, com uma solução de 970 g de água e 30 g de hidróxido de sódio. A solução de hidróxido de sódio é utilizada para lavar 200 g do agregado miúdo e posteriormente permanece em repouso por 24 horas em ambiente escuro. Após este período a solução de hidróxido de sódio foi filtrada com papel filtro e realizado a comparação da coloração. Caso a cor da solução de hidróxido de sódio seja mais clara que a solução padrão, a matéria orgânica da areia é inferior ao limite permitido pela norma NBR 7214 (2015) e pode ser utilizada como areia normal. O resultado do ensaio pode ser verificado na Figura 31.

Figura 31 – Comparativo entre solução padrão e solução de hidróxido de sódio.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Afim de evitar a produção de grande quantidade de hidróxido de sódio para lavar aproximadamente 100 kg necessária para a produção dos corpos de prova da pesquisa, foi proposto lavar a areia com água e comparar com a solução padrão, seguindo os mesmos procedimentos citados no ensaio anterior, como pode ser observado na Figura 32.

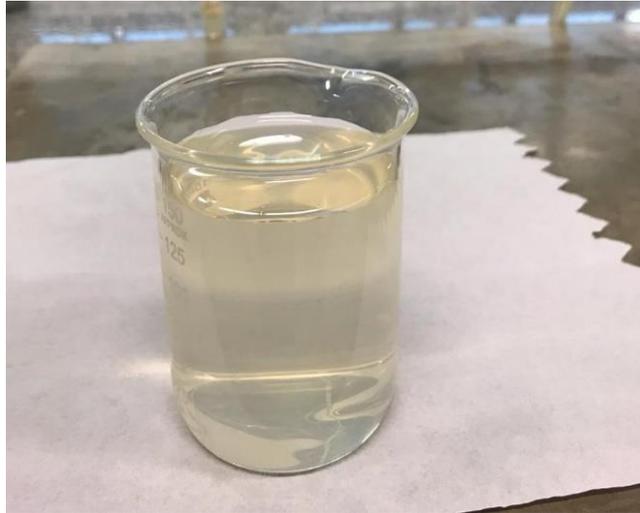
Figura 32 – Comparativo entre solução padrão e água na primeira lavagem.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

A solução resultante da lavagem da areia com água foi bastante turva, portanto, a areia passou por um novo processo de lavagem, com os mesmos passos do anterior e o resultado é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Água da segunda lavagem da areia.



Fonte: Registrado pelo autor (2019).

Como pode ser observado, após duas lavagens com água, a areia apresentou uma solução com cor mais clara que a solução padrão, tornando possível o processo de lavagem do agregado miúdo apenas com água e após secagem em estufa, utilizá-lo como areia normal para moldagem dos corpos de prova.

## APÊNDICE B – RESULTADOS

Tabela 15 – Dimensão linear dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.

<i>Idade</i>	<i>Traço</i>	<i>CP</i>	<i>Medidas (mm)</i>			<i>Média</i>	<i>Variação (%)</i>	<i>Média (%)</i>
14 dias de cura	Ref	1	4,625	4,631	4,614	4,623	Medida inicial	-
		2	5,06	5,081	5,04	5,060		
		3	5,005	5,016	4,971	4,997		
		4	4,631	4,639	4,627	4,632		
	8%	1	3,795	3,816	3,807	3,806	Medida inicial	-
		2	5,929	5,928	5,933	5,930		
		3	5,407	5,409	5,401	5,406		
		4	6,591	6,592	6,585	6,589		
27/ago	15%	1	6,48	6,483	6,485	6,483	Medida inicial	-
		2	7,12	7,105	7,057	7,094		
		3	6,28	6,287	6,281	6,283		
		4	6,375	6,361	6,372	6,369		
28 dias de cura	Ref	1	4,701	4,709	4,705	4,705	0,2393	0,20
		2	5,122	5,127	5,124	5,124	0,1852	
		3	5,071	5,074	5,073	5,073	0,2184	
		4	4,685	4,682	4,671	4,679	0,1377	
	8%	1	3,887	3,896	3,889	3,891	0,2542	0,20
		2	6,006	6,01	6,002	6,006	0,2145	
		3	5,484	5,48	5,471	5,478	0,2082	
		4	6,638	6,643	6,631	6,637	0,1330	
10/set	15%	1	6,538	6,534	6,531	6,534	0,1436	0,18
		2	7,188	7,183	7,182	7,184	0,2469	
		3	6,345	6,346	6,339	6,343	0,1695	
		4	6,416	6,425	6,427	6,423	0,1487	
42 dias de cura	Ref	1	4,713	4,714	4,718	4,715	0,2686	0,23
		2	5,139	5,137	5,137	5,138	0,2238	
		3	5,087	5,084	5,082	5,084	0,2522	
		4	4,697	4,691	4,688	4,692	0,1748	
	8%	1	3,898	3,888	3,883	3,890	0,2512	0,21
		2	6,001	6,004	5,989	5,998	0,1919	
		3	5,483	5,485	5,477	5,482	0,2177	
		4	6,651	6,649	6,647	6,649	0,1653	
24/set	15%	1	6,545	6,544	6,548	6,546	0,1751	0,21
		2	7,202	7,199	7,196	7,199	0,2869	
		3	6,348	6,344	6,333	6,342	0,1649	

56 dias de cura	Ref	4	6,441	6,437	6,438	6,439	0,1933	0,28
		1	4,729	4,728	4,723	4,727	0,30	
		2	5,154	5,149	5,159	5,154	0,27	
		3	5,107	5,085	5,098	5,097	0,29	
08/out	8%	4	4,722	4,724	4,718	4,721	0,26	0,20
		1	3,907	3,898	3,892	3,899	0,28	
		2	6,005	6	5,998	6,001	0,20	
		3	5,459	5,48	5,442	5,460	0,16	
70 dias de cura	15%	4	6,659	6,642	6,64	6,647	0,16	0,23
		1	6,549	6,537	6,532	6,539	0,16	
		2	7,227	7,213	7,213	7,218	0,34	
		3	6,347	6,34	6,338	6,342	0,16	
22/out	Ref	4	6,47	6,465	6,446	6,460	0,25	0,23
		1	4,713	4,714	4,718	4,715	0,27	
		2	5,139	5,137	5,142	5,139	0,23	
		3	5,087	5,084	5,078	5,083	0,25	
03/set	8%	4	4,697	4,691	4,688	4,692	0,17	0,22
		1	3,898	3,888	3,883	3,890	0,25	
		2	6,014	6,004	5,998	6,005	0,21	
		3	5,495	5,485	5,479	5,486	0,23	
14 dias de cura	15%	4	6,651	6,649	6,647	6,649	0,17	0,22
		1	6,555	6,544	6,538	6,546	0,18	
		2	7,202	7,199	7,196	7,199	0,29	
		3	6,368	6,344	6,353	6,355	0,20	
03/set	Ref	4	6,441	6,446	6,437	6,441	0,20	-
		1	7,865	7,859	7,854	7,859		
		2	6,872	6,861	6,866	6,866	Medida inicial	
		3	7,876	7,858	7,854	7,863		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 16 - Dimensão linear dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial.

Idade	Traço	CP	Medidas (mm)			Média	Variação (%)	Média (%)
14 dias de cura	Ref	1	6,75	6,764	6,754	6,756	Medida inicial	-
		2	4,233	4,229	4,249	4,237		
		3	5,914	5,897	5,896	5,902		
		4	3,395	3,382	3,403	3,393		
03/set	8%	1	5,654	5,637	5,653	5,648	Medida inicial	-
		2	5,784	5,8	5,788	5,791		
		3	6,631	6,594	6,628	6,618		
		4	2,825	2,819	2,824	2,823		
14 dias de cura	15%	1	7,865	7,859	7,854	7,859	Medida inicial	-
		2	6,872	6,861	6,866	6,866		
		3	7,876	7,858	7,854	7,863		

		4	5,456	5,433	5,442	5,444		
14 dias de cura e 14 de exposição	Ref	1	6,873	6,872	6,866	6,870	0,3154	0,33
		2	4,366	4,357	4,344	4,356	0,3517	
		3	6,001	6	6,002	6,001	0,2787	
		4	3,518	3,511	3,512	3,514	0,3658	
	8%	1	5,753	5,731	5,739	5,741	0,2646	0,34
		2	5,919	5,905	5,897	5,907	0,3296	
		3	6,765	6,76	6,759	6,761	0,3978	
		4	2,946	2,929	2,935	2,937	0,3527	
17/set	15%	1	7,93	7,939	7,923	7,931	0,1909	0,21
		2	6,968	6,97	6,958	6,965	0,2722	
		3	7,925	7,939	7,924	7,929	0,1784	
		4	5,507	5,513	5,499	5,506	0,1793	
14 dias de cura e 14 de exposição	Ref	1	6,91	6,916	6,919	6,915	0,4385	0,48
		2	4,416	4,412	4,415	4,414	0,5256	
		3	6,059	6,048	6,061	6,056	0,4341	
		4	3,565	3,568	3,572	3,568	0,5320	
	8%	1	5,779	5,776	5,772	5,776	0,3632	0,45
		2	5,949	5,939	5,94	5,943	0,4307	
		3	6,814	6,8	6,811	6,808	0,5279	
		4	2,976	2,968	2,969	2,971	0,4589	
01/out	15%	1	7,96	7,968	7,976	7,968	0,2909	0,30
		2	6,97	6,976	6,97	6,972	0,2906	
		3	7,965	7,968	7,952	7,962	0,2650	
		4	5,559	5,563	5,562	5,561	0,3367	
14 dias de cura e 42 de exposição	Ref	1	7,082	7,086	7,075	7,081	0,90	0,89
		2	4,59	4,579	4,584	4,584	1,03	
		3	6,196	6,194	6,185	6,192	0,82	
		4	3,663	3,675	3,667	3,668	0,84	
	8%	1	6,014	6,006	5,999	6,006	1,02	1,16
		2	6,152	6,151	6,15	6,151	1,02	
		3	7,078	7,066	7,068	7,071	1,25	
		4	3,257	3,27	3,26	3,262	1,36	
15/out	15%	1	8,029	8,028	8,023	8,027	0,45	0,65
		2	7,076	7,074	7,072	7,074	0,57	
		3	8,088	8,092	8,09	8,090	0,61	
		4	5,78	5,786	5,79	5,785	0,98	

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 17 - Dimensão linear dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial.

<b>Idade</b>	<b>Traço</b>	<b>CP</b>	<b>Medidas (mm)</b>			<b>Média</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>Média (%)</b>
14 dias de cura	Ref	1	4,384	4,377	4,373	4,378	Medida inicial	-
		2	4,48	4,483	4,483	4,482		
		3	5,525	5,536	5,529	5,530		
		4				0,000		
20/ago	8%	1	6,079	6,065	6,07	6,071	Medida inicial	-
		2	5,529	5,521	5,53	5,527		
		3	5,728	5,715	5,723	5,722		
		4				0,000		
20/ago	15%	1	6,534	6,531	6,524	6,530	Medida inicial	-
		2	6,242	6,237	6,249	6,243		
		3	5,712	5,714	5,696	5,707		
		4	5,694	5,701	5,698	5,698		
28 dias de cura	Ref	1	4,41	4,391	4,399	4,400	0,0649	0,0590
		2	4,509	4,498	4,496	4,501	0,0559	
		3	5,549	5,547	5,553	5,550	0,0561	
		4				0,000		
28 dias de cura e 14 de exposição	8%	1	6,126	6,127	6,116	6,123	0,1452	0,0850
		2	5,536	5,53	5,522	5,529	0,0076	
		3	5,764	5,757	5,753	5,758	0,1022	
		4				0,000		
03/set	15%	1	6,37	6,375	6,366	6,370	-0,4422	-0,1369
		2	6,21	6,2	6,211	6,207	-0,0998	
		3	5,702	5,697	5,691	5,697	-0,0303	
		4	5,706	5,71	5,703	5,706	0,0246	
28 dias de cura e 14 de exposição	Ref	1	4,499	4,475	4,472	4,482	0,3070	0,323
		2	4,599	4,59	4,603	4,597	0,3394	
		3	5,624	5,626	5,622	5,624	0,2683	
		4				0,000		
28 dias de cura e 14 de exposição	8%	1	6,222	6,212	6,2	6,211	0,3936	0,3089
		2	5,593	5,606	5,595	5,598	0,2037	
		3	5,839	5,845	5,83	5,838	0,3293	
		4				0,000		
17/set	15%	1	6,446	6,445	6,443	6,445	-0,2359	0,0568
		2	6,271	6,257	6,253	6,260	0,0494	
		3	5,785	5,781	5,778	5,781	0,2102	
		4	5,774	5,772	5,762	5,769	0,2036	
28 dias de cura e 14 de exposição	Ref	1	4,561	4,56	4,562	4,561	0,54	0,57
		2	4,656	4,664	4,66	4,660	0,52	

28 de exposição	3	5,753	5,762	5,748	5,754	0,64	0,55	
	4				0,000	0,00		
8%	1	6,317	6,312	6,319	6,316	0,69		
	2	5,667	5,68	5,677	5,675	0,42		
	3	5,909	5,912	5,906	5,909	0,53		
	4				0,000			
01/out	1	6,499	6,496	6,502	6,499	-0,09		0,19
	2	6,281	6,301	6,311	6,298	0,15		
	3	5,804	5,818	5,816	5,813	0,30		
	4	5,835	5,842	5,837	5,838	0,40		
28 dias de cura e 42 de exposição	Ref	1	4,773	4,769	4,75	4,764	1,14	1,11
		2	4,881	4,852	4,859	4,864	1,12	
		3	5,914	5,903	5,908	5,908	1,08	
		4				0,000		
8%	1	6,855	6,863	6,861	6,860	2,22	1,82	
	2	6,077	6,078	6,059	6,071	1,56		
	3	6,323	6,325	6,316	6,321	1,70		
	4				0,000			
15/out	15%	1	6,703	6,705	6,706	6,705	0,49	0,75
		2	6,509	6,522	6,513	6,515	0,76	
		3	5,907	5,922	5,919	5,916	0,59	
		4	6,104	6,096	6,102	6,101	1,14	

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 18 – Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>Média (Mpa)</b>	<b>Desvio (MPa)</b>
Ref	14	5,66	5,44	5,31	5,47	0,19
	28	5,32	6,14*	5,36	5,34	0,02
	42	5,55	5,75	6,31*	5,65	0,10
	56	5,50	5,39	5,59	5,49	0,10
	70	5,75	5,69	5,96	5,80	0,16
8% met.	14	5,21	4,80	4,95	4,98	0,22
	28	5,27	5,63	5,94*	5,45	0,18
	42	6,28	7,05*	6,39	6,34	0,06
	56	6,11	5,87	4,33*	5,99	0,12
	70	5,68	6,05	6,08	5,93	0,26
15% met.	14	4,78	4,95	4,50	4,74	0,25
	28	5,47	5,26	4,86*	5,36	0,10
	42	5,95	6,02	6,69*	5,98	0,04
	56	5,77	5,32	5,69	5,59	0,27
	70	6,00	5,81	5,92	5,91	0,10

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 19 - Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio (MPa)</b>
Ref	14	7,73	7,28*	8,08	7,90	0,18
	28	8,40	8,12	8,53	8,35	0,18
	42	5,56*	7,57	7,68	7,63	0,06
8% met.	14	7,36*	6,71	6,69	6,70	0,01
	28	7,41	7,16	7,15	7,24	0,17
	42	7,41	7,07	7,47	7,32	0,25
15% met.	14	6,16	6,50	6,72	6,46	0,30
	28	6,70	6,59	6,83	6,70	0,12
	42	6,61	6,94	6,77	6,77	0,17

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 20 - Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio (MPa)</b>
Ref	14	7,18	6,85	6,84	6,96	0,22
	28	8,73*	7,68	6,80	7,24	0,44
	42	8,63	8,03*	8,95	8,79	0,16
8% met.	14	7,10	7,27	7,41	7,26	0,16
	28	7,00	7,41	8,10*	7,20	0,21
	42	7,38	6,99	6,50*	7,18	0,19
15% met.	14	5,02*	6,54	6,32	6,43	0,11
	28	5,28*	5,90	6,35	6,13	0,23
	42	5,92	6,07	6,03	6,01	0,06

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 21 – Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em água saturada com cal.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>CP 4 (MPa)</b>	<b>CP 5 (MPa)</b>	<b>CP 6 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>DRM</b>
REF	14	24,19	27,72*	24,97	24,58	25,37	28,24*	24,78	2,38
	28	28,66*	20,86*	26,39	24,66	24,27	25,04	25,09	5,17
	42	22,85	24,73	26,75	22,85*	28,74*	26,70	25,26	2,08
	56	21,46*	25,67	25,29	25,65	24,41	22,62*	25,25	1,64
	70	19,14*	16,10*	26,81	27,31	26,19	27,88	27,05	3,17
8% met.	14	22,19	23,64	23,09	15,31*	28,37*	21,61	22,63	4,43
	28	26,39*	31,65	33,03	13,66*	32,99	32,24	32,48	1,71
	42	32,05	32,57	33,06	32,02	26,54*	21,05*	32,42	1,96
	56	32,46	31,24	29,59	29,27*	32,13	27,22*	31,28	3,79
	70	31,32	13,90*	31,07	30,33	15,60*	30,20	30,73	1,93
15% met.	14	14,37*	21,27*	23,30	22,22	22,93	21,44	22,47	4,60
	28	25,91*	30,13	31,46	32,28	29,66	22,46*	30,88	4,52
	42	25,95*	32,12	31,86	29,84	27,90*	31,82	31,41	4,99
	56	30,03	31,12	21,05*	31,16	29,06	31,44	30,56	4,92
	70	30,06	30,86	29,21	25,29*	24,87*	31,08	30,30	3,61

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 22 - Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 14 dias de cura inicial.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>CP 4 (MPa)</b>	<b>CP 5 (MPa)</b>	<b>CP 6 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>DRM</b>
Ref	14	27,41	27,25	29,53	23,32*	35,50*	28,09	28,07	5,20
	28	33,85	34,82	33,90	39,42*	35,65	27,30*	34,56	3,17
	42	30,89*	23,37	21,58	23,25	22,29	11,91*	22,62	3,29
8% met.	14	28,51	29,04	29,66	22,30*	27,80	24,86*	28,75	3,32
	28	27,90	30,94	29,76	28,51	31,46	30,26	29,81	5,56
	42	24,70	26,59	23,92	25,91	26,67	24,48	25,38	5,09
15% met.	14	30,58	27,37*	29,74	25,84*	31,78*	30,35	30,61	4,37
	28	30,70	25,63*	30,78	31,58	28,50*	30,51	30,89	4,13
	42	26,33	23,56*	27,59	14,06*	26,75	27,08	26,94	2,43

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 23 - Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova imersos em sulfato de sódio com 28 dias de cura inicial.

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>CP 1 (MPa)</b>	<b>CP 2 (MPa)</b>	<b>CP 3 (MPa)</b>	<b>CP 4 (MPa)</b>	<b>CP 5 (MPa)</b>	<b>CP 6 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>DRM</b>
Ref	14	18,06*	31,56	34,59	27,43*	33,45	32,98	33,15	4,79
	28	24,92	25,88	27,73*	24,66	18,22*	23,83	24,82	4,25
	42	21,99	18,77*	23,17	22,07	22,92	18,69*	22,54	2,82
8% met.	14	26,70	27,53	25,99*	29,29	30,02*	27,41	27,73	5,62
	28	28,34	24,88*	27,21	28,57	30,01*	29,43	28,39	3,67
	42	18,53*	29,07	32,22*	26,88	27,56	27,48	27,75	4,75
15% met.	14	32,98*	29,95	28,74	29,25	27,56*	30,23	29,54	2,71
	28	27,61	29,26	28,33	24,55*	29,18	24,11*	28,60	4,97
	42	28,39	26,84	29,52	27,37	12,56*	8,56*	28,03	5,33

\* Valores desconsiderados devido ao desvio padrão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).