

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

JOSÉ ARMANDO SAMPAIO CLAUDINO

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
EM FACE AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO**

Cajazeiras-PB
2023

JOSÉ ARMANDO SAMPAIO CLAUDINO

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
EM FACE AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO**

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

Cajazeiras-PB
2023

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

C615d Claudino, José Armando Sampaio.
Durabilidade de argamassas com baixo consumo de cimento em face ao ataque por sulfato de sódio / José Armando Sampaio Claudino.– 2023.

16f. : il.

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

Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

1. Construção civil. 2. Argamassa. 3. Cimento. 4. Sustentabilidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 624.01(043.2)

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO EM FACE AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO

JOSÉ ARMANDO SAMPAIO CLAUDINO

armando.sampaio@academico.ifpb.edu.br

ROBSON ARRUDA DOS SANTOS

robson.santos@ifpb.edu.br

RESUMO

Além dos avanços para a sociedade, a indústria do cimento é marcada por uma série de questões ambientais. Neste sentido, tendo em vista os impactos gerados pela produção e consumo de cimento, surge a necessidade de soluções tecnológicas que visem a mitigação desses danos. Este trabalho tem como objetivo detalhar o comportamento de corpos de prova prismáticos, 4x4x16 cm, frente ao ataque por sulfato de sódio. Foram estudadas três composições: argamassa com 100% de cimento, argamassa com substituição de 60% do cimento por RTM, e esta última com adição de 5% de cal hidratada. Os corpos de prova foram moldados a partir da dosagem do concreto de referência com o traço definido. Para realização do ensaio de expansão geométrica, fez-se uso do concreto na fase de argamassa, a qual não possui agregado graúdo. Os corpos de prova foram postos nas duas curas (cal e sulfato de sódio) logo após a desmoldagem. O principal fenômeno observado após a imersão foi, como já citado, a expansão geométrica, que é o aumento das dimensões das argamassas. As peças com RTM e cal apresentaram maiores expansões no ambiente com sulfato de sódio, devido ao alto teor de alumina no resíduo, com expansões acima do limite para um material resistente à sulfatos.

Palavras-Chave: Argamassa; Expansão; Empacotamento; Sulfato.

ABSTRACT

In addition to advances for society, the cement industry is marked by a series of environmental issues. In this sense, in view of the effects generated by the production and consumption of cement, there is a need for technological solutions aimed at mitigating these damages. This work aims to detail the behavior of prismatic specimens, 4x4x16 cm, against attack by sodium sulfate. Three compositions were studied: mortar with 100% cement, mortar with 60% replacement of cement by RTM, and the latter with the addition of 5% hydrated lime. The specimens were molded from the dosage of the reference concrete with the defined mix. To conduct the free expansion test, use concrete in the mortar phase, which does not have coarse aggregate. The specimens were placed in the two cures (lime and sodium sulfate) right after demoulding. The main phenomenon observed after the experiment was, as already mentioned, the spiritual expansion, which is the increase in the dimensions of the mortars. The parts with RTM and lime showed greater expansions in the environment with sodium sulfate, due to the high alumina content in the residue, with expansions above the limit for a material resistant to sulfates.

Keywords: Mortar; Expansion; Packing; Sodium sulfate.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, devido, principalmente, às variadas formas de composição destas misturas, que fornecem produtos com diferentes propriedades e características próprias. Ao passo em que a tecnologia avança, as argamassas obtêm uma série de melhorias, uma vez que novos componentes vão surgindo, o que atribui mais eficiência ao composto e populariza ainda mais o seu uso.

O preço pago pela humanidade devido ao amplo consumo do cimento, no entanto, é alto, uma vez que a produção e consumo de cimento são responsáveis por grande parte das emissões de CO₂ na atmosfera. Segundo Worrell *et al.* (2001), a indústria do cimento contribui com cerca de 5% para as emissões antrópicas globais de CO₂. Neste sentido, torna-se crucial a conscientização, sobretudo das indústrias, acerca da redução do consumo de cimento em seus materiais, visto que é possível ter concretos e argamassas tão resistentes quanto às tradicionais, com consumo menor de clínquer.

Com vistas à urgente necessidade de mitigação de tal problemática, surgem os primeiros meios de combate às emissões de CO₂ na atmosfera em decorrência do cimento. Conforme Vejmelková *et al.* (2015), há muitas tentativas de utilização de materiais cimentícios suplementares em substituição ao cimento que, a depender dos materiais usados nessa substituição, podem tornar o concreto mais ecológico e viável economicamente.

Souza (2016) afirma que a adoção de práticas relacionadas ao aprimoramento da durabilidade do concreto, sobretudo por meio de adições minerais, além de prolongar a vida útil, reduz as intervenções para a recuperação da estrutura. Logo, o aporte financeiro para restabelecer o adequado desempenho é reduzido.

Daminelli, Pileggi e John (2017) sondaram uma alternativa para reduzir o consumo de cimento através da teoria de empacotamento e dispersão de partículas. Esta teoria enuncia que o emprego de partículas de tamanhos diferentes promove um preenchimento dos vazios gerados pelas partículas maiores e, conseqüentemente, concebe um sistema onde há diminuição significativa destes vazios, diminuindo sua permeabilidade.

Hoppe Filho *et al.* (2015) enunciam que os íons sulfatos oriundos do meio, quando em contato com a água, por exemplo, reagem com a portlandita do concreto, formando subprodutos de caráter agressivo para a matriz cimentícia. Ainda na literatura dos autores, a deterioração do concreto se dá por duas fases: inicialmente há um período de dormência, devido ao preenchimento lento dos vazios pelo material expansivo; em seguida, ocorre uma expansão considerável, surgindo fissuras.

Consoante a Varela *et al.* (2021), quando da hidratação do Cimento Portland, a formação de etringita se dá pela reação entre gipsita – forma do sulfato mais comum na natureza –, e aluminatos. Este produto formado, por sua vez, é altamente agressivo, pois reduz o pH da argamassa e causa expansão e fissuração.

Costa (2004) afirma que os íons sulfato são agentes extremamente agressivos à matriz cimentícia, pois reagem com (1), os chamados produtos da hidratação do cimento, resultando em etringita, e (2) com o hidróxido de cálcio, produzindo gesso, assegurando elevada alcalinidade do conjunto e estabilizando os produtos da hidratação.

Partindo para as ações mitigadoras dos efeitos causados pelos íons sulfato, surge a necessidade de atribuição de qualidade à argamassa. Dentro deste conjunto, Mehta e Monteiro (2014) enfatizam que a redução da permeabilidade é um dos principais mecanismos controladores da degradação de concretos, pois está diretamente ligada com o transporte de água, bem como substâncias agressivas. Logo, os sólidos menos porosos e de baixa permeabilidade apresentam poder de defesa superior a ataques desta natureza.

Ainda que haja uma diversidade de pesquisas cujos objetivos versam acerca da diminuição do consumo de cimento em concretos e seus subprodutos, como as argamassas, uma parcela considerável não estuda a durabilidade destes materiais. Este trabalho desponta pela carência de análises sobre a expansão geométrica sofrida por argamassas, quando produzidas em diferentes traços e composições; bem como pelo poder que as diferentes composições da mistura podem agregar. Em particular, serão analisadas argamassas produzidas com resíduo cerâmico e/ou cal em substituição parcial ao cimento, quando submetidas ao ataque por sulfato – este último facilmente encontrado na natureza diluído em água –, e que gera diversos danos à matriz cimentícia, à medida que produz etringita mediante reações com os produtos da hidratação do cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com as informações fornecidas pela NBR 13529 (ABNT, 1995), argamassa é definida como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. Ao seguir uma proporção específica de cada componente, as propriedades e características da argamassa podem variar, afetando sua qualidade, resistência e durabilidade, bem como a finalidade do seu uso.

Trevisol *et al.* (2017) definem que a argamassa é um material obtido a partir da mistura, em proporções adequadas, de materiais inertes de baixa granulometria e de uma pasta com propriedades aglomerantes. Em conformidade com os autores, a distinção entre argamassa e concreto acontece através do tamanho do agregado que compõe a mistura. Quando os agregados miúdos e graúdos são empregados, a composição resultante é o concreto, quando não há emprego do agregado graúdo, concebe-se a argamassa.

Torres e Andrade (2016), em um de seus estudos, ratificam a influência negativa da etringita tardia (DEF) no que tange à durabilidade de argamassas. Ainda consoante aos autores, o fator que desencadeia esta patologia está ligado ao calor de hidratação do cimento Portland, à medida que elevadas temperaturas são alcançadas por elementos massivos de concreto, como é o caso de blocos de fundação.

Schmalz (2018) traz que não são raros os casos em que estruturas apresentam quadro de deterioração excessiva, antes mesmo do término da vida útil prevista pela NBR 15575 (ABNT, 2013). As causas, no entanto, podem ser as mais variadas possíveis, que vão desde erros de projeto a problemas de execução. Diante destes fatos, medidas como emprego de materiais duráveis despontam como artifícios imprescindíveis para a eficiência das estruturas.

2.1 CIMENTO E SUA RELAÇÃO COM CO₂

Para Worrell *et al.* (2001), a produção de CO₂ é um processo intrínseco à produção do cimento, uma vez que faz uso de uma alta concentração de energia. Para tanto, a queima de combustíveis dominantes em carbono, como o carvão, faz da indústria cimenteira uma importante fonte de emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

Consumido em todo o mundo, o cimento é um material extremamente popular e de baixo custo, o que justifica a sua produção em praticamente todos os países do globo terrestre. Mehta e Monteiro (2014) justificam a relação do cimento com o CO₂ por dois meios: pela abundância geográfica dos principais componentes utilizados na produção de cimento, entre eles gesso, calcário e argila; aliados dos custos elevados de transporte e logística, resulta em um favorecimento econômico para a sua produção global.

De acordo com Araújo *et al.* (2021), uma das alternativas frequentemente utilizadas para aumentar a resistência das argamassas aos íons sulfatos é a adição de pozolanas na mistura. O fenômeno que justifica essa afirmação é a redução da porosidade dos compostos cimentícios pela pozolana, reagindo com os constituintes anidros cimentícios e neutralizando a sua conversão em materiais expansivos.

2.2 DURABILIDADE

Durante um longo período, a maioria das pesquisas acerca do concreto e seus subprodutos estiveram voltadas, exclusivamente, à resistência a compressão. Em contrapartida, a necessidade de soluções para problemas de degradação precoce das estruturas fez com que estas pesquisas expandissem seus objetos de estudos. Uma dessas ramificações é o estudo da durabilidade posto o ataque por sulfatos.

Em analogia à NBR 15575 (ABNT, 2013), durabilidade é a capacidade da edificação e de seus sistemas de resistirem ao tempo preservando o desempenho sob condições de serviço e manutenção pré-especificadas. A Norma ainda cita que a extinção da durabilidade se dá quando estas condições deixam de ser atendidas, seja por degradação ou obsolescência funcional, o que acarreta desempenho insatisfatório.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) qualifica as estruturas de concreto, especificando que estas estruturas devem satisfazer requisitos mínimos para que sejam consideradas de qualidade. Dentre os

requisitos, destaca-se a capacidade de resistir às influências ambientais, o que pode ser entendido como o conceito de durabilidade.

Schmalz (2018) elucida que as argamassas podem apresentar modificações em função das condições impostas pelo ambiente os quais estão inseridas, sendo capaz de alterar significativamente a sua funcionalidade e, conseqüentemente, comprometer a sua capacidade de se manter estável.

Não obstante, corriqueiramente diversas construções apresentam patologias relacionadas ao ataque por sulfatos. Como citado por Mehta e Monteiro (2014) e reforçado por Torres e Andrade (2016), há consenso, na literatura, que a etringita tardia (DEF) acontece quando a fonte de íons sulfato é interna ao invés de externa, podendo ser proveniente da utilização de um agregado contaminado com gipsita ou de cimento contendo teor de sulfato elevado na produção do concreto. Somando-se a isso, a cura à vapor de peças de concreto acima de 65°C também pode estimular a concepção de patologias. Em muitos casos, a estrutura pode chegar a colapsar devido a inobservância destas questões.

2.2.1 Grau de agressividade

O grau de agressividade do meio em que a estrutura de concreto está inserida é fator determinante para a sua eficiência e durabilidade. A NBR 6118 (ABNT, 2014), por sua vez, associa o grau de agressividade com o ambiente, aliando todos os fatores que também podem contribuir com o ataque de íon sulfatos.

Em complementação a isso, a normalização brasileira, com aparelhamento da norma NBR 12655 (ABNT, 2015), determina que concretos expostos a sulfatos devem ser preparados com cimentos resistentes a sulfatos (RS), o qual tem seu preparo fundamentado pela NBR 5737 (ABNT, 1992). Ademais, satisfazer condições relacionadas à resistência característica a compressão (f_{ck}) e à relação água/cimento.

Segundo Batista (2013), a durabilidade do concreto é intrinsecamente emparelhada com a interação entre as fases provenientes da hidratação do cimento Portland e/ou da solução presente em seus poros com os demais materiais integrantes do concreto ou com o ambiente no qual a estrutura está inserida. Deste modo, o grau de agressividade vai ser variável de ambiente para outro, apresentando concentrações distintas de sulfato que devem ser minuciosamente analisadas nas etapas que antecedem a execução da obra.

2.2.2 Efeitos dos íons sulfato no concreto/argamassa

O sulfato de sódio é, como citado anteriormente, altamente danoso para os concretos e argamassas que contêm alumina. Neste sentido, Mehta e Monteiro (2014) detalham que, na hidratação, cimentos Portland com teor considerável de aluminato tricálcico (C_3A) conterão a maior parte da alumina sob a forma de monossulfato hidratado. Por sua vez, a presença de hidróxido de cálcio na pasta de cimento Portland hidratada, quando esta entra em contato com íons sulfato, promove uma conversão dos hidratatos que contêm alumina em etringita, que é expansiva.

Gomides (2009) sintetiza que a deterioração do concreto pelo ataque de sulfatos pode se dar tanto externa quanto internamente: externamente, este tipo de ataque está diretamente ligado ao pH do meio que, quando ácido, promove a conversão de sulfetos em sulfatos (gipsita, taumasita etc.), propiciando o ataque através da transformação da superfície do concreto em uma pasta branca e frágil; internamente, o ataque acontece devido ao uso de matéria-prima para a composição do concreto contaminada com sulfatos, gerando a forma mais agressiva de ataque à estabilidade da estrutura.

Complementando o exposto, Mehta e Monteiro (2014) destacam outras particularidades do ataque interno por sulfatos, dentre elas: expansão resultante da formação de cristais expansivos de etringita, promovendo expansão da matriz e, conseqüentemente, fissuras e lascamento das camadas mais externas do concreto, além da perda progressiva de resistência, rigidez e massa do concreto, associada à formação da gipsita.

2.2.3 Porosidade e permeabilidade

Para Souza (2008), a permeabilidade é a principal propriedade frente à durabilidade de concretos. Diante disso, é possível estabelecer uma relação entre as degradações químicas e a permeabilidade do concreto, definindo-as como proporcionais. Neste cenário, é mister que tais conceitos sejam discutidos e levados em consideração.

Neville (2016) discorre que a porosidade é a medida da proporção do volume total ocupado por poros e expresso em porcentagem. Analogamente, a permeabilidade é, grosso modo, a consequência da porosidade. Ainda no entendimento do autor, partindo de uma elevada porosidade no concreto, tem-se uma elevada permeabilidade, que é conceituada como a facilidade de movimentação de fluídos através do concreto.

Lopes e Silva (2021) constataram que a substituição de cimento por cinzas volantes reduz a absorção de água por capilaridade. O fenômeno que explica tal fato é o refinamento dos poros atribuído pela adição do resíduo. Não obstante, é indispensável que a NBR 16072 (ABNT, 2012) seja observada para que, finalmente, haja a definição assertiva se esta argamassa é, ou não, impermeável.

Andrade (1997) assegura que a utilização de concretos com menor porosidade (baixas relações água/cimento), associada à atenção quanto à qualidade de execução de lançamento, adensamento e cura, geram um concreto mais denso e, à vista disso, menos permeável. Em suma, quando observadas estas condições, a quantidade de água no interior do concreto é minimizada, dificultando o transporte de substâncias agressivas para a matriz.

2.3 ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Worrell *et al.* (2001) partem em defesa do benefício ambiental decorrente da redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) que as argamassas com redução de cimento promovem. Como exemplo disso, os autores afirmam que a indústria do cimento é responsável por gastar 2% de energia elétrica primária, ou 5% do total da energia industrial do mundo, sendo que de 70 a 80% é demandada apenas na fase de produção de clínquer.

Mauri *et al.* (2009) assevera que a procura por alternativas ao cimento, especialmente em condições de exposição a ambientes agressivos, objetiva, além de alavancar a durabilidade, amenizar efeitos negativos do uso deste tradicional material, sobretudo associados ao impacto ambiental atrelado à indústria do cimento. Neste sentido, revela-se que o cimento pode ser substituído por outras adições, que acometem em uma durabilidade igual ou superior frente ao ataque por sulfatos, atribuindo inúmeras vantagens ao concreto de baixo consumo.

Mehta e Monteiro (2014) são precisos ao afirmarem que íons sulfato são liberados pelos produtos da hidratação do cimento. Além disso, há consenso entre os autores no fato de que o elevado consumo de cimento fornece um maior calor de hidratação do concreto, o que propicia o surgimento de microfissuras. Neste padrão, o emprego de argamassas com baixo consumo de cimento, além de desonerar consideravelmente o concreto, mostra-se como uma medida extremamente viável.

2.3.1 Formas de redução do consumo de cimento

Tutikian e Helene (2011) conceituam o estudo de dosagem dos concretos de Cimento Portland com os procedimentos necessários à obtenção da mais otimizada proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço, expresso em massa ou em volume. Os autores afirmam que a forma mais rigorosa da proporção é expressa mediante a massa seca de materiais. Tais estudos, atrelados a uma visão ecológica sobre os impactos ambientais gerados pelo consumo de Cimento Portland, revelam as formas de redução deste material.

Em relação a dispersão de partículas, devido a polaridade elevada da água, o concreto, quando hidratado, tende a formar aglomerados que influenciam tanto na reologia das suspensões, quanto no empacotamento das partículas. Partindo disso, alterações na microestrutura do material são notadas. Conforme Castro e Pandolfelli (2009), quando as forças de dispersão das partículas superam as forças de atração, tem-se como resultado as suspensões dispersas. Para a obtenção de suspensões em dispersão, faz-se necessário o uso de aditivos dispersantes.

No que diz respeito ao empacotamento de partículas, os modelos de empacotamento de partículas se apresentam através de equações matemáticas que prescrevem como partículas de diferentes

tamanhos irão interagir geometricamente. Tais modelos calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura baseado na distribuição granulométrica e na densidade (Oliveira *et al.*, 2018). Diante disso, o estudo do empacotamento de partículas visa a mais assertiva relação de proporção entre os elementos do concreto, de modo que seus tamanhos promovam o preenchimento dos vazios maiores por partículas menores, e assim sucessivamente.

2.4 ADIÇÕES MINERAIS

Souza (2016) reconhece que as adições minerais são maneiras eficazes de substituição parcial e/ou total do cimento, podendo ser classificadas como cimentantes, inertes e pozolânicas. Dentre as adições citadas, as adições pozolânicas merecem um enfoque especial.

Define-se pozolana como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que numa forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes (Mehta; Monteiro, 2014).

Neville (2016) conclui que incorporar adições minerais é uma forma de tornar o concreto mais ecológico e aumentar a sua durabilidade. Ao substituir parte do cimento por essas adições, ocorre uma modificação nas características físicas e mecânicas do concreto, além de uma melhoria na ação ligante do cimento, resultando em um concreto menos poroso. Além dos benefícios mencionados, essa abordagem também melhora a resistência do concreto contra a ação de agentes agressivos, como é o caso dos íons sulfato, aumentando significativamente sua manutenção diante desses ataques.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Com o intuito de responder aos questionamentos da fundamentação teórica proposta, a metodologia utilizada neste trabalho se dedica em compreender o comportamento de argamassas com baixos teores de cimento, quando do ataque por sulfato de sódio, focando na análise da durabilidade.

As argamassas foram submetidas ao ataque de íons sulfato e à otimização da eficiência do aglomerante, verificando, assim, a influência dessas variáveis na deterioração destas.

À priori, para a produção das argamassas, foi pesado os materiais referentes ao volume total necessário do traço. Após a pesagem, a parte interna da argamassadeira foi umedecida e, posteriormente, iniciou-se o procedimento de mistura.

Para tanto, fez-se uso do CP V ARI, areias de diversas graduações (fina, média e grossa), aditivo superplastificante, água, cal e resíduo cerâmico. Foram moldados três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm de cada combinação a seguir, sendo que todos possuem 399,0 g de areia fina, 1064,0 g de areia média e 196,0 g de areia grossa:

- Argamassa com RTM: 273,0 g de cimento e 427,0 g de resíduo cerâmico (6,0 g aditivo e fator água/cimento de 1,1);
- Argamassa com 100% de cimento: 700,0 g de cimento (3,0 g aditivo e fator água/cimento de 0,5);
- Argamassa com RTM e 5% de cal: 273,0 g de cimento, 427,0 g de resíduo cerâmico e 5% do total de finos para cal, o que resulta em 35,0 g (6,0 g aditivo e fator água/cimento de 1,1).

Ao todo, foram nove corpos de prova para cada ambiente de cura. Para a mistura dos componentes das argamassas, utilizou-se uma argamassadeira. Após a mistura da argamassa, repassou-se a mistura para os moldes prismáticos e, depois de 24 horas da moldagem, as argamassas foram desmoldadas, identificadas e divididas entre a imersão em solução de cal e solução contendo sulfato de sódio.

3.1 EXPANSÃO GEOMÉTRICA

Para o ensaio de expansão geométrica, foram utilizadas as peças prismáticas, as quais foram verificadas aos 7,14, 21 e 28 dias, com o auxílio de um paquímetro após a exposição de cura final. A Figura 1 traz a ilustração do processo.

Figura 1- ilustração do processo de medição com auxílio de paquímetro.



Fonte: Autor (2023).

Este ensaio foi realizado com o intuito de analisar a ação do sulfato na argamassa, verificando a variação nas dimensões dos corpos de provas (CP's) com a utilização de um paquímetro, onde foi posicionado no mesmo ponto em todas as barras. Para neutralizar a temperatura, os CP's foram retirados da solução de sulfato e colocados sobre a banca por 10 minutos.

A partir da fundamentação presente na NBR 13583 (ABNT, 2014), o resultado do ensaio fundamenta-se através do aumento ou redução da expansão da argamassa devido ao ataque do sulfato de sódio, comparado à expansão da argamassa que foi submetida ao processo de cura normal. Além disso, o resultado corresponde à diferença entre a expansão média das barras submetidas ao sulfato e as barras curadas em solução de cal.

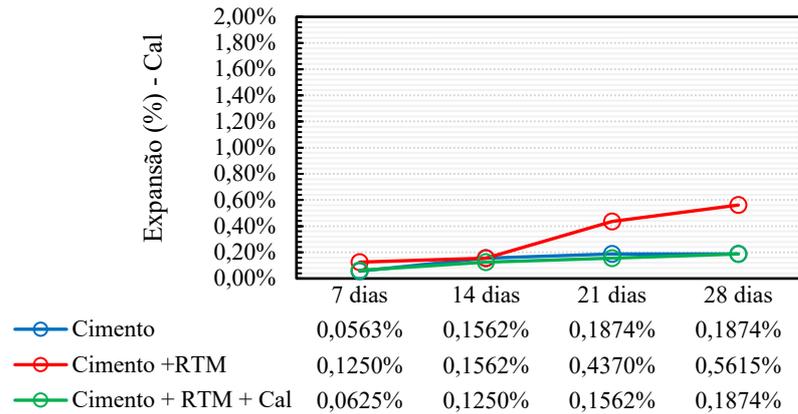
4 RESULTADOS DA PESQUISA

A NBR 13583 (ABNT, 2014) não menciona uma expansão resultante limite como referência para uma argamassa resistente ao ataque por solução de sulfato de sódio. Assim, os resultados obtidos no ensaio de imersão são analisados de forma comparativa entre cada traço, considerando o desempenho, mas sempre em comparação com outra argamassa de composição distinta.

Marciano (1993) propôs o valor de 0,030% como expansão geométrica resultante limite, aos 42 dias, para argamassas imersas em solução saturada de cal e/ou sulfatos. Abaixo do deste limite, a argamassa pode ser considerada resistente ao ataque por sulfatos. Em contrapartida, caso supere este limite, a argamassa é considerada não resistente ao sulfato.

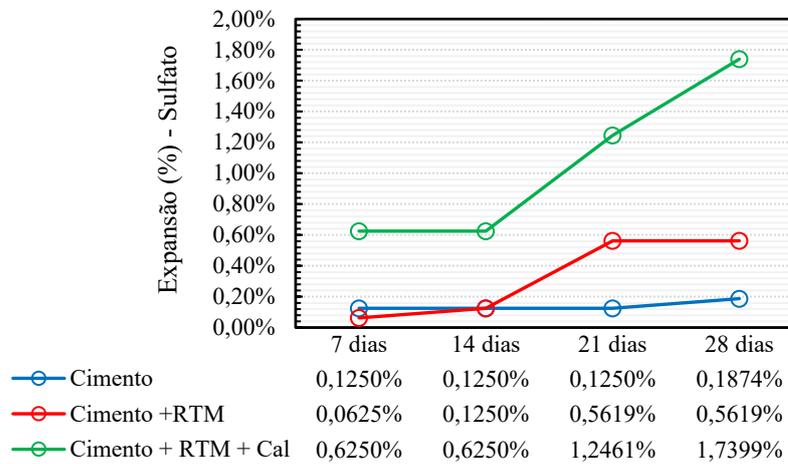
A leitura da expansão geométrica dos corpos de prova moldados foi realizada nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem e cura em tanque de água saturada com cal e de íons sulfato. Os resultados correspondem às diferenças médias obtidas das expansões médias de cura normal e em sulfato, como podem ser observadas nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Expansão média (solução de cal).



Fonte: Autor (2023).

Figura 3 – Expansão média (solução de sulfato).



Fonte: Autor (2023).

A princípio, percebe-se que, à medida em que as idades avançam, as amostras tendem a expandir, em que se observa comportamentos diferentes para cada traço, nos dois ambientes analisados.

A argamassa com composição única de cimento apresentou, aos 28 dias de imersão, 0,1874% de expansão média tanto na cura com cal quanto na de sulfato. Diante do expressivo resultado de expansão, define-se que esta argamassa não é resistente ao sulfato de sódio, pois, antes mesmo dos 42 dias, ultrapassou o limite preconizado por Marciano (1993). Com efeito, mesmo tendo o resultado menos expressivo de expansão, este traço apresentou uma série de microfissuras devido ao sulfato, como visto na Figura 4:

Figura 4 - Imagem de argamassa exposta ao sulfato.



Fonte: Autor (2023).

Analogamente, a argamassa com adição de resíduo cerâmico (RTM) também se expandiu. No entanto, a expansão foi de 0,5615% na solução de cal e 0,5619% na solução sulfatada. O fato que justifica essa expansão superior em mais de 300%, em comparação com o traço de referência, é a presença do resíduo cerâmico. Essa adição mineral, em substituição parcial ao cimento, promoveu uma maior oferta de reagentes vulneráveis ao sulfato, o que promoveu esse aumento de produtos expansivos na matriz. A Figura 5 traz um esboço de como ficou este traço após o ataque por sulfato.

Figura 5 - Imagem de argamassa exposta ao sulfato.



Fonte: Autor (2023).

O traço com o emprego da cal, por conseguinte, destacou-se como a expansão mais significativa em relação aos demais. Este corpo de prova, no que lhe concerne, alcançou 0,1874% de expansão na cura de cal e 1,7399% na cura de sulfato, ambos aos 28 dias. Neste cenário, é notório que a adição da cal potencializa os efeitos de expansão. O fato da cal se transformar facilmente em gipsita, produto expansivo, atacando a matriz cimentícia e causando expansão, justifica este comportamento.

O resultado menos expressivo de expansão, dentre as argamassas sem adições foi aos 28 dias na argamassa de referência sem empacotamento composta apenas por cimento, que pode ser explicado pela porosidade da matriz. Esta argamassa apresenta menor porosidade, que absorve melhor as possíveis tensões causadas pela formação dos produtos da reação do sulfato com o C₃A do cimento.

Na presença de íons sulfato, observa-se que o RTM, rico em alumina, favorece a formação de gipsita e etringita, compostos expansivos consequentes da reatividade das formas amorfas como a

alumina e dos aluminatos formados, também observado por Hoppe Filho *et al.* (2015). É devido a essas reações que os corpos de prova com RTM e cal apresentam expansões maiores em relação aos corpos de prova somente com cimento e RTM com cimento.

Devido aos efeitos negativos das expansões, evidencia-se que as argamassas não podem ser consideradas resistentes ao sulfato de sódio. Isso posto, é sabido que Marciano (1993) cita a idade de 42 dias para aplicação do parâmetro de expansão de 0,03%, no entanto, antes mesmo desta idade, as argamassas já extrapolaram a recomendação.

Além disso, nas amostras que foram expostas aos íons sulfato, percebeu-se desacordos visuais nas suas superfícies, como alteração na coloração e aparecimento de microfissuras. Outrossim, fica visível o surgimento de manchas brancas na superfície dos corpos de prova, caracterizando o preenchimento dos poros da peça por cristais, como expõe, a seguir, a Figura 6:

Figura 6 - Imagem de argamassa exposta ao sulfato.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a pesquisa de Batista (2013), a deterioração causada pelo ataque de sulfato está relacionada a processos de neoformação, resultantes da interação entre o sulfato e as fases de hidratação do material. Essas neoformações possuem menor coesão e maior volume molecular, o que compromete a integridade física do material.

5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dados os resultados demonstrados ao longo do trabalho, no que tange ao comportamento da argamassa frente ao ataque por sulfato de sódio, pôde-se verificar que a redução dos vazios entre as partículas por si só, bem como a diminuição do consumo de cimento, não foi suficiente para que as argamassas concebidas pudessem ser consideradas resistentes ao sulfato de sódio.

Percebeu-se, também, que as adições de cal e resíduo cerâmico tiveram impacto direto na trabalhabilidade, bem como nas reações químicas das matrizes posto o ataque do sulfato. Como já mencionado, esta adição aumentou o teor de silicatos, favorecendo ainda mais as reações expansivas entre os sulfatos, o cimento e, sobretudo, a cal adicionada.

Analisando a expansão geométrica dos corpos de prova, concluiu-se que os referidos traços se expandiram e apresentaram resultados fora do limite preconizado por Marciano (1993) que, por meio de aproximações, estima-se os resultados de expansão resultante limite aos 42 dias. Percebe-se que os resultados da expansão dos CP's curados em sulfato foram maiores em relação aos CP's curados na cal, devido ao aumento de tensões internas no corpo da argamassa, causado pela reação de compostos químicos com o sulfato, causando, assim, a sua expansão, maior nas argamassas com adição de cal.

Portanto, o estudo da durabilidade ao ataque de íons de sulfato em concretos/argamassas com baixo consumo de cimento é relevante, visto que a redução deste, por diferentes adições, pode provocar o aumento das expansões, dependendo do teor de alumina presente nestes materiais.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**: análise das manifestações patológicas nas estruturas do estado do Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/122441>. Acesso em: 22 jan. 2023.
- ARAÚJO, A. L. *et al.* Bark ash mitigation power of rice attacked by sulfates in mortars made with scheelite residues. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 13583**: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16072**: Argamassa impermeável. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BATISTA, D. G. **Investigação da deterioração de concretos UHEs por reações com os agregados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 55, n. 333, 2009, p. 18–32.
- COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- DAMINELLI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 10, n. 5, 2017, p. 998–1024.
- GOMIDES, M. J. **Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Concrete attack by sodium sulfate: Mineral additions as a mitigation tool. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, 2015, p. 168–177.

LOPES, D. F.; SILVA, S. N. Evaluation of the properties of cementitious mortars with the addition of thermoelectric generation residues. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, 2021.

MARCIANO, Z. A. N. **Desenvolvimento de um Método Acelerado para Avaliação da Resistência de Argamassas de Cimento Portland Expostas à Solução de Sulfato de Sódio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MAURI, J. *et al.* Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 3, 2009, p. 1039–1046.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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

OLIVEIRA, C. O. E. *et al.* Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

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

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 9, n. 3, 2016, p. 357–394.

TREVISOL, C. A. *et al.* Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, 2017.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, Ipsis, v.1, 2011, p. 415-452. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.

VARELA, M. V. F. *et al.* Study of gypsum and phosphogypsum as a source of calcium sulfate in supersulfated cement (Ssc) against sulfate attack. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, 2021.

VEJMEJKOVÁ, E. *et al.* Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, 2015, p. 259–267.

WORRELL, E. *et al.* Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annu. Rev. Energy Environ**, [s.l.], n. 26, 2001, p. 303-329.

JOSÉ ARMANDO SAMPAIO CLAUDINO

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
EM FACE AO ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO**

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

Aprovado em 09 de Agosto de 2023

BANCA EXAMINADORA



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

Documento assinado digitalmente
 CINTHYA SANTOS DA SILVA
Data: 10/08/2023 07:12:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cinthya Santos da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 JOHN WILLIAMS FERREIRA DE SOUZA
Data: 10/08/2023 07:38:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

John Williams Ferreira de Souza – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC Completo

Assunto: TCC Completo
Assinado por: Jose Armando
Tipo do Documento: Dissertação
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jose Armando Sampaio Claudino, ALUNO (201912200012) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 10/08/2023 11:21:53.

Este documento foi armazenado no SUAP em 10/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 904139
Código de Autenticação: f9a8c8b191

