



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



THAMARA ANTUNES SALVIANO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMEROS (EVA) AO CONCRETO VISANDO A
REDUÇÃO DO ATAQUE POR SULFATOS**

Uberlândia

2024

THAMARA ANTUNES SALVIANO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMEROS (EVA) AO CONCRETO VISANDO A
REDUÇÃO DO ATAQUE POR SULFATOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
como requisito obrigatório para conclusão do
curso de Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Uberlândia

2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a Deus e a todos que contribuíram para minha jornada em direção à graduação em Engenharia Civil. Em especial, agradeço ao meu orientador, Antônio de Paulo Peruzzi, cujo apoio constante e estímulo foram fundamentais durante todo o processo. Seu conhecimento e experiência foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à técnica do laboratório de Engenharia Civil, Cristiane, pela assistência durante os experimentos, e às mestrandas Maria Eduarda e Andressa, pela ajuda no teste de resistência dos corpos de prova.

Um agradecimento especial vai para meus pais, Jair e Simara, e minha irmã, Thainá, cujo apoio inabalável e presença constante foram cruciais em cada etapa da minha trajetória acadêmica. Sou grato por terem sido minha base, muitas vezes abrindo mão de suas próprias escolhas para priorizar o que era melhor para mim. Agradeço também a todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado, oferecendo suporte e compreensão nos momentos desafiadores.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores da Universidade Federal de Uberlândia por proporcionar um ambiente estimulante para o desenvolvimento acadêmico. O compromisso da instituição com a excelência educacional foi fundamental para minha formação profissional.

RESUMO

Os materiais empregados na construção civil estão constantemente sujeitos às influências físico-químicas do ambiente ao qual estão expostos. Essas condições ambientais podem causar efeitos adversos, impactando diretamente a integridade estrutural dos materiais e comprometendo aspectos cruciais como durabilidade, funcionalidade e estabilidade. A crescente preocupação com a falta de durabilidade em estruturas de concreto destaca a importância de compreender as manifestações patológicas, frequentemente desencadeadas por reações químicas entre os componentes do concreto e agentes agressivos. Nesse contexto, o presente estudo tem como principal objetivo avaliar alternativas viáveis de adições aos concretos, com o intuito de aprimorar sua resistência e durabilidade em ambientes caracterizados por elevada concentração de ácido sulfúrico. A presença significativa desse elemento químico pode desencadear processos corrosivos e prejudiciais ao concreto, tornando imperativa a busca por soluções que minimizem tais impactos. Ao analisar cuidadosamente as possíveis adições ao concreto, pretendemos identificar formulações que não apenas resistam eficazmente às agressões químicas, mas também preservem as propriedades estruturais e funcionais do material. Dessa forma, almejamos contribuir para o desenvolvimento de tecnologias construtivas mais sustentáveis e resilientes, capazes de enfrentar os desafios ambientais específicos associados à presença de ácido sulfúrico. Ao final deste estudo, realizamos em laboratório corpos de prova cilíndricos, após processo de cura, serão imersos em água com concentração de 1% do ácido durante quatorze dias. A seguir serão diagnosticados o nível de agressividade sofrido por cada tipo de amostra por meio da perda de massa e pela determinação da resistência à compressão axial.

Palavras-chave: Concreto, Durabilidade, Ácido Sulfúrico, Polímeros, Cimento Portland.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 6 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 7 |
| 2.1. Durabilidade | 7 |
| 2.2. Ataque por sulfato..... | 8 |
| 2.3. Controle do Ataque por Sulfato..... | 9 |
| 2.4. A modificação de concretos e argamassas por polímero | 10 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 12 |
| 3.1. Materiais utilizados e determinação dos traços dos concretos..... | 12 |
| 3.2. Preparo dos corpos de prova..... | 14 |
| 3.3. Processo de Cura | 18 |
| 3.4. Imersão no ácido sulfúrico | 18 |
| 3.5. Ensaio à compressão axial | 19 |
| 4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE | 20 |
| 5. CONCLUSÃO | 24 |
| 6. REFERÊNCIAS | 25 |

1. INTRODUÇÃO

A agressividade do ambiente em que as estruturas de concreto estão inseridas pode reduzir, de maneira significativa, a vida útil destes elementos. Ambientes urbanos, industriais, marítimos, entre outros, representam riscos à estrutura devido, principalmente, à presença de sulfatos. Quando presentes no meio, os sulfatos reagem quimicamente com os compostos do concreto, principalmente o aluminato tricálcico, e provoca a expansão dos elementos, fissuração seguida de desagregação do concreto armado.

O íon sulfato é um contaminante comumente encontrado em efluentes, incluindo aqueles provenientes da indústria de papel, produção de fertilizantes, indústria têxtil, manufatura de pesticidas, anodização de alumínio, mineração e beneficiamento de minerais sulfetados e em processos de oxidação natural de minerais sulfetados expostos ao intemperismo. (DAM) (Tait et al., 2009).

A durabilidade das estruturas de concreto está associada com a forma de ingresso de agentes agressivos em estruturas de concretos, sendo que o processo mais confiável na definição da durabilidade do concreto é a resistência à penetração de agentes agressivos (COSTA, 2015).

O estudo da durabilidade dos materiais é um dos campos de pesquisa mais destacados atualmente, devido à sua importância econômica e ecológica e ao seu inter-relacionamento com as questões da qualidade e da satisfação do usuário, que se expressa na exigência de manutenção de um desempenho adequado. O trabalho abordará a questão da durabilidade do concreto frente aos ataques químicos, em especial o decorrente da ação deletéria dos íons sulfato.

Esse Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo analisar a influência do ácido sulfúrico quando está em contato com o concreto, investigando experimentalmente como esse agente químico impacta suas propriedades estruturais e funcionais.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Durabilidade das estruturas de concreto

Os estudos sobre a durabilidade das estruturas de concreto examinam os vários elementos que afetam sua resistência ao longo do tempo. Isso abarca a análise dos materiais constituintes, como agregados, cimento e aço, além da composição da mistura de concreto, incluindo a relação água/cimento, aditivos e outros fatores de construção, como as condições de cura. É essencial compreender o comportamento da estrutura em seu ambiente, pois este pode impactar significativamente sua vida útil, mesmo com especificações e execução corretas.

De acordo com o conceito de durabilidade estabelecido pelo CEB (1990), uma estrutura de concreto deve ser projetada, construída e operada de maneira a manter sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável ao longo de um período de tempo determinado, sem a necessidade de custos excessivos de manutenção e reparo. Isso significa que a durabilidade de uma estrutura depende de vários parâmetros fundamentais, como características construtivas, ambiente de exposição, critérios de desempenho e a vida útil esperada para aquela estrutura específica.

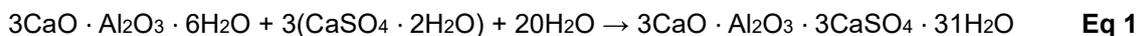
A durabilidade do concreto é um aspecto fundamental na engenharia civil, definido como a capacidade do material de resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Conforme Mehta e Monteiro (2008), um concreto durável é aquele que consegue manter sua forma original, qualidade e desempenho ao longo do tempo, mesmo quando exposto a condições ambientais adversas. Essa característica é essencial para garantir a longevidade e a segurança das estruturas, minimizando a necessidade de intervenções e reparos frequentes.

A ABNT NBR 15575-1:2013 estabelece requisitos de desempenho para edificações habitacionais, com foco na durabilidade do concreto para garantir a vida útil de projeto, geralmente de 50 anos. Ela exige que o projeto considere a proteção contra ações ambientais para assegurar essa durabilidade. A norma também especifica a espessura mínima da camada de cobertura do concreto sobre as armaduras para prevenir a corrosão. Além disso, são recomendadas medidas adicionais de proteção contra agentes agressivos e a implementação de um plano de manutenção preventiva, com inspeções regulares, para garantir o desempenho contínuo do concreto ao longo da vida útil da edificação.

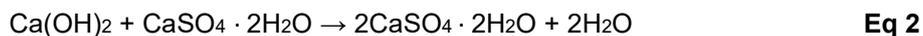
2.2. Ataque por sulfato

Desde 1936, manuais de construção em concreto, como o publicado pelo U.S. Bureau of Reclamation, alertam sobre os riscos associados a altas concentrações de sulfato no solo e na água para o concreto. A maioria dos solos contém uma certa quantidade de sulfato, geralmente na forma de gipsita, que não é prejudicial ao concreto. No entanto, concentrações mais altas de sulfato, frequentemente associadas à presença de magnésio e sulfatos alcalinos, podem representar sérios riscos para a durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A degradação do concreto devido ao ataque por sulfato pode assumir duas formas distintas, dependendo da concentração e fonte dos íons sulfato na água de contato e da composição da pasta de cimento no concreto. Isso pode levar à expansão do concreto, aumento da permeabilidade e perda progressiva de resistência e massa, resultando em sérios problemas estruturais. Segundo (MEHTA; MONTEIRO, 2008) o ataque por sulfato geralmente começa com a formação de etringita, um mineral expansivo. A Etringita é formada pela reação entre sulfatos (geralmente de fontes externas, como solo ou água) e aluminatos de cálcio presentes no cimento, segundo a Equação 1.

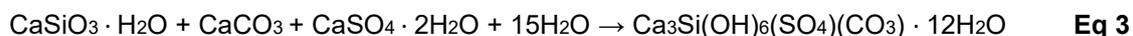


Esta reação resulta na formação de Etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) que tem um volume maior do que os reagentes originais, causando expansão e possíveis fissuras no concreto. Outra reação envolvida no ataque por sulfato é a formação de gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado). Esta reação ocorre entre o sulfato de cálcio e a Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] presente no cimento, Equação 2.



A formação de gipsita como resultado de reações por troca de cátions também é capaz de causar expansão. Entretanto, foi observado que a deterioração da pasta de cimento Portland endurecida pela formação de gipsita passa por um processo que leva à redução da rigidez e resistência; este é seguido por expansão e fissuração, e transformação final do material em uma massa pastosa ou não-coesiva (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Em condições específicas, principalmente em ambientes frios e úmidos, pode ocorrer a formação de Thaumasita, que afeta não só os aluminatos, mas também os silicatos do cimento. A reação de formação da Thaumasita dada pela Equação 3.



A Thaumasita causa deterioração significativa porque converte o silicato de cálcio hidratado, que é um dos principais componentes que conferem resistência ao concreto, em uma forma mineral que não contribui para a resistência estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3. Controle do Ataque por Sulfato

A resistência do concreto ao ataque por sulfatos, principalmente devido à sua baixa permeabilidade, é crucial para sua durabilidade. Para garantir essa baixa permeabilidade, são essenciais fatores como espessura adequada, alto teor de cimento, baixa relação água/cimento, e a devida compactação e cura do concreto fresco. No caso de fissuras causadas por diversos fatores, como retração por secagem, congelamento, ou corrosão da armadura, o uso de cimentos resistentes a sulfatos pode oferecer uma proteção adicional. Cimentos Portland com menos de 5% de aluminato de cálcio (como o Tipo V16 ASTM) são considerados suficientemente resistentes a ataques moderados por sulfatos, especialmente quando a principal preocupação são as reações que formam etringita (NEVILLE; BROOKS, 2013)

No entanto, em situações com alta concentração de sulfatos, superiores a 1500 mg/l (geralmente associadas à presença de íons de magnésio e álcalis), o desempenho do cimento Portland Tipo V pode ser prejudicado devido a reações de troca de cátions que resultam na formação de gipsita, especialmente se o teor de sulfato do cimento for elevado (NEVILLE; BROOKS, 2013). Nessas condições, a experiência demonstra que cimentos que apresentam baixo teor ou ausência de hidróxido de cálcio após a hidratação apresentam melhor desempenho. Exemplos incluem cimentos com alto teor de alumina, cimentos Portland de alto-forno com mais de 70% de escória e cimentos pozolânicos contendo pelo menos 25% de pozolana (como argila calcinada, cinza volante com baixo teor de cálcio, ou pozolana natural) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Com base em normas desenvolvidas originalmente pelo U.S. Bureau of Reclamation, a exposição ao sulfato é classificada em quatro graus de severidade no ACI Building Code 318-8348, que contém os seguintes requisitos:

- Ataque negligenciável: Quando o conteúdo de sulfato está abaixo de 0,1 por cento no solo, ou abaixo de 150 ppm (mg/l) na água, não deve haver restrição quanto ao tipo de cimento e relação água/cimento.

- Ataque moderado: Quando o conteúdo de sulfato no solo é de 0,1 a 0,2 por cento, ou 150 a 1500 ppm na água, devem ser usados o cimento Portland Tipo II ASTM*, ou cimento pozolânico ou cimento Portland com escória, com uma relação água/cimento menor que 0,5 para concreto de peso normal.

- Ataque severo: Quando o conteúdo de sulfato no solo é de 0,2 a 2,00 por cento, ou 1500 a 10.000 ppm na água, deve ser usado o cimento Portland Tipo V ASTM, com uma relação água/cimento menor que 0,45.

- Ataque muito severo: Quando o conteúdo de sulfato no solo está acima de 2 por cento, ou acima de 10.000 ppm na água, deve ser usado o cimento Tipo V ASTM com adição pozolânica, com relação água/cimento menor que 0,5. Para concreto com agregado leve, o ACI Building Code especifica uma resistência mínima à compressão aos 28 dias de 28 MPa para condições de ataque de sulfatos severo ou muito severo.

Para concreto de peso normal, recomenda-se uma relação água/cimento (A/C) mais baixa (ou maior resistência para concreto leve) para garantir estanqueidade e proteção contra corrosão e ciclos de gelo-degelo. Em condições de ataque severo, o BRE Digest 250 recomenda o uso de cimento Portland resistente a sulfatos, uma relação água/cimento máxima de 0,45, um consumo mínimo de 370 kg/m³ de cimento, e uma camada protetora no concreto. No entanto, camadas protetoras não substituem concreto de alta qualidade ou baixa permeabilidade, pois é difícil garantir que camadas finas não tenham perfurações e que camadas espessas não fissurem. As recomendações do ACI Comitê 515 devem ser seguidas para barreiras de proteção contra elementos químicos.

2.4. A modificação de concretos e argamassas por polímero

Os polímeros têm encontrado uma ampla gama de aplicações na indústria da construção civil. Eles são amplamente utilizados como adesivos, em tubulações, revestimentos, isolantes acústicos e térmicos, além de atuarem como componentes impermeabilizantes, seja como aditivos ou como matriz em concretos. Recentemente,

os polímeros têm sido cada vez mais usados na produção de concretos e argamassas de alta resistência mecânica e durabilidade. Resinas como poliéster, epóxi, vinílicas, fenólicas e metilmetacrilato são utilizadas como aglomerantes, oferecendo boa resistência química, especialmente em ambientes ácidos (IBRACON, 2020).

Os compósitos de concreto polímero mantêm as características essenciais do aglomerante, resultando em materiais com alta resistência química. Os aglomerantes poliméricos aprimoram as propriedades desses materiais, conferindo-lhes um amplo potencial de aplicações que podem explorar uma ou mais de suas principais características, como:

- Elevada resistência mecânica;
- Excelentes propriedades dielétricas;
- Baixa porosidade e absorção de água;
- Resistência química;
- Alta aderência aos substratos.

Devido às características mencionadas, o concreto polímero tem sido amplamente adotado em diversas indústrias, incluindo processamento de alimentos, química, engenharia civil e mineração (GORNINSKI, 2002). De acordo com Maass (1997), o crescente interesse na utilização do concreto polímero em revestimentos de estradas e pontes é atribuído aos seguintes fatores:

- Permite uma rápida retomada da utilização da estrutura após a aplicação;
- Protege o aço nas estruturas de concreto armado contra agentes corrosivos, como água, dióxido de carbono e íons cloretos, que aceleram a corrosão das armaduras;
- Forma uma superfície durável e altamente resistente ao desgaste e à abrasão causados pelo tráfego de veículos;
- Reduz os custos indiretos ao minimizar as interrupções no tráfego.

Os concretos poliméricos têm grande potencial na construção civil por suas excelentes propriedades mecânicas e durabilidade. São amplamente utilizados em diversos países, apesar de serem cerca de cinco vezes mais caros que o concreto convencional no Brasil. A produção e aplicação apresentam desafios, pois os aglomerantes poliméricos são voláteis e de cura rápida, exigindo cuidados especiais e segurança no manuseio. Polímeros estão transformando a construção civil, oferecendo soluções inovadoras para melhorar durabilidade, resistência e eficiência estrutural. Com

o avanço tecnológico, o uso de polímeros na construção deve crescer ainda mais, trazendo novas oportunidades para o setor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

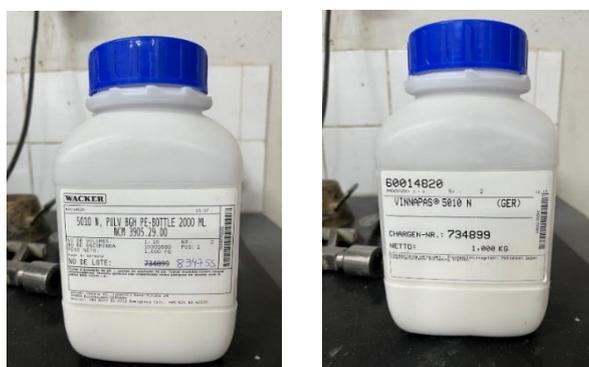
3.1. Materiais utilizados e determinação dos traços dos concretos

Para o experimento, foram selecionados cuidadosamente os materiais para a fabricação do concreto. O cimento utilizado foi o CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), escolhido por sua rápida aquisição de resistência e boa durabilidade, especialmente adequado para ambientes agressivos. Os agregados selecionados foram areia média e brita 0. A areia média foi escolhida por sua granulometria que proporciona boa trabalhabilidade, enquanto a brita 0 oferece resistência mecânica e estabilidade à mistura.

Os corpos de prova do tipo “A” foram preparados com uma mistura composta por uma parte de cimento, uma parte de areia média e duas partes de brita 0, utilizando uma relação água/cimento de 0,50. Esse traço foi selecionado para alcançar um equilíbrio entre trabalhabilidade e resistência. Já os corpos de prova do tipo “B” seguiram a mesma composição, mas com a adição de 1% de aditivo polimérico em relação à massa de cimento. A adição do aditivo foi fundamentada em estudos anteriores, visando aumentar a resistência do concreto frente a condições químicas agressivas.

O aditivo polimérico escolhido foi o VINNAPAS® 5010 N (GER) que é um pó polimérico dispersível para argamassas de mistura seca (Figura 1) a base de copolímero acetato de vinila e etileno. Segundo o fabricante, garante um efeito neutro na reologia e confere propriedades essenciais de adesão e flexibilidade, permitindo uma ampla liberdade na formulação.

Figura 1 – Aditivo VINNAPAS® 5010 N (GER)



Fonte: Autora (2024)

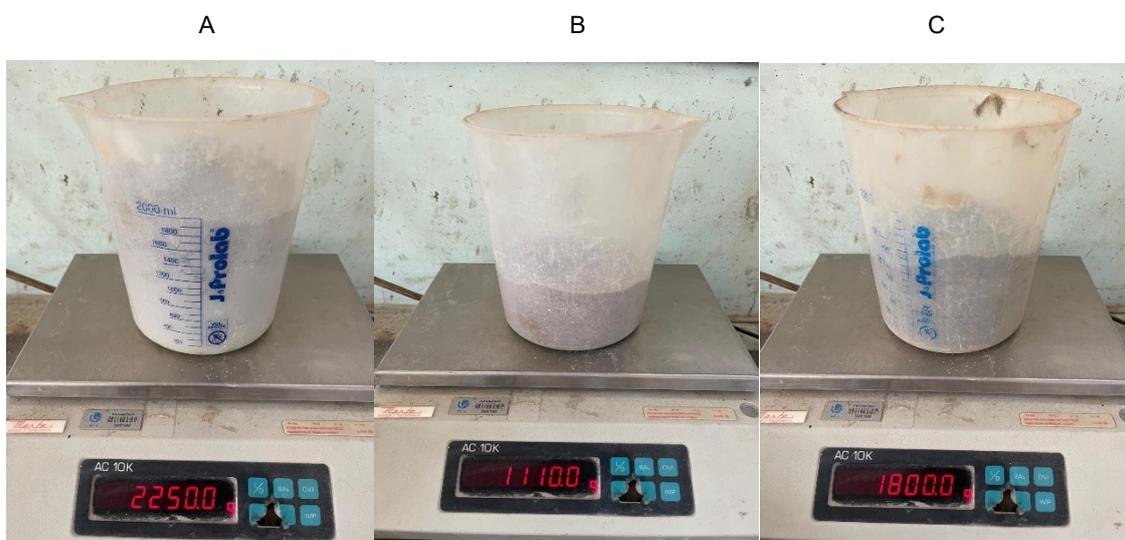
Ainda segundo o fabricante, o VINNAPAS® 5010 N é ideal para uso combinado com outros aditivos para argamassas, contém uma carga mineral fina como agente antibloqueio e é produzido sem solventes orgânicos, plastificantes ou agentes filmogênicos.

Para determinar a quantidade de cada material, foi necessário primeiro definir o volume total de concreto que será produzido. A área total necessária para os corpos de prova foi calculada considerando o volume de cada unidade multiplicado pela quantidade de moldes, incluindo uma margem de 20% para possíveis perdas durante o processo de montagem.

Portanto, o volume total necessário para os 12 corpos de prova é de aproximadamente 282,74 cm³, considerando uma perda de 20%. Em termos de capacidade, isso equivale a cerca de 3 litros

O cálculo das quantidades de cimento e agregados para uma mistura de concreto começa com a definição do traço, que estabelece as proporções dos materiais necessários para obter as propriedades desejadas do concreto. Como o traço 1:1:2 é uma proporção em volume a quantidade de água foi ajustada com base na relação água/cimento 0,50, significando que você usará 0,50 vezes o peso do cimento em água. Para converter esses volumes em massa, foi necessário utilizar as densidades específicas dos materiais. A densidade do cimento CPV ARI 3000 kg/m³, areia média 1480 kg/m³ e da brita 0 1200 kg/m³. Assim, a determinação precisa das quantidades de cada material permite a preparação de uma mistura de concreto conforme o traço especificado. Segue as imagens dos materiais nas balanças (Figura 2).

Figura 2 – a) Pesagem do Cimento; b) Pesagem da areia média; c) Pesagem da brita 0



Fonte: Autora (2024)

3.2. Preparo dos corpos de prova

Antes da preparação dos moldes, é importante garantir que estejam completamente limpos e livres de resíduos de moldagens anteriores para evitar qualquer interferência nos resultados do ensaio. Os moldes têm uma forma cilíndrica com uma base rosqueada, o que facilita o processo de desmolde (Figura 3).

Figura 3 – Molde cilíndrico



Fonte: Autor 2024

A base deve ter uma espessura mínima de 3 mm e dimensões adequadas para permitir a fixação segura do molde. Além disso, a superfície cilíndrica deve ser plana e lisa, sem apresentar variações de mais de 0,050 mm em 50 mm, para assegurar a precisão e uniformidade dos corpos de prova.

Um dia antes de produzir o concreto, foi aplicado um desmoldante apropriado nas superfícies internas dos moldes. Esse desmoldante tem a propriedade de criar uma camada que facilita a remoção dos corpos de prova após a cura inicial do concreto, prevenindo que ele grude nas paredes do molde. A aplicação antecipada garante que o desmoldante seque adequadamente, tornando o processo de desmolde mais fácil e evitando danos aos moldes e aos corpos de prova (Figura 4).

Figura 4 – Molde após aplicação do desmoldante



Fonte: Autor 2024

O processo de mistura do concreto começou com a adição dos agregados secos, como areia e brita, no misturador, seguidos pelo cimento, que foi combinado com os agregados secos para assegurar uma distribuição uniforme. Em seguida, a água foi adicionada gradualmente enquanto o misturador estava em funcionamento, permitindo uma integração completa com o cimento e os agregados.

A mistura dos materiais na argamassadeira foi feita até obter uma massa homogênea. A mistura deve ser bem feita para garantir que todos os componentes estejam uniformemente distribuídos como mostra a Figura 5.

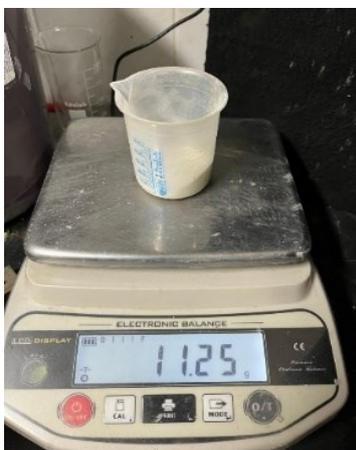
Figura 5 – Argamassadeira tipo planetária durante a mistura dos materiais



Fonte: Autora (2024)

A mistura foi mantida em agitação por 10 minutos para garantir uma homogeneização completa. Em seguida, foram moldados rapidamente os seis corpos de prova do tipo “A”. Em seguida, foi adicionado 1% de aditivo polimérico ao restante da mistura (Figura 6). Para garantir que o aditivo se incorporasse de maneira eficaz, a mistura foi agitada novamente e foi feita uma pausa para permitir que o aditivo se integrasse completamente à mistura, proporcionando tempo suficiente para que o aditivo aderisse com os outros componentes. A mistura foi agitada mais uma vez para assegurar a uniformidade da incorporação do aditivo para assim serem moldados os seis corpos de prova do tipo “B”, que incluíam o aditivo polimérico.

Figura 6 – Pesagem do aditivo



Fonte: Autora (2024)

Após a limpeza e preparação do molde, ele foi colocado sobre uma superfície nivelada e estável para evitar qualquer deslocamento durante o processo de enchimento. A moldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após a preparação da mistura de concreto para garantir a integridade das propriedades do material. Para facilitar o enchimento utilizou-se um funil e uma colher de pedreiro e para minimizar a formação de vazios um soquete (Figura 7).

Figura 7 – Soquete, Funil e Colher de pedreiro



Fonte: Autor 2024

Seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 7215:1995, o concreto foi introduzido no molde em duas camadas: foi preenchido até a metade de sua altura e compactada com um soquete, aplicando-se 12 golpes para assim completar o molde e aplicar novamente os golpes para assim garantir a remoção de bolhas de ar e a obtenção da densidade adequada. Após a compactação de ambas as camadas, o topo do corpo de prova é rasado e nivelado com uma espátula para assegurar uma superfície plana.

Finalmente, o molde foi colocado em um local estável e protegido de vibrações ou impactos para permitir que o concreto cure de maneira uniforme e sem interferências, assegurando a precisão e a qualidade dos corpos de prova. A Figura 8 apresenta os corpos de prova logo após serem moldados.

Figura 8 – Corpos de prova moldados



Fonte: Autora (2024)

3.3. Processo de Cura

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nos moldes por um período de tempo de 24 horas, para assim ser desmoldados e foram armazenados na câmara úmida, em condições controladas, para garantir uma cura adequada. A cura é fundamental para o desenvolvimento da resistência do concreto, permaneceram durante 7 dias (Figura 9).

Figura 9 – Corpos de prova após desformados



Fonte: Autora (2024)

Os corpos de prova foram identificados com giz de cera para facilitar a classificação nos diferentes grupos do experimento. Um traço grande indicava corpos de prova sem aditivo que seriam inseridos no ácido sulfúrico, enquanto um traço pequeno identificava aqueles sem aditivo que não seriam expostos ao ácido. Um X pequeno marcava os corpos de prova com aditivo que não seriam colocados no ácido, e um X grande era usado para aqueles com aditivo que seriam inseridos no ácido.

Após o período de cura, todos os corpos de prova foram pesados para registrar sua massa inicial. Este registro inicial permite a comparação futura e a análise da perda de massa, especialmente para os corpos de prova que serão imersos no ácido sulfúrico, assim poder avaliar o impacto do ácido na integridade estrutural dos corpos de prova e determinar a durabilidade do concreto sob condições ácidas.

3.4. Imersão no ácido sulfúrico

Para preparar uma solução de ácido sulfúrico com 1%, seguiu-se rigorosamente todos os procedimentos de segurança, utilizando Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) apropriados, como óculos de segurança, máscara, jaleco e luvas. A preparação envolveu o uso de pipetas e uma proveta graduada para medir com precisão o ácido sulfúrico concentrado. Inicialmente, a proveta foi preenchida com uma pequena quantidade de água, e o ácido foi adicionado lentamente à água para evitar reações

perigosas. A mistura foi então agitada cuidadosamente para depois ser introduzido os corpos de prova que permaneceram por 14 dias. Os outros corpos de prova foram imersos em água durante esse período (Figura 10).

Figura 10 – Corpos de prova inseridos no ácido sulfúrico



Fonte: Autora (2024)

Após a retirada dos corpos de prova do ácido e da água, eles foram pesados novamente para verificar se ocorreu alguma perda de massa. Comparando as massas inicial e final, podemos avaliar o grau de deterioração que cada corpo de prova sofreu, o que nos fornece dados importantes sobre a durabilidade do concreto sob condições agressivas.

3.5. Ensaio à compressão axial

Os corpos de prova foram retirados das fôrmas com cuidado para evitar danos. Após a remoção, eles foram submetidos a um processo de retificação. Este processo de retificação é fundamental para garantir que as superfícies dos corpos de prova estejam perfeitamente planas e paralelas, o que é essencial para a precisão dos testes de resistência. A Figura 11 ilustra a esmerilhadora usada na preparação dos corpos de prova para ensaio à compressão axial segundo ABNT NBR 5739:2018.

Figura 11 – Esmerilhador de concreto



Fonte: Autora (2024)

A retificação envolve a eliminação de quaisquer imperfeições ou irregularidades superficiais que possam afetar os resultados dos ensaios. Além disso, ela assegura que a área de aplicação da carga durante o teste de compressão seja uniforme, proporcionando medições mais precisas e reproduzíveis da resistência do concreto.

O ensaio de compressão é um teste fundamental para avaliar a resistência à compressão de corpos de prova de concreto. Esse ensaio fornece informações essenciais sobre a capacidade do concreto em suportar cargas compressivas, o que é crucial para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto.

O ensaio à compressão axial segue a norma ABNT NBR 5739:2018. A máquina utilizada para realizar o ensaio de compressão de corpos de prova de concreto foi uma Máquina Universal de Ensaio marca Emic, do Laboratório de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos no ensaio à compressão axial são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Perda de Massa de Corpos de Prova de Concreto em Diferentes Condições de Exposição Após 14 Dias

| TIPO DE CP | Nº | Massa inicial (g) | Massa no 14º dia (g) | Perda (g) | Perda (%) |
|---------------------|----------|-------------------|----------------------|-------------|-------------|
| B | 1 | 411,10 | 410,34 | 0,76 | 0,18 |
| | 2 | 416,19 | 415,41 | 0,78 | 0,19 |
| | 3 | 415,20 | 414,23 | 0,97 | 0,23 |
| | M | 414,17 | 413,33 | 0,83 | 0,20 |
| A | 4 | 406,52 | 405,94 | 0,58 | 0,14 |
| | 5 | 407,12 | 405,62 | 1,50 | 0,37 |
| | 6 | 412,05 | 411,47 | 0,58 | 0,14 |
| | M | 408,56 | 407,67 | 0,89 | 0,22 |
| B – Imerso no ácido | 1 | 421,35 | 418,83 | 2,52 | 0,60 |
| | 2 | 419,59 | 417,16 | 2,43 | 0,58 |
| | 3 | 408,73 | 407,62 | 1,11 | 0,27 |
| | M | 416,56 | 414,54 | 2,02 | 0,48 |
| A – Imerso no ácido | 4 | 419,84 | 418,36 | 1,48 | 0,35 |
| | 5 | 418,95 | 417,22 | 1,73 | 0,41 |
| | 6 | 418,61 | 416,70 | 1,91 | 0,46 |
| | M | 419,13 | 417,43 | 1,71 | 0,41 |

Fonte: Autora (2024)

Gráfico 1: Perda de Massa de Corpos de Prova de Concreto



Fonte: Autora (2024)

Ao analisar os corpos de prova imersos no ácido, constatou-se que houve uma perda de massa de aproximadamente 0,48%, o que corresponde a cerca de 2,02 g. As amostras que continham aditivo apresentaram uma perda ligeiramente maior, com uma média de 0,07% a mais em comparação com as amostras sem aditivo. Isso sugere que, a amostra com adição de polímero exposta ao ácido sulfúrico resultou em uma

degradação maior do concreto. A diferença percentual, apesar de pequena, pode indicar que os aditivos testados não foram suficientemente eficazes para mitigar completamente os efeitos corrosivos do ácido, destacando a necessidade de continuar investigando e desenvolvendo aditivos mais eficazes para melhorar a resistência do concreto em ambientes químicos agressivos.

Visualmente, os corpos de prova que foram imersos no ácido apresentaram uma aparência mais esbranquiçada, o que pode indicar um processo de calcificação. Esta mudança na coloração sugere que o ácido sulfúrico pode ter reagido com os compostos de cálcio presentes no concreto, levando à formação de sulfato de cálcio. A calcificação visível pode ser um sinal de degradação química. Essa observação visual é importante pois reforça a necessidade de desenvolver estratégias para proteger o concreto em ambientes ácidos. A figura 12 traz os corpos de prova do lado esquerdo imergidos na água e lado direito no ácido sulfúrico e a figura 13 a máquina para o ensaio à compressão axial.

Figura 12 – Corpos de prova após retirados da imersão em água (à esquerda) e imersos em solução com ácido sulfúrico (à direita)



Fonte: Autora (2024)

Figura 13: Máquina Universal de Ensaio Emic usada nos ensaios



Fonte: Autor 2024

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio à compressão axial.

Tabela 2: Resultados de Força Aplicada (F) e Tensão (T)

| TIPO DE CP | Nº | F (kgf) | T (MPa) |
|----------------------|----------|----------------|--------------|
| B | 1 | 5911,40 | 29,52 |
| | 2 | 4613,18 | 24,04 |
| | 3 | 6017,50 | 30,05 |
| | M | 5514,03 | 27,87 |
| A | 4* | 3241,30* | 16,52* |
| | 5 | 5190,05 | 26,45 |
| | 6 | 4616,79 | 23,53 |
| | M | 4903,42 | 24,99 |
| B – Imeroso no ácido | 1 | 5231,52 | 27,21 |
| | 2 | 5283,79 | 26,39 |
| | 3 | 4921,45 | 25,08 |
| | M | 5145,59 | 26,23 |
| A – Imeroso no ácido | 4 | 6003,08 | 29,98 |
| | 5 | 6022,91 | 30,69 |
| | 6 | 5408,18 | 28,12 |
| | M | 5811,39 | 29,60 |

Fonte: Autora (2024)

* Desconsiderar o corpo de prova, apresentou um vazio relativamente grande. Esse defeito comprometeu o ensaio e resultou em uma resistência significativamente inferior à dos demais corpos de prova.

Gráfico 2: Resultados de Tensão de Rompimento (T)



Fonte: Autora (2024)

Os resultados do ensaio de compressão revelaram que os corpos de prova que foram imersos no ácido apresentaram uma resistência à compressão superior em comparação com os que não passaram pela exposição ao ácido. Esse achado pode parecer surpreendente, uma vez que o ácido é comumente associado à deterioração do concreto. No entanto, é possível que a imersão no ácido tenha induzido uma reação química benéfica que contribuiu para um aumento inesperado na resistência do concreto.

5. CONCLUSÃO

Os resultados do ensaio de compressão indicam que os corpos de prova imersos no ácido apresentaram uma resistência à compressão superior em comparação com os corpos de prova que não foram expostos ao ácido. Este resultado pode parecer contraintuitivo, já que a exposição ao ácido geralmente é associada a uma degradação do concreto. No entanto, é possível que a imersão no ácido tenha promovido uma reação química que resultou em um efeito benéfico inesperado na resistência do concreto.

Uma hipótese para esse fenômeno é que a imersão no ácido pode ter causado a formação de uma camada adicional de produtos de reação na superfície do concreto, como sulfatos de cálcio, que poderiam ter agido como uma forma de reforço ou proteção para a estrutura interna do concreto. Essa camada poderia ter aumentado a resistência à compressão, ao menos em termos de carga suportada antes da ruptura.

Além disso, é importante considerar que a metodologia de preparo e as condições específicas do experimento podem ter influenciado os resultados. Pode ser necessário realizar análises adicionais, como estudos microestruturais, para entender

completamente os mecanismos envolvidos e confirmar se a resistência aumentada é um efeito real ou se pode ser atribuída a variáveis experimentais não controladas.

6. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 7215:1996 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ABNT. NBR 5737:1992 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ABNT. NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. NBR 15575-1:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

COSTA, J. O. Durabilidade das Estruturas de Concreto: Uma Análise dos Mecanismos de Degradação e das Práticas de Manutenção. São Paulo: Editora Técnica, 2015.

IBRACON - INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. Manual de Tecnologia do Concreto. Volume 2. São Paulo: IBRACON, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PINA, P. S.; SOUZA, A. D. de; RUTKOWSKI, E. S.; MAGALHÃES, J. A. de. Avaliação de tecnologias para remoção de sulfato presente em efluente da Votorantim Metais Zinco Três Marias

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-071-9.

TAIT, S.; HEAL, K.; SCHOLZ, M.; CHENG, Y. Sorção de Metais Pesados de Escoamento Rodoviário por Solos de Áreas Alagadas Construídas. Environmental Pollution, v. 156, n. 2, p. 385-390, 2009.

TANÍSA, S. R. Estudo da durabilidade de concretos com a substituição do cimento por cinza de casca de arroz sob ação de sulfatos. Revista de Engenharia e Tecnologia, 2023.

WACKER. Vinnapas® 5010 N. Disponível em: <https://www.wacker.com/h/en-us/dispersible-polymer-powders/vinnapas-5010-n-ger/p/000010668>.