

O EFEITO DO CONSUMO DE CIMENTO E DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO NO CONCRETO EM AMBIENTES AGRESSIVOS COM ÁCIDO SULFÚRICO

Remenche, Igor Rossi¹; Surmas, Juliana de Souza²; Medeiros, Marcelo Henrique Farias³

¹ Estudante de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, igorrossi@ufpr.br

² Estudante de graduação, Universidade Federal do Paraná, julianasurmas@ufpr.br

³ Professor Doutor, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: O governo brasileiro atualizou, em 2020, o marco legal de saneamento, que tem como objetivo garantir água potável para 99% da população e coleta e tratamento de esgoto para 90%, até 2033. Nesse sentido, verifica-se a necessidade de estudos que busquem compreender os impactos destrutivos em estruturas de concreto armado em ambientes como estações de tratamento de esgoto, sujeitas ao ataque por ácido sulfúrico biogênico. O presente trabalho tem como objetivo investigar o efeito do consumo de cimento em ambientes agressivos com ácido sulfúrico. Para isso, foram moldados corpos de prova de concreto com três traços de consumo de cimento: 292 kg/m³, 353 kg/m³ e 487 kg/m³. Assim como, para cada traço, teve-se uma relação água/cimento diferente, que foi de 0,43, 0,57 e 0,69. As amostras de cada traço foram imersas em uma solução com concentração de 1% de ácido sulfúrico e ensaiadas por meio da variação dimensional linear e variação de massa. A variação dimensional linear apresentou maiores valores para as amostras dosadas com o consumo intermediário de cimento, enquanto que, para a variação de massa, observou-se uma redução da massa para os traços mais ricos. Pode-se concluir que os concretos com maior consumo de cimento apresentam uma menor expansão linear em ambientes com ácido sulfúrico.

Palavras-chave: Ácido sulfúrico, Concreto, Variação de massa, Variação dimensional linear.

Abstract: The Brazilian government updated its sanitation legal framework in 2020, with the goal of ensuring potable water for 99% of the population and sewage collection and treatment for 90% by 2033. In this context, there is a growing need for studies aimed at understanding the destructive impacts on reinforced concrete structures in environments such as wastewater treatment plants, which are subject to biogenic sulfuric acid attack. The present study aims to investigate the effect of cement content on concrete performance in aggressive environments containing sulfuric acid. For this purpose, concrete specimens were cast with three different cement consumption levels: 292 kg/m³, 353 kg/m³, and 487 kg/m³. Each mix design also had a distinct water-to-cement ratio: 0.43, 0.57, and 0.69, respectively. Specimens from each mix were immersed in a 1% sulfuric acid solution and evaluated by means of linear dimensional variation and mass variation tests. The linear dimensional variation showed higher values for the samples with the intermediate cement content, while the mass variation results indicated greater mass loss for the richer mixes. It can be concluded that concretes with higher cement content exhibit lower linear expansion when exposed to sulfuric acid environments.

Keywords: Sulfuric acid. Concrete. Mass variation. Linear dimensional variation.

1. Introdução

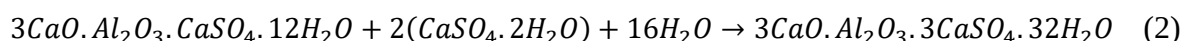
No ano de 2022, foram detectados um total de 379,3 mil quilômetros de rede pública de esgotamento sanitário em 5.150 cidades participantes do grupo amostral, representando um aumento de 14,3 mil quilômetros em comparação com 2021 [1]. Diversos fatores, como o aumento de prestadores de serviço de tratamento local e a expansão dos sistemas de esgotamento sanitário, podem ter influenciado esse acréscimo de 2021 para 2022 [1]. O saneamento básico é marcado por crescentes esforços para alcançar altos níveis de salubridade ambiental, sendo essencial para a saúde pública e devendo ser tratado como um direito do cidadão, fundamental para sua qualidade de vida [2].

Considerando a importância das estações de tratamento de esgoto e seu contínuo crescimento, o governo brasileiro atualizou o marco legal do saneamento básico em 2020, visando garantir o atendimento de 99% da população com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto até 2033. Assim sendo, pode-se prever novas construções relacionadas a estações de tratamento de esgoto em alguns anos.

No entanto, o abastecimento com água de qualidade e a infraestrutura para tratamento de água demandam altos investimentos em obras de concreto, com uma expectativa de vida útil elevada [3]. Além disso, estima-se que os gastos associados à operação e manutenção de infraestruturas de água potável e estações de tratamento de esgoto nos Estados Unidos excedam US\$ 31 bilhões e US\$ 25 bilhões, respectivamente [3]. Desse modo, verifica-se um elevado custo de manutenção de estações de tratamento de esgoto necessitando assim de uma maior compreensão em relação a meios para mitigar as manifestações patológicas originadas por esse ambiente.

As estruturas de concreto presentes em estações de tratamento de esgoto, especialmente aquelas que utilizam digestão anaeróbica (processo fermentativo), estão expostas a elevadas concentrações de ácido sulfúrico (H_2SO_4) [4]. Além da deterioração causada pelo ácido sulfúrico em ambientes de esgoto, há também a deterioração do concreto por outros ácidos biogênicos [5].

Nesse contexto, tendo em vista o ataque por ácido sulfúrico em compósitos cimentícios, as formulas estequiométricas apresentam as reações ocasionadas [6][7]:



Tendo em vista as equações 1 e 2, tem-se que inicialmente a portlandita e os íons C-S-H do cimento, responsáveis pela manutenção da alcalinidade da matriz cimentícia, reagem com os íons sulfatos formando gipsita; em seguida tem-se a reação da etringita com as fases do cimento aluminatos hidratados que formam a etringita secundária [6][8]. Essas fases formadas durante o ataque da matriz cimentícia pelo ácido sulfúrico, caracterizam-se por serem expansivas e ocasionarem tensões expansivas [7].

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a deterioração dos concretos com proporção cimento:agregados de 1:6,5, 1:5,0 e 1:3,5, conforme o método de dosagem IPT/EPUSP, submersos em solução de ácido sulfúrico. Para isso, foi utilizada uma concentração de ácido sulfúrico de 1% misturado em solução aquosa. Os experimentos mobilizados para analisar as amostras submersas em soluções de ácido sulfúrico foram: variação dimensional linear e variação de massa. A pesquisa busca contribuir para a averiguação da influência da quantidade de cimento e da relação água/cimento para a dosagem do concreto quanto ao ataque por ácido sulfúrico e colaborar quanto a mitigação e exploração do ataque do concreto em ambientes como estações de tratamento de esgoto.

2. Programa experimental

Para avaliar os efeitos danosos do ácido sulfúrico no concreto, foram realizados ensaios em três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm para cada proporção de mistura correspondente. Nesta seção, apresenta-se os materiais utilizados na produção das amostras, bem como os experimentos realizados para investigar os efeitos do ataque por ácido sulfúrico ao concreto.

2.1 Materiais

O cimento utilizado na preparação do concreto foi o cimento Portland CP-II F - 32. Os agregados miúdo e graúdo empregados na composição do traço do concreto foram, respectivamente, areia média natural e brita 1, de calcário, com dimensão máxima característica igual a 19 mm. Todos os agregados foram previamente secos em estufa antes da mistura. A quantidade de argamassa seca utilizada para dosar o concreto foi mantida constante em 53% em massa. A dosagem da água foi ajustada para alcançar um estado fresco do concreto com abatimento de 80 ± 20 mm. Foram preparados concretos com traços pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) em relação à quantidade de cimento.

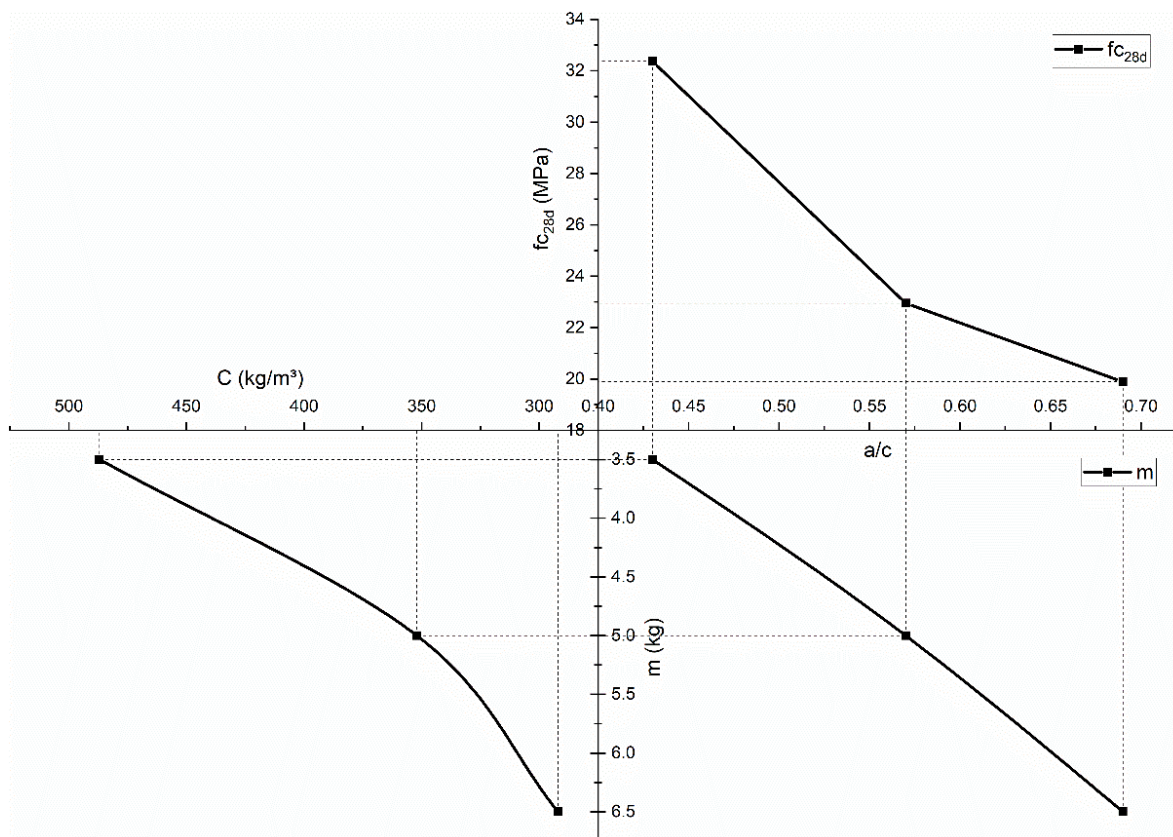
A Tabela 1 apresenta as informações referentes aos nomes atribuídos aos diferentes tipos de concreto produzidos, o consumo de cimento utilizado para cada mistura, os traços em massa, as respectivas relações água/cimento para cada composição, os abatimentos dos concretos no estado fresco (slump test), a massa específica e a resistência à compressão média aos 28 dias.

Tabela 1: Especificações e características dos concretos

Amostra	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa			Relação a/c	Abatimento (slump test)	Massa específica (kg/m³)	f _{c28d} (MPa)
		Cimento	Areia	Brita				
T - Pob.	292	1	3,12	3,38	0,69	90	2.390	19,89
T - Int.	352	1	2,30	2,70	0,57	80	2.210	22,95
T - Rico	487	1	1,48	2,02	0,43	95	2.400	32,37

O diagrama de dosagem obtido com os respectivos traços, conforme a metodologia IPT/EPUSP, pode ser visualizado pela Figura 2.

Figura 2: Diagrama de dosagem do concreto conforme o método IPT/EPUSP



Após a dosagem dos traços, as amostras foram submersas em uma caixa contendo água e hidróxido de cálcio para a cura por um período de 150 dias. Esse tempo de cura foi utilizado, pois, amostras com tempo de cura acima de 90 dias apresentam um elevado grau de hidratação dos compostos cimentícios [9][10]. Após esse tempo, as amostras foram imersas em uma solução aquosa com concentração de 1% de ácido sulfúrico por 240 dias para análise.

2.2 Variação dimensional linear

Para os corpos de prova cilíndricos utilizados na análise, foi necessário realizar um furo no centro de ambas as faces para acoplar os pinos que seriam utilizados para a leitura das variações dimensionais. Os furos para a colocação dos pinos foram feitos após 150 dias de submersão em uma cura com água e hidróxido de cálcio. Os pinos foram fixados com cola epóxi e, adicionalmente, foi aplicado epóxi como pintura em ambas as faces circulares para evitar o ingresso de agente agressivo pelas faces retificadas.

As medições dos corpos de prova foram realizadas com o uso de um pórtilho metálico equipado com um relógio comparador com precisão de 0,001 mm. A Figura 3 ilustra as medições das amostras com o relógio comparador e o aspecto das amostras após a fixação dos pinos com cola epóxi.

Figura 3: (a) Medição dos corpos de prova cilíndricos no relógio comparador e (b) representação após colagem dos pinos com cola epóxi



As leituras da variação dimensional foram realizadas nos dias 1, 5, 9, 16, 23, 44, 61, 190 e 240 dias após a submersão das amostras no composto agressivo, sendo a leitura inicial feita antes da imersão das amostras na solução. Dessa forma, a variação dimensional das amostras foi medida com cuidado, garantindo o posicionamento correto, com a mesma face voltada para cima. Em cada corpo de prova ensaiado, foram registradas duas medidas: uma após o primeiro acoplamento ao pórtico e outra após um giro de 360°.

Atualmente, não há uma normativa específica para avaliar a variação dimensional causada pelo ataque por ácido sulfúrico e como expressar os resultados obtidos. Desse modo, optou-se por verificar a expansão ocorrida nos corpos de prova após a imersão na solução agressiva. A equação utilizada para o cálculo pode ser visualizada na Equação 1:

$$E_r = E_s - E_i \quad (3)$$

Onde: E_r : Expansão resultante, expresso em porcentagem; E_s : Comprimento do corpo de prova submerso em solução agressiva ao longo do tempo de monitoramento da expansão; E_i : Comprimento médio do corpo de prova de concreto antes da submersão em solução. Os resultados obtidos foram interpretados por meio da expansão acumulada ao longo do tempo.

2.3 Variação de massa

A variação percentual de massa em amostras de concreto em relação à massa inicial é uma medida comumente utilizada para avaliar os efeitos da exposição ao ataque ácido. No entanto, essa variação pode ser influenciada pelo tamanho da amostra, pelo tipo de cimento utilizado e pela maneira como os produtos da reação entre a pasta de cimento e o ácido são tratados [11]. Nesse contexto, um estudo conduzido por Silva *et al.* [12] indicou um aumento de 2% na massa de corpos de prova de concreto submersos em uma solução de 1% de ácido sulfúrico.

Para este estudo, as análises de variação de massa foram realizadas em uma balança com precisão de 0,001 g. Os ensaios foram conduzidos nos mesmos dias das medições de variação dimensional linear. Os resultados obtidos foram interpretados utilizando a diferença das médias aritméticas da massa inicial (antes da imersão na solução) e da massa medida (após a submersão em ácido) em porcentagem. Além disso, foi calculada a variação percentual da massa acumulada ao longo do tempo.

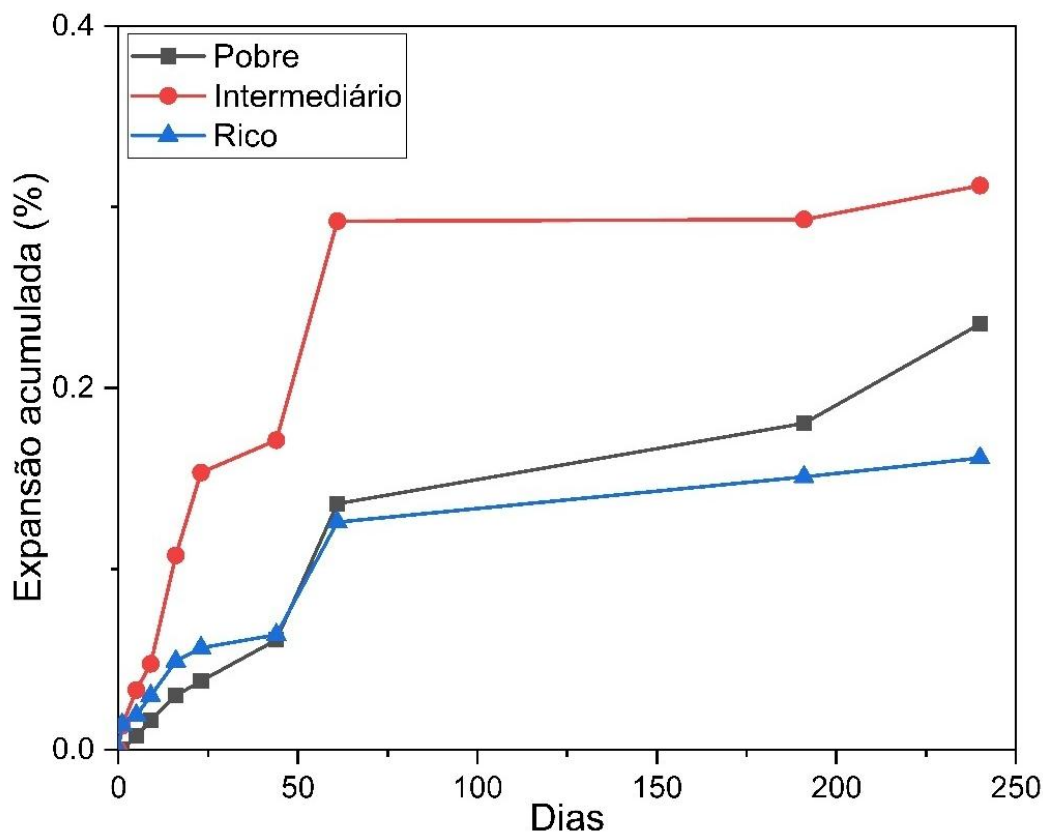
3. Resultados e discussões

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de variação de massa e variação dimensional linear.

3.1 Variação dimensional linear

A expansão acumulada ao longo do tempo das amostras com traço pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) que ficaram submersas na solução de ácido sulfúrico, pode ser observada pela Figura 4.

Figura 4: Expansão acumulada ao longo do tempo para os traços pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) (240 dias em solução aquosa com 1% de H_2SO_4).



Pode-se notar pela Figura 4 que o traço rico apresenta a menor expansão acumulada ao longo do tempo quando comparado com o traço intermediário e pobre. Deve-se observar que até a leitura de 44 dias a expansão se apresenta da seguinte forma: Pobre (1:6,5) < Rico (1:3,5) < Intermediário (1:5,0), porém após 44 dias tem-se outro comportamento passando a ser Rico (1:3,5) < Pobre (1:6,5) < Intermediário (1:5,0).

Isso, provavelmente, se deve ao fato de o traço rico possuir uma menor relação água/cimento, levando a menor permeabilidade para a entrada dos agentes agressivos, diminuindo a sua variação dimensional linear ao longo do tempo. Zou *et al.* [13] verificaram que uma relação água/cimento alta, leva à uma matriz cimentícia mais porosa, permitindo a difusão dos íons para o interior da amostra cimentícia e acelerando a formação de produtos provenientes de interação com agentes agressivos. Além disso, tem-se uma estrutura com menor resistência mecânica, o que facilita com que a cristalização dos produtos expansivos exceda a resistência mecânica da amostra [13].

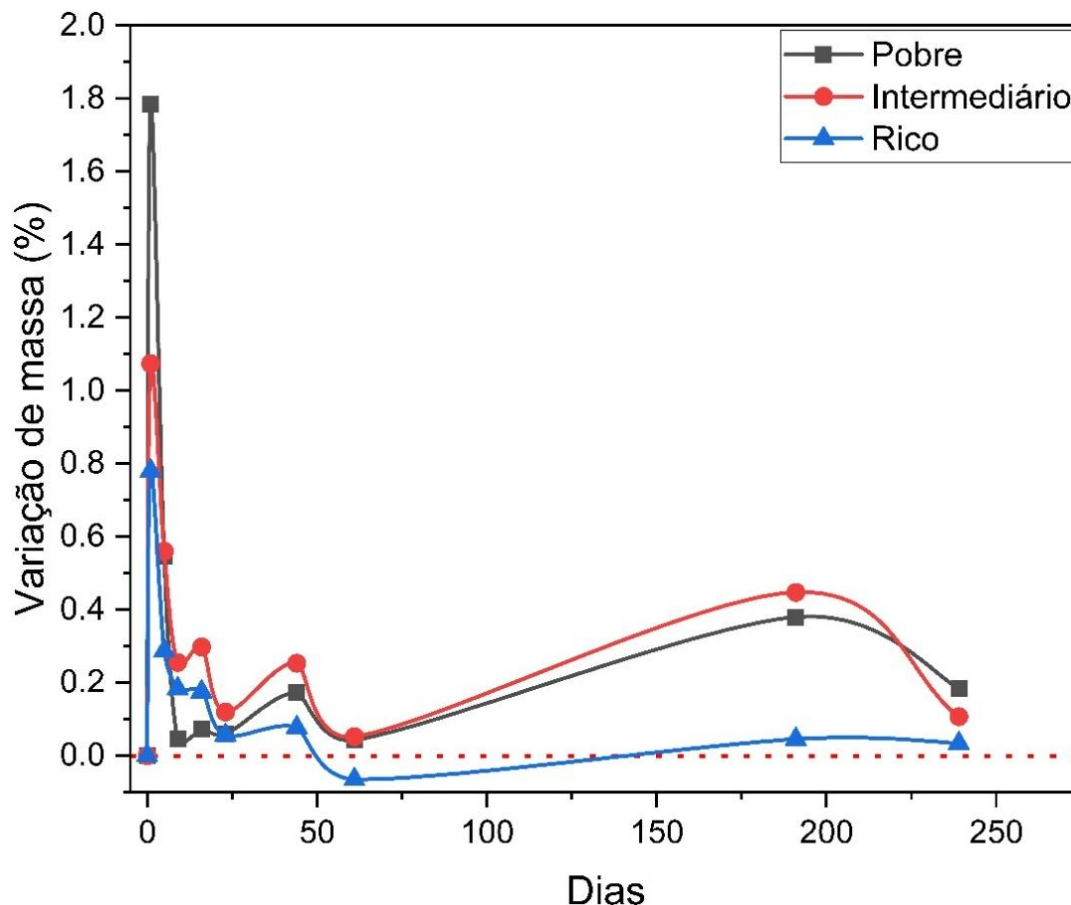
Em relação ao traço intermediário, a sua maior variação dimensional linear pode estar relacionada a maior relação água/cimento que facilita a entrada de agentes agressivos. Assim, haverá mais produtos de hidratação, como por exemplo o hidróxido de cálcio e as fases contendo alumina, essas fases caracterizam-se por serem mais vulneráveis ao ataque de íons sulfato [14]. O hidróxido de cálcio reage com o ácido sulfúrico, formando etringita e gipsita [14][15][16] assim como os compostos contendo alumina reagem com os íons sulfato cristalizando a etringita secundária [14].

Entretanto, aos 240 dias, pode-se constatar que as expansões entre o traço intermediário e pobre começam a se aproximar e possivelmente as linhas podem vir a se cruzar. Isso está atrelado a descalcificação do composto silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O mecanismo de ataque do ácido sulfúrico descalcifica o C-S-H próximo à superfície após o consumo da barreira alcalina de portlandita [13]. O íons C-S-H são responsáveis pela resistência mecânica do compósito cimentício, tendo-se após a sua descalcificação uma matriz pouco resistente a entrada de agentes agressivos e as forças expansivas.

3.2 Variação de massa

A variação de massa de corpos de prova de concreto imersos em uma solução de ácido sulfúrico é um método amplamente aceito para avaliar a resistência do concreto em condições agressivas [17]. A variação de massa (%) das amostras dosadas com traço pobre (1: 6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) ao longo dos 240 dias em que ficaram submersas na solução de ácido sulfúrico pode ser observada na Figura 5.

Figura 5: Variação de massa (%) ao longo do tempo para os traços pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) (240 dias em solução aquosa com 1% de H_2SO_4)



Pode-se verificar, conforme Figura 5, que o traço rico apresenta uma menor variação de massa quando comparado com os demais traços. Inicialmente, as amostras sofrem um pico de variação positiva, que pode estar relacionado à absorção de solução nas amostras cimentícias, sendo o comportamento de aumento de massa correspondente a Rico (1:3,5) < Intermediário (1:5,0) < Pobre (1:6,5). Contudo, ao longo do tempo, as amostras reagem de maneiras diferentes, com os corpos de prova moldados com o maior consumo de cimento (traço rico e intermediário) sofrendo uma menor perda de massa quando comparado com o traço pobre. Essa perda de massa, pode estar possivelmente relacionada a formação de etringita secundária que auxilia na desagregação superficial da matriz cimentícia, assim como em compostos solúveis como gipsita e descalcificação do silicato de cálcio hidratado.

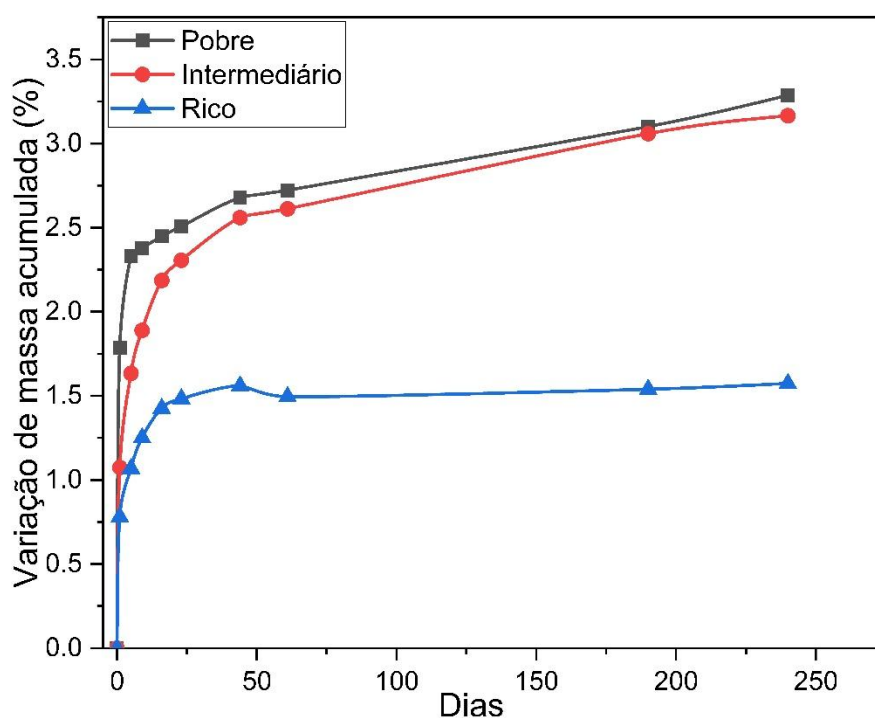
De acordo com o estudo desenvolvido por Jorabchian [17], que investigou a influência de adições pozolânicas (metacaulim) e fíler em corpos de prova de concreto imersos em solução de ácido sulfúrico, verificou-se que as amostras sem adições, devido à maior quantidade de produtos de hidratação presentes, sofreram maior perda de massa. Isso ocorre porque, conforme apontado por Jorabchian et al. [16], os constituintes da pasta com elevado teor de produtos de hidratação reagem com o ácido sulfúrico, formando compostos solúveis que se lixiviam no concreto.

Além disso, Cheng et al. [18] investigaram amostras de concreto com diferentes relações água/cimento (0,37; 0,47 e 0,57) expostas a solução sulfática e observaram que concretos com elevada relação água/cimento passam por dois estágios de variação de massa: um rápido ganho, seguido por acentuada perda. Por outro lado, concretos com relação água/cimento mais baixa (0,37 e 0,47) tendem a passar por três estágios distintos: (1) aumento de massa relacionado à hidratação do cimento e ao início do ataque por íons sulfato; (2) novo aumento de massa devido à formação de produtos de ataque; e (3) perda de massa associada à formação de agentes expansivos, que contribuem para a fissuração.

Dessa forma, a maior perda de massa dos corpos de prova com menor teor de cimento pode ser explicada pela maior relação água/cimento, que facilita a penetração do ácido sulfúrico nos poros do concreto, além da menor quantidade de produtos de hidratação. Comparando os traços pobre e rico, observa-se menor ganho e perda de massa no traço rico.

Essa menor variação de massa no traço rico pode ser visualizada na Figura 6, que apresenta a variação de massa acumulada ao longo do tempo para os traços pobre, intermediário e rico. Verifica-se que as amostras dosadas com os traços pobre e intermediário apresentaram maior variação de massa acumulada em relação ao traço rico. Aos 240 dias, essa variação foi 209% e 201% superior à do traço rico, respectivamente.

Figura 6: Variação de massa acumulada ao longo do tempo para os traços pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) (240 dias em solução aquosa com 1% de H_2SO_4)



Ao analisar a Figura 4 (expansão) e a Figura 6 (variação de massa acumulada), constata-se que o concreto com traço rico apresentou a menor variação dimensional linear, bem como a menor variação de massa. O traço intermediário, por sua vez, exibiu maior expansão acumulada (Figura 4), enquanto a variação de massa acumulada (Figura 6) aumentou significativamente, aproximando-se do comportamento observado no traço pobre.

O traço pobre apresentou uma expansão acumulada inicialmente menor, porém crescente após 44 dias, além de uma variação de massa acumulada superior às demais. Esse comportamento observado nos traços intermediário e pobre pode estar relacionado à porosidade: no traço intermediário, os poros menores favorecem a geração de tensões internas causadas pela formação de produtos expansivos, isso explica a causa de sua expansão ser maior do que o observado no traço pobre. Entretanto no traço pobre, os poros maiores facilitam o avanço contínuo da degradação e o aumento da variação dimensional ao longo do tempo, em razão da reação dos produtos de hidratação com o ácido sulfúrico.

4. Considerações finais

A partir dos resultados obtidos durante a fase experimental do presente estudo, podem ser traçadas as seguintes conclusões:

1. Avaliando apenas os dados obtidos durante o ensaio de variação dimensional linear, foi possível observar uma maior variação dimensional nas amostras nos concretos com um consumo intermediário de cimento. À vista disso, no concreto pobre teve-se inicialmente uma expansão menor, porém ao longo do tempo existiu tendência de aumento da expansão de forma mais acelerada com a evolução do ataque ácido;
2. Avaliando os dados de variação de massa (%), pode-se verificar uma variação de massa menor para os traços ricos. Enquanto o traço pobre e intermediário houve uma variação de massa acumulada maior. A possível variação de massa acumulada menor observada para o traço rico pode estar relacionada a relação água/cimento baixa e ao alto consumo de cimento, o que contribui para uma matriz densa e compacta, reduzindo a permeabilidade;
3. Conclui-se que os concretos com maior quantidade de cimento expostos a ambientes agressivos com ácido sulfúrico indicaram uma menor expansão linear e uma menor variação de massa acumulada (%). Isso indica, uma menor tendência à formação de fissuras devido a menor expansão. Além disso, essa menor variação de massa acumulada provavelmente está relacionada com a baixa permeabilidade da matriz cimentícia, a menor relação água/cimento e ao alto consumo de cimento que densifica o compósito e contribui para um composto mais estável frente ao ataque do ácido sulfúrico.

5. Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão às agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pela bolsa e apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná (UFPR) campus Curitiba, Centro Politécnico, ao Departamento de Construção Civil (DCC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC), assim como à Cia. de Cimentos Itambé, pela doação de materiais para a pesquisa.

Referências

- [1] SECRETARIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. 2023.
- [2] Vaz, A. J. A importância da rede coletora de esgoto na promoção da qualidade socio-ambiental. 2017.
- [3] O'Connell, M.; McNally, C.; Richardson, M. G (2010) Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 7, p. 479-485.
- [4] Gobbi, A. et al. (2023) Deterioração do concreto em estações de tratamento de esgoto: caracterização do processo e meios de mitigação. *CONCRETO & Construções*-ISSN 1809-7197, v. 110, n. 110, p. 36-40.
- [5] Wu, M. et al. (2020) Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*, v. 239, p. 117813.
- [6] Coni, G. A. et al. (2022) Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto. *Revista ALCONPAT*, v. 12, n. 2, p. 279-295.
- [7] House, M.; Weiss, W. J. (2014) Review of microbially induced corrosion and comments on needs related to testing procedures. *4th International Conference on the Durability of Concrete Structures*. Purdue University, West Lafayette, IN, USA
- [8] Yuan, H. et al. (2013) Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 267-277.
- [9] Cai, X. et al. (2016) Macro-and micro-characteristics of cement binders containing high volume fly ash subject to electrochemical accelerated leaching. *Construction and Building Materials*, v. 116, p. 25-35.
- [10] Liang, T.; Zhou, J.; Wu, Q. (2023) Experimental investigation on leaching behavior of ultra-high-performance concrete submitted to a flow environment. *Construction and Building Materials*, v. 372, p. 130843.
- [11] Chang, Z.-T. et al. (2005) Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 8, p. 1486-1494.

- [12] Silva, M. S. A. *et al.* (2018) Influência do ataque por ácido sulfúrico na variação dimensional de corpos de prova de argamassa de diferentes tipos de cimentos. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 14, n. 1.
- [13] Zou, D. *et al.* (2024) Mechanistic insights into two-stage expansion of concrete under external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 446, p. 138027.
- [14] Al-Amoudi, O. S. B. (2002) Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*, v. 24, n. 3-4, p. 305-316.
- [15] Munhoz, G. S. *et al.* (2022) The influence of fly ash and neutral sodium silicate on concretes submitted to sulfuric acid attack. *Engineering Failure Analysis*, v. 141, p. 106673.
- [16] Dobrolski, M. E. G. *et al.* (2019) Influência do silicato de sódio neutro na degradação de pastas de cimento Portland submetidas ao ataque por ácido sulfúrico. *Revista Técnico-Científica CREA-PR*, n. 21.
- [17] Joorabchian, S. M. Durability of concrete exposed to sulphuric acid attack. Ryerson University, Toront, 2010;
- [18] Cheng, Hanbin *et al.* (2021) Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions. *Construction and Building Materials*, v. 293, p. 123550.