ANÁLISE DA VIDA ÚTIL CONCRETO ARMADO SOB EXPOSIÇÃO AO SULFATO DE AMÔNIO

SERVICE LIFE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE EXPOSED TO AMMONIUM SULFATE

ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DEL HORMIGÓN ARMADO EXPUESTO AL SULFATO DE AMONIO

Monalisa Coelho Martins[1]
Marcelo Henrique Farias de Medeiros[2]

Resumo

A exposição do concreto armado ao sulfato de amônio pode comprometer significativamente sua durabilidade e reduzir sua vida útil. Este estudo teve como objetivo analisar matematicamente a vida útil de concretos armados expostos ao sulfato de amônio, considerando diferentes estratégias de proteção, constituídas pela adição de sílica ativa (SA) e pela aplicação dos tratamentos de superfície TS28 e TS40. A estimativa da vida útil foi realizada por meio de modelos matemáticos, considerando como critérios de desempenho a perda de seção das armaduras e a abertura de fissuras no concreto. Foram empregados os modelos propostos por Andrade (1993) e Stewart (1998). Os resultados demonstraram aumento da vida útil estimada com a utilização das estratégias de proteção, destacando-se o tratamento TS40. Nas amostras sem sílica ativa, o tempo para atingir 10% de perda de seção aumentou de 7,3 para 13,0 anos com TS40, segundo Andrade, e de 14,4 para 25,8 anos, segundo Stewart. A associação entre sílica ativa e TS40 apresentou o melhor desempenho, atingindo 26,8 e 53,1 anos para 10% de perda de seção, conforme os modelos de Andrade e Stewart, respectivamente. Para o limite de abertura de fissura de 0,2 mm, essa mesma condição apresentou tempos estimados de 3,5 e 6,8 anos. Os resultados evidenciam que a modelagem matemática permite estimar e comparar a vida útil de diferentes sistemas de proteção, demonstrando a contribuição da sílica ativa e, principalmente, do tratamento TS40 para o aumento da durabilidade do concreto armado exposto ao sulfato de amônio.

Palavra-chave: vida útil; sulfato de amônio; tratamento de superfície; concreto armado.

Abstract

The exposure of reinforced concrete to ammonium sulfate can significantly compromise its durability and reduce its service life. This study aimed to mathematically analyze the service life of reinforced concrete exposed to ammonium sulfate, considering different protection strategies, including silica fume (SF) addition and the application of TS28 and TS40 surface treatments. Service life was estimated using mathematical models, considering reinforcement cross-section loss and concrete cracking as performance criteria. The models proposed by Andrade (1993) and Stewart (1998) were applied. The results demonstrated an increase in the estimated service life with the use of protective strategies, with TS40 showing the best performance. For specimens without silica fume, the estimated time to reach 10% reinforcement cross-section loss increased from 7.3 to 13.0 years with TS40 according to Andrade's model, and from 14.4 to 25.8 years according to Stewart's model. The combination of silica fume and TS40 showed the best overall performance, reaching 26.8 and 53.1 years for 10% cross-section loss according to the Andrade and Stewart models, respectively. For a crack width limit of 0.2 mm, the same condition resulted in estimated times of 3.5 and 6.8 years. The results demonstrate that mathematical modeling enables the estimation and comparison of the service life of different protection systems, highlighting the contribution of silica fume and, particularly, TS40 surface treatment to improving the durability of reinforced concrete exposed to ammonium sulfate.

Keywords: service life; ammonium sulfate; surface treatment; reinforced concrete.

[1] Universidade Federal do Paraná. Uninter. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9638-6205 Lattes: http://lattes.cnpq.br/3077308550665148. E-mail: monalisa.m@uninter.com
[2] Universidade Federal do Paraná. ORCID https://orcid.org/0000-0003-3112-9715. Lattes http://lattes.cnpq.br/2049752365695485 E-mail: mmedeiros.ufpr@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.22169/cadprog.v6n11.4120

Resumen

La exposición del hormigón armado al sulfato de amonio puede comprometer significativamente su durabilidad y reducir su vida útil. Este estudio tuvo como objetivo analizar matemáticamente la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas al sulfato de amonio, considerando diferentes estrategias de protección, constituidas por la adición de sílice activa (SA) y la aplicación de los tratamientos superficiales TS28 y TS40. La estimación de la vida útil se realizó mediante modelos matemáticos, considerando como criterios de desempeño la pérdida de sección de las armaduras y la apertura de fisuras en el hormigón. Se emplearon los modelos propuestos por Andrade (1993) y Stewart (1998). Los resultados demostraron un aumento de la vida útil estimada con la utilización de las estrategias de protección, destacándose el tratamiento TS40. En las muestras sin sílice activa, el tiempo necesario para alcanzar 10% de pérdida de sección aumentó de 7,3 a 13,0 años con TS40, según Andrade, y de 14,4 a 25,8 años, según Stewart. La combinación de sílice activa y TS40 presentó el mejor desempeño, alcanzando 26,8 y 53,1 años para 10 % de pérdida de sección, según los modelos de Andrade y Stewart, respectivamente. Para el límite de apertura de fisuras de 0,2 mm, esta misma condición presentó tiempos estimados de 3,5 y 6,8 años. Los resultados evidencian que la modelización matemática permite estimar y comparar la vida útil de diferentes sistemas de protección, demostrando la contribución de la sílice activa y, principalmente, del tratamiento TS40 al aumento de la durabilidad del hormigón armado expuesto al sulfato de amonio.

Palabras clave: vida útil; sulfato de amonio; tratamiento superficial; hormigón armado.

1 Introdução

O Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial de consumo de fertilizantes, representando aproximadamente 8% do consumo global (Secretaria de Assuntos Estratégicos, 2020). Nesse contexto, o setor de fertilizantes apresenta significativa relevância socioeconômica, envolvendo diferentes segmentos da economia, especialmente aqueles relacionados à logística, armazenamento e comercialização desses produtos (Oliveira; Malagolli; Cella, 2019).

Estruturas de concreto armado utilizadas em instalações destinadas ao armazenamento e processamento de fertilizantes estão sujeitas à ação de agentes agressivos capazes de comprometer sua durabilidade e vida útil. Entre esses agentes, destacam-se os sulfatos provenientes das matérias-primas armazenadas (Corsini, 2013). Embora grande parte das pesquisas esteja concentrada nos efeitos do sulfato de sódio (Na_2SO_4) e do sulfato de magnésio ($MgSO_4$), o sulfato de amônio ($(NH_4)_2SO_4$) apresenta elevada agressividade e ainda é relativamente pouco explorado na literatura (Amin *et al.*, 2017).

O ataque por sulfato de amônio envolve mecanismos de degradação associados à formação de produtos expansivos, como gipsita e etringita tardia, capazes de gerar tensões internas e fissuração. Adicionalmente, a acidificação da matriz cimentícia favorece a dissolução dos produtos de hidratação e a redução do pH, intensificando a deterioração do concreto e comprometendo seu desempenho ao longo do tempo (Monzón *et al.*, 2018; Landa-Sánchez *et al.*, 2020).

Diante dessas condições de exposição, diferentes estratégias podem ser empregadas para aumentar a durabilidade do concreto. A utilização de adições minerais pode modificar a

estrutura de poros e reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia (Cyr, 2013). Da mesma forma, tratamentos de superfície podem restringir a entrada de água e agentes agressivos, contribuindo para a proteção do concreto e para o prolongamento de sua vida útil.

A avaliação da vida útil dessas estruturas pode ser realizada por meio de modelos matemáticos capazes de representar a evolução da degradação ao longo do tempo. Entre as abordagens disponíveis, os modelos de Andrade (1993) e Stewart (1998) permitem estimar a perda de seção das armaduras a partir de parâmetros relacionados à intensidade do processo de deterioração. Complementarmente, modelos de previsão da abertura de fissuras possibilitam estabelecer critérios associados ao desempenho e à necessidade de intervenção na estrutura. Essas ferramentas permitem comparar diferentes condições de proteção e subsidiar estratégias voltadas à gestão da durabilidade (Félix; Carrazedo, 2021; Peixoto; Félix, 2020).

Nesse contexto, a aplicação de modelos preditivos constitui uma ferramenta importante para estimar o comportamento de estruturas submetidas a ambientes agressivos, permitindo avaliar o efeito de diferentes soluções de proteção sobre sua longevidade e contribuindo para o planejamento de intervenções ao longo do ciclo de vida.

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo analisar matematicamente a vida útil de concretos armados expostos ao sulfato de amônio, considerando a perda de seção das armaduras e a abertura de fissuras como critérios de desempenho, bem como avaliar a influência da adição de sílica ativa e dos tratamentos de superfície TS28 e TS40 na ampliação da vida útil estimada das estruturas.

2 Programa experimental

O planejamento experimental foi desenvolvido para obtenção dos parâmetros necessários à análise da vida útil de corpos de prova de concreto armado submetidos à solução saturada de cal e à solução de sulfato de amônio. O comportamento das amostras foi monitorado por meio da técnica de resistência de polarização linear (RPL), cujos resultados foram utilizados como dados de entrada nos modelos matemáticos empregados para estimar a perda de seção das armaduras e a abertura de fissuras ao longo do tempo.

2.1 Materiais

O cimento utilizado nas dosagens foi o CPV-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial), que na sua composição possui basicamente clínquer, gipsita e material carbonático.

Para a utilização do cimento CPV – ARI em ambiente com sulfato levou- se em consideração os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018), além de cimentos com baixo teor de C3A.

As propriedades físico-químicas do cimento CPV-ARI estão descritas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Caracterização do cimento CPV-ARI

FINURA		TEMPO DE PEGA		MASSA ESPECÍFICA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
BLAINE (cm^2/g)	#200 (%)	INICIAL (min.)	FINAL (min.)	(g/cm^3)	1 DIA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
4464	0.08	196	243	3.13	24.3	39.2	45.7	54.1

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

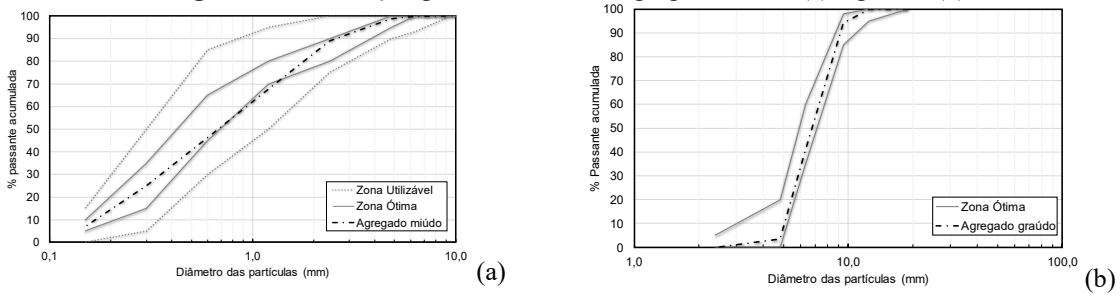
Tabela 2: Composição química do cimento CPV-ARI

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	CaO livre	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)
CIMENTO	60.97	18,77	4,36	3,5	3,12	2,93	0,9	0,77	3,55

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O agregado miúdo foi uma areia natural de quartzo com módulo de finura de 2,66 e massa específica de 2,38 g/cm³, conforme NBR 52 (ABNT, 2009). O agregado graúdo utilizado foi uma brita basáltica com diâmetro máximo de 12,5 mm, massa específica de 2,74 g/cm³ e 0,62% de absorção de água, conforme a NBR 53 (ABNT, 2006). Os agregados miúdo e graúdo possuem teor de materiais pulverulentos igual a 2,38% e 0,53%, respectivamente, conforme a NBR 46 (ABNT, 2003). A distribuição granulométrica dos agregados é indicada na figura 1, sendo ambos os agregados localizados predominantemente na zona ótima de utilização.

Figura 1: Distribuição granulométrica do agregado miúdo (a) e graúdo (b).



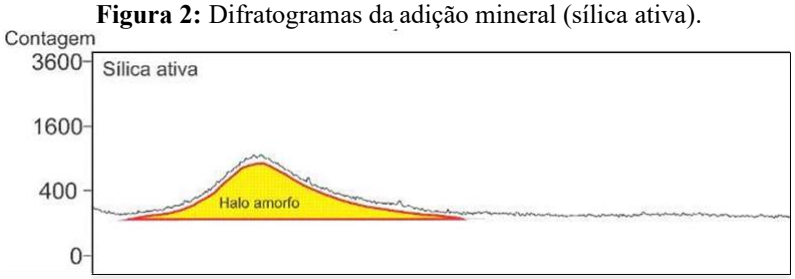
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram desenvolvidas amostras com substituição parcial de cimento por sílica ativa (15% da massa de cimento), além das amostras de referência.

As análises mineralógicas foram realizadas por difração de raios-X, na sílica ativa, utilizando um difratômetro Bruker D8 Advanced Eco (λ = 1,54 Å, 40 kV, 25 mA), com

varredura de 5° a 70°, passo de 0,02° a cada 0,1 s. A interpretação foi feita com o software EVA e o banco COD. A composição química foi obtida por espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), com espectrômetro Axios Max. A figura 2 mostra os difratogramas das adições minerais pozolânicas da sílica ativa.

Figura 2: Difratogramas da adição mineral (sílica ativa).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foi utilizado, como alternativa de elevar a durabilidade frente o ataque de sulfato de amônio, dois tratamentos de superfície, TS40 e TS28. Cada produto possui diferentes concentrações de SiO2. As características dos produtos estão apresentadas na tabela 3, disponibilizada pelo fabricante dos produtos.

Tabela 3: Propriedades físico-químicas dos produtos de tratamento

CARACTERÍSTICAS	SILIETHYL TS28	SILIETHYL TS40
Composição química	Orto silicato de tetraetila	Poli etoxi siloxano
Aspecto	Claro	Claro
Densidade (g/cm³) 20° C	0,93 a 0,94	1,055 a 1,065
Percentual de SiO2	mínimo 28	mínimo 40
Viscosidade a 25° C (cps)	Aprox. 1	Aprox. 5
Índice de refração a 25 C	1,381 a 1,383	1,396 a 1,398

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O produto Siliethyl TS28 é mais puro que o Siliethyl TS40, além disso, o TS40 é parcialmente hidrolisado e possui maior concentração de sílica em relação ao TS28 (Hergrand, 2019).

2.2 Métodos

A corrosão das armaduras ao longo do tempo promove a redução da seção transversal do aço e o surgimento de fissuras no concreto, o que compromete a durabilidade e pode exigir intervenções para a manutenção da estrutura. Para estimar esses efeitos, foram empregados modelos matemáticos baseados na densidade de corrente de corrosão (i_{corr}). Esses dados foram retirados dos ensaios eletroquímicos da tese realizados por Martins, 2022.

O comportamento das amostras foi monitorado por meio da técnica de resistência de polarização linear (RPL), cujos resultados foram utilizados como dados de entrada nos modelos matemáticos empregados para estimar a perda de seção das armaduras e a abertura de fissuras ao longo do tempo.

2.2.1 Análise de vida útil

Neste estudo, utilizaram-se dois modelos distintos para a previsão da perda de seção das armaduras: o modelo proposto por Andrade (1993) e o modelo desenvolvido por Stewart (1998). Além disso, adotou-se o modelo de previsão da abertura de fissuras descrito no Eurocode 2 (European Prestandard, 1992).

A aplicação desses modelos teve como finalidade demonstrar, de forma estimativa, os impactos associados aos valores de densidade de corrente de corrosão obtidos por meio dos ensaios de resistência de polarização linear (RPL).

O modelo de Andrade (1993) para perda de seção é apresentado na Equação 1 onde φt é o diâmetro residual da armadura (em mm), φi é o diâmetro inicial da armadura (em mm), icorr é a corrente de corrosão (em μA/cm²) e t é o tempo (em anos).

$$\varphi_t = \varphi_i - 0{,}023\, i_{corr}\, t \qquad \text{(Equação 1)}$$

A Equação 2 apresenta o modelo proposto por Stewart (1998) para perda de seção. Nesse modelo, a diferença para a Equação 4 está na constante matemática.

$$\varphi_t = \varphi_i - 0{,}016\, i_{corr}\, t \qquad \text{(Equação 2)}$$

Na Equação 3 é descrito o modelo utilizado para o cálculo da previsão de abertura de fissuras.

$$w = 0{,}05 + \beta\,[P_x - P_{x0}] \text{ para } w \leq 1{,}0 \text{ mm} \qquad \text{(Equação 3)}$$

Onde,

- w é a abertura de fissuras do concreto (em mm);
- β é o coeficiente que depende da posição da barra (10 para armadura superior e 12,5 para armadura inferior);
- P_x é a penetração do ataque (em mm);

- P_{X0} é a penetração do ataque para iniciação da fissura (em mm).

Para o cálculo de P_x utiliza-se a Equação 4 dada por CONTECVET IN30902I (2001).

$$P_x = (\varphi i - \varphi t)/2 \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde,

- φi é o diâmetro original da barra (em mm);
- φt é o diâmetro da barra no tempo t (em mm).

Para o cálculo de P_{X0} utiliza-se a Equação 5 dada por Uomoto e Misra (1987), citado em CONTECVET IN30902I (2001).

$$P_{x0} = (83{,}8 + 7{,}4\ c/\varphi i - 22{,}6\ f_{c,sp})10^{-3} \text{ para } P_{x0} \geq 0 \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde,

- c é o cobrimento da barra de aço (em mm);
- φi é o diâmetro original da barra de aço (em mm);
- fc,sp é a resistência a tração do concreto (em MPa).

A Equação 6 apresenta o cálculo da resistência do concreto à tração indireta ($f_{ct,sp}$), conforme Réus (2022).

$$f_{c,sp} = 0,\ 333\ f_{ck}^{2/3} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde,

- f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto (em MPa).

Os valores de resistência à compressão axial utilizados neste estudo foram obtidos da tese realizados por Martins, 2022, a partir de ensaios com corpos de prova cúbicos, com arestas de 4 cm, realizados aos 28 dias. Para compatibilização com o modelo matemático adotado, que exige resultados com corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm, aplicou-se um fator de correção de 0,55. Esse fator foi determinado com base na razão entre os resultados de resistência à compressão de corpos cilíndricos e cúbicos, obtidos em ensaios realizados paralelamente por outro pesquisador, utilizando a mesma proporção de mistura deste estudo. Assim, o fator de correção foi aplicado uniformemente a todas as séries analisadas.

3 Resultados

Após as análises dos ensaios eletroquímicos foi estabelecido os valores da corrente de corrosão aos 365 dias para aplicar nos modelos matemáticos. A tabela 4 mostra os valores de entrada utilizados nos cálculos da perda de seção e tempo de abertura de fissura.

Tabela 4: Valores utilizados para os cálculos de perda de seção da armadura e tempo de abertura de fissuras.

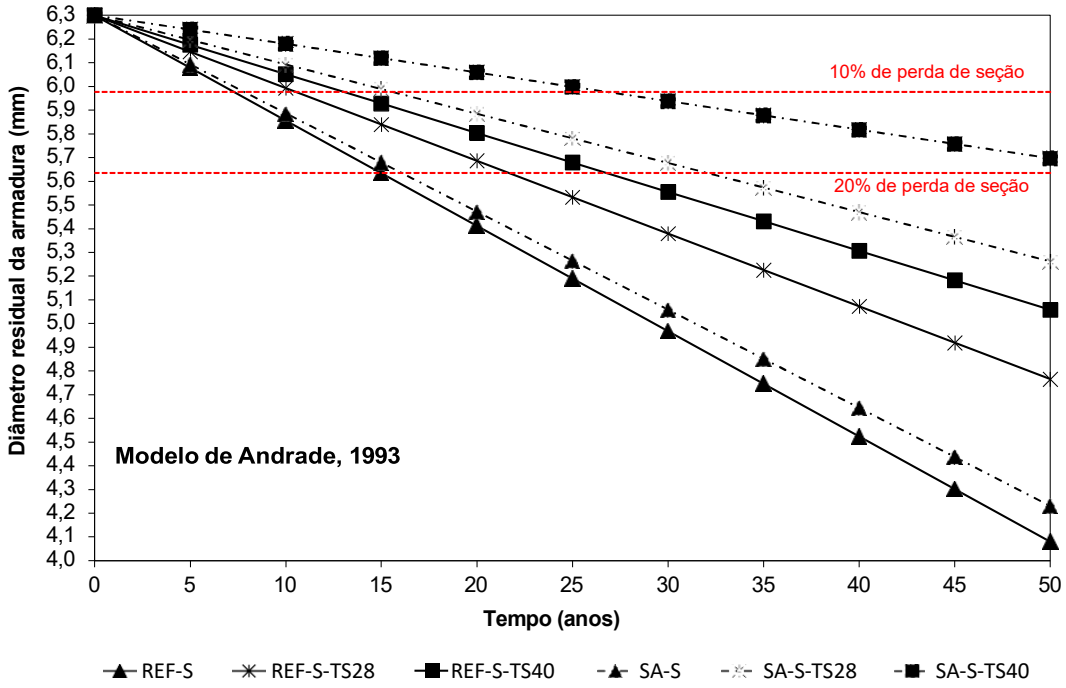
Amostras	Diâmetro inicial da barra (mm)	Cobrimento (mm)	β Considerando a posição inferior da barra	f_{ck} aos 28 dias (MPa)	i_{corr} aos 365 dias (μA/cm²)
REF-S	6,3	17	12,5	46	1,932
REF-S-TS28	6,3	17	12,5	33	1,335
REF-S-TS40	6,3	17	12,5	33	1,080
SA-S	6,3	17	12,5	45	1,800
SA-S-TS28	6,3	17	12,5	45	0,903
SA-S-TS40	6,3	17	12,5	45	0,525

Fonte: Martins, 2022.

3.1. Análise da perda de seção do aço

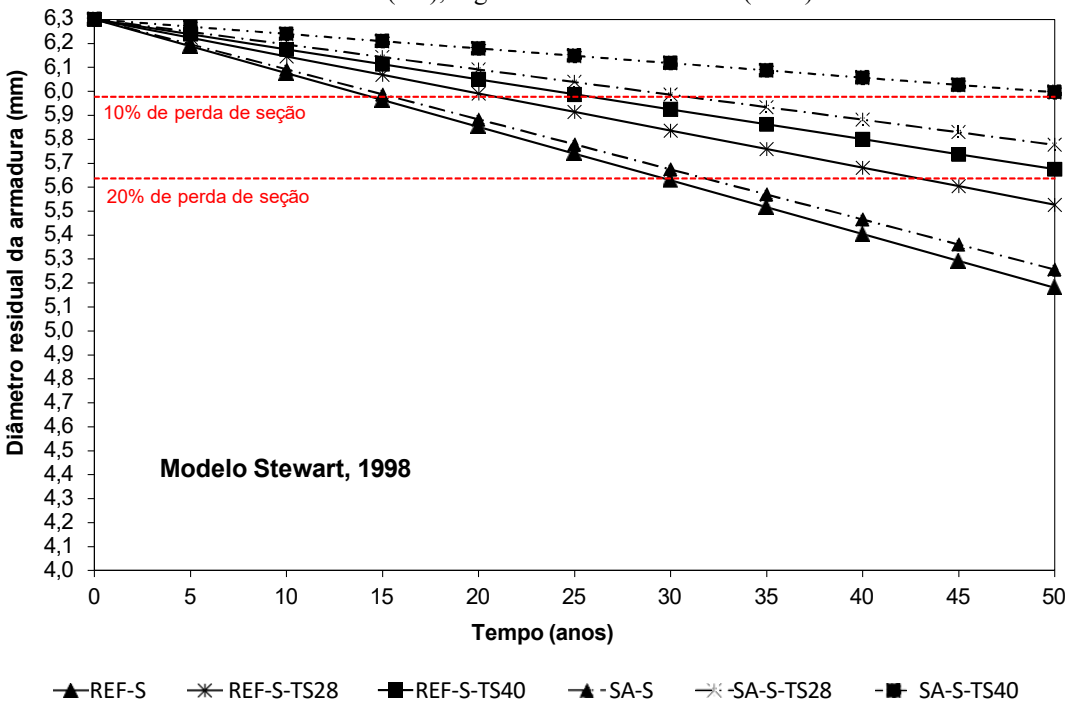
Os resultados dos cálculos de perda de seção da armadura ao longo do tempo são apresentados na figura 3, para o modelo de Andrade (1993), e na Figura 4, para o modelo de Stewart (1998).

Figura 3: Perda de seção do aço da armadura ao longo do tempo das amostras de referência (REF) e sílica ativa (SA), segundo o modelo Andrade (1993).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 4: Perda de seção do aço da armadura ao longo do tempo das amostras de referência (REF) e sílica ativa (SA), segundo o modelo Stewart (1998).

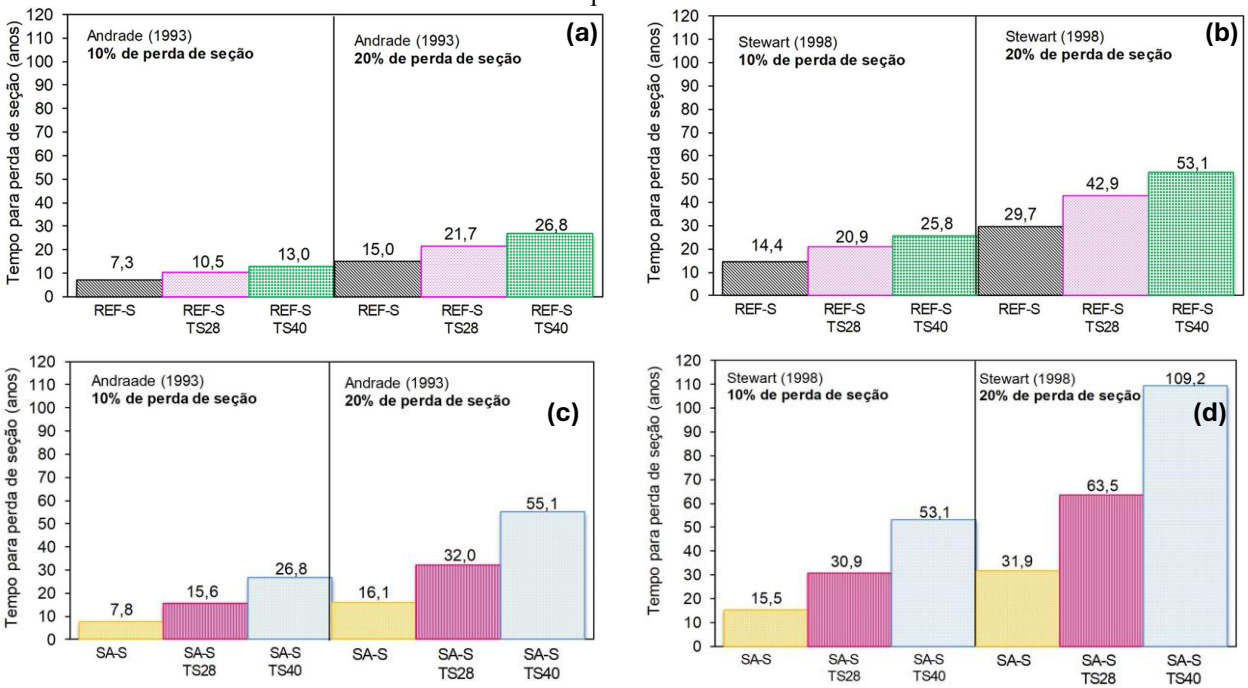


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Ao analisar as Figuras 3 e 4, observa-se que o modelo de Andrade (1993) prevê uma perda de seção da armadura mais acentuada ao longo do tempo, caracterizando-se como mais conservador. Destaca-se, ainda, a relevância da estimativa dos tempos necessários para que ocorram perdas de 10% e 20% da seção de aço, uma vez que esses marcos podem subsidiar decisões sobre eventuais intervenções na estrutura de concreto armado. Assim, a seguir são apresentados os tempos correspondentes a essas perdas.

Na Figura 5 são apresentados os resultados para o modelo de Andrade (1993) e, para o modelo de Stewart (1998). Na figura 5A e 5B apresentam os resultados para as amostras REF, sem adição mineral, apenas o uso de TS28 e TS40. Já a figura 5C e 5D apresentam os resultados para as amostras SA e com o uso de TS28 e TS40.

Figura 5: Perda de 10% e 20% da seção do aço segundo o modelo de Andrade (1993) e Stewart (1998). (a) e (b) amostras REF, sem adição, com uso de tratamento de superfície; (c) e (d) amostras SA, com uso de tratamento de superfície.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise das figuras 5A e 5B indica que o sulfato de amônio pode provocar a perda de 10% da seção da armadura em 7,3 anos, segundo o modelo de Andrade (1993), e em 14,4 anos, conforme o modelo de Stewart (1998), para as amostras sem tratamento (REF-S). Observa-se, ainda, que os tratamentos de superfície aumentaram significativamente o tempo para a perda de 10% da seção. O tratamento TS40 apresentou o melhor desempenho, com 13,0 anos (78,1% superior à série REF-S) no modelo de Andrade (1993) e 25,8 anos (79,2% superior) no modelo de Stewart (1998). O tratamento TS28 indicou 10,5 anos (43,8% superior) para o modelo de Andrade (1993) e 20,9 anos (45,1% superior) para o modelo de Stewart (1998). Para a perda de 20% da seção, observa-se o mesmo comportamento qualitativo.

Destaca-se, porém, que, se adotado o critério de intervenção com base nessa perda, o tratamento TS40 permite um tempo de 53,1 anos, segundo o modelo de Stewart (1998), enquanto a amostra REF-S apresenta 29,7 anos. Considerando que a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece uma vida útil mínima de 50 anos para estruturas de concreto armado, evidencia-se que o tratamento TS40 pode contribuir significativamente para o atendimento desse requisito, ao contrário da amostra sem tratamento.

Analisando-se as figuras 5C e 5D, observa-se que a adição de sílica ativa promoveu uma melhoria significativa no desempenho das amostras, quando comparadas àquelas sem a incorporação desse material. Considerando-se o parâmetro de tempo de vida útil estabelecido pela NBR 6118, fixado em 50 anos, verifica-se que, com o tratamento TS40, as amostras superam esse valor, apresentando mais de 50 anos para a ocorrência de 10% de perda de seção, conforme o modelo de Stewart (1998). Esse mesmo comportamento é observado para a perda de 20% da seção, segundo ambos os modelos analisados. Destaca-se, ainda, que, nas amostras sem sílica ativa, tal desempenho superior foi registrado apenas para a perda de 20% no modelo de Stewart (1998).

Na análise qualitativa dos resultados para a perda de 10% da seção, verifica-se que a amostra com tratamento TS40 apresentou um tempo de 26,8 anos — valor 243,6% superior ao obtido pela série SA-S, que foi de 7,8 anos — segundo o modelo de Andrade (1993). Para o modelo de Stewart (1998), a amostra com TS40 apresentou um tempo de 53,1 anos, correspondente a um acréscimo de 242,6% em relação à série SA-S (15,5 anos). A amostra com tratamento TS28, por sua vez, apresentou 15,6 anos (um incremento de 100,0% em relação à série SA-S) no modelo de Andrade (1993) e 30,9 anos (99,3% superior à série SA-S) no modelo de Stewart (1998).

Para a perda de 20% da seção, os resultados apresentaram comportamento semelhante, com destaque para o maior tempo registrado: 109,2 anos, correspondente à amostra com tratamento TS40, avaliada segundo o modelo de Stewart (1998).

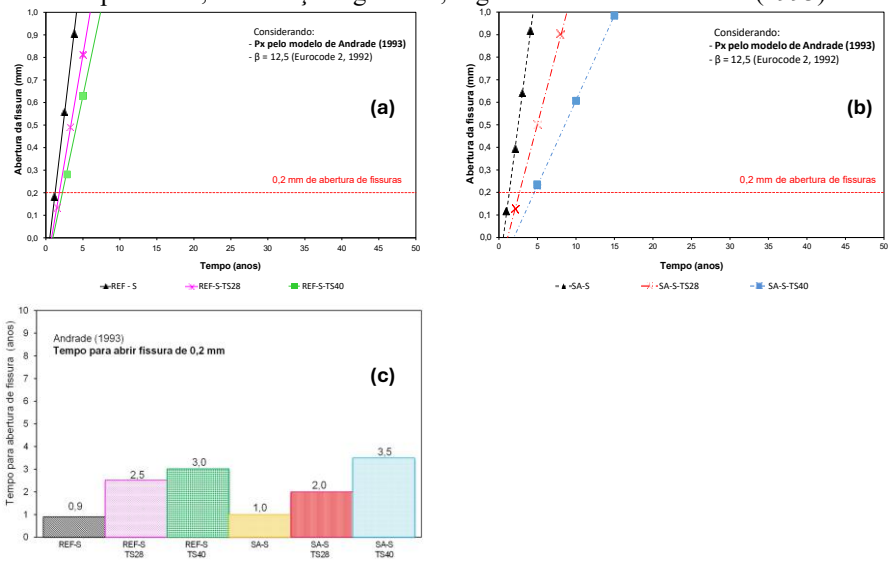
3.1 Avaliação da abertura de fissuras

No que se refere à abertura de fissuras, a NBR 6118:2014 estabelece que, para armaduras passivas, desde que os valores de abertura não ultrapassem a faixa de 0,2 mm a 0,4 mm, não há impacto significativo no processo de corrosão. Para armaduras ativas, contudo, a possibilidade de corrosão sob tensão impõe limites mais restritivos, diretamente relacionados à classe de agressividade ambiental. Neste estudo, adotou-se a Classe de Agressividade Ambiental IV, a qual define um limite máximo de abertura de fissura de 0,2 mm. Ressalta-se que, embora os procedimentos de cálculo devam assegurar que as estimativas de abertura de fissura atendam a esses limites, é reconhecido que, na prática, as fissuras reais podem eventualmente exceder os valores estimados (NBR 6118:2014).

Na figura 6 são apresentados os resultados referentes ao tempo de abertura de fissuras das amostras REF (figura 6A) e amostras com SA (figura 6B), expostas à solução de sulfato

de amônio. A figura 6C apresenta os tempos de abertura de fissura para 0,2 mm, para todas as amostras. A modelagem foi realizada com base nos dados de entrada aplicados ao modelo matemático proposto por Andrade (1993).

Figura 6: Tempo para abertura de fissura no concreto armado em amostras REF, SA, com e sem tratamento de superfície e, em solução agressiva, segundo o modelo Andrade (1993).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise dos resultados apresentados na figura 8 evidencia que, ao comparar os diferentes tratamentos de superfície, o tempo para a abertura de fissura de 0,2 mm nas amostras submetidas ao tratamento TS40 foi superior em relação às demais condições (sem tratamento e com tratamento TS28).

Comparando-se as amostras com adição de sílica ativa às amostras sem essa adição, observa-se que, de modo geral, a presença de sílica ativa proporcionou um aumento no tempo de abertura de fissuras. A única exceção refere-se ao tratamento TS28, em que a amostra sem sílica ativa (REF-S-TS28) apresentou tempo de abertura de 2,5 anos, superior ao da amostra com sílica ativa (SA-S-TS28), que apresentou 2,0 anos.

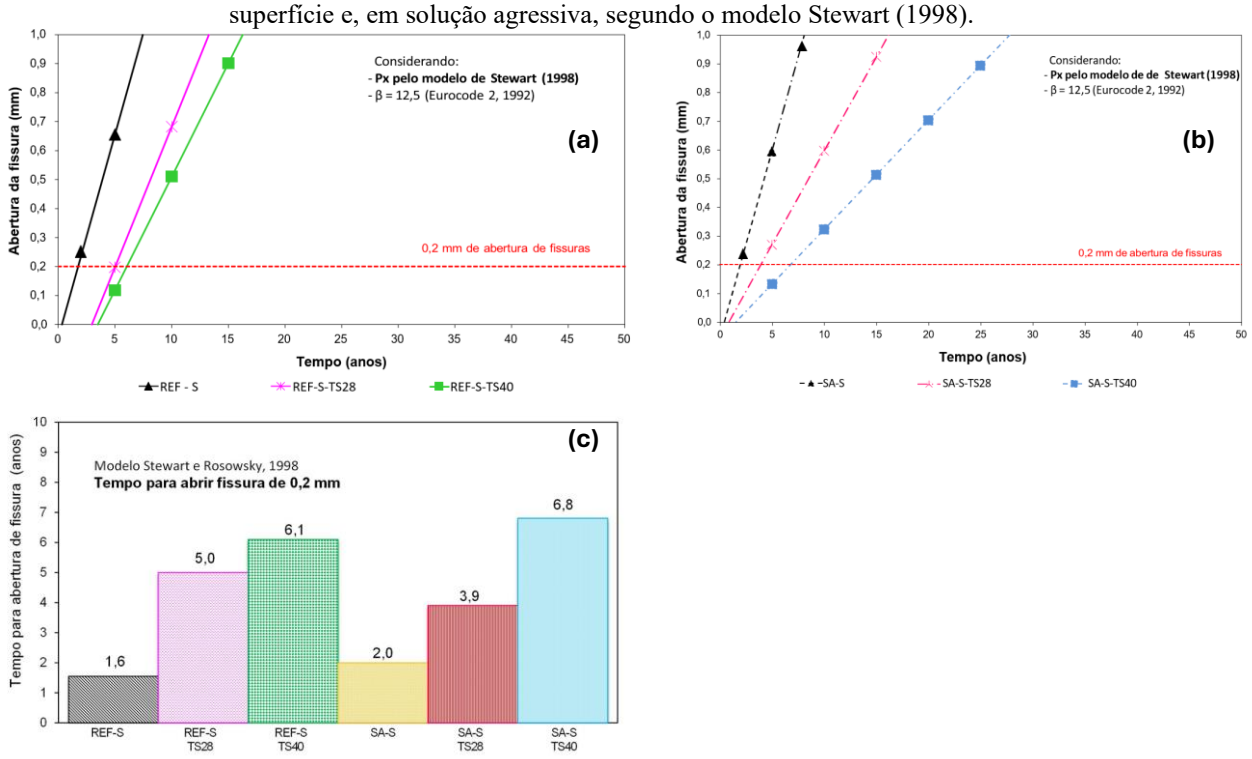
A amostra com o maior tempo de abertura de fissura foi aquela com sílica ativa e submetida ao tratamento TS40 (SA-S-TS40), atingindo 3,5 anos. Por outro lado, o menor tempo de abertura foi observado na amostra sem sílica ativa e sem tratamento superficial (REF-S), com 0,9 anos.

A seguir na figura 7 são expostos os resultados para o tempo de abertura de fissuras em amostras REF (figura 7A) e amostras com SA (figura 7B), expostas à solução de sulfato de amônio. A figura 7C apresenta os tempos de abertura de fissura para 0,2 mm, para todas as

amostras. Nesse caso utilizando os dados de entrada do modelo matemático de Stewart (1998).

A análise dos resultados apresentados na Figura 7 confirma, mais uma vez, que as amostras submetidas ao tratamento de superfície TS40 apresentaram tempos de abertura de fissuras superiores em relação às demais condições avaliadas (sem tratamento e com tratamento TS28). Especificamente, o tempo de abertura de fissura de 0,2 mm foi de 6,1 anos para as amostras sem adição de sílica ativa e de 6,8 anos para as amostras com sílica ativa.

Figura 7: Tempo para abertura de fissura no concreto armado em amostras REF, SA, com e sem tratamento de superfície e, em solução agressiva, segundo o modelo Stewart (1998).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De modo geral, as amostras com adição de sílica ativa apresentaram maior tempo de abertura de fissura em comparação com aquelas sem adição, excetuando-se novamente a condição com tratamento TS28. Nesta situação, a amostra sem sílica ativa (REF-S-TS28) apresentou tempo de abertura de 5,0 anos, superior ao observado na amostra com sílica ativa (SA-S-TS28), que apresentou 3,9 anos. A amostra que apresentou o maior tempo de abertura de fissura foi aquela com sílica ativa e tratamento TS40 (SA-S-TS40), atingindo 6,8 anos. Em contrapartida, o menor tempo de abertura foi verificado na amostra sem sílica ativa e sem tratamento superficial (REF-S), com 1,6 anos.

Observa-se que os resultados obtidos são qualitativamente semelhantes aos previstos pelo modelo de Andrade (1993). Tal semelhança ocorre em razão da proximidade entre os fundamentos matemáticos de ambos os modelos, sendo que o modelo de Andrade (1993) se caracteriza por ser mais conservador, ou seja, prevê tempos inferiores para a abertura de fissuras.

Além disso, destaca-se que a ordem de grandeza dos tempos de abertura de fissura obtidos encontra-se coerente com a literatura, que aponta o ataque por sulfato de amônio como um dos mais severos para o concreto armado. Esse tipo de degradação caracteriza-se por ser intensa, promovendo desde a expansão até a dissolução dos compostos do cimento, o que compromete significativamente a durabilidade das estruturas. Em função desse comportamento agressivo, diversos autores indicam que as manifestações patológicas podem iniciar-se com apenas três anos de exposição (Girardi; Di Maggio, 2011; Miletic *et al.*, 1998; Al-Dulaijan *et al.*, 2003; Jauberthie *et al.*, 2003; Amin *et al.*, 2017).

3 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a exposição de estruturas de concreto armado ao sulfato de amônio promove intensificação significativa dos processos corrosivos, reduzindo a vida útil das estruturas. A aplicação de tratamentos de superfície demonstrou-se uma estratégia eficaz para mitigação desses efeitos, destacando-se o tratamento TS40, que proporcionou redução de até 70,5% na densidade de corrente de corrosão em comparação com as amostras sem tratamento.

Adicionalmente, a incorporação de sílica ativa contribuiu para a elevação da resistência elétrica da matriz cimentícia, retardando o avanço da corrosão. A combinação da sílica ativa com o tratamento TS40 resultou no melhor desempenho global, ampliando a vida útil estimada das estruturas para mais de 100 anos, conforme o modelo de Stewart (1998), no cenário de perda de 20% da seção da armadura.

A análise das aberturas de fissuras revelou benefícios significativos decorrentes das estratégias de proteção adotadas. De acordo com o modelo proposto por Andrade (1993), as séries de referência submetidas ao tratamento TS40 apresentaram um tempo estimado para abertura de fissuras de 3,0 anos, enquanto as amostras com incorporação de sílica ativa, associadas ao mesmo tratamento, demonstraram desempenho superior, com tempo de abertura de 3,5 anos. De forma complementar, o modelo proposto por Stewart e Rosowsky (1998) indicou resultados ainda mais expressivos em comparação ao modelo de Andrade (1993). As

séries tratadas com TS40, porém sem adição de sílica ativa, apresentaram tempo de abertura de fissuras estimado em 6,1 anos, enquanto as amostras com sílica ativa e o mesmo tratamento alcançaram 6,8 anos. Esses achados reforçam a importância das estratégias de proteção e do uso de adições minerais na melhoria do desempenho e da durabilidade das estruturas de concreto.

Dessa forma, este estudo reforça a importância da adoção de tratamentos de superfície associados a adições minerais pozolânicas como medidas preventivas para a ampliação da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos, como aqueles contaminados por sulfato de amônio. Recomenda-se, para investigações futuras, a realização de estudos complementares em condições naturais de exposição, bem como a análise de outros agentes agressivos e variáveis ambientais.

4 Agradecimentos

Os autores expressam a sua gratidão às agências brasileiras CNPq, CAPES e Fundação Araucária pela bolsa e apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná, ao Centro Internacional Uninter, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC).

Referências

AL-DULAIJAN, S. U. *et al.* Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5, p. 429-437, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00083-5. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946502000835. Acesso em: 15 out. 2026.

AMIN, M.; BASSUONI, M. T. Resistance of concrete with blended binders to ammonium sulfate attack. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/21650373.2017.1334601. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21650373.2017.1334601. Acesso em: 15 out. 2026.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90023-3. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884693900233?via%3Dihub. Acesso em: 15 out. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:2014:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

CONTECVET. **A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures**. IN30902I. Lund: Lund University, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 206-1:** Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN, 2000.

EUROPEAN PRESTANDARD**.** Eurocode 2: Design of concrete structures. **European Commission**, 1992. Disponível em: https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-2-design-concrete-structures. Acesso em: 15 out. 2026.

GIRARDI, F.; DI MAGGIO, R. Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: effect of the type of aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 276-285, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946510001745?via%3Dihub. Acesso em: 15 out. 2026.

JAUBERTHIE, R. *et al.* Degradation of cementing materials by various organic acids in agro-industrial waste-waters. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 8, p. 882–892, 2003. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.04.007. Disponível em: https://sci-hub.al/10.1016/j.cemconres.2011.04.007. Acesso em: 15 out. 2026.

LANDA-SÁNCHEZ, A. *et al.* Corrosion behavior of steel-reinforced concrete in ammonium sulfate environments. **Materials**, Basel, v. 13, n. 19, art. 4345, 2020. DOI: 10.3390/ma13194345. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma13194345. Acesso em: 15 out. 2026.

MILETIC, S. *et al.* Portland ash cement degradation in ammonium-sulfate solution. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 713-725, 1998. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00023-4. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884698000234?via%3Dihub. Acesso em: 15 out. 2026.

MONZÓN, M. A. *et al.* Ammonium sulfate attack on cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122252, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122252. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182100012X. Acesso em: 15 out. 2026.

RÉUS, G. C. Elevação da alcalinidade do concreto e restauração da camada de passivação do aço por meio da realcalizaçõa química. 2022. 120 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/78076?show=full. Acesso em: 16 out. 2026.

STEWART, M. G. Corrosion-induced cracking and structural reliability of concrete structures. *In*: STRAUSS, A. (ed.) **Life-cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems**. [s. l.]: CRC PressEditors, 1998.

UOMOTO, T.; MISRA, S. Deterioration of concrete beams and columns caused by corrosion of reinforcing steel. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 4., 1987, Singapore. **Proceedings […]**. Singapore: [s.n.], 1987. DOI: 10.1016/B978-1-4832-8386-9.50058-9. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/monograph/abs/pii/B9781483283869500589?via%3Dihub. Acesso em: 15 out. 2026.

Data da submissão: 06/10/2026
Data de aceite: 06/10/2026