CAPÍTULO 13 · Parte I · Deterioração e ensaios
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/9as5pt68
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/be989c45

ESTUDO DO DESEMPENHO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM ADIÇÃO DE MATERIAIS POZOLÂNICOS SUBMETIDAS À CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA – CAIM

Júlia Giordani Berton[1], Débora Pedroso Righi[2]*
*Autor de contato: righi.p.debora@gmail.com

[1] Departamento de Engenharia, Faculdade CESURG, Marau, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade FTEC, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

A vida útil das estruturas de concreto armado tem se mostrado inferior àquela prevista em projeto, fato associado ao aumento significativo das manifestações patológicas nas construções. Dentre essas manifestações, a corrosão das armaduras destaca-se como a que mais compromete o desempenho estrutural, devido ao seu elevado potencial de dano e à redução da capacidade resistente dos elementos estruturais. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a durabilidade de três tipos de vigas de concreto armado submetidas ao processo de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM). Foram moldadas seis vigas, sendo duas vigas de referência; duas com substituição parcial de 10% do cimento por cinza de casca de arroz (CCA); e duas com substituição parcial de 10% do cimento por sílica ativa. De cada traço, uma viga foi submetida ao processo de corrosão acelerada. A avaliação do desempenho estrutural foi realizada por meio de ensaio de flexão à tração, comparando-se a resistência das vigas submetidas ao processo de corrosão com aquelas não submetidas. Os resultados indicam que a incorporação de materiais pozolânicos contribuiu para a redução do potencial de corrosão nas vigas de concreto armado, evidenciando melhoria na durabilidade do material.

Palavras-chave: concreto armado; corrosão; sílica ativa; CCA; CAIM.

ABSTRACT

The service life of reinforced concrete structures has been lower than that predicted in design, a fact associated with the significant increase in pathological manifestations in construction. Among these manifestations, reinforcement corrosion stands out as the one that most compromises structural performance due to its high damage potential and the reduction of the load-bearing capacity of structural elements. This study aimed to evaluate the durability of three types of reinforced concrete beams subjected to the Modified Immersion Accelerated Corrosion (CAIM) process. Six beams were cast: two reference beams; two with partial replacement of 10% of the cement by rice husk ash; and two with partial replacement of 10% of the cement by silica fume. From each mixture, one beam was subjected to the accelerated corrosion process.The structural performance was evaluated through a flexural tensile test, comparing the strength of beams subjected to the corrosion process with those not exposed to it. The results indicate that the incorporation of pozzolanic materials contributed to reducing the corrosion potential in reinforced concrete beams, demonstrating an improvement in the durability of the material.

Keywords: reinforced concrete; corrosion; silica fume; CCA; CAIM.

1. INTRODUÇÃO

No início da utilização do concreto, as estruturas eram consideradas elementos de elevada eficiência mecânica, com baixa necessidade de manutenção e reparos. Entretanto, com o passar do tempo, os problemas relacionados à deterioração e ao comprometimento estrutural das construções tornaram-se mais evidentes, impulsionando o desenvolvimento de estudos voltados à compreensão das causas e à busca de soluções para as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado (Rodrigues, 2023). Diante desse cenário de crescente preocupação com o desempenho ao longo do tempo, tornou-se fundamental o estabelecimento de diretrizes normativas que orientassem o projeto e a execução dessas estruturas.

As normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2026) e NBR 15575-1 (ABNT, 2025) estabelecem os requisitos mínimos relacionados à durabilidade, ao projeto, à vida útil e ao desempenho das estruturas de concreto armado, além de apresentarem diretrizes para a elaboração de projetos adequados às condições de exposição às quais as estruturas estarão submetidas, visando a durabilidade e vida útil das edificações. Ainda assim, a complexidade dos mecanismos de degradação exige avanços contínuos no conhecimento técnico e científico, indo além das prescrições normativas.

A preocupação com a durabilidade e a vida útil das edificações de concreto armado vem instigando a comunidade técnico-científica a desenvolver soluções que minimizem tanto o processo de degradação quanto os danos decorrentes. Comitês técnicos de organizações como a Federação Internacional do Concreto Estrutural – fib (*Fédération Internacionale du Béton*), o Instituto Americano de Concreto – ACI (*American Concrete Institute*) e o Comité Euro-Internacional do Concreto – CEB (*Comité Euro-International du Béton*) têm desenvolvido relatórios e práticas recomendadas acerca desses problemas relacionados à durabilidade e vida útil das estruturas. Os primeiros roteiros destinavam-se à durabilidade do concreto, como o ACI 201 (1992), intitulado "*Guide to Durable Concrete*", o CEB 183 (1992) – "*Durable Concrete Structures*" e o CEB 238 (1997), que aborda a corrosão nas estruturas – "*New approach to durability design: an example for carbonation-induced corrosion*". Essas contribuições reforçam a importância de compreender, de forma mais aprofundada, os conceitos fundamentais associados à durabilidade do concreto (Berton, 2022).

Segundo Stein (2019), a durabilidade é a capacidade que a estrutura tem de desempenhar as funções para as quais foi prevista ao longo do tempo; dessa forma, considera-se durável o concreto capaz de resistir aos processos de degradação decorrentes do meio no qual está inserido, sem necessidade de manutenções frequentes. A durabilidade das estruturas depende diretamente de fatores como a relação água/cimento (a/c), a classe de agressividade ambiental conforme a região de construção da edificação e as características dos materiais empregados (agregados, adições, aditivos e qualidade do aço). Dentre esses fatores, destaca-se a relação a/c, por controlar propriedades como permeabilidade, porosidade, capilaridade, densidade e compacidade, além da resistência mecânica. Essas propriedades, por sua vez, estão diretamente associadas aos mecanismos de degradação mais recorrentes nas estruturas de concreto armado, como a corrosão das armaduras (Reginato, 2020).

A corrosão das armaduras do concreto armado é uma das manifestações patológicas mais graves e frequentes, podendo ser causada por erros de projeto, falhas durante a execução, ausência de manutenção periódica ou pela exposição da estrutura a ambientes agressivos para os quais não foi projetada. As fissuras decorrentes desse processo estão associadas ao aumento de volume dos produtos de corrosão, gerando tensões internas que levam ao aparecimento de fissuras e

destacamentos do cobrimento, além de manchas características na superfície do concreto (Cabrera, 2014). Diante da relevância desse fenômeno para a durabilidade estrutural, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos que permitam sua análise controlada em ambiente laboratorial.

Dessa forma, os estudos sobre os mecanismos envolvidos no processo de corrosão das armaduras são de grande relevância. Entre os métodos utilizados para simular ambientes agressivos em laboratório, destaca-se o método de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM), desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esse método apresenta elevado potencial de aplicação, pois permite não apenas avaliar o grau de degradação estrutural provocado pela corrosão, mas também comparar o desempenho de diferentes tipos de concreto (Torres, 2006). Nesse sentido, a utilização de diferentes composições de matriz cimentícia surge como uma estratégia promissora para aumentar a resistência à corrosão.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, em laboratório, a influência da substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz e sílica ativa na matriz cimentícia de vigas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão acelerada.

2. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Conforme Zhang *et al.* (2020), as velocidades agregadas à construção civil aliadas com edificações cada vez mais esbeltas e com constantes modificações do meio em que se encontram, apresentam um grande problema às estruturas de concreto armado, principalmente por conta das manifestações patológicas e falhas que possam vir a se manifestar ao longo do tempo. Desta forma, conforme Clifton (1993), nas últimas décadas, aspectos voltados à extensão da durabilidade e da vida útil das estruturas como um todo são uma tendência mundial. A durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado são conceitos diretamente ligados, devido à direta dependência entre ambos.

Para Neville (2001) a durabilidade de uma estrutura não é uma propriedade particular da mesma, sendo resultante da interação entre o ambiente, a estrutura de concreto armado, as condições de uso e a manutenção da mesma. Desta forma, o pleno conhecimento dos materiais que compõe a estrutura, as particularidades de uso e o pleno conhecimento do ambiente em que a estrutura se encontra inserida, auxiliam de forma expressiva na previsão de comportamento da mesma e na prevenção de manifestações patológicas, aumentando assim sua durabilidade.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2026), a durabilidade das estruturas executadas em concreto armado depende de diversos fatores como: a resistência mecânica do concreto, a relação água-cimento (a/c), a porosidade, a densidade e a permeabilidade do concreto, o local de execução do mesmo e a agressividade presente no meio em que este se encontra. Com base nestes fatores, a referida norma estabelece os parâmetros de qualidade a serem utilizados conforme o tipo de estrutura e a localização de cada um dos elementos que constituem a mesma.

Em estruturas de concreto armado, o processo de deterioração dificilmente ocorre devido à causa isolada, conforme já comentado anteriormente. Um concreto pode apresentar qualidade satisfatória, porém um único fator adverso na qual a estrutura é sujeita pode desencadear o processo de deterioração. Lima (2005) apresenta que fatores como a umidade, a orientação e velocidade dos ventos, as variações de temperatura, a presença de substâncias agressivas no meio, a periodicidade das chuvas, além dos materiais que compõe o concreto e a porosidade do mesmo, são de extrema importância na interação entre o meio ambiente e o concreto. A permeabilidade do concreto é

ligada diretamente à vulnerabilidade da estrutura a agentes externos, ou seja, quanto maior a permeabilidade do concreto, maior é a sua vulnerabilidade (Santos, 2012).

2.1 Corrosão das armaduras

Para Soares *et al.* (2015), a corrosão das armaduras é uma das mais graves manifestações patológicas que afetam a estrutura, sendo segundo os autores, resultante de interações do material com o meio ambiente. Em estruturas de concreto armado estas manifestações são dadas por meio de manchas superficiais, fissuras, perda de massa das armaduras e destacamento do cobrimento que envolve a armadura.

Dentre as consequências da corrosão das armaduras que compõe estruturas de concreto, Cabral (2000), destaca a perda de massa da armadura transversal e o decréscimo na resistência mecânica, a formação de hidróxidos e óxidos que geram uma tendência ao aparecimento de fissuras e as perturbações no pleno funcionamento entre aço e concreto, comprometendo diretamente a durabilidade da estrutura como um todo.

A exposição das estruturas a substâncias como cloretos, sulfetos, dióxido de carbono e os nitritos, podem fazer com que a corrosão das armaduras ocorra de forma precipitada, devido ao fato de que ao entrarem em contato com o concreto provocam a ruptura da camada passiva que protege as barras de aço, facilitando assim a corrosão das mesmas (Helene, 1986). Para Mota *et al.* (2012), a corrosão devido a ação de cloretos pode ser definida como uma das principais causas da corrosão às armaduras. No concreto, os cloretos podem encontrar-se em componentes da mistura contaminados ou por meio da penetração através dos poros do concreto armado.

2.2 Corrosão por imersão modificada

O método de corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em 1990, é um dos métodos mais utilizados para acelerar a corrosão em elementos de concreto armado.

Durante o ensaio, corpos de prova de concreto armado são expostos a uma solução de cloretos aliada a corrente elétrica constante, buscando facilitar a migração dos cloretos para a armadura (Graeff, 2007). Para isto, os corpos-de-prova são posicionados em caixas com uma solução de cloretos de 35,0 g/l, sendo ligadas em série à uma fonte de alimentação com corrente constante. O tempo de ensaio é definido de acordo com o grau de corrosão esperado, para que ocorra 10% de perda de massa são necessários aproximadamente 30 dias (Cabrera, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a moldagem das vigas de concreto armado foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP-V ARI, areia natural média do tipo quartzosa, brita de origem balsáltica do tipo 1, sílica ativa e cinza de casca de arroz (com controle de queima e moagem, produto vendido comercialmente). Estes materiais foram caracterizados conforme suas respectivas normas, como pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais utilizados.

Materiais	Massa específica (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)
Cimento CP-V	3,15	-
Areia média	2,35	1,40
Brita 01	2,62	1,25
Sílica Ativa	2,20	-
Cinza de casca de arroz	1,90	-

Fonte: os autores.

A dosagem do concreto foi realizada utilizando o Método ABCP que consiste na adaptação do método desenvolvido pela ACI (*American Concrete Institute*) para agregados brasileiros. No método define-se uma relação a/c através das características dos materiais a serem utilizados e da resistência desejada. Também, é determinado no método o consumo de cada um dos materiais. Assim, o traço unitário utilizado foi 1:2,67:3,18 (cimento, areia e brita), com uma relação a/c de 0,65, de modo que garanta a resistência mínima de 20 MPa. Esta classe de resistência foi escolhida exclusivamente para garantir que houvesse corrosão de armadura neste estudo. Foram desenvolvidos três traços, sendo que em dois foram realizadas as substituições parciais do cimento (10%) por materiais pozolânicos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Proporção dos materiais para os traços estudados (kg/m/3).

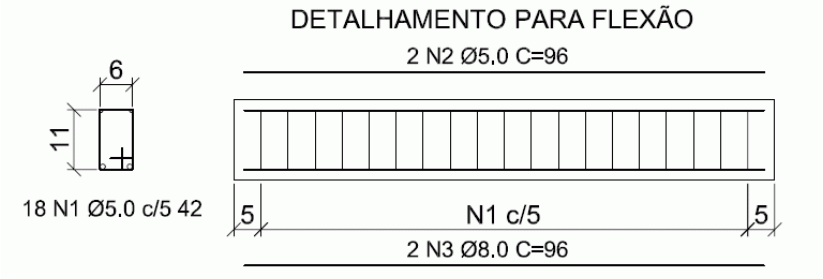
Traço	Cimento	Areia	Brita	Água	CCA	Sílica Ativa
Referência	10,30	27,50	32,74	6,70	-	-
10% CCA	10,20	27,50	32,74	6,70	1,02	-
10% Sílica Ativa	10,20	27,50	32,74	6,70	-	1,02

Fonte: os autores.

3.2 Execução dos elementos estruturais

As armaduras utilizadas neste estudo foram dimensionadas por Battisti (2017), conforme especificado na NBR 6118 (ABNT, 2026). Desta forma, foram utilizadas duas barras de armadura positiva com diâmetro de 8 mm de aço CA50 e duas barras negativas de aço CA60 com diâmetro de 5 mm, considerando um cobrimento nominal de 2 cm. Os estribos foram de aço CA60 e ficaram dispostos a cada 5 cm. A Figura 1 apresenta o detalhamento das armaduras para flexão.

Figura 1 – Detalhamento das armaduras para produção das vigas de concreto.



Fonte: os autores.

Após a finalização dos estribos e isolamento de todos os cantos em contato direto com as barras positivas, montou-se a armadura conforme as especificações de projeto. O passo seguinte foi a colocação de um fio de cobre para garantir a diferença de potencial durante o ensaio CAIM sobre as barras positivas. A capa protetora do fio de cobre foi completamente removida. Os pontos de

amarração na armadura transversal foram isolados, para que se diminua a probabilidade da perda localizada da seção das barras de aço.

Os três tipos de concreto executados (traço referência, traço com substituição parcial do cimento por sílica e com substituição parcial por cinza de casca de arroz) foram produzidos em betoneira e lançados nas fôrmas em uma única etapa. Antes do lançamento, realizou-se o ensaio para determinação do abatimento do concreto (*slump test*), conforme descrito pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

Após a moldagem das 2 vigas pertencentes a cada um dos traços, foram moldados os corpos de prova referentes a cada traço (3 corpos de prova para cada idade) para a realização de ensaios de resistência no estado endurecido do concreto. Todo o ensaio foi realizado com base nos parâmetros expressos na NBR 5738 (ABNT, 2016). Terminada a moldagem de todos os corpos de provas e das 6 vigas, todos foram colocados em superfície lisa e livre de intempéries, onde iniciaram o processo de cura permanecendo por 24 horas. Após este período colocou-se os mesmos na câmara úmida com controle de umidade onde os corpos de prova permaneceram até o momento da execução dos ensaios em estado endurecido, nas idades de 7, 14 e 28 dias, e as vigas, até a execução do ensaio de CAIM, na idade de 28 dias.

3.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão do concreto, foi realizado o ensaio descrito pela NBR 7215 (ABNT, 2025) e pela NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio foi realizado com 3 corpos de prova para cada uma das seguintes idades: 7, 14 e 28 dias após a moldagem dos mesmos.

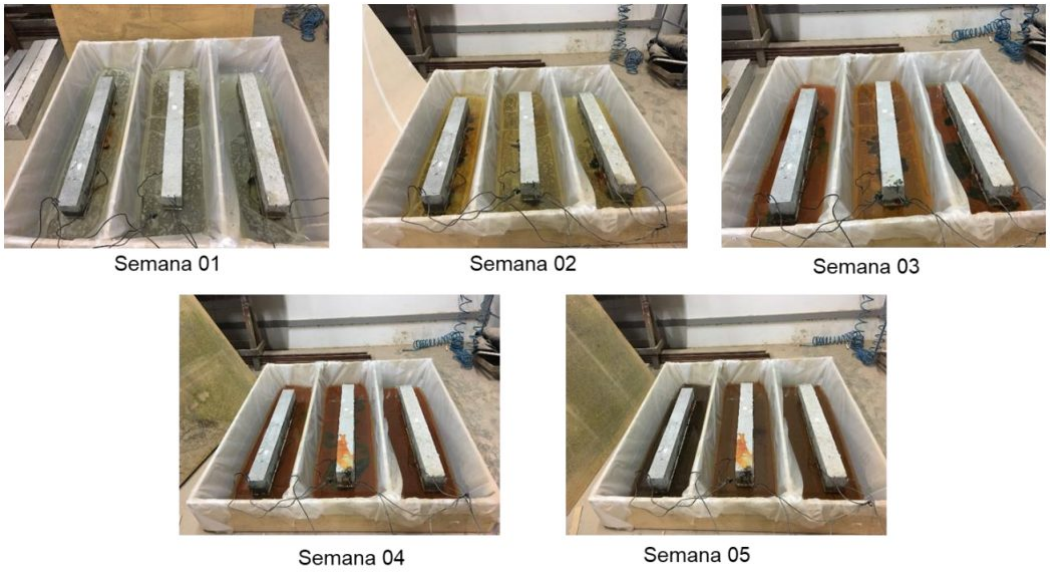
3.2.2 Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM

Para a aceleração da corrosão em três das seis vigas moldadas foi utilizado o método CAIM, sendo uma referência, uma com substituição de 10% em volume de cinza de casca de arroz e uma com substituição de 10% em volume de sílica ativa. Para garantir a indução eletroquímica, o ensaio propõe a imersão parcial de corpos de prova em uma solução de íons de cloreto, que migram da solução para as barras da armadura por meio de estímulos elétricos (diferença de potencial), iniciando o processo de corrosão. Nesta etapa determinou-se também o tempo de ensaio necessário, que conforme os estudos de Graeff (2007), para que se atinja 10% de perda de massa o necessário são aproximadamente 30 dias.

Após a disposição das três vigas em cada protótipo, as mesmas foram preenchidas com a solução de cloretos até uma altura de cerca de 5 cm de altura, garantindo que a lâmina da solução ultrapassasse a barra de 8 mm localizada no interior da viga. O fio de cobre, presente no interior da viga, foi ligado ao polo positivo da fonte, atuando como ânodo do processo eletroquímico. Já o fio de cobre disposto imerso em torno de cada uma das vigas foi ligado ao polo negativo da fonte, atuando como cátodo no processo.

O processo de corrosão das vigas foi acompanhado semanalmente, avaliando-se a condição das vigas e a possibilidade de seguir-se com o ensaio. Na Figura 2 é possível visualizar a propagação da corrosão nas vigas, desde o dia no qual as vigas foram colocadas nos protótipos (semana 01) até sua retirada (semana 05).

Figura 2 – Propagação da corrosão nas vigas.



Fonte: os autores.

Após o término do ensaio de corrosão, adotou-se a nomenclatura disposta na Tabela 3 para cada uma das vigas.

Tabela 3 – Nomenclatura adotada

Nomenclatura	Código
Referência não corroída	REFNC
10% Cinza de casca de arroz não corroída	10CCANC
10% Sílica ativa não corroída	10SANC
Referência corroída	REFC
10% Cinza de casca de arroz corroída	10CCAC
10% Sílica ativa corroída	10SAC

Fonte: os autores.

3.2.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado para todas as vigas, tanto as submetidas quanto as não submetidas ao ensaio de CAIM, com o objetivo de determinar a máxima deformação das mesmas. Para a realização do ensaio na prensa de compressão Emic 200PLUS, foram utilizados suportes metálicos adaptados. A resistência à tração na flexão das vigas ensaiadas é calculada conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), dependendo diretamente da localização da ruptura na viga.

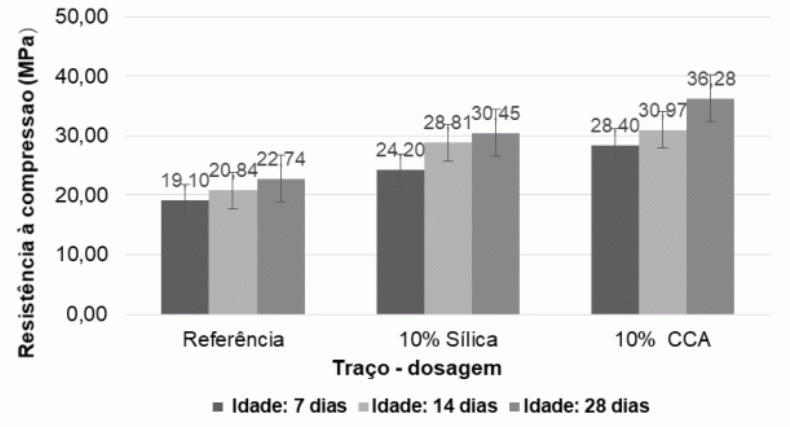
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão simples

Os resultados de resistência mecânica à compressão simples dos corpos-de-prova dos traços utilizados neste estudo estão dispostos na Figura 3, o ensaio foi realizado para controle tecnológico do concreto. É possível observar que os traços com substituição parcial do cimento por sílica ativa e cinza de casca de arroz obtiveram resistências aos 28 dias superiores a obtida pelo traço referência na ordem de aumento de resistência em 33,90% para sílica ativa e 59,54% para traço com cinza de casca de arroz. Porém, o traço com substituição de 10% do cimento por cinza de casca de arroz apresentou resistência superior tanto ao traço referência quando ao traço com substituição do

cimento por 10% de sílica ativa na ordem de 19,15%. Righi (2015) já demonstravam que a cinza de casca de arroz vendida comercialmente possui uma reatividade bastante elevada aos 28 dias, pois seu índice pozolânico é 3 vezes superior à exigência da NBR 12653 (ABNT, 2015) que é da ordem de 90%.

Figura 3 – Resistência à compressão simples dos corpos de prova de concreto.

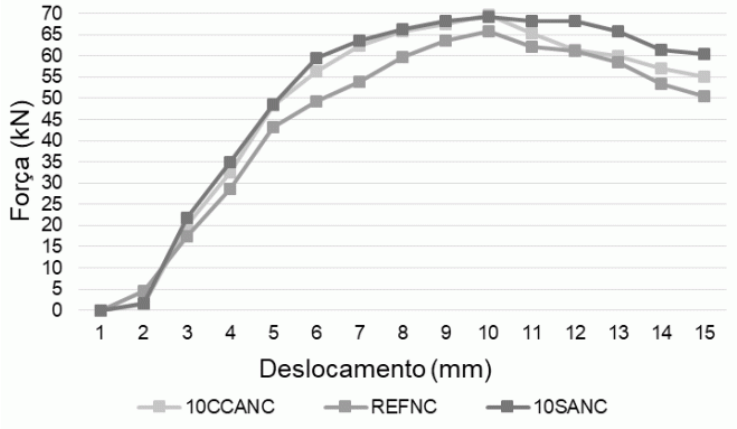


Fonte: os autores.

4.2 Resistência à tração na flexão

O desempenho à tração na flexão de cada uma das seis vigas pode ser analisado nas Figuras 4 e 5 a seguir, no qual a Figura 4 apresenta as vigas que não sofreram processo de corrosão e a Figura 5 as vigas expostas à corrosão.

Figura 4 – Resistência à tração na flexão nas vigas não expostas à corrosão.



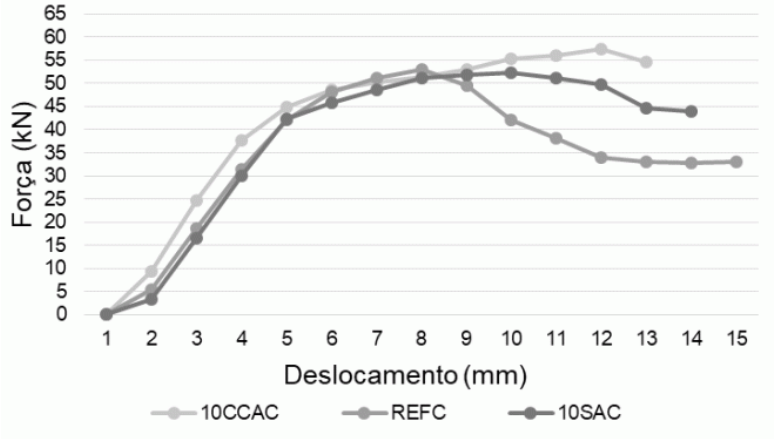
Fonte: os autores.

Com base na Figura 4, pode-se analisar um comportamento semelhante para todas as vigas não submetidas à corrosão. Todas as vigas apresentaram a carga máxima próxima ao deslocamento de cerca de 10 mm, tendo um deslocamento máximo de 15 mm. É possível também visualizar o maior ganho de força e maior homogeneidade de perda de carga das vigas com materiais pozolânicos em sua composição.

Na Figura 5, pode ser analisada a curva força x deslocamento para as vigas submetidas ao ensaio de corrosão acelerada. As vigas obtiveram comportamentos distintos quando ao ganho de resistência e o deslocamento máximo alcançado.

A viga referência (REFC) apresentou o pior comportamento dentre as 3 vigas submetidas ao processo corrosivo, apresentando um deslocamento de 7 mm para sua carga máxima e uma redução brusca no desempenho após este valor. A viga com sílica ativa (10 SAC) apresentou um deslocamento para a carga máxima próximo aos 10 mm, e uma perda de desempenho após este ponto de forma mais uniforme ao comparada com as demais vigas. Já a viga com cinza de casca de arroz (10CCAC) apresentou o melhor desempenho, tendo a carga máxima nos 11 mm de deslocamento.

Figura 5 – Resistência à tração na flexão nas vigas expostas à corrosão.



Fonte: os autores.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados da carga de ruptura e flecha máxima de cada uma das vigas submetidas ao ensaio de resistência à tração na flexão.

Tabela 4 – Resistência a tração na flexão

Nomenclatura	Carga de Ruptura (MPa)	Flecha máxima (mm)
REFNC	26,28	16,81
REFC	14,10	15,99
10CCANC	27,88	16,94
10CCAC	26,96	17,27
10SANC	27,68	17,51
10SAC	20,92	17,14

Fonte: os autores.

As vigas não corroídas com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos (10CCANC e 10SANC) apresentaram maiores valores para carga de ruptura, ao comparado com o traço referência (REFNC). Assim como na resistência à compressão, a viga com a cinza de casca de arroz (10CCANC) apresentou resistência superior tanto ao traço referência quando ao traço com substituição do cimento por 10% de sílica (10SANC). Ao tratar-se das vigas submetidas ao método CAIM, é possível observar uma redução da capacidade de carga destas vigas em comparação com as vigas mantidas em condições ambiente.

Dentre as vigas submetidas à corrosão, a pior situação de resistência foi a da viga referência (REFC), que obteve uma redução de resistência na ordem de 46,35%, para sílica ativa (10SAC) a redução foi de 24,43%, enquanto para a viga com cinza de casca de arroz (10CCAC) a redução foi de 3,30%. Desta forma é possível perceber um melhor desempenho da viga com substituição do cimento por cinza de casca de arroz.

O melhor desempenho desta viga (10CCAC), é dado pela menor perda de massa das barras que compõe a armadura, certificando que o material apresenta características favoráveis a resistência à corrosão. Com base na Tabela 3, é possível observar uma redução na capacidade de deformação, aliada a menores resistências das vigas submetidas ao método CAIM. Percebe-se, conforme o esperado, uma maior deformação aliada ao maior suporte de carga, nas vigas não submetidas ao processo de corrosão, este mesmo comportamento foi analisado por Cabrera (2014).

Este fato pode ser decorrência da corrosão provocada nas armaduras, tornando as vigas mais frágeis. Para as vigas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, pode-se perceber um aumento na deformação da viga submetida à corrosão para a viga não submetida ao processo. Acredita-se que o fato ocorreu pela maior resistência à corrosão desta viga.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

A incorporação de sílica ativa e cinza de casca de arroz ao concreto proporcionou melhorias tanto na resistência mecânica quanto no comportamento frente à deterioração das vigas de concreto armado. Observou-se que ambas as adições atuam de forma eficiente na mitigação de processos corrosivos, configurando-se como alternativas tecnicamente viáveis para o aumento da durabilidade. Destaca-se que o traço com substituição de 10% de cinza de casca de arroz apresentou o melhor desempenho global, indicando maior potencial de durabilidade.

O método empregado para indução da corrosão mostrou-se eficaz, uma vez que foi capaz de promover a degradação das vigas de concreto armado, evidenciada pela corrosão das armaduras e pela consequente perda de massa das barras de aço.

Por meio do ensaio de resistência à tração na flexão, verificou-se que as vigas com adição de materiais pozolânicos apresentaram melhor desempenho mecânico, além de um modo de ruptura semelhante ao das vigas não submetidas ao processo de corrosão. Em contrapartida, a viga sem a incorporação desses materiais apresentou resistência significativamente inferior em comparação às demais cinco vigas, além de ruptura por cisalhamento, característica associada à falha nos estribos que compõem a armadura.

Nesse contexto, os resultados indicam que a corrosão exerceu influência direta na redução da capacidade resistente dessa viga, ao mesmo tempo em que evidenciam que a utilização de materiais pozolânicos — especialmente a cinza de casca de arroz — contribui para o aumento da resistência ao processo corrosivo e, consequentemente, para a melhoria do desempenho estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201: **guide to durable concrete.** ACI manual of concrete practice, Detroit, 1992, part 1, 39p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2026.

_____. NBR 15575-1: **Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1**: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2025.

_____. NBR 16889: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2025.

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

_____. NBR 12142: **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12653: **Materiais pozolânicos** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

BATTISTI, F. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017.

BERTON, J. G. **Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos à ação de cloretos.** (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2022.

CABRERA, L. S. **Vigas de concreto armado submetidas à corrosão acelerada:** avaliação do comportamento mecânico de argamassa de reparo com diferentes materiais pozolânicos. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

CABRAL, E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate a iniciação e a propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2000.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 183: **durable concrete structures. Bulletin d' Information, Suecis**, n. 183, may 1992, 112p.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB 238: **new approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. Bulletin d' Information, Suecis**, n. 238, may 1997, 138p.

CLIFTON, J. R. **Predicting the Service Life of Concrete**. ACI Materials Journal, 1993.

GRAEFF, Â. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armadura para concreto armado.** São Paulo: PINI, 1986.

LIMA, M. G. **Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. **Consideration of durability of concrete structures: past, present and future**. Material and Structures, volume 34, mar. 2001.

MOTA, J.M.F; BARBOSA, F.R; COSTA E SILVA, A.J. **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto**. In: 54° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais IBRACON, Maceió, 2012.

NEVILLE, A. M. **Consideration of durability of concrete structures: past, present and future**. Revisit Material and Structures, Volume 34, mar. 2001.

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e concreto têxtil.** Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2020.

RIGHI, D. P. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibra de polipropileno e cinza de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2015.

RODRIGUES, W. B. **Influência da resistividade elétrica na migração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFCAT, Catalão, 2023.

SANTOS, M. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso.** Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2012.

SOARES, A.; VASCONCELOS, L.; NASCIMENTO, F. **Corrosão em armaduras de concreto. Cadernos de graduação – Ciências exatas e Tecnologias**. Maceió, 2015.

STEIN, J. K. **Avaliação experimental de ciclos de carregamento em vigas corroídas de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

TORRES, A. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM- Corrosão Acelerada por Imersão Modificada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2006.

ZHANG, Y.; YANG, Z.; YE, G. **Dependence of unsaturated chloride diffusion on the pore structure in cementitious materials**. Cement and Concrete Research, v. 127, p. 105919, 2020.