

Comportamento a flexão de vigas de concreto armado com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão

J. A. Moreno Herrera*¹, J. L. Varela Rivera¹, R. Visairo Méndez², P. Castro Borges²

* Autor de Contato: joel.moreno@correo.uady.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.630>

Recepção: 16/07/2022 | Aceitação: 17/08/2022 | Publicação: 01/08/2022

RESUMO

Neste trabalho, avaliou-se a mudança no comportamento da flexão de vigas de concreto armado. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Os parâmetros eletroquímicos considerados foram velocidade de corrosão, resistividade elétrica e concentração de cloretos. As vigas foram ensaiadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. São apresentados padrões de fissuração, escoamento e cargas máximas, rigidez de escoamento e ductilidade de deslocamento das vigas. Com base na análise desses parâmetros estruturais, conclui-se que o comportamento de flexão das vigas com e sem corrosão foi semelhante.

Palavras-chave: vigas de concreto armado; corrosão; cargas de longa duração; comportamento estrutural; comportamento eletroquímico.

Citar como: Moreno Herrera, J. A., Varela Rivera, J. L., Visairo Méndez, R., Castro Borges, P. (2022), “Comportamento a flexão de vigas de concreto armado com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 422 – 432, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.630>

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, IPN, Unidad Mérida, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Joel Moreno Herrera contribuiu com o planejamento do ensaio (100%), a análise do comportamento estrutural das vigas (50%), bem como a redação do artigo (100%); Jorge Luis Varela Rivera contribuiu com a análise do comportamento estrutural das vigas (50%); Rebeca Visairo Méndez contribuiu com a medição dos parâmetros eletroquímicos (100%), o ensaio das vigas durante o mestrado (100%) e a análise do comportamento eletroquímico (50%); Pedro Castro Borges contribuiu com a análise do comportamento eletroquímico (50%).

Licença Creative Commons

Os direitos autorais (2022) são de propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na terceira edição do ano de 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento da segunda edição do ano de 2023.

Flexural behavior of reinforced concrete beams with electrochemical parameters associated with high level of corrosion

ABSTRACT

In this work the change in the flexural behavior of reinforced concrete beams was evaluated. Beams without corrosion and beams with electrochemical parameters associated with high level of corrosion were considered. The electrochemical parameters considered were the corrosion rate, the electrical resistivity, and the concentration of chlorides. Beams were subjected to vertical incremental loads until failure. Cracking patterns, yielding loads, maximum loads, yielding stiffnesses, and displacement ductilities of beams are presented. Based on the analysis of these structural parameters it is concluded that the flexural behavior of beams with and without corrosion was similar.

Keywords: reinforced concrete beams; corrosion; sustained loads; structural behavior; electrochemical behavior.

Comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzado con parámetros electroquímicos asociados con un nivel de corrosión alto

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el cambio en el comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzado. Se consideraron vigas sin corrosión y vigas con parámetros electroquímicos asociados con un nivel de corrosión alto. Los parámetros electroquímicos considerados fueron la velocidad de corrosión, la resistividad eléctrica y la concentración de cloruros. Las vigas se ensayaron bajo cargas verticales incrementales hasta la falla. Se presentan los patrones de agrietamiento, las cargas de fluencia y máxima, la rigidez de fluencia y la ductilidad de desplazamiento de las vigas. Con base en el análisis de estos parámetros estructurales se concluye que el comportamiento a flexión de las vigas con y sin corrosión fue similar.

Palabras clave: vigas de concreto reforzado; corrosión; cargas sostenidas; comportamiento estructural; comportamiento electroquímico.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado (CA) é um dos materiais mais utilizados na construção civil em todo o mundo. A produção global anual de concreto é estimada em aproximadamente 11 bilhões de metros cúbicos (Ceballos, 2016). Um dos principais problemas que afetam a segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado é a corrosão (Rodríguez, 2014). A corrosão pode começar quando agentes agressivos como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono, entre outros, penetram no concreto (Castro, 1988). A corrosão pode induzir uma degradação nas propriedades físicas e mecânicas do aço da armadura. A referida degradação é atribuída a alterações na composição química devido à reação química do aço com os agentes agressivos do meio ambiente (Maldonado-López, 1996). A corrosão pode causar danos aos elementos CA, como fissuras e deslocamento do cobrimento da armadura. Esses danos causam perdas na resistência e capacidade de deformação dos elementos de CA, colocando em risco a segurança das estruturas. Danos às estruturas associados à corrosão geram custos significativos e perdas econômicas em muitos países (Vázquez-Castillo, 1998). O custo anual de reparos em estruturas de CA no Reino Unido é de aproximadamente £ 755 milhões (Rodríguez, 2014). Nos EUA, o custo de manutenção e reparo da infraestrutura costeira é estimado em US\$ 660 milhões (Xianming et al. 2012). Portanto, medidas de prevenção, avaliação e controle adequado da corrosão são de extrema importância.

Os atuais regulamentos mexicanos sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado concentram-se principalmente em dois aspectos, prevenção e avaliação. As Normas Técnicas Complementares para Projeto e Construção de Estruturas de Concreto (NTCC-2017) especificam recomendações voltadas à prevenção da corrosão. Essas normas propõem recomendações mínimas para a resistência à compressão do concreto e para a espessura do cobrimento de concreto dos elementos estruturais com base nos níveis de exposição ao meio ambiente. Por outro lado, existem normas que especificam recomendações baseadas principalmente no comportamento eletroquímico de vigas de concreto armado. Por exemplo, no NMX-C-514-ONNCCE-2016, os níveis de corrosão são estabelecidos com base na taxa de corrosão. Adicionalmente, a NMX-C-523-ONNCCE-2015 estabelece níveis de risco de corrosão com base na resistividade elétrica do concreto. Essas normas não estão explicitamente associadas ao comportamento estrutural dos elementos de concreto armado.

Existem alguns estudos onde se avalia o comportamento estrutural de elementos de concreto armado afetados pela corrosão. As variáveis mais estudadas foram o nível de corrosão (Gu et al., 2010; Ou et al., 2016; Ye et al., 2018), o diâmetro da armadura de tração longitudinal (Gu et al., 2010; Ou et al., 2016; Shaikh, 2018) e a magnitude das cargas mantidas (Tachibana et al., 1990; Castel et al., 2000; Vidal et al., 2007; Torres et al., 2007; Juárez et al., 2011; Ye et al., 2018). Por outro lado, existem estudos sobre o comportamento eletroquímico de vigas de concreto armado afetadas pela corrosão (Andrade y González, 1978; Andrade et al., 1993; Elsener et al., 2003). Nos estudos anteriores observa-se que o comportamento estrutural e o comportamento eletroquímico dos elementos foram considerados separadamente. Apenas um estudo foi encontrado onde o comportamento estrutural e eletroquímico de vigas de CA estão correlacionados (Yu et al., 2015). No entanto, neste estudo apenas 2 vigas corroídas foram testadas. O único parâmetro considerado para relacionar o comportamento estrutural e eletroquímico foi a taxa de corrosão. Com base na revisão dos estudos anteriores, observa-se que ainda são necessários mais estudos experimentais onde se relacionam outros parâmetros que definem o comportamento estrutural e eletroquímico das vigas de CA. Os parâmetros mais utilizados para avaliar o comportamento estrutural à flexão de vigas de concreto armado são resistência, rigidez e capacidade de deformação. Os parâmetros mais utilizados para avaliar o comportamento eletroquímico são a taxa de corrosão, o potencial de corrosão, a resistividade elétrica do concreto e a concentração de cloretos. As relações entre os parâmetros acima permitirão uma melhor avaliação das estruturas afetadas pela corrosão.

O objetivo deste trabalho é avaliar a mudança no comportamento de flexão de vigas de concreto armado. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Essas vigas foram retirados do trabalho de Moreno-Herrera et al. (2022).

2. METODOLOGIA

2.1 Características das vigas existentes

São 8 vigas de concreto armado, 4 de controle e 4 com corrosão (Moreno-Herrera et al., 2022). As dimensões das vigas foram de 15 x 30 x 350 cm (largura x profundidade x comprimento). As vigas foram projetadas para induzir o comportamento de flexão. A armadura longitudinal consistia de 2 barras #4 (13 mm de diâmetro) na zona de tração e 2 #3 barras (9,5 mm de diâmetro) na zona de compressão. Foram utilizadas barras corrugadas com limite de escoamento nominal (f_y) de 411,88 MPa (4200 kg/cm²). O aço de armadura transversal consistia em estribos nº 2 (64 mm de diâmetro) espaçados a cada 130 mm. Barras lisas com limite de escoamento nominal de 227,51 MPa (2320 kg/cm²) foram usadas. O revestimento livre do aço de armadura longitudinal era de 25 mm. A resistência média à compressão do concreto foi de 17,53 MPa (178,75 kg/cm²). Foram utilizados cimento Portland composto, agregado calcário britado de alta absorção, tamanho máximo do agregado de 19 mm, relação água/cimento de 0,62 e abatimento de 100 mm. As vigas foram moldadas por um trabalhador experiente. A armadura transversal foi pintada com esmalte alquídico anticorrosivo, para induzir corrosão exclusivamente no aço de armadura longitudinal. No caso das vigas de controle, o concreto foi lançado e compactado da forma tradicional. No caso das vigas corroídas, o concreto foi lançado em duas camadas de 150 mm de altura. Na primeira, foi colocado concreto contaminado com cloretos (1,5% do peso do cimento). Na segunda camada foi colocado concreto normal. As vigas foram armazenadas e curadas com água por um período de 28 dias.

As vigas foram submetidas a cargas verticais incrementais até atingirem as tensões de tração alvo na armadura longitudinal (Tabela 1). As cargas foram aplicadas usando um sistema de carregamento de quatro pontos (Figura 1). Com este sistema de carregamento, as vigas foram submetidas a momentos fletores constantes e força cortante zero no terço central das vigas. Na Tabela 1, VC refere-se a vigas de controle e VCC a vigas corroídas, 0,4 e 0,8 referem-se aos percentuais de tensão de tração alvo em armaduras longitudinais (40% e 80% de f_y). A Tabela 1 inclui a carga associada à fissuração por flexão (P_{cr}) e seu deslocamento correspondente (Δ_{cr}), a carga associada à tensão de tração alvo (P_{m1}) e seu deslocamento correspondente (Δ_{m1}), bem como a rigidez inicial (K_o) e rigidez pós-fissuração (K_{cr}) das vigas. A rigidez inicial foi calculada com P_{cr} e Δ_{cr} . A rigidez pós-fissuração foi calculada com P_{cr} e P_{m1} .

Tabela 1. Parâmetros estruturais iniciais das vigas (Moreno-Herrera et al., 2022)

Viga	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_{m1} (kN)	Δ_{m1} (mm)	K_o (kN/mm)	K_{cr} (kN/mm)
VC1-0.4	7.69	0.83	18.17	4.32	10.30	3.00
VC2-0.4	5.20	0.45	18.29	4.25	12.90	3.44
VC1-0.8	8.03	0.80	35.80	10.63	11.18	2.82
VC2-0.8	5.40	0.68	35.31	11.77	8.86	2.70
VCC1-0.4	7.61	0.80	17.88	4.38	10.55	2.87
VCC2-0.4	9.74	0.98	18.37	4.09	11.21	2.78
VCC1-0.8	9.11	1.00	36.11	10.93	10.20	2.72
VCC2-0.8	7.93	0.92	36.37	11.17	9.56	2.78

2.2 Cargas mantidas e corrosão acelerada em vigas existentes

As vigas foram submetidas a cargas mantidas por um período de 166 dias (Moreno-Herrera et al., 2022). Foram consideradas as cargas mantidas associadas às tensões de tração alvo (Tabela 1). As cargas mantidas geraram a mesma distribuição de momentos fletores e esforços cortantes nas vigas obtidos com o sistema de carregamento de quatro pontos descrito acima. Durante este período, ciclos de umedecimento e secagem foram aplicados para induzir a corrosão acelerada. As vigas foram umedecidas a cada 12 horas, uma vez com água potável e outra com soro fisiológico 3,5%. A concentração de cloretos na solução utilizada é semelhante à da água do mar. A Tabela 2 mostra os valores máximos observados para taxa de corrosão em armadura de tração longitudinal, e resistividade elétrica e concentração de cloretos no concreto das vigas. A taxa de corrosão e a resistividade elétrica foram medidas com um corrosímetro (James Instruments, 2010). A concentração de cloreto foi obtida de acordo com a norma NMX-C.523-ONNCCE-2015.

Tabela 2. Parâmetros eletroquímicos das vigas (Moreno-Herrera et al., 2022)

Viga	Velocidade de corrosão ($\mu\text{Amp}/\text{cm}^2$)	Resistividade elétrica do concreto ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)	Concentração de cloreto (%por peso do cimento)
VC1-0.4	0,45	11,97	0,3034
VC2-0.4			
VC1-0.8	0,65	11,08	0,3295
VC2-0.8			
VCC1-0.4	7,01	1,37	2,5853
VCC2-0.4			
VCC1-0.8	5,66	2,47	3,2038
VCC2-0.8			

A Tabela 2 mostra que a taxa máxima de corrosão das vigas de controle (VC) foi associada a um nível de corrosão baixo a moderado ($0,1$ a $0,5 \mu\text{Amp}/\text{cm}^2$) (NMX-C-501-ONNCCE-2015); a resistividade elétrica foi associada a um risco baixo a moderado de corrosão (10 a $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$) (NMX-C-514-ONNCCE-2016); a concentração de cloretos foi inferior ao valor limite de $0,52$ proposto para concretos com agregados calcários e com relação a/c de $0,6$ (Castro et al., 1993). Por outro lado, a Tabela 2 mostra que a taxa de corrosão das vigas corroídas (VCC) foi associada a um alto nível de corrosão (maior que $1 \mu\text{Amp}/\text{cm}^2$); a resistividade elétrica foi associada a um alto risco

de corrosão (menos de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$); a concentração de cloreto foi pelo menos 5 vezes superior ao valor limite. Com base no exposto, observa-se que, do ponto de vista eletroquímico, existem vigas com parâmetros associados a um alto nível de corrosão.

Para vigas submetidas à mesma tensão de tração alvo, o padrão de fissuração foi geralmente semelhante. Para vigas com tensão de tração alvo de $0,8 f_y$, foram observadas aberturas e comprimentos de fissura maiores do que aqueles observados para vigas com tensão de $0,4 f_y$. Isso se deve ao fato de que as cargas aplicadas para o esforço de $0,8 f_y$ foram maiores. Após a indução da corrosão, os padrões de fissuração foram semelhantes aos observados antes da aplicação da técnica de corrosão.

2.3 Sistema de carregamento e instrumentação para testar vigas existentes

As vigas de controle e corroídas foram testadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. As vigas foram ensaiadas após o período de aplicação de cargas mantidas e a indução de corrosão. Foi utilizado o mesmo sistema de carregamento de quatro pontos descrito acima (Figura 1). As cargas foram aplicadas usando um atuador hidráulico e medidas usando uma célula de carga. Os deslocamentos verticais no comprimento médio das vigas foram medidos por meio de dois potenciômetros lineares. As deformações em armaduras longitudinais em tração foram medidas usando extensômetros. Antes da concretagem, os extensômetros foram colados à armadura longitudinal em tração (Moreno-Herrera et al., 2022).

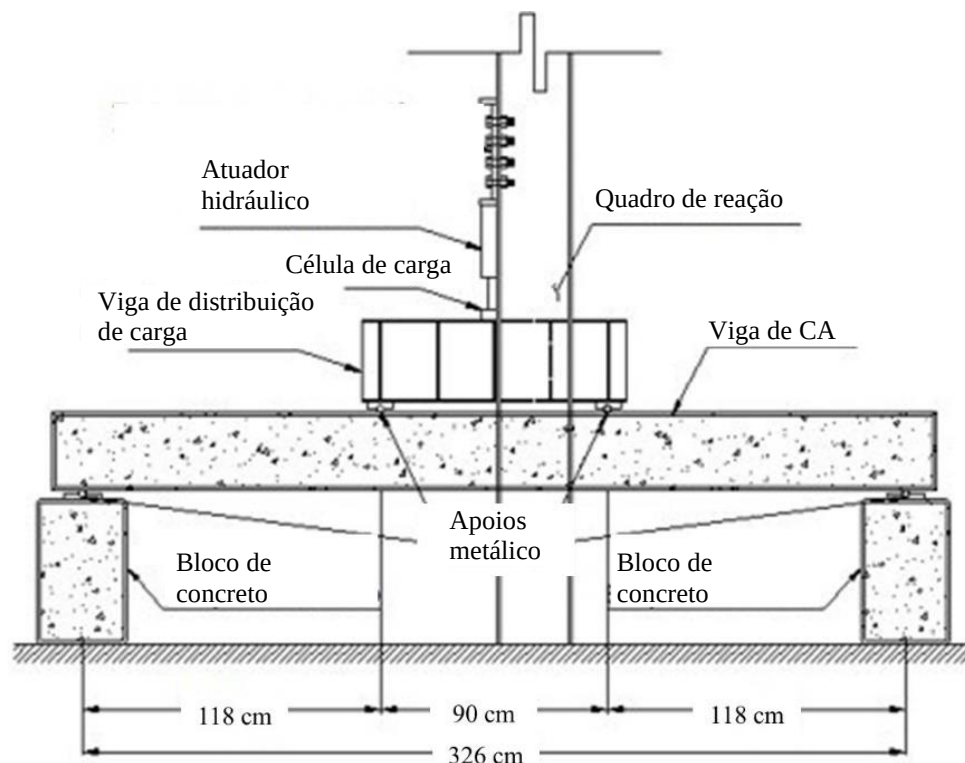


Figura 1. Sistema de carregamento de quatro pontos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra o padrão de fissuração final das vigas. O padrão de fissuração foi semelhante tanto para as vigas de controle quanto para as vigas corroídas. Este padrão foi caracterizado pela formação de fissuras de flexão verticais na parte central das vigas e fissuras de flexão-cisalhamento inclinadas nas extremidades.

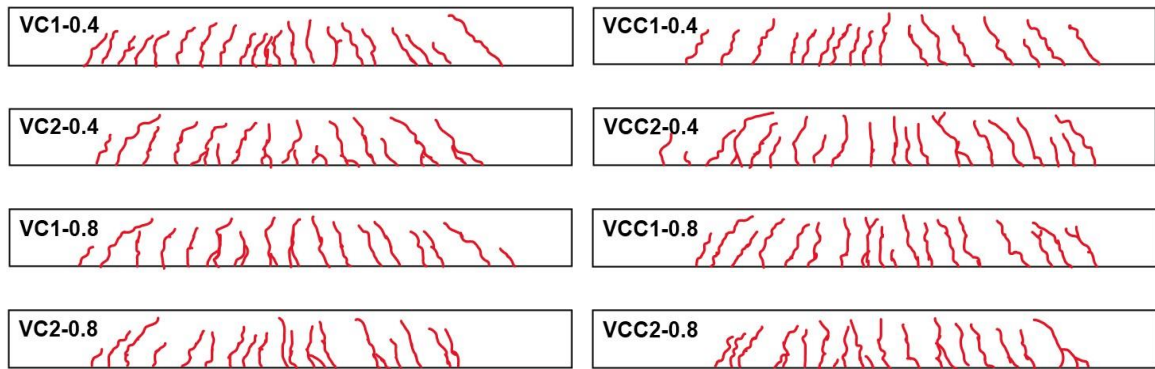


Figura 2. Padrões de fissuração final de vigas

A Figura 3 mostra as curvas carga-deslocamento das vigas. A Tabela 3 mostra a carga de escoamento (P_y) e o deslocamento de escoamento correspondente (Δ_y), bem como a carga máxima (P_{m2}) e o deslocamento máximo correspondente (Δ_{m2}) das vigas. As cargas de escoamento foram determinadas usando as deformações unitárias medidas com os strain gages das vigas. A Tabela 3 inclui a rigidez de fluência inicial (K_y) e a ductilidade de deslocamento (μ) das vigas. A rigidez de escoamento inicial foi calculada usando a carga de escoamento. A ductilidade de deslocamento foi calculada como a razão entre o deslocamento máximo e o deslocamento de escoamento correspondente de cada viga. Para a viga VCC1-0,8, apenas a carga máxima e seu deslocamento correspondente são relatados, devido a problemas com as medições do extensômetro.

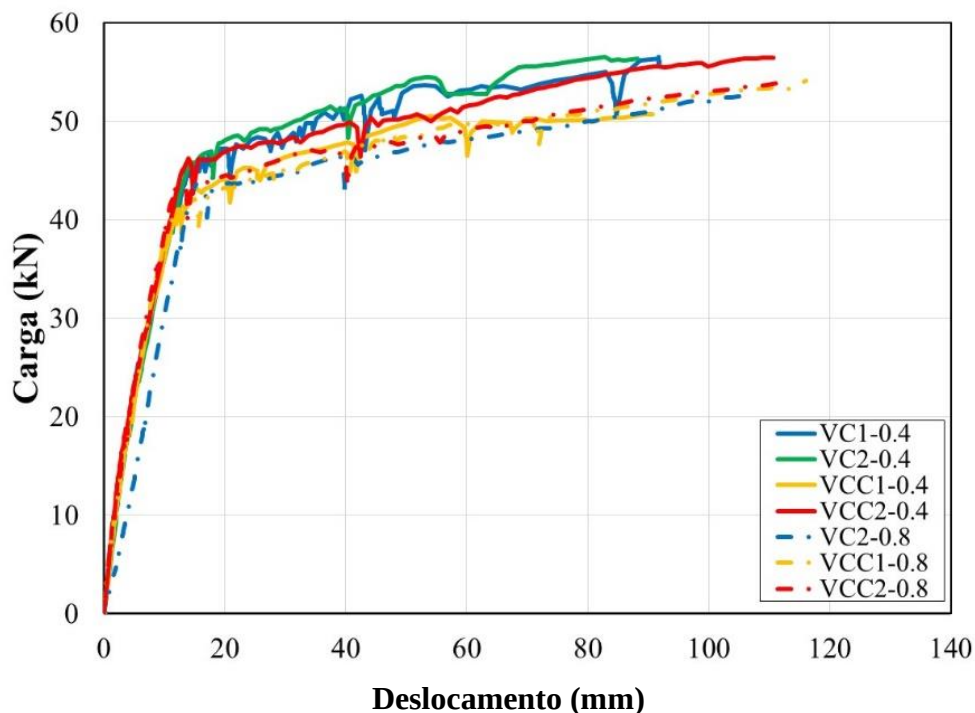


Figura 3. Curvas de carga - deslocamento vertical

Tabela 3. Parâmetros estruturais de vigas ensaiadas à ruptura

Viga	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{m2} (kN)	Δ_{m2} (mm)	K_y (kN/mm)	μ (Δ_{m2}/Δ_y)
VC1-0.4	43,47	13,08	56,54	91,79	3,32	7,02
VC2-0.4	44,09	13,24	54,45	88,18	3,33	6,66
VC1-0.8	--	--	52,93	119,30	--	--
VC2-0.8	42,52	14,35	52,56	105,87	2,96	7,38
Média	43,36	13,56	54,12	101,28	3,21	7,02
CV	0,02	0,05	0,03	0,14	0,07	0,05
VCC1-0.4	42,63	14,11	50,70	90,72	3,02	6,43
VCC2-0.4	46,13	15,59	56,48	110,66	2,96	7,10
VCC1-0.8	41,92	16,54	54,10	116,03	2,53	7,02
VCC2-0.8	42,93	14,44	53,92	112,79	2,97	7,81
Média	43,30	15,17	53,80	107,55	2,87	7,09
CV	0,04	0,07	0,04	0,11	0,08	0,08

A Tabela 3 mostra que as cargas médias de escoamento e as cargas máximas médias juntamente com seus deslocamentos médios correspondentes foram semelhantes para todas as vigas, respectivamente. A razão entre as cargas médias de escoamento das vigas corroídas e as cargas médias de escoamento das vigas de controle foi de 0,99. Por sua vez, a razão entre as cargas máximas médias das vigas corroídas e as cargas máximas médias das vigas de controle foi de 1,01. Adicionalmente, a Tabela 3 mostra que a rigidez de escoamento inicial média foi semelhante para todas as vigas. A razão entre a média das rigidezes de escoamento inicial das vigas corroídas e a média das rigidezes de escoamento inicial das vigas de controle foi de 0,90. Por fim, a Tabela 3 mostra que a ductilidade média de deslocamento das vigas foi semelhante. A razão entre as ductilidades de deslocamento médias das vigas corroídas e as ductilidades de deslocamento médias das vigas de controle foi de 1,01.

Apesar dos valores dos parâmetros eletroquímicos das vigas corroídas indicarem um alto nível de corrosão, não foi observada diferença significativa no comportamento estrutural das vigas corroídas em flexão, em comparação com as vigas controle. A carga de escoamento, a carga máxima, a rigidez de escoamento inicial e a ductilidade de deslocamento das vigas estudadas foram semelhantes. Embora os parâmetros acima sejam adequados do ponto de vista estrutural, os parâmetros eletroquímicos indicam um risco na durabilidade das vigas. Portanto, do ponto de vista eletroquímico, medidas devem ser tomadas para mitigar a corrosão nessas vigas.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Oito vigas de concreto armado foram ensaiadas sob cargas verticais incrementais até a ruptura. Foram consideradas vigas sem corrosão e vigas com parâmetros eletroquímicos associados a um alto nível de corrosão. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões e recomendações:

- O padrão de fissuração final das vigas de controle e das vigas corroídas foi semelhante. O padrão foi caracterizado pela formação de fissuras de flexão verticais na parte central das vigas e fissuras de cisalhamento de flexão inclinadas nas extremidades.

- Mesmo quando os valores dos parâmetros eletroquímicos das vigas corroídas indicaram um alto nível de corrosão, não foi observada diferença significativa no comportamento de flexão estrutural das vigas corroídas, comparado ao das vigas controle. A carga de escoamento, a carga máxima, a rigidez de escoamento inicial e a ductilidade de deslocamento das vigas estudadas com e sem corrosão foram semelhantes.
- Embora os parâmetros de comportamento à flexão estudados sejam adequados do ponto de vista estrutural, os parâmetros eletroquímicos indicam risco na durabilidade das vigas. Portanto, medidas devem ser tomadas para mitigar a corrosão nas vigas.
- Recomenda-se o estudo de vigas com parâmetros eletroquímicos associados a níveis de corrosão superiores aos considerados neste trabalho. Parâmetros físicos como fissuras e manchas associadas a níveis mais altos de corrosão também devem ser considerados. Esses parâmetros físicos não foram observados nas vigas estudadas. Isso permitirá estabelecer relações entre diferentes níveis de corrosão e os danos estruturais correspondentes em vigas de concreto armado. Desta forma, pode-se obter a relação entre os parâmetros eletroquímicos e estruturais das vigas. Os níveis de corrosão podem ser definidos com base em parâmetros estruturais, como perda de resistência, rigidez ou capacidade de deformação. Por sua vez, os parâmetros físicos podem ser avaliados com base nas larguras e comprimentos de fissuras longitudinais ao aço de armadura. Este tipo de fissuração é característico em vigas com altos níveis de corrosão.

5. AGRADECIMENTOS

R. Visairo Méndez agradece ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia pela bolsa de mestrado recebida. Da mesma forma, agradecemos à Faculdade de Engenharia da UADY e Cinvestav Mérida pelas facilidades fornecidas para medições estruturais e de corrosão.

6. REFERÊNCIAS

- Andrade F., y González J.A. (1978). Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Materials and Corrosion*, 29(8): 515-519.
- Andrade, C. (1993), Calculation of chloride diffusion-coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, 23 (3): 724-742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3).
- Castro P. (1998). “Corrosión en Estructuras de Concreto: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones”. 1ª Edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, DF.
- Castel A., François R., Arliguie G. (2000). *Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 1: Experimental study of corroded beams*. *Materials and Structures*, 33: 539-544, <https://doi.org/10.1007/BF02480533>
- Ceballos, M. (2016). “El concreto, material fundamental para la infraestructura.” Centro de Innovación Tecnológica para la Construcción. pp. 24-25.
- Elsener, B., Andrade, C. Gulikers, J., Polder, R y Raupach, M. (2003). *Half-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures*. *Materials and Structures*, 36: 461–471, <https://doi.org/10.1007/BF02481526>
- Gu X., Zhang W., Shang D., Wang X. (2010). “Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams.” *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, ASCE, 2, 3545–3552. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)339](https://doi.org/10.1061/41096(366)339)

- Juárez, C. A., Guevara, B., Fajardo, G., & Castro-Borges, P. (2011). *Ultimate and nominal shear strength in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion*. Engineering Structures, 33(8): 3189-3196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.014>
- Maldonado López, L. (1996). “*Corrosión del acero de refuerzo: revisión del estado del arte en México.*” En F. d. Yucatán (Ed.), VII Seminario de Investigación, (pág. 18). Mérida, Yucatán, México.
- Moreno-Herrera, J., Visairo-Méndez, R., Varela-Rivera, J., Balancan-Zapata, M., y Castro-Borges, P. (2022). Enviado a: *Corrosion, The Journal of Science and Engineering*.
- NMX-C-501-ONNCCE-2015. (2015). “*Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-514-ONNCCE-2016. (2016). “*Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-523-ONNCCE-2016. (2016). “*Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado - Concentración de cloruros solubles en agua y ácido – determinación en concreto hidráulico - Método de extracción y método de determinación por ión selectivo.*” Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NTCC-2017 (2017). “*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.*” Órgano del Gobierno del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno. México, D.F.: Administración Pública del Distrito Federal.
- Ou Y., Susanto Y., Roh H. (2016). *Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars*. Construction and Building Materials, 103: 93–104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.075>
- Rodríguez-Rodríguez, A. (2014). *Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado*. CENIC: Ciencias Químicas, 45: 52-59.
- Shaikh, F.U.A. (2018). *Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 12(3), <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0234-y>
- Tachibana Y., Maeda K., Kajikawa Y., Kawuamura M. (1990). *Mechanical behavior of RC beams damaged by corrosion of reinforcement*. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, 178-187.
- Torres Acosta, A., Navarro Gutiérrez, S., & Terán, C. (2007). *Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams*. Engineering Structures, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.018>.
- Vázquez Castillo, C. D. (1998). “*Diagnóstico de la corrosión del puente de Celestún.*” Tesis. Mérida, Yucatán, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Vidal T., Castel A., François R. (2007). *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. Cement and Concrete Research, 37(11): 1551-1561, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Xianming, S., Ning, X., Keith, F., Jing, G. (2012) *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview*. Construction and Building Materials, 37: 36-40, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
- Ye, H., Fu, C., Jin, N., Jin, X. (2018). *Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques*. Construction and Building Materials, 162: 286–297, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.108>

Yu, L., François, R., Hiep, V., L'Hostis, V., Gagné, R. (2015). *Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions*. Cement and Concrete Research, 67: 246–258, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.007>