



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



FERNANDO NUNES NASCIMENTO

AVALIAÇÃO DA PERDA DE ANCORAGEM EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUBMETIDOS A ATAQUES CORROSIVOS

Uberlândia-MG

2025

FERNANDO NUNES NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE ANCORAGEM EM ELEMENTOS
ESTRUTURAIS SUBMETIDOS A ATAQUES CORROSIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Doutor Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia-MG

2025

FERNANDO NUNES NASCIMENTO

AVALIAÇÃO DA PERDA DE ANCORAGEM EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS SUBMETIDOS A ATAQUES CORROSIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Doutor Antonio Carlos dos Santos

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Arquimedes Diógenes Ciloni

Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTO

Acima de tudo, agradeço a Deus e a Nossa Senhora, pela sabedoria concedida, pela fé que sustenta minhas escolhas e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus pais, Antônio do Nascimento e Fabiana Nunes da Silva, manifesto minha mais profunda gratidão por todo amor, confiança e esforço incansável dedicados à minha formação. A eles devo os valores e princípios que orientam minha vida, assim como o apoio constante em cada etapa desta caminhada.

Aos meus irmãos, Gabriel Nunes Nascimento e Davi Nunes Nascimento, que sempre foram fonte de inspiração e motivação para que eu buscasse dar o meu melhor em qualquer atividade, dedico igualmente minha gratidão. Estendo este agradecimento a toda a minha família, que jamais deixou de me apoiar e de oferecer suporte nos momentos mais necessários.

À minha namorada, Júlia Magalhães de Paiva, agradeço por todo amor e carinho, pela confiança e pelo apoio incondicional, especialmente nos momentos de maior dificuldade. Sua presença foi essencial para que esta jornada fosse mais leve e significativa.

Ao meu orientador, professor doutor Antonio Carlos dos Santos, registro meu sincero reconhecimento por sua dedicação, orientação e apoio não apenas neste trabalho, mas também em minha formação como engenheiro e pessoa. Foi ele quem jamais permitiu que eu desistisse, mesmo diante dos inúmeros percalços enfrentados tanto durante a pesquisa quanto na vida. Sua experiência e disponibilidade foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Aos meus amigos Bruno Henrique Lino de Sousa, Lucas Gabriel Coronel Tirone e João Pedro Trocoli Makhoul, que se tornaram verdadeiros irmãos ao longo desta graduação, deixo meu agradecimento pela parceria, companheirismo e pelo apoio em todas as situações. Tornaram desta trajetória acadêmica uma experiência mais prazerosa, saudável e marcante.

Agradeço à FAPEMIG e à Vale pelo apoio financeiro concedido, fundamental para a viabilização desta pesquisa. Registro também minha gratidão ao grupo de pesquisa DURAE, cuja contribuição científica, troca de conhecimentos e suporte técnico foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, que, com empenho, dedicação e generosidade, compartilharam seus conhecimentos, contribuindo de forma determinante para minha formação acadêmica e profissional.

Avaliação da perda de ancoragem em elementos estruturais submetidos a ataques corrosivos

Evaluation of anchorage loss in structural elements subjected to corrosive attacks

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de um programa experimental voltado à avaliação da perda de ancoragem em barras de aço CA-50 submetidas a diferentes níveis de corrosão induzida. Foram investigados 24 corpos de prova, com diâmetros de 6,3 mm e 10 mm, moldados sob reduções geométricas de 0%, 10%, 20% e 30% do diâmetro original. Os ensaios de arrancamento direto (pull-out test), realizados aos 56 dias, possibilitaram observar a transição entre os mecanismos de falha, distinguindo os casos em que o fator limitante é a aderência aço–concreto daqueles em que a integridade do aço passa a governar a ruptura. Os resultados demonstraram que, enquanto em níveis de deterioração até 20% a falha ainda se associa à perda de aderência, para 30% de redução diametral a ruptura do aço se torna predominante. Assim, o limiar crítico de transição situa-se no intervalo entre 20% e 30% de perda geométrica, fornecendo parâmetros de relevância prática para diagnósticos, prognósticos e estratégias de intervenção em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: corrosão; arrancamento; aderência; ruptura do aço; durabilidade estrutural.

Abstract

This work presents the results of an experimental program aimed at evaluating anchorage loss in CA-50 reinforcing bars subjected to different levels of induced corrosion. A total of 24 specimens, with diameters of 6.3 mm and 10 mm, were tested at 56 days under geometric reductions of 0%, 10%, 20%, and 30% of the original diameter. Direct pull-out tests allowed the observation of the transition between failure mechanisms, distinguishing cases in which the limiting factor was the steel–concrete bond from those in which the steel integrity governed the collapse. The results showed that while up to 20% diameter loss the failure was still associated with bond degradation, at 30% diameter loss steel rupture became predominant. Thus, the critical threshold for the transition lies between 20% and 30% of diameter loss, providing relevant parameters for diagnostics, prognosis, and intervention strategies in reinforced concrete structures.

Keywords: corrosion; pull-out test; bond strength; steel rupture; structural durability.

1 Introdução

A corrosão das armaduras é reconhecida como uma das principais manifestações patológicas que afetam a durabilidade e a segurança das estruturas de concreto armado. Esse fenômeno é desencadeado, em grande parte, pela penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e dióxido de carbono, que despassivam a camada protetora do aço, iniciando o processo corrosivo (MEIRA, 2017). A perda de seção transversal das barras de aço e a formação de produtos de corrosão expansivos reduzem a capacidade resistente do elemento estrutural e comprometem sua vida útil (ANDRADE; ALONSO, 2004).

Dentro desse contexto, a ancoragem entre elementos estruturais desempenha papel fundamental no desempenho global das construções em concreto armado. A transmissão eficaz de esforços entre pilares, vigas e lajes depende diretamente da capacidade de ancoragem das barras de aço, assegurada pelo comprimento de aderência previsto em norma (ABNT NBR 6118:2023). Alterações nesse mecanismo podem levar a falhas prematuras por deslizamento ou arrancamento das armaduras, comprometendo a segurança estrutural.

A aderência aço-concreto é o mecanismo que garante a compatibilidade de deformações entre os materiais, permitindo que as tensões sejam transferidas de forma contínua. Tal mecanismo é resultante da adesão química, do atrito superficial e do engrenamento mecânico entre nervuras das barras e a matriz cimentícia (CORONELLI; GAMBAROVA, 2004). A corrosão interfere de modo direto nesse processo, tanto pela redução do diâmetro das barras quanto pela degradação da interface aço-concreto, favorecendo o descolamento e a perda de resistência ao arrancamento (ZHANG; DENG; WANG, 2019).

Apesar da ampla literatura sobre os efeitos da corrosão em estruturas de concreto, grande parte dos estudos foca no processo expansivo associado à formação de óxidos, gerando fissuração do cobrimento e perda adicional de aderência (TANG et al., 2022; ZHAO et al., 2019). No presente trabalho, busca-se isolar o efeito puramente geométrico da corrosão, considerando exclusivamente a perda de seção transversal das barras como variável de análise. Dessa forma, não se avalia a degradação decorrente das pressões internas do processo corrosivo, mas apenas a redução direta da área resistente do aço e seu impacto sobre a ancoragem.

Diante da relevância prática do tema, há uma demanda crescente por estudos que não apenas expliquem os mecanismos de corrosão, mas que forneçam parâmetros operacionais para diagnóstico, prognóstico e intervenção em estruturas de concreto armado. Nesse sentido, o foco deste trabalho é investigar o limiar crítico em que a falha por ruptura do aço passa a ser mais determinante que a perda de aderência aço-concreto, definindo assim a fronteira de comportamento estrutural em situações de deterioração avançada.

Foram utilizados aços CA-50 com diâmetros nominais de 6,3 mm e 10 mm, previamente submetidos a diferentes níveis de corrosão controlada — correspondentes a perdas de 0%, 10%, 20% e 30% do diâmetro original. Cada condição foi representada por três corpos de prova, totalizando 24 amostras moldadas para ensaios de arrancamento (pull-out test), conduzidos segundo a norma EN 10080:2005 e práticas recomendadas pela literatura. Todos os ensaios foram realizados aos 56 dias de idade do concreto. O objetivo central consiste em identificar, a partir dos resultados experimentais, o ponto de transição em que a integridade do aço se torna o fator limitante, sobrepondo-se à aderência aço-concreto.

2 Programa experimental

2.1 Amostra

As amostras utilizadas neste estudo consistem em barras de aço CA-50 com diâmetros nominais de 6,3 mm e 10 mm. Cada diâmetro foi submetido a quatro níveis de deterioração controlada, correspondentes a perdas de 0%, 10%, 20% e 30% do diâmetro original, obtidas por processo prévio de corrosão induzida. Para cada condição experimental foram moldados três corpos de prova, totalizando 24 unidades destinadas aos ensaios de arrancamento (*pull-out test*), todos executados aos 56 dias de idade do concreto. A Figura 1 apresenta a organização esquemática do programa experimental, evidenciando a distribuição dos diâmetros e respectivos níveis de corrosão.

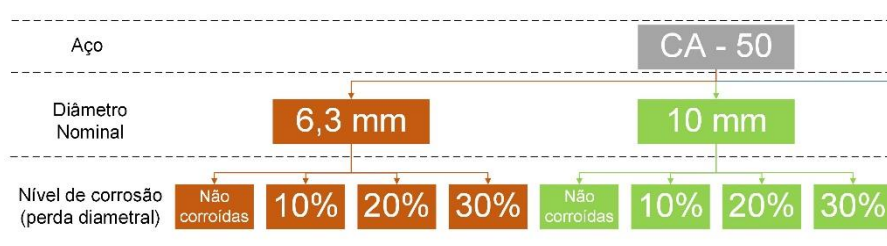


Figura 1: Programa experimental (Fonte: Autor).

2.2 Ensaio de pré-corrosão

O processo de indução da corrosão das barras de aço foi fundamentado em metodologias descritas em normas consolidadas, como a ASTM G109 (2013) e a NT Build 356 (1999), com adaptações ao contexto específico desta pesquisa. Para intensificar a ação corrosiva e reduzir o tempo de exposição, utilizou-se uma solução saturada de cloreto de sódio (NaCl) como meio eletrolítico, associada a uma fonte de corrente contínua ajustada para 2,6 A. A disposição esquemática do ensaio em operação encontra-se apresentada na Figura 2.

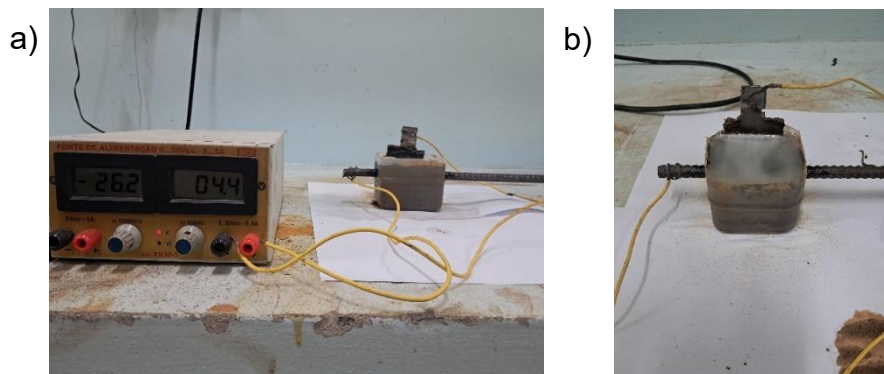


Figura 2 – Ensaio de pré-corrosão: a) Fonte e barra b) Barra (Fonte: Autor).

As barras foram expostas ao meio agressivo apenas na fração correspondente ao trecho posteriormente moldado nos corpos de prova de arrancamento. Essa estratégia buscou restringir a ação eletroquímica à região de interesse, reduzindo variações no perfil de ataque e contribuindo para maior uniformidade dos resultados. Como exemplo do efeito obtido, a Figura 3 ilustra as variações visuais nos diferentes níveis de corrosão atingidos após a realização do processo de pré-corrosão.



Figura 3 – Níveis de corrosão – 30%,20%,10% e inerte (Fonte: Autor).

Cabe destacar que o mecanismo patológico considerado neste estudo se aproxima do comportamento de um ataque corrosivo homogêneo. Embora o processo experimental tenha utilizado solução saturada de cloretos, a configuração do ensaio e a forma de indução empregada não reproduzem a penetração localizada típica dos íons cloreto, que resulta em pitting corrosion. Ao contrário, o modelo adotado gera uma corrosão mais uniformizada ao longo do comprimento exposto, análoga ao efeito provocado pela carbonatação do concreto. Essa abordagem permite isolar e quantificar a influência da perda geométrica da seção da armadura sobre a ancoragem, sem considerar os efeitos adicionais da fissuração induzida por expansão.

A quantificação da corrosão foi realizada a partir da variação de massa das amostras, medida antes e após o processo. Para converter essa perda de massa em perda de diâmetro, adotou-se procedimento análogo ao estabelecido pela ABNT NBR 7480 (2007), que define a determinação do diâmetro nominal em função da massa, da densidade e do comprimento da barra. Ressalta-se que essa aplicação pressupõe a hipótese de homogeneidade no processo de corrosão, de forma que a redução de massa seja distribuída de maneira relativamente uniforme ao longo do trecho exposto. O cálculo da perda diametral foi realizado conforme a Equação (1).

$$P_d = \sqrt{d_0 \cdot \left(1 - \frac{m_0 - m}{\left(\frac{l_{exp}}{l} \right) \cdot m_0} \right)}$$

Equação 1

Em que:

P_d é a perda relativa de diâmetro;

d_0 é o diâmetro inicial da barra;

m_0 é a massa inicial da barra antes da corrosão;

m é a massa final da barra após a corrosão;

l_{exp} é o comprimento exposto da barra ao processo corrosivo;

l é o comprimento total da barra.

Com o intuito de estabelecer parâmetros de controle para o processo de indução corrosiva, antes da aplicação direta nas barras destinadas aos corpos de prova de arrancamento, foi conduzida uma etapa preliminar de ensaios. Nessa fase, segmentos reduzidos de barras de aço foram expostos às mesmas condições eletroquímicas, porém em diferentes intervalos de tempo, permitindo a construção de curvas de ajuste entre tempo de exposição e perda de massa. A regressão obtida serviu de referência para definir os períodos de exposição necessários para alcançar as faixas de deterioração desejadas (0%, 10%, 20% e 30% de perda diametral) nas barras efetivamente moldadas nos prismas de concreto. A representação dessa regressão encontra-se na Figura 4.

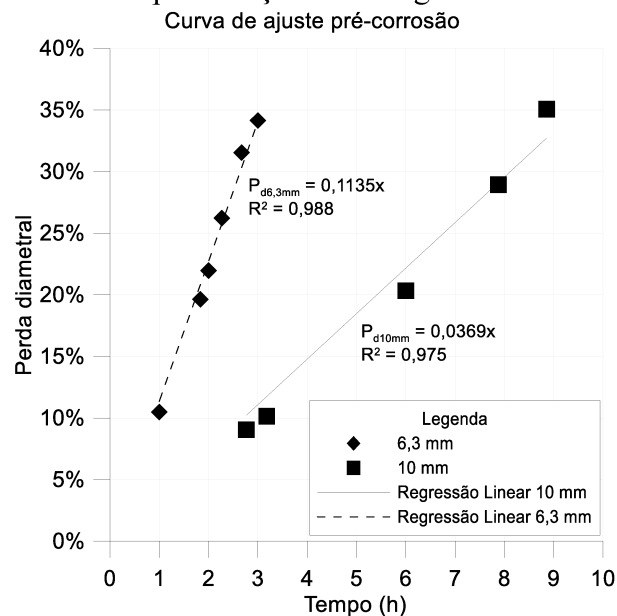


Figura 4 –Equações de ajuste pré-corrosão (Fonte: Autor).

2.3 Ensaio de Arrancamento Direto

O ensaio de arrancamento (pull-out test) foi conduzido em conformidade com as recomendações da EN 10080 (2005), a qual define dimensões padronizadas para os prismas de concreto utilizados nesse tipo de ensaio. Tais dimensões são estabelecidas em função do diâmetro nominal da barra de aço empregada, assegurando proporcionalidade geométrica entre corpo de prova e armadura. Dentro dessa configuração, o comprimento aderente da barra em relação ao concreto corresponde à metade da altura do prisma. A configuração genérica do ensaio, incluindo a disposição do corpo de prova, está representada na Figura 5

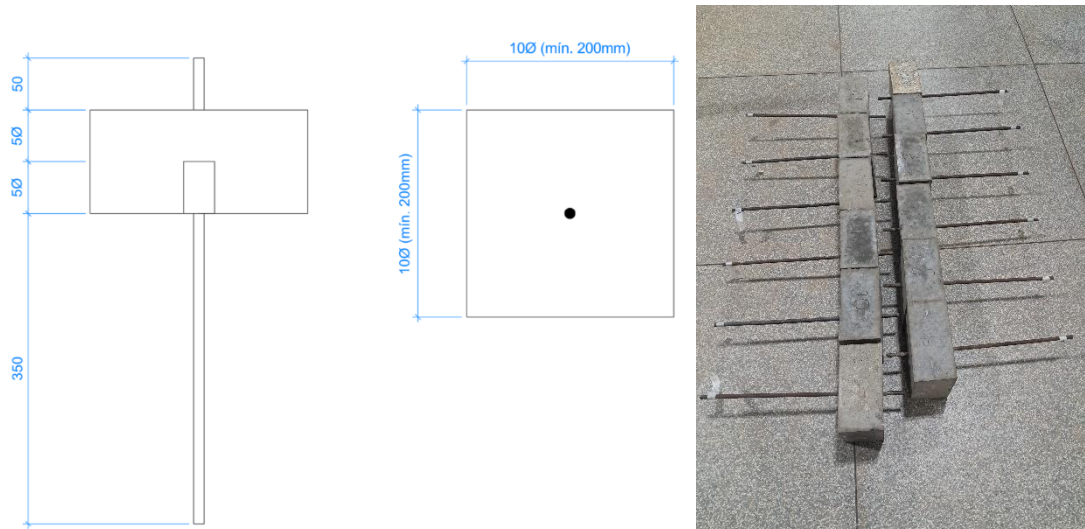


Figura 5 – a) Configuração do ensaio b) CPs moldados (Fonte: Autor).

Durante o procedimento, o prisma de concreto permaneceu rigidamente apoiado no dispositivo de ensaio, enquanto a barra de aço era tracionada no sentido longitudinal por meio da garra da máquina, promovendo a sollicitação direta da interface aço–concreto.

A aplicação da carga foi realizada em uma máquina universal de ensaios, equipada com célula de carga calibrada, conduzida de forma monotônica e contínua, sob controle de deslocamento, respeitando a taxa de variação estabelecida pela norma. O ensaio foi interrompido quando se verificou um dos seguintes critérios: (i) deslizamento relativo entre a barra e o prisma de concreto, (ii) fendilhamento do corpo de prova ou (iii) ruptura da própria barra. O deslocamento relativo da barra em relação ao concreto foi monitorado por um transdutor de deslocamento linear (LVDT), enquanto a força aplicada foi registrada pela célula de carga, possibilitando a análise conjunta da força e do deslocamento em cada corpo de prova. A execução prática do ensaio, com o posicionamento do corpo de prova e a aplicação da carga, pode ser observada na Figura 6.



Figura 6 – Ensaio de arrancamento (Fonte: Autor).

A determinação da tensão média de aderência foi realizada a partir da relação entre a carga máxima de arrancamento e a área de superfície de contato da barra com o concreto, corrigida em

função da perda diametral decorrente da corrosão. Esse parâmetro, expresso pela Equação (2), serviu como referência para a análise comparativa entre os diferentes níveis de corrosão avaliados.

$$\tau = \frac{10 \cdot F}{5 d_0 \cdot \pi \cdot [(1 - P_d) d_0]}$$

Equação 2

τ é a tensão média de aderência (MPa);
 F é a carga máxima de arrancamento (kN);
 d_0 é o diâmetro inicial da barra (mm);
 P_d a perda relativa de diâmetro.

2.4 Ensaios mecânicos do concreto

Com o intuito de caracterizar o material empregado e verificar a classe de resistência do concreto utilizado nos corpos de prova, foram realizados ensaios mecânicos de referência. Inicialmente, executou-se o ensaio de compressão axial simples em corpos de prova cilíndricos, conforme prescrito pela ABNT NBR 5739:2018, de modo a determinar a resistência característica do concreto a partir dos 56 dias, parâmetro utilizado para enquadrar o material em sua respectiva classe de resistência.

Complementarmente, foi conduzido o ensaio de compressão diametral, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7222:2011, o qual permitiu estimar a resistência à tração indireta do concreto. Esse parâmetro é de especial relevância, pois fornece indicativos da capacidade do material em resistir às tensões cisalhantes que ocorrem na interface aço-concreto durante o ensaio de arrancamento. Além disso, procedeu-se ao ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão, conforme metodologia descrita na ABNT NBR 8522:2021, destinado à avaliação da rigidez do concreto. Os resultados obtidos em todos os ensaios realizados encontram-se sintetizados na Tabela 1, a qual apresenta as propriedades mecânicas do concreto empregado nesta pesquisa.

Propriedades do concreto			
Φ_{nom} (mm)	Resistência à compressão $\pm \sigma$ (MPa)	Resistência à tração $\pm \sigma$ (MPa)	Módulo de elasticidade $\pm \sigma$ (Gpa)
6,3	58,26 \pm 1,64	2,18 \pm 0,06	84,33 \pm 7,30
10	58,94 \pm 3,77	2,47 \pm 0,17	88,6 \pm 0,28

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do concreto para cada ensaio(Fonte: Autor).

3 Resultados e discussão

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento direto, sistematizados nas **Tabelas 2 e 3** conforme o diâmetro das armaduras e os respectivos níveis de pré-corrosão.

Φ_{nom} (mm)	CP	Perda de diâmetro $\pm \sigma$ (%)	Diâmetro $\pm \sigma$ (mm)	Carga de arrancamento (kN)	Carga média (kN)	Desvio Padrão	Tensão de aderência $\pm \sigma$ (MPa)	Critério de parada
6,3	1	31,53% \pm 00,49%	4,35 \pm 0,45	6,04	8,77	2,98	13,89 \pm 06,97	Ruptura da barra
	2	28,10% \pm 00,84%	4,57 \pm 0,59	11,94			26,15 \pm 06,65	Ruptura da barra
	3	27,85% \pm 01,37%	4,59 \pm 0,75	8,32			18,14 \pm 06,63	Ruptura da barra
	4	19,09% \pm 00,56%	5,15 \pm 0,48	11,91	12,82	0,80	23,16 \pm 01,59	Escorregamento
	6	19,63% \pm 00,52%	5,74 \pm 0,46	13,38			26,21 \pm 01,60	Escorregamento
	7	18,02% \pm 00,67%	5,11 \pm 0,52	13,17			25,28 \pm 01,57	Escorregamento
	5	09,81% \pm 00,33%	5,21 \pm 0,37	9,05	10,92	2,27	15,79 \pm 04,03	Escorregamento
	8	09,83% \pm 00,20%	5,73 \pm 0,29	10,27			17,93 \pm 04,03	Escorregamento
	9	09,29% \pm 00,03%	5,77 \pm 0,14	13,44			23,31 \pm 04,01	Escorregamento
	10	00,00% \pm 00,00%	6,36 \pm 0,07	11,78	14,37	2,27	18,55 \pm 03,64	Escorregamento
	11	00,00% \pm 00,00%	6,36 \pm 0,07	16,03			25,23 \pm 03,64	Escorregamento
	12	00,00% \pm 00,00%	6,36 \pm 0,07	15,3			24,08 \pm 03,64	Escorregamento

Tabela 2 – Dados brutos do ensaio de arrancamento de 6,3 mm (Fonte: Autor).

Φ_{nom} (mm)	CP	Perda de diâmetro $\pm \sigma$ (%)	Diâmetro $\pm \sigma$ (mm)	Carga de arrancamento (kN)	Carga média (kN)	Desvio Padrão	Tensão de aderência $\pm \sigma$ (MPa)	Critério de parada
10	1	27,20% \pm 00,38%	7,18 \pm 0,04	24,18	22,16	2,90	21,75 \pm 02,61	Ruptura da barra
	2	30,44% \pm 00,43%	6,86 \pm 0,04	23,46			22,09 \pm 02,73	Ruptura da barra
	3	28,92% \pm 00,41%	7,01 \pm 0,04	18,84			17,36 \pm 02,67	Ruptura da barra
	4	17,90% \pm 00,46%	8,10 \pm 0,04	34,13	32,47	2,46	27,22 \pm 01,97	Escorregamento
	6	19,32% \pm 00,56%	7,96 \pm 0,06	33,64			27,30 \pm 02,01	Escorregamento
	7	22,28% \pm 00,58%	7,66 \pm 0,06	29,64			24,97 \pm 02,08	Escorregamento
	5	10,15% \pm 00,76%	8,86 \pm 0,08	40,42	42,85	2,12	29,46 \pm 01,57	Escorregamento
	8	10,51% \pm 00,43%	8,82 \pm 0,04	44,34			32,44 \pm 01,56	Escorregamento
	9	10,20% \pm 00,32%	8,85 \pm 0,03	43,80			31,94 \pm 01,55	Escorregamento
	10	00,00% \pm 00,00%	9,86 \pm 0,07	52,56	45,79	5,87	34,42 \pm 03,85	Escorregamento
	11	00,00% \pm 00,00%	9,86 \pm 0,07	42,76			28,00 \pm 03,85	Fendilhamento
	12	00,00% \pm 00,00%	9,86 \pm 0,07	42,05			27,54 \pm 03,85	Fendilhamento

Tabela 3 – Dados brutos do ensaio de arrancamento de 10 mm (Fonte: Autor).

Na sequência, procedeu-se à análise estatística dos resultados, com a finalidade de eliminar eventuais valores atípicos que pudessem comprometer a representatividade do conjunto amostral. O critério adotado baseou-se na verificação do desvio em relação ao comportamento médio, sendo descartadas as amostras que apresentaram discrepâncias significativas. Em particular, observou-se que, nos corpos de prova 11 e 12 referentes ao diâmetro nominal de 10 mm, o ensaio foi interrompido pelo critério de fendilhamento do concreto. Embora essa ocorrência esteja prevista como válida pela norma, neste estudo, cujo foco reside na determinação da carga de arrancamento direto, considerou-se que o fendilhamento configurou uma limitação do concreto e não da interface de aderência. Tal interpretação foi corroborada pelo cálculo da tensão de aderência, cujos valores se mostraram substancialmente inferiores aos obtidos no corpo de prova 10, da mesma série. A

ocorrência pode ser visualizada na Figura 7, que ilustra o modo de falha apresentado por esses corpos de prova.



Figura 7 – CPs 11 e 12 de 10 mm fendilhados após ensaio (Fonte: Autor).

Adicionalmente, verificou-se que os corpos de prova 5, 8 e 9, correspondentes ao nível de 10% de perda diametral no diâmetro de 6,3 mm, apresentaram valores demasiadamente destoantes em relação à tendência observada, não se ajustando a uma possível regressão. Também nesse caso, a interpretação adotada foi a de que o material limitante foi o próprio concreto, não refletindo adequadamente a capacidade de ancoragem da interface aço-concreto. Dessa forma, essa faixa foi igualmente desconsiderada para os cálculos subsequentes. A relação final dos corpos de prova mantidos no corpo amostral, após a aplicação dos critérios estatísticos e o devido processamento dos resultados, encontra-se organizada na Tabela 4.

Φ_{nom} (mm)	CP	Perda de diâmetro $\pm \sigma$ (%)	Carga de arrancamento $\pm \sigma$ (kN)	Tensão de aderência $\pm \sigma$ (MPa)	Carga média (kN)	Critério de parada
6,3	1	31,53% \pm 00,49%	6,04 \pm 1,61	13,89 \pm 03,77	7,18	Ruptura da barra
	3	27,85% \pm 01,37%	8,32 \pm 1,61	18,14 \pm 03,59		Ruptura da barra
	6	19,63% \pm 00,52%	13,38 \pm 0,15	26,21 \pm 00,35	13,28	Escorregamento
	7	18,02% \pm 00,67%	13,17 \pm 0,15	25,28 \pm 00,36		Escorregamento
	11	00,00% \pm 00,00%	16,03 \pm 0,52	25,23 \pm 00,83		Escorregamento
	12	00,00% \pm 00,00%	15,30 \pm 0,52	24,08 \pm 00,83	15,67	Escorregamento
10	1	27,20% \pm 00,38%	24,18 \pm 0,51	21,75 \pm 00,47	23,82	Ruptura da barra
	2	30,44% \pm 00,43%	23,46 \pm 0,51	22,09 \pm 00,50		Ruptura da barra
	4	17,90% \pm 00,46%	34,13 \pm 2,46	27,22 \pm 01,97		Escorregamento
	5	19,32% \pm 00,56%	33,64 \pm 2,46	27,30 \pm 02,01	32,47	Escorregamento
	6	22,28% \pm 00,58%	29,64 \pm 2,46	24,97 \pm 00,19		Escorregamento
	7	10,15% \pm 00,76%	40,42 \pm 2,12	29,46 \pm 01,57		Escorregamento
	8	10,51% \pm 00,43%	44,34 \pm 2,12	32,44 \pm 01,56	42,85	Escorregamento
	9	10,20% \pm 00,32%	43,80 \pm 2,12	31,94 \pm 01,55		Escorregamento
	10	00,00% \pm 00,00%	52,56 \pm 0,00	34,42 \pm 00,00	52,56	Escorregamento

Tabela 4 – Dados processados dos ensaios de arrancamento de 6,3mm e 10 mm (Fonte: Autor).

A partir dos dados obtidos nos ensaios de arrancamento, foram construídas as curvas de tensão de aderência versus deslocamento, organizadas lado a lado na Figura 8. À esquerda,

apresentam-se as curvas brutas, diretamente registradas nos ensaios, enquanto à direita estão as curvas resultantes após o devido processamento estatístico, com a exclusão dos corpos de prova que não atenderam aos critérios estabelecidos. Essa disposição comparativa permite visualizar de forma clara o efeito do tratamento dos dados, destacando como a filtragem estatística contribui para evidenciar a tendência geral de variação da aderência aço–concreto diante dos diferentes níveis de corrosão. Embora a análise subsequente se concentre nos valores de carga máxima, a leitura conjunta das curvas fornece uma compreensão mais completa do comportamento global dos ensaios.

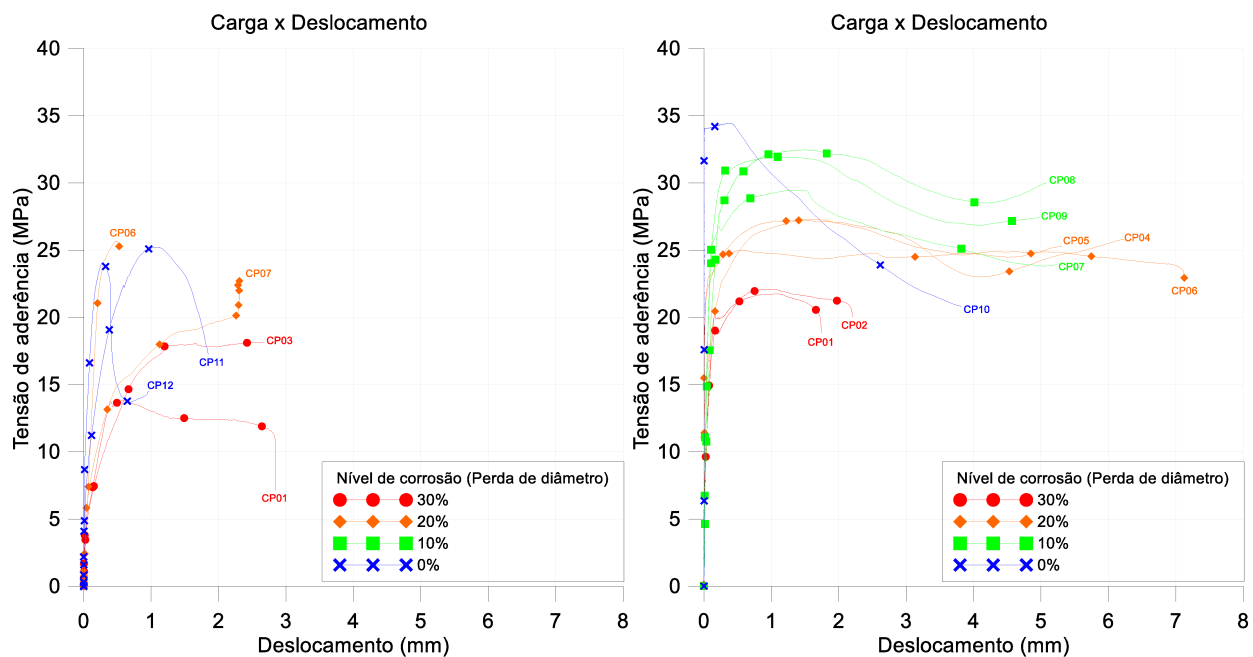


Figura 8 – Curvas de arrancamento: a) 6,3 mm; b) 10 mm (Fonte: Autor).

Nos níveis mais avançados de deterioração, observou-se uma redução significativa na capacidade de arrancamento das barras ensaiadas. Em particular, para a faixa de 30% de perda diametral, em diversos corpos de prova a falha deixou de ocorrer pela perda de aderência entre aço e concreto e passou a ser caracterizada pela ruptura do próprio aço. Isso indica que, entre 20% e 30% de perda diametral, ocorre a transição em que a integridade da armadura se torna o fator limitante da resistência ao arrancamento. Esse comportamento é consistente com achados experimentais de Koulouris & Apostolopoulos (2021), que mostram que, conforme aumenta a corrosão (incluindo redução geométrica da seção), a força de aderência residual decresce de forma a tornar a ruptura do aço mais provável em níveis elevados de dano.

A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados médios de carga máxima de arrancamento para cada nível de deterioração analisado, bem como os critérios de falha observados nos ensaios. Nota-se que, nos níveis iniciais (0% e 10%), a aderência ainda se mostrou predominante, conduzindo à falha por deslizamento ou fendilhamento do concreto. No nível de 20%, há uma queda progressiva da capacidade de ancoragem, embora a falha ainda esteja associada à interface aço–concreto. Já no nível de 30%, a ruptura do aço se torna recorrente, evidenciando que o limiar crítico de transição entre aderência e ruptura do aço se encontra no intervalo de 20% a 30% de perda diametral.

Φ_{nom} (mm)	CP	Perda de diâmetro $\pm \sigma$ (%)	Tensão de aderência $\pm \sigma$ (MPa)	Critério de parada
6,3	1	31,53% \pm 00,49%	13,89 \pm 03,77	Ruptura da barra
	3	27,85% \pm 01,37%	18,14 \pm 03,59	Ruptura da barra
	6	19,63% \pm 00,52%	26,21 \pm 00,35	Escorregamento
	7	18,02% \pm 00,67%	25,28 \pm 00,36	Escorregamento
	11	00,00% \pm 00,00%	25,23 \pm 00,83	Escorregamento
	12	00,00% \pm 00,00%	24,08 \pm 00,83	Escorregamento
10	1	27,20% \pm 00,38%	21,75 \pm 00,47	Ruptura da barra
	2	30,44% \pm 00,43%	22,09 \pm 00,50	Ruptura da barra
	4	17,90% \pm 00,46%	27,22 \pm 01,97	Escorregamento
	5	19,32% \pm 00,56%	27,30 \pm 02,01	Escorregamento
	6	22,28% \pm 00,58%	24,97 \pm 00,19	Escorregamento
	7	10,15% \pm 00,76%	29,46 \pm 01,57	Escorregamento
	8	10,51% \pm 00,43%	32,44 \pm 01,56	Escorregamento
	9	10,20% \pm 00,32%	31,94 \pm 01,55	Escorregamento
	10	00,00% \pm 00,00%	34,42 \pm 00,00	Escorregamento

Tabela 5 – Critérios de parada de ensaio e tensão aderente de 6,3mm e 10 mm (Fonte: Autor).

Para fins de atestar esse comportamento, foi traçado um diagrama de tensão de aderência em função da perda diametral, com o intuito de analisar comparativamente tanto a evolução da perda de ancoragem quanto a ocorrência dos diferentes tipos de ruptura observados nos ensaios. Esse recurso gráfico permite visualizar de forma integrada a redução progressiva da aderência à medida que a corrosão avança, bem como identificar o intervalo em que a integridade do aço passa a ser determinante no colapso do sistema.

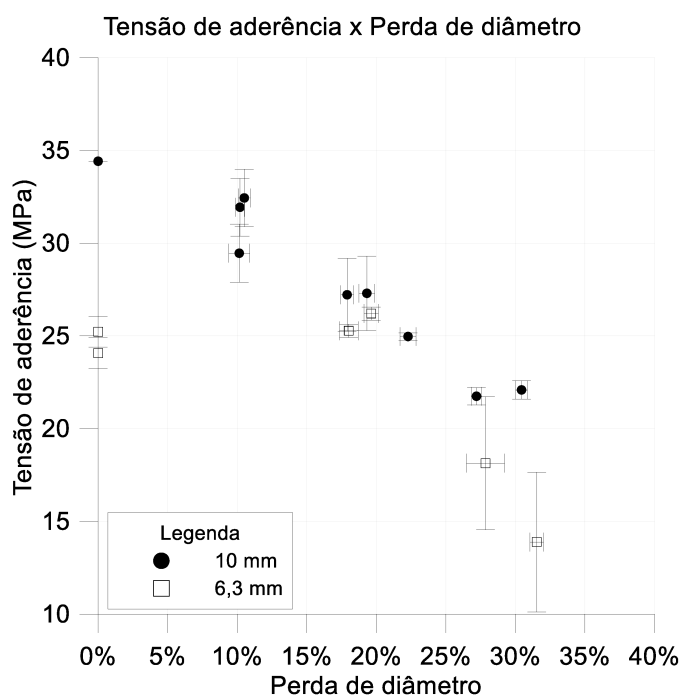


Figura 9 – Diagrama tensão de aderência \times perda diametral (Fonte: Autor).

A análise da Figura 9 evidencia que o comportamento da tensão de aderência em função da perda diametral apresenta tendências distintas para os dois diâmetros avaliados. No caso das barras de 6,3 mm, observa-se uma queda acentuada e notável na faixa de 30% de perda diametral, indicando que, nesse patamar, a integridade da seção de aço se torna decisiva para a ruptura. Já para as barras de 10 mm, o comportamento é mais discreto, caracterizado por uma redução contínua e gradual da tensão de aderência ao longo dos níveis de deterioração. Ainda assim, também nesse diâmetro o estado mais crítico ocorre em 30% de perda, quando a ruptura do aço se torna predominante, reforçando que o limiar de transição entre aderência e resistência metálica situa-se entre 20% e 30% de perda diametral.

4 Conclusão

O presente estudo permitiu avaliar, de forma sistemática, os efeitos da corrosão induzida sobre a capacidade de ancoragem de barras de aço CA-50 em concreto, considerando diâmetros de 6,3 mm e 10 mm submetidos a perdas de 0%, 10%, 20% e 30% de seção geométrica. A análise experimental mostrou que, nos níveis iniciais de deterioração, a aderência aço–concreto permanece como fator predominante na resistência ao arrancamento, enquanto a perda progressiva de diâmetro acarreta redução gradual da tensão de aderência mobilizada.

A partir dos resultados, observou-se que, na faixa de 20% de perda diametral, a falha ainda se relaciona principalmente à interface aço–concreto, manifestando-se por escorregamento ou fendilhamento do concreto. Entretanto, para 30% de perda, o mecanismo de falha altera-se substancialmente, sendo a ruptura do aço o critério predominante. Dessa forma, identifica-se que o limiar de transição entre os mecanismos de falha se encontra no intervalo entre 20% e 30% de perda diametral, quando a integridade da seção metálica passa a governar o colapso.

Do ponto de vista prático, tais achados reforçam a importância de se considerar não apenas a perda de aderência, mas também a capacidade residual do aço em situações de corrosão avançada. A identificação desse limiar fornece subsídios relevantes para diagnósticos estruturais, uma vez que permite diferenciar cenários em que a reabilitação pode priorizar o reforço da interface aço–concreto daqueles em que a substituição ou reforço da armadura torna-se imprescindível. Assim, o estudo contribui para práticas de inspeção e prognóstico mais consistentes, alinhadas às demandas de segurança, durabilidade e economia na gestão de estruturas de concreto armado.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018 – Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480:2007 – Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1:2021 – Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação — Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 3, p. 233-239, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.002>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G109-07 (2013) – Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments**. West Conshohocken, 2013.
- CORONELLI, D.; GAMBAROVA, P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 8, p. 1214-1224, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:8\(1214\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:8(1214)).
- EN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 10080:2005 – Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – General**. Brussels, 2005.
- KOULOURIS, K.; APOSTOLOPOULOS, C. Study of the Residual Bond Strength between Corroded Steel Bars and Concrete — A Comparison with the Recommendations of Fib Model Code 2010. *Metals*, v. 11, n. 5, art. 757, 2021.
- MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. ISBN 978-85-93715-06-3.
- NORDTEST. **NT Build 356:1989 – Concrete repairing materials and protective coating — Embedded steel method, chloride permeability**. Espoo, 1989.
- TANG, F.; CHEN, G.; ZHANG, W.; GAO, Z. Investigation into corrosion-induced bond degradation between concrete and steel rebar with acoustic emission and 3D laser scan

techniques. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00050-9>.

ZHANG, W.; DENG, M.; WANG, Q. Experimental study on bond behavior between corroded steel bars and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 215, p. 472-482, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.077>.

ZHAO, Y.; LIN, H.; WU, K.; WANG, W. Bond behavior between corroded reinforcing steel bar and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 765-773, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.022>