

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Loany Sabriny Cortes Trindade

**ANÁLISE CRÍTICA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-
CONCRETO EM BARRAS CORROÍDAS ATRAVÉS DA ACELERAÇÃO DA
CORROSÃO**

Porto Alegre
Maio de 2021

LOANY SABRINY CORTES TRINDADE

**ANÁLISE CRÍTICA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-
CONCRETO EM BARRAS CORROÍDAS ATRAVÉS DA ACELERAÇÃO DA
CORROSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como pré-requisito para obtenção do Título de Engenheira Civil.

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre

Maio de 2021

LOANY SABRINY CORTES TRINDADE

**ANÁLISE CRÍTICA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-
CONCRETO EM BARRAS CORROÍDAS ATRAVÉS DA ACELERAÇÃO DA
CORROSÃO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de Maio de 2021

Prof^a. Ângela Gaio Graeff
PhD. pela Universidade de Sheffield
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD. pela Universidade de Sheffield

Prof^a. Paula Manica Lazzari (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lucas Alexandre Reginato (UNISC)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, ao meus pais, Claudionor e Gracinete, e ao meu irmão, Rodrigo, por acreditarem em mim, me encorajando a continuar mesmo com toda a distância que nos separa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Claudionor e Gracinete, por conseguirem me propiciar a oportunidade de estudar na UFRGS. Não tenho palavras para agradecer todo o trabalho e esforço que tiveram para conseguirem me manter por 5 anos do outro lado do País.

Agradeço à Prof.^a Ângela Graeff, orientadora deste trabalho, por todo o suporte recebido durante a realização do meu TCC. Mesmo com todas as dificuldades encontradas no meio da jornada, com o tema experimental sendo deixado de lado devido ao agravamento da pandemia, não me deixou desistir e me ajudou a definir essa nova estratégia que está se concluindo.

Agradeço ao Antônio Freitas por ter me apoiado diretamente em todos os momentos difíceis. Durante esses anos, se tornou a família que não tinha em Porto Alegre e sou eternamente grata por tudo o que tem feito por mim.

Por fim, agradeço às “Pentens”, Socorro, Sheylla, Letícia, Emilly e Patrícia, por sempre me apoiarem e vibrarem por cada pequena conquista desta caminhada.

RESUMO

O bom funcionamento de estruturas de concreto armado depende da aderência entre seus componentes, o aço e o concreto. Sabe-se que a corrosão das armaduras, uma das manifestações patológicas mais sérias e onerosas do ramo de Engenharia Civil, influencia diretamente no desempenho desta ligação. A realização de ensaios de aderência em barras corroídas é essencial para entender como a evolução dos efeitos da corrosão influenciam na aderência entre o concreto e a armadura. Devido à falta de normativas acerca da realização do ensaio de aderência em barras corroídas através da aceleração da corrosão, buscou-se na literatura as metodologias mais empregadas para a realização destes ensaios separadamente. Para a análise dos ensaios de aderência, quatro ensaios foram considerados, sendo: os ensaios de arrancamento direto, o ensaio de arrancamento excêntrico, os ensaios de viga e os ensaios apropriados. Para a aceleração da corrosão, três ensaios foram considerados, sendo: o ensaio de névoa salina, o ensaio de aceleração eletroquímica e a metodologia de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – CAIM. Através da análise crítica, foram elencados os pontos negativos e positivos de cada metodologia. Tendo em vista a utilização de um corpo de prova com dimensões reduzidas associado à uma metodologia de aceleração da corrosão capaz de controlar e acompanhar o processo corrosivo, é proposto a utilização conjunta dos ensaios de arrancamento push-in e a metodologia CAIM para a avaliação da aderência em barras corroídas pelo processo de aceleração da corrosão.

Palavras-chave: corrosão; ensaios de aderência; manifestações patológicas; concreto armado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos corpos de prova para ensaio de arrancamento simples, conforme RC6 (RILEM, 1983).....	4
Figura 2 - Modelos alternativos para o ensaio de pull-out (a) Ensaio DTP-BT (b) Esquema de ensaio de 4 barras	5
Figura 3 - Representação dos corpos de prova para ensaio de arrancamento excêntrico, conforme A944-10 (ASTM, 2015).....	6
Figura 4 - Detalhe da fixação do CP para a realização do ensaio beam-end na vertical.....	7
Figura 5 - Modelos beam-end com duas barras (a) Sharma et al. (2016) (b) Bošnjak, Sharma e Öttl (2018)	7
Figura 6 - Representação do corpo de prova para ensaios de viga, conforme RC5 (RILEM, 1982).....	8
Figura 7 - Detalhes de reforço longitudinal e transversal para ensaio beam test	9
Figura 8 - Moldes para ensaio push-in (a) esquema dos moldes cilíndricos (b) foto representativa dos moldes.....	10
Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova para o ensaio push-in	10
Figura 10 - Localização dos extensômetros	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo das metodologias para ensaio de aderência	16
Tabela 2 - Comparativo das metodologias para ensaio de aceleração da corrosão	17

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APULOT – Appropriate Pull-Out Teste

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

NBR – Norma Brasileira

RILEM – Journal of Materials and Structures

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	2
2 MÉTODO	3
3 ENSAIOS DE ADERÊNCIA	3
3.1 Ensaio de Arrancamento Direto (Pull-Out Test)	4
3.2 Ensaio de Arrancamento Excêntrico (Beam-End Test).....	5
3.3 Ensaio de Viga (Beam Test)	8
3.4 Ensaio Apropriados.....	9
4 ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADA	10
4.1 Ensaio de Névoa Salina (Salt Spray - Fog)	11
4.2 Aceleração Eletroquímica	11
4.3 Metodologia CAIM	12
5 ENSAIOS DE ADERÊNCIA EM BARRAS CORROÍDAS.....	13
6 PROPOSIÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE ADERÊNCIA EM BARRAS CORROÍDAS	15
7 CONCLUSÃO.....	17
REFERÊNCIAS	17

ANÁLISE CRÍTICA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO EM BARRAS CORROÍDAS ATRAVÉS DA ACELERAÇÃO DA CORROSÃO

CRITICAL ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE BOND TEST PROCEDURES ON CORRODED BARS THROUGH ACCELERATED CORROSION

RESUMO

O bom funcionamento de estruturas de concreto armado depende da aderência entre seus componentes, o aço e o concreto. Sabe-se que a corrosão das armaduras, uma das manifestações patológicas mais sérias e onerosas do ramo de Engenharia Civil, influencia diretamente no desempenho desta ligação. A realização de ensaios de aderência em barras corroídas é essencial para entender como a evolução dos efeitos da corrosão influenciam na aderência entre o concreto e a armadura. Devido à falta de normativas acerca da realização do ensaio de aderência em barras corroídas através da aceleração da corrosão, buscou-se na literatura as metodologias mais empregadas para a realização destes ensaios separadamente. Para a análise dos ensaios de aderência, quatro ensaios foram considerados, sendo: os ensaios de arrancamento direto, o ensaio de arrancamento excêntrico, os ensaios de viga e os ensaios apropriados. Para a aceleração da corrosão, três ensaios foram considerados, sendo: o ensaio de névoa salina, o ensaio de aceleração eletroquímica e a metodologia de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – CAIM. Através da análise crítica, foram elencados os pontos negativos e positivos de cada metodologia. Tendo em vista a utilização de um corpo de prova com dimensões reduzidas associado à uma metodologia de aceleração da corrosão capaz de controlar e acompanhar o processo corrosivo, é proposto a utilização conjunta dos ensaios de arrancamento push-in e a metodologia CAIM para a avaliação da aderência em barras corroídas pelo processo de aceleração da corrosão.

Palavras-chave: Corrosão. Ensaio de aderência. Manifestações patológicas. Concreto armado.

ABSTRACT

The proper functioning of reinforced concrete structures depends on the adherence between their components, steel and concrete. It is known that reinforcement corrosion, one of the most serious and costly pathological phenomena in the field of Civil Engineering, influences directly the performance of this bond. The steel-concrete bond test on corroded bars is essential to understand how the evolution of corrosion effects influence the bond between concrete and reinforcement. Due to the lack of standards about steel-concrete bond test on corroded bars through the acceleration of corrosion, the literature was searched for the most used methodologies to perform these tests separately. For the analysis of the bond strength tests, four methodologies were considered: pull-out tests, beam-end tests, beam tests, and appropriate tests. For corrosion acceleration, three methodologies were considered: salt spray fog, electrochemical acceleration, and the Accelerated Corrosion by Modified Immersion – CAIM methodology. Through critical analysis, the negative and positive points of each methodology were listed. Considering the use of a specimen with reduced dimensions associated with a methodology of accelerated corrosion capable of controlling and monitoring the corrosive process, it is proposed the joint use of push-in test and the CAIM methodology for the evaluation of the adhesion in corroded bars by the process of accelerated corrosion.

Keywords: Corrosion. Bond tests. Pathological manifestations. Reinforced concrete.

1 INTRODUÇÃO

A história do concreto armado teve início com a necessidade de construir estruturas que aliassem durabilidade e resistência, visto que as estruturas sempre estiveram expostas a agentes degradantes. Ao longo dos anos o ramo da patologia das construções buscou entender os fatores que influenciam na diminuição da vida útil e desempenho de uma estrutura.

Atualmente, existe a certeza de que o concreto é mutável ao longo do tempo, tendo em vista que altera as propriedades físicas e químicas em função dos componentes e às condições ambientais que estão inseridos, como explica Souza e Ripper (1998). Um dos processos mais importantes e onerosos que pode comprometer a durabilidade e desempenho de estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras.

O processo de corrosão é espontâneo e constante, sendo classificado como uma das manifestações patológicas mais sérias na área de engenharia civil. Na literatura, encontram-se muitos estudos relacionados à prevenção e mitigação da corrosão, pois, quando instalada, acaba gerando danos críticos que podem resultar em acidentes, com prejuízos materiais ou danos aos usuários.

O início do processo da corrosão é facilitado pela baixa qualidade do concreto. O uso de agentes aceleradores de pega que contenham íons cloreto ou a adição de agregados contaminados pode facilitar a entrada dos agentes corrosivos. Além disso, deficiências nas etapas de concretagem e moldagem pode resultar em concretos porosos ou segregados, que facilitam a entrada dos agentes agressivos. Essas condições podem permitir a ruptura da camada de passivação e, assim, permitindo o aparecimento de danos estruturais, como o aumento das tensões internas de tração e a diminuição da aderência entre a armadura e o concreto.

Pode-se definir que o concreto armado depende essencialmente da solidariedade entre os componentes, o concreto e o aço. Assim, o conceito de aderência passa a ser fundamental no dimensionamento de estruturas de concreto armado, pois tem como finalidade garantir que a deformação da armadura como um todo seja igual a das fibras de concreto vizinhas. Contudo, ao analisarmos o comportamento local das armaduras, percebemos que este é mais complexo, pois envolve descontinuidades como as fissuras e os deslocamentos relativos entre a armadura e o concreto (CAETANO, 2008; FERNANDES, 2000; FUSCO, 1995).

Stanish (1997) cita que a corrosão pode influenciar na aderência entre o concreto e a armadura de duas maneiras. A primeira seria quando a barra ainda não foi concretada, havendo pouca ou nenhuma diminuição da aderência em níveis baixos de corrosão, podendo até contribuir com a aderência, já que os produtos da corrosão aderem à barra aumentando a rugosidade. A segunda, porém, ocorre após a concretagem e a expansão do aço pode causar fissuras no concreto, afetando a ligação e o desempenho estrutural.

Na literatura são encontrados vários métodos experimentais para a determinação da tensão de aderência entre a armadura de aço e o concreto. Dentre eles, são destacados: o Ensaio de Arrancamento Direto e o Ensaio de Arrancamento em Vigas. Porém, grupos de pesquisa, como o Grupo APULOT¹ (*Appropriate pull-out test*), tem desenvolvido alternativas para ensaios de aderência, visto que a dificuldade na preparação e desmoldagem é uma das maiores limitações desse tipo de ensaio. No entanto, não existem normativas acerca da realização do ensaio de aderência em barras corroídas através da aceleração da corrosão.

Considerando a relevância do tema analisado, o presente estudo foi proposto com o objetivo de aprofundar o conhecimento acerca dos tipos de ensaio para a determinação da resistência de

¹ Grupo de Pesquisa certificado pelo CNPq e pela UNESP: Ensaio APULOT (Em vigor até 2014)

Este grupo de pesquisa foi liderado pela Prof^a. Mônica P. Barbosa (UNESP/Ilha Solteira) e pelo Prof. Luiz Carlos P. da Silva Filho (UFRGS/LEME), contando com a participação de outras universidades brasileiras (PUC – Campinas, UFRJ, IME, UFF, UNICAMP, UERJ, UFJF e o CEFET-MG). O Grupo estava ligado a uma rede internacional integrada pelos laboratórios de pesquisa INSAT – França, ENIG – Tunísia e UPV – Espanha.

aderência, elencando os pontos positivos e negativos, e na avaliação comparativa das técnicas de corrosão acelerada. Uma vez que a corrosão afeta diretamente na diminuição da resistência de aderência, propõe-se a escolha de uma metodologia de ensaio eficiente para a determinação da redução da resistência de aderência em barras submetidas ao ensaio de corrosão acelerada.

2 MÉTODO

Este trabalho foi desenvolvido através do estudo do referencial bibliográfico relacionado ao tema proposto, de maneira a possibilitar a compreensão adequada dos assuntos abordados. Através da análise crítica, definiu-se que o trabalho seria baseado em três análises: a avaliação dos ensaios de aderência encontrados na literatura; na avaliação das metodologias de aceleração da corrosão; e na avaliação dos ensaios de aderência eficientes na determinação da resistência de aderência em barras corroídas. Com o detalhamento da análise, foram avaliados os aspectos positivos e negativos relacionados a cada alternativa apresentada para, assim, propor uma alternativa eficaz para a realização dos ensaios de aderência em barras corroídas através da metodologia de corrosão acelerada.

3 ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Atualmente, não existem normas consolidadas para o ensaio de aderência no Brasil. Em nível internacional, são encontrados na literatura normas e procedimentos disponíveis para nortear este tipo de ensaio, tais como a norma americana A944 – 10 “*Standar Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Beam-End Specimens*” (ASTM, 2015) e os procedimentos da RC5 “*Bond Test for Reinforcement Steel. 1. Beam Test*” (RILEM, 1982) e da RC6 “*Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-Out Test*” (RILEM, 1983).

De acordo com Caetano (2008), devido essa deficiência de um corpo normativo estável, uma gama extensa de variações nos ensaios tradicionais foi proposta por vários pesquisadores. Essas modificações surgiram da necessidade de se obter resultados mais coerentes em relação ao comportamento real da aderência, pois a falta de padronização dificulta a comparação de dados. Segundo o comitê 408 do ACI (2003), existem quatro ensaios mais comuns na avaliação da aderência, sendo: os ensaios de arrancamento direto (*pull-out test*); os ensaios de arrancamento excêntrico (*beam-end test*); os ensaios de viga (*beam test*); e o ensaio para determinar o comportamento de emendas (*splice test*).

Para a realização dos ensaios de aderência, alguns fatores devem ser considerados. Segundo o comitê 408 do ACI (2003), com um cobrimento insuficiente a falha por fendilhamento ocorre mais facilmente. O estudo desenvolvido por Makni *et al.* (2010) demonstrou que, para garantir que não ocorra o fendilhamento do concreto, ou seja, para garantir o deslizamento da barra de aço, o limite mínimo da relação entre o cobrimento da armadura e o diâmetro da barra é na ordem de $c/\varnothing = 5$.

Para Caetano (2008), a resistência à compressão é um fator importante quando a ruptura de aderência ocorre por arrancamento da barra, pois esta situação, característica de concretos de menor resistência, envolve o corte do cobrimento de concreto e o esmagamento do concreto a frente da nervura. No entanto, segundo a autora, em rupturas por fendilhamento, comum em concretos de maior resistência, a resistência a tração é quem influencia na capacidade de aderência, pois a falha se caracteriza pelo aparecimento de fissuras longitudinais, que ocorrem quando as tensões radiais excedem a resistência à tração do concreto.

Além disso, é importante considerar o estado superficial das barras. Para Ribeiro (1985), as barras lisas, que possuem a resistência de aderência relacionada à adesão e ao atrito, sofrem maiores influências da presença de graxas e impurezas do que as barras nervuradas. Segundo o autor, pelo fato de a aderência nas barras nervuradas estarem relacionadas ao suporte provido

pelas nervuras, o estado superficial das barras não é muito influente na resistência de aderência das mesmas.

Como o intuito da pesquisa é encontrar um ensaio de arrancamento capaz de avaliar a diminuição da aderência em barras corroídas, será realizada uma breve revisão dos ensaios utilizados para a avaliação da aderência, sendo: o ensaio de arrancamento direto, o ensaio de arrancamento excêntrico, ensaios de viga e ensaios apropriados.

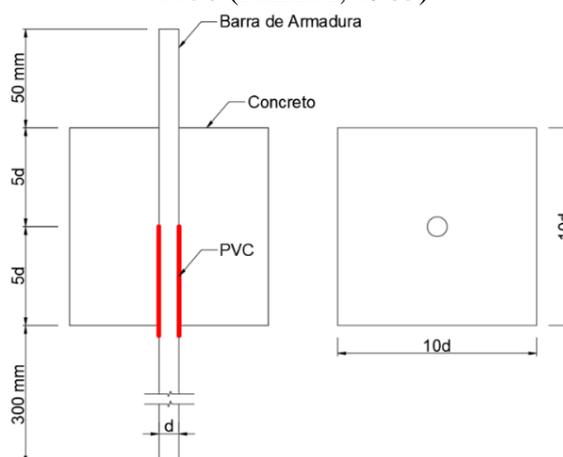
3.1 Ensaios de Arrancamento Direto (Pull-Out Test)

O ensaio de arrancamento direto tem seu procedimento apresentado na RC6 (RILEM, 1983) e é realizado em um corpo de prova constituído por uma barra de aço inserida em um bloco de concreto sem armadura transversal. Existem muitas variações relacionadas a esse tipo de ensaio, como diferentes formatos e dimensões do corpo de prova, podendo ser cúbico, prismático e cilíndrico, e diferentes comprimentos e posicionamento do comprimento de ancoragem da armadura.

Caetano (2008) explica que esse tipo de ensaio se destaca pela facilidade de execução, pois o corpo de prova apresenta pequenas dimensões. No entanto, a autora destaca que a configuração de ensaio apresenta um campo de tensões diferente do que é gerado em estruturas reais, sendo incapaz de simular tensões complexas existentes em estruturas como vigas e lajes. O comitê 408 do ACI (2003) afirma que os resultados do ensaio de arrancamento direto não são recomendados e são insuficientes para a determinação do comprimento de ancoragem.

O formato original proposto pela RC6 (RILEM, 1983) é cúbico com dimensões de $10\ \varnothing$, conforme Figura 1. O ensaio deve ser realizado aos 28 dias e o concreto deve apresentar valores de resistência à compressão necessariamente entre 23 a 28 MPa. A barra deve ser posicionada de modo que os dois extremos estejam fora do corpo de prova. O maior extremo é utilizado para a aplicação das cargas de tração e o menor é utilizado para fixar um medidor de deslocamento (LVDT), com o intuito de medir o escorregamento relativo entre a barra e o concreto.

Figura 1 - Representação dos corpos de prova para ensaio de arrancamento simples, conforme RC6 (RILEM, 1983)



Fonte: Autoria própria

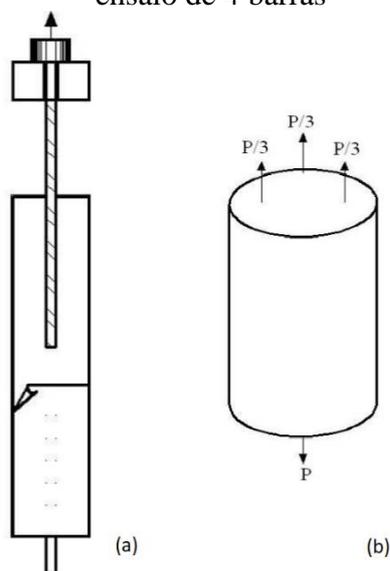
A zona aderida é controlada através na inserção de um tubo de PVC de comprimento igual a cinco vezes o diâmetro da barra, sendo posicionado na zona mais próxima da aplicação da carga. Essa limitação é necessária para garantir que a ruptura seja pela falha da ligação

aço/concreto e não pelo fenômeno de fendilhamento, pois impede que ocorram concentrações de tensões no ponto que a barra se insere no concreto.

As alterações mais significativas encontradas na literatura são as de duplo arrancamento e a de quatro barras. Caetano (2008) explica que o ensaio duplo de arrancamento é caracterizado pela inserção de dois seguimentos de barra e a aplicação de carga em ambos os seguimentos, sendo estes posicionados um em cada face oposta do prisma. Segundo a autora, o ensaio de quatro barras é caracterizado por uma barra se projetando para fora do corpo de prova e as demais no lado oposto, tendo como finalidade manter o corpo de prova imóvel através da força reativa nas três barras, conforme Figura 2b. No entanto, Caetano (2008) afirma que o método de quatro barras não obteve muita aceitação pelos pesquisadores, devido à dificuldade encontrada na confecção dos corpos de prova.

Testani e Pantazopoulou (2010) realizaram um estudo experimental com a aplicação de uma nova concepção para o método com duas barras, denominado *Direct Tension Pull-out Test* (DTP-BT), conforme Figura 2a. Segundo as autoras, esse tipo de ensaio é caracterizado por um prisma de concreto que possui dois seguimentos de barras concêntricas, uma sendo utilizada para teste e outra para suporte. Nesse tipo de ensaio, as duas barras são submetidas a esforços, transferindo gradualmente tensões normais de tração para o cobrimento de concreto. A presença de uma força de tração longitudinal no cobrimento, distante das nervuras, é ponto que distingue a metodologia DTP do modelo clássico do *pull-out test*, em que o corpo de prova é submetido diretamente à compressão paralela ao eixo da barra. Com o objetivo de evitar o fendilhamento e garantir a transferência e tensões entre os trechos que abrigam as barras, é indicado o encamisamento longitudinal do cilindro de concreto com um polímero reforçado com fibra de carbono ou de vidro. Contudo, apesar de simular o comportamento da ligação aço-concreto, esse tipo de ensaio possui como pontos negativos a dificuldade e custo para a confecção dos corpos de prova.

Figura 2 - Modelos alternativos para o ensaio de pull-out (a) Ensaio DTP-BT (b) Esquema de ensaio de 4 barras



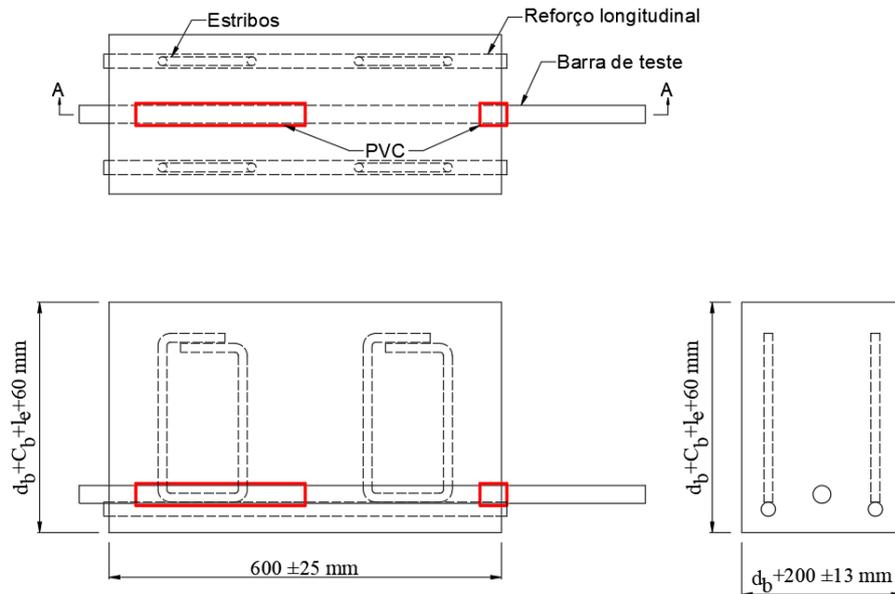
Fonte: CAETANO, 2008

3.2 Ensaio de Arrancamento Excêntrico (Beam-End Test)

O ensaio de arrancamento excêntrico tem seu procedimento apresentado na A944-10 (ASTM, 2015). O modelo de ensaio consiste em uma barra inserida em um corpo de prova de 600 ± 25 mm de comprimento, em que a largura é dependente do diâmetro da barra (d_b) e a altura depende

do diâmetro da barra (d_b), do cobrimento de concreto (C_b) e do comprimento de ancoragem (l_e), conforme Figura 3. Diferente do ensaio de arrancamento direto, o ensaio de arrancamento excêntrico deve ser reforçado com quatro estribos e duas barras orientados paralelamente à barra de teste.

Figura 3 - Representação dos corpos de prova para ensaio de arrancamento excêntrico, conforme A944-10 (ASTM, 2015)

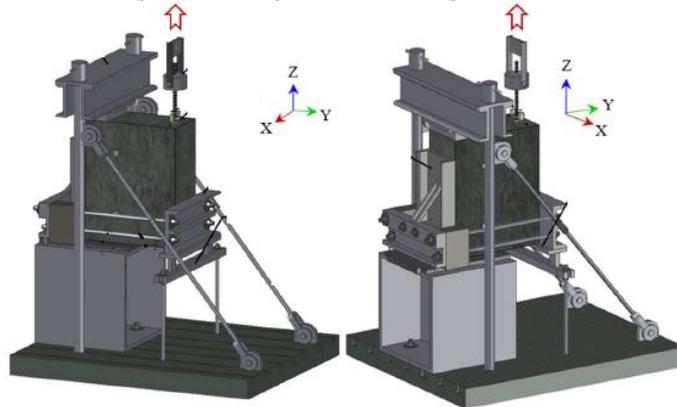


Fonte: Autoria própria

Dois tubos de PVC devem ser inseridos no corpo de prova para controlar a posição da zona aderida e garantir que a ruptura não seja pelo fenômeno de fendilhamento. Além disso, a A944-10 (ASTM, 2015) também especifica que a resistência à compressão do concreto esteja entre 31 a 38 MPa.

O ensaio *beam-end* foi desenvolvido para que a aplicação das cargas seja realizada na horizontal. Entretanto, com o intuito de minimizar custos e otimizar o espaço de ensaio, se verifica a tendência de adaptação do ensaio para que a aplicação de cargas aconteça na vertical. Pasquale, Malo e Jolin (2018) publicaram no *Journal of Testing and Evaluation* da ASTM uma configuração alternativa que permite que o ensaio seja realizado com a aplicação vertical de cargas. Nesta configuração, as dimensões do corpo de prova não são alteradas e seguem a recomendação encontrada na A944-10 (ASTM, 2015). A diferença é baseada na fixação do corpo de prova na mesa de testes, sendo recomendado que o corpo de prova seja posicionado entre duas placas de suporte onde a fixação é feita com quatro parafusos, conforme Figura 4.

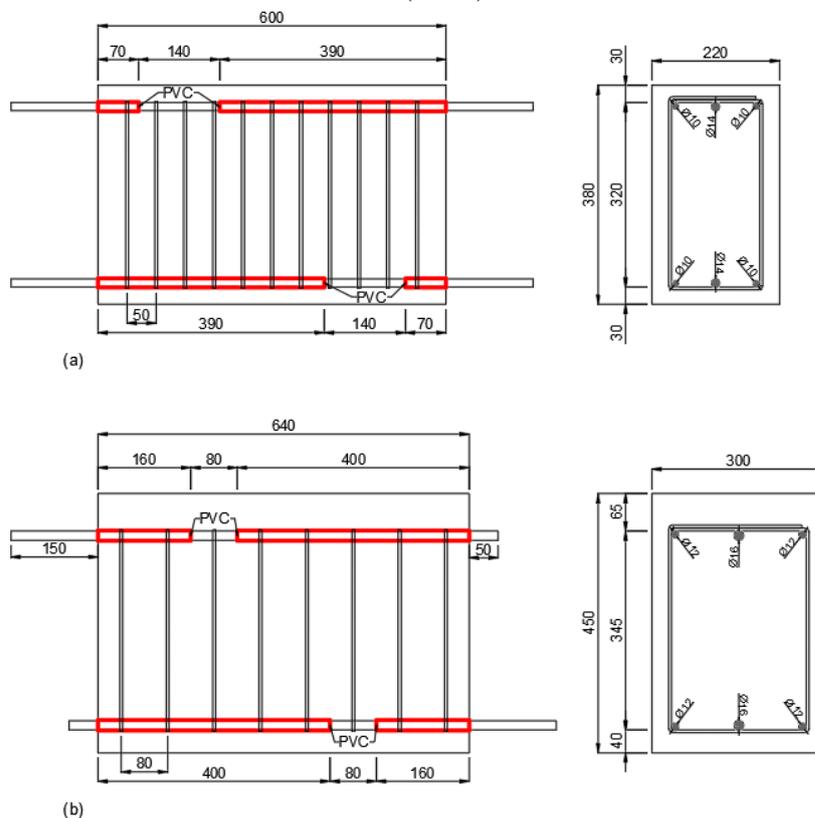
Figura 4 - Detalhe da fixação do CP para a realização do ensaio beam-end na vertical



Fonte: PASQUALE, MALO E JOLIN, 2018

Alguns autores, no entanto, realizam o ensaio *beam-end* com duas barras de teste. Sharma *et al.* (2016) utilizaram um modelo de duas barras de 14 mm posicionadas em um corpo de prova com dimensões iguais a 220 mm x 380 mm x 600 mm. O modelo é reforçado com quatro barras longitudinais de 10 mm de diâmetro e estribos de 6 mm espaçados a cada 50 mm, conforme Figura 5a. Bošnjak, Sharma e Öttl (2018) utilizaram um modelo de duas barras similar, porém, com dimensões 300 mm x 450 mm x 640 mm. O reforço é feito com quatro barras longitudinais de 12 mm e estribos de 8 mm espaçados a cada 80 mm, conforme Figura 5b. Ambos os autores justificam o uso do ensaio *beam-end* com duas barras pela otimização do ensaio, visto que o modelo torna possível ensaiar duas barras em um único corpo de prova.

Figura 5 - Modelos beam-end com duas barras (a) Sharma et al. (2016) (b) Bošnjak, Sharma e Öttl (2018)



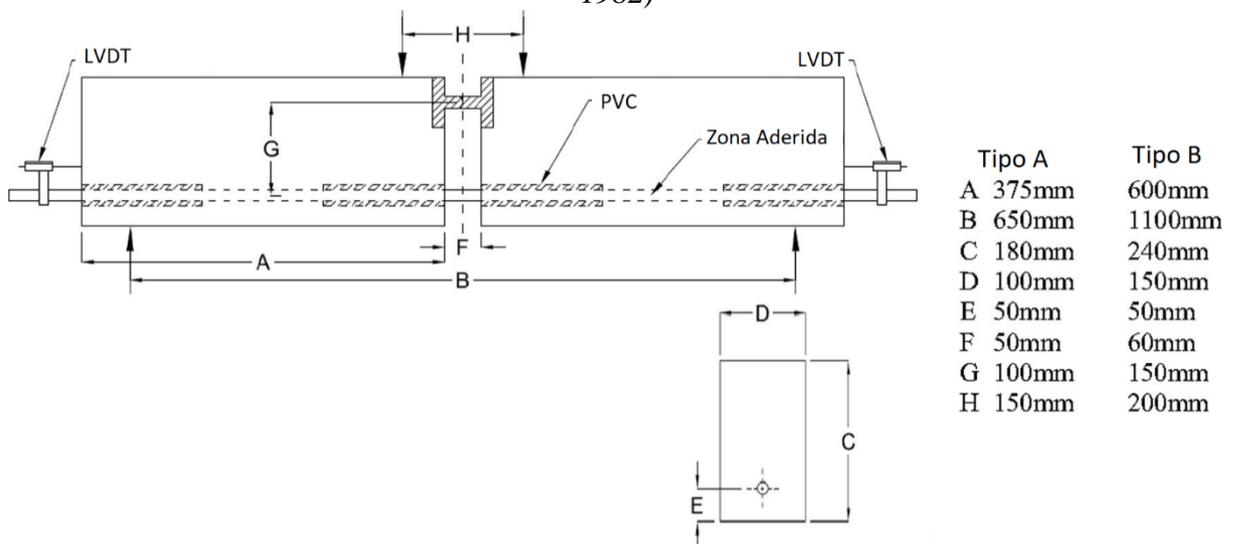
Fonte: Autoria própria

No ensaio *beam-end*, a zona aderida da barra não sofre influência direta das forças de compressão, como acontece no ensaio *pull-out*, o que torna esse tipo de ensaio adequado para simular o comportamento da aderência em elementos reais. Contudo, esse tipo de ensaio pode ser de difícil manuseio e confecção quando comparado ao ensaio *pull-out*, pois as dimensões dos corpos de prova são significativamente maiores.

3.3 Ensaios de Viga (Beam Test)

O ensaio de arrancamento em vigas tem seu procedimento apresentado na RC5 (RILEM, 1982) e consiste em dois blocos paralelepípedicos de concreto armado conectados na parte inferior por uma barra de armadura. Com o intuito de evitar a concentração de tensões de compressão na face superior dos blocos, uma rótula metálica deve ser adicionada, conforme Figura 6. O corpo de prova é submetido à flexão simples pela aplicação de duas cargas de igual magnitude aplicadas simetricamente em relação ao centro da viga.

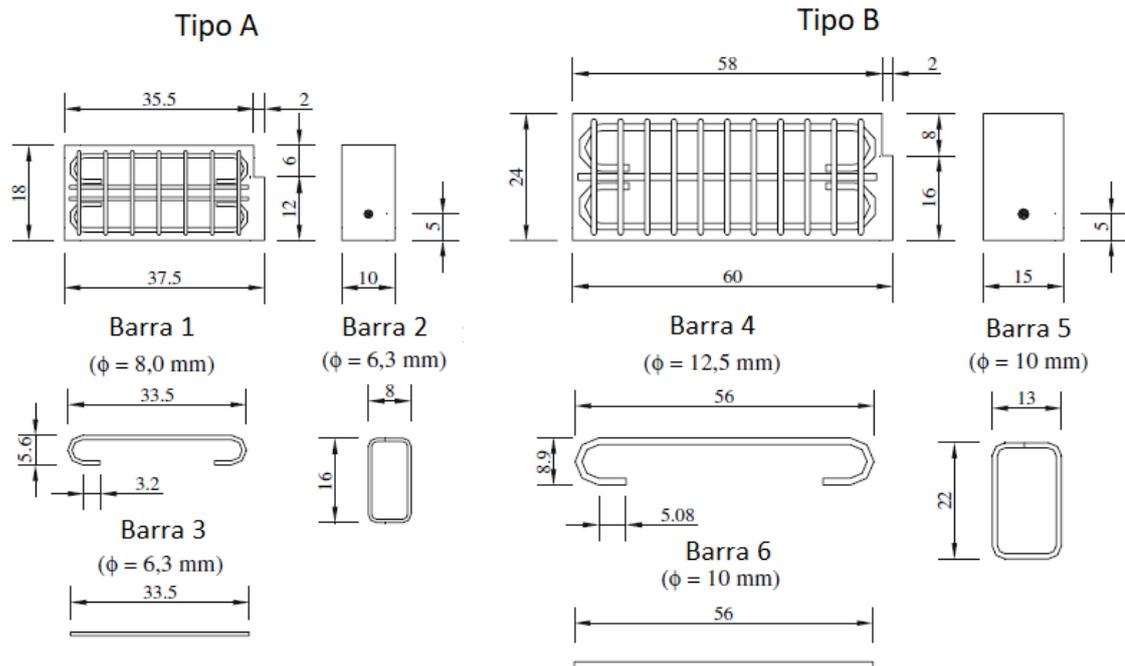
Figura 6 - Representação do corpo de prova para ensaios de viga, conforme RC5 (RILEM, 1982)



Fonte: HOSSAIN, 2018

As dimensões dos corpos de prova variam com o diâmetro da barra a ser ensaiada. Segundo o RC5 (RILEM, 1982), pode-se admitir que existem dois tipos de corpos de prova: o Tipo A e o Tipo B. O Tipo A é recomendado para o ensaio de barras com diâmetros iguais ou menores a 16 mm, enquanto que o Tipo B é recomendado para o ensaio de barras com diâmetros superiores a 16 mm. Ambas as configurações necessitam de reforços longitudinais e transversais para garantir um confinamento adequado, conforme apresentado na Figura 7. Além disso, tubos de PVC devem ser inseridos no corpo de prova para controlar a posição da zona aderida e garantir que a ruptura não seja pelo fenômeno de fendilhamento.

Figura 7 - Detalhes de reforço longitudinal e transversal para ensaio beam test



Fonte: ALMEIDA FILHO, EL DEBS E EL DEBS, 2008

Esse tipo de ensaio gera um campo de tensões mais realístico que o encontrado no ensaio de arrancamento excêntrico, sendo o ensaio que mais se aproxima do comportamento de estruturas reais. No entanto, a dificuldade de confecção, a complexidade de procedimentos e as dimensões do corpo de prova podem ser empecilhos para a utilização.

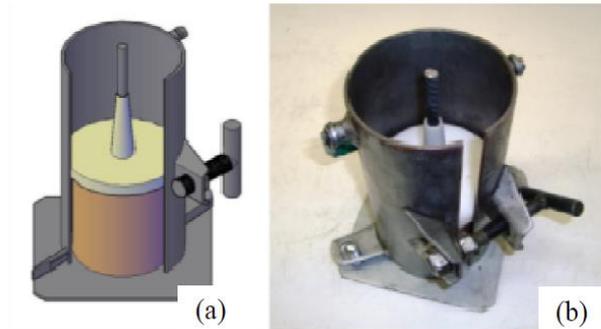
3.4 Ensaios Adequados

Os ensaios adequados surgiram pela proposição de um método complementar para o controle de qualidade do concreto baseado no comportamento da aderência. A ideia original foi publicada por Lorrain e Barbosa (2008) em um artigo que descrevia um modelo simplificado do ensaio de arrancamento direto, que consistia em corpos de prova fabricados com a utilização de garrafas de plástico PET cilíndricas como molde.

Segundo Silva (2014), os procedimentos do APULOT (*Appropriate pull-out test*) foram estudados e aprimorados por grupos de pesquisa no Brasil, França, Espanha, Paraguai e Tunísia. O laboratório LEME da UFRGS, um dos centros de pesquisa do grupo APULOT, atuou no desenvolvimento de alternativas para a confecção de moldes dos corpos de prova para os ensaios adequados de aderência, visto que a dificuldade na preparação e desmoldagem é uma das maiores limitações desse tipo de ensaio. Em decorrência da dificuldade de fabricar moldes para o ensaio do tipo *pull-out*, constatou-se que o ensaio poderia ser feito através do tipo *push-in*.

Através do trabalho de Silva (2014), foi desenvolvido um molde para a fabricação de corpos de prova para o ensaio *push-in*. O molde é constituído de fibra de náilon em formato cilíndrico com diâmetro e altura de 100 mm. As dimensões foram escolhidas de maneira a caber no molde cilíndrico metálico (ϕ 100 x 200 mm), conforme Figura 8. A utilização do molde é necessária para garantir a altura, comprimento de ancoragem e a centralização da barra de aço.

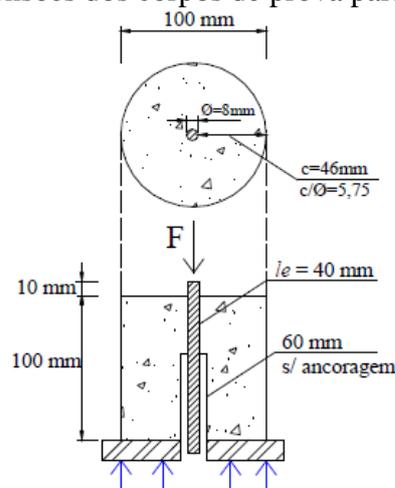
Figura 8 - Moldes para ensaio push-in (a) esquema dos moldes cilíndricos (b) foto representativa dos moldes



Fonte: SILVA, 2014

Segundo a recomendação de Silva (2014), é necessário ter cuidado para não colocar no comprimento de ancoragem a parte que contenha as identificações na barra, visto que o posicionamento inadequado interfere no resultado do ensaio de aderência. A barra de teste possui 11 cm de comprimento, onde 4 cm pertencem a zona aderida e 6 cm estão na zona sem ancoragem, sobrando externamente 1 cm, conforme Figura 9.

Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova para o ensaio push-in



Fonte: SILVA, 2014

O ensaio de arrancamento do tipo *push-in* obteve resultados satisfatórios quando comparado ao ensaio *pull-out*, porém, com a vantagem de ser um ensaio mais simples, com uma confecção facilitada do corpo de prova e a necessidade de barras com apenas 11 cm de comprimento, diferentemente dos 40 cm necessários para o ensaio do tipo *pull-out*.

4 ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADA

De acordo com Helene (1993), a deterioração das armaduras pode ocorrer através de dois processos: a oxidação direta e a corrosão eletroquímica. O primeiro possui caráter puramente químico, pois forma uma película uniforme e contínua de produtos da corrosão na superfície da barra. Já a corrosão eletroquímica pode ser definida pelo fenômeno decorrente da formação de pilhas ou células de corrosão, que surgem a partir da presença de umidade, água ou solução

aquosa que entre em contato com a superfície da barra ou do revestimento de concreto que a envolve.

Tendo em vista que o avanço do processo de corrosão é um processo demorado, torna-se necessária a utilização de métodos acelerados para desencadear o processo corrosivo em corpos de prova. Em geral, os métodos encontrados na literatura utilizam o processo de corrosão eletroquímica através da exposição a íons cloreto. Os íons cloretos podem ser introduzidos no concreto através da adição de cloreto de sódio, de agentes aceleradores de pega e endurecimento, e podem vir através da contaminação dos constituintes do concreto, como os agregados e a água de amassamento. A impregnação também pode ocorrer na superfície do concreto através da ação de agentes externos, como a névoa salina, o contato direto com a água do mar e as salmouras industriais.

Apresenta-se, a seguir, uma breve revisão dos ensaios utilizados para a aceleração da corrosão, sendo eles: ensaio de névoa salina, aceleração eletroquímica e a metodologia CAIM.

4.1 Ensaio de Névoa Salina (Salt Spray - Fog)

O ensaio de névoa salina consiste na simulação dos efeitos de uma atmosfera marítima produzida a partir de uma câmara de ensaio. As especificações acerca da aparelhagem necessária para a execução do ensaio são encontradas na B117-19 (ASTM, 2019) e na NBR 8094 (ABNT, 1983). Ambas indicam que a câmara de ensaio não deve permitir que gotas de solução salina acumuladas na tampa caiam sobre os corpos de prova e especificam que as câmaras devem ser fabricadas com um material resistente à ação da corrosão. Além disso, os corpos de prova devem ser posicionados de modo a não encostarem entre si para permitir a correta exposição à névoa salina.

A B117 (ASTM, 2019) indica que a solução salina deve ser preparada dissolvendo de 5 partes de cloreto de sódio em 95 partes de água e o sal não deve possuir mais que 0,3% de impurezas na sua composição. O pH da solução deve estar na faixa de 6,5 a 7,2 quando coletado após a pulverização a 35°C. Já NBR 8094 (ABNT, 1983), apesar de trazer recomendações semelhantes às apresentadas anteriormente, especifica que a pressão do ar comprimido deve estar entre 70 kPa e 170 kPa.

Apostolopoulos, Demis e Papadakis (2013) aplicaram o ensaio de névoa salina para verificar o comportamento da corrosão em barras de 8mm de diâmetro, comparando a exposição direta das barras com o comportamento encontrado quando estas são embutidas em um cilindro de concreto. As barras diretamente expostas foram ensaiadas por um período de 120 dias, enquanto as embutidas em concreto foram ensaiadas por um período de 1 ano. Essa diferença no tempo de exposição pode ser explicada pelo fato da corrosão no concreto ser um processo lento.

O ensaio de névoa salina é a metodologia que melhor reproduz o processo de corrosão natural que acontece em regiões com grande influência marítima. Contudo, este ensaio requer uma aparelhagem específica para a sua reprodução e, pelo fato da proximidade com o processo natural da corrosão, acaba sendo um ensaio muito demorado quando empregado para a avaliação de elementos de concreto armado.

4.2 Aceleração Eletroquímica

O ensaio de aceleração eletroquímica é caracterizado pela aplicação de uma diferença de potencial (d.d.p) ou uma corrente elétrica no corpo de prova. Essa indução eletroquímica estabelece uma pilha de corrosão com a formação de regiões anódicas e catódicas, ou seja, estabelece as reações de oxidação e redução.

Cabrera (1996) propôs uma metodologia para estudar a deterioração do concreto pela corrosão no aço. A preparação para o ensaio é iniciada na fase de mistura do concreto, sendo indicado adicionar 2% cloreto de sódio à mistura. Além disso, após a cura de 28 dias, o corpo de prova

deve ser parcialmente imergido em uma solução de 5% de NaCl por um período de 3 dias antes de iniciar o ensaio de aceleração da corrosão. Durante o ensaio, o corpo de prova deve continuar parcialmente imergido na solução salina com a aplicação de uma d.d.p de 3 V entre uma placa inoxidável imersa na solução e a barra.

Amleh e Mirza (1999) indicam a imersão completa dos corpos de prova em uma solução de 5% de NaCl, com uma lâmina de aço inoxidável servindo de cátodo para a aplicação de uma d.d.p de 5 V. Fang *et al.* (2004) também indicam a imersão completa do corpo de prova em uma solução de 5% de NaCl, no entanto, segundo os autores esta deve iniciar 3 dias antes do ensaio de aceleração da corrosão. No entanto, Fang *et al.* (2004) aplicaram uma corrente de 0-2 A entre uma barra de aço inoxidável, que funciona como contra-elétron, e a barra.

Através de análises em trabalhos recentes, é verificado que a metodologia não sofreu alterações significativas com o tempo. Yang, Deng e Ingham (2016) utilizaram uma metodologia similar ao apresentado no trabalho de Cabrera (1996), com a adição de 5% de cloreto de sódio à mistura do concreto e a imersão parcial do corpo de prova após o período de cura em solução de 5% de NaCl por um período de 3 dias, para de garantir a presença de íons cloreto livres para o ensaio de aceleração da corrosão. Os autores também indicam que a aceleração da corrosão foi realizada com a aplicação de uma corrente de 0,12 A entre a barra (ânodo) e uma placa de cobre imersa na solução (cátodo).

Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016) e Lei *et al.* (2016) indicam que o corpo de prova deve estar parcialmente imergido na solução de 5% de NaCl enquanto a corrente é aplicada na placa de cobre imersa na solução e na barra de testes. Porém, Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016) realizaram a aceleração da corrosão com a aplicação de uma densidade de corrente de 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ enquanto Lei *et al.* (2016) aplicaram uma densidade de corrente de 200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Quando comparada com a corrosão natural, a corrosão alcançada pela aplicação de correntes de grande densidade resulta em comportamentos distintos na superfície da barra. Segundo Graeff (2007), em densidades de corrente muito elevadas, os produtos da corrosão não se alojam corretamente nos poros de concreto, provocando níveis de fissuração e deformabilidade que não correspondem à realidade. Por esta razão, os autores passaram a utilizar tensões e densidades de corrente mais baixas, que alongam o tempo de ensaio e reduzem as distorções geradas.

4.3 Metodologia CAIM

A metodologia CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – foi desenvolvida na UFRGS e já foi empregada com sucesso por vários pesquisadores do Grupo de Pesquisa LEME (CAETANO, 2008; GRAEFF, 2007; STEIN, 2016, 2019; TORRES, 2006). O ensaio se baseia em um princípio de funcionamento similar aos ensaios encontrados na literatura e apresentados no Item 5.2, sendo realizado com a imersão parcial de um corpo de prova de concreto contendo uma barra em uma solução rica em cloretos. A penetração dos íons cloreto é realizada através do princípio de capilaridade induzido com a aplicação de um estímulo elétrico.

Torres (2006) avaliou a sensibilidade da técnica de ensaio com a variação da tensão aplicada, do tempo de ensaio e a altura da solução de cloretos no corpo de prova. Foi avaliado o comportamento de corpos de prova com relações a/c de 0,35 a 0,70 quando submetidos a voltagens de excitação de 15, 45 e 70 V. Através das análises, Torres (2006) constatou que a tensão de 45 V apresentava resultados significativos com um tempo razoável de ensaio e que a degradação gerada varia consideravelmente com a relação a/c, sendo quase nula com relações a/c de 0,35 e grande com relações a/c de 0,70.

Tendo em vista a necessidade de aprimorar a simulação do fenômeno da corrosão e controlar sua evolução, Graeff (2007) buscou ajustar a densidade de corrente a ser utilizada. A densidade escolhida foi de 500 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, pois trabalhar com densidades menores implicaria em alongar os

tempos de ensaio. A proposição de Graeff (2007) foi aceita e empregada com sucesso por Caetano (2008) e Stein (2016, 2019), sendo essa a metodologia mais recente de ensaio.

Em geral, o ensaio é realizado com a imersão do corpo de prova em uma solução de NaCl de 35 g/l, pois esta concentração é similar a encontrada na água do Oceano Atlântico. A altura da solução no corpo de prova corresponde à espessura do revestimento de concreto. Para a indução do processo eletroquímico, um fio de cobre é posicionado acima da barra de armadura antes da moldagem das amostras. Como cátodo, outro fio de cobre é imerso na solução salina e conectado ao polo negativo da fonte de alimentação. O tempo de ensaio varia com o grau de corrosão desejado, onde este é determinado pela perda de massa das barras de armadura. Para prever a perda de massa, e conseqüentemente o tempo de ensaio, é utilizada a Lei de Faraday. A metodologia CAIM apresenta resultados satisfatórios para a análise da evolução do processo de corrosão em elementos de concreto armado, sendo um ensaio de análise rápida com a possibilidade de controle da evolução do processo. Entretanto, é um ensaio que necessita de atenção e dedicação, pois é necessário um acompanhamento da evolução da corrente para garantir um funcionamento eficiente.

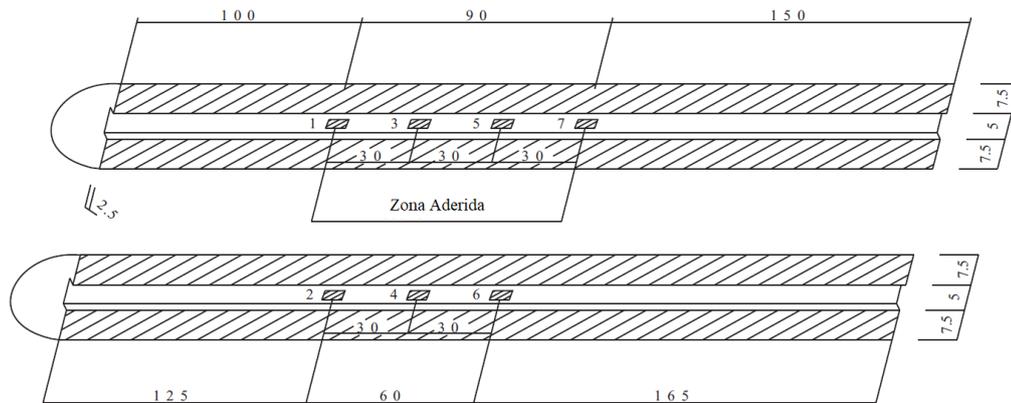
5 ENSAIOS DE ADERÊNCIA EM BARRAS CORROÍDAS

Devido a importância da aderência aço-concreto para o bom funcionamento das estruturas de concreto armado e o processo de corrosão ser classificado como uma das manifestações patológicas mais importantes, a comunidade acadêmica tende a querer compreender como a ação da corrosão influencia no comportamento desta aderência.

Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016) avaliaram a influência da corrosão na aderência aço-concreto adaptando a metodologia do ensaio de arrancamento direto (*pull-out*), conforme Figura 1. As dimensões do corpo de prova são uma adaptação da recomendação da RC6 (RILEM, 1983), que sugere um corpo de prova cúbico com dimensões de 10Ø. A barra estudada pelas autoras possui 12 mm de diâmetro, assim, o corpo de prova escolhido possui formato cúbico de lado igual a 150 mm. Além disso, há a presença de duas zonas não aderidas próximas a ambas as faces do corpo de prova, configurando uma zona aderida de 70 mm. Para o ensaio de aceleração da corrosão, um fio rígido de cobre foi fixado na extremidade maior da barra de testes.

O ensaio de arrancamento direto também foi adaptado por Lei *et al.* (2016). Os autores utilizaram as mesmas dimensões de corpo de prova apresentadas no trabalho de Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016), mas com uma zona aderida de 90 mm em uma barra de 20 mm de diâmetro. Outra diferença encontrada nessa adaptação, é a metodologia utilizada para a medição da deformação local da barra. Os autores indicam cortar a barra de armadura ao meio no sentido longitudinal, com uma reentrância de 2,5 mm x 5 mm, para a fixação de extensômetros (*strain gauge*) e a acomodação da fiação a ser ligada no dispositivo de aquisição de dados, conforme Figura 10. Para o ensaio de aceleração da corrosão, foi utilizada a mesma adaptação encontrada no trabalho de Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016).

Figura 10 - Localização dos extensômetros

Fonte: LEI *et al.*, 2016

Yang, Deng e Ingham (2016) avaliaram a influência da corrosão na aderência entre armadura e concreto com base nos ensaios de viga. As dimensões do corpo de prova seguem os procedimentos apresentados na RC5 (RILEM, 1982), que consiste em dois blocos paralelepípedicos de concreto armado conectados na parte inferior por uma barra de armadura de 20 mm de diâmetro. Cada metade de viga que compõe o corpo de prova possui uma seção transversal de 150 mm x 250 mm e um comprimento de 360 mm. Como nesse tipo de ensaio de arrancamento é necessária a utilização de reforços longitudinais e transversais, os estribos devem ser revestidos por resina epóxi e respeitar uma distância de 10 mm da barra de testes com o intuito de evitar que ocorra curto circuito durante o ensaio de aceleração da corrosão. Além disso, para garantir que somente a zona aderida sofra os efeitos do processo de corrosão, as zonas não aderidas devem ser revestidas com resina epóxi. Os autores indicam a mesma metodologia utilizada por Lei *et al.* (2016) para a medição das deformações locais da barra e utilizam a mesma técnica de aceleração da corrosão encontrada no trabalho de Coccia, Imperatore e Rinaldi (2016).

No laboratório LEME da UFRGS, autoras como Graeff (2007) e Caetano (2008) realizaram ensaios de aderência em barras corroídas. Graeff (2007) utilizou o ensaio de arrancamento direto (*pull-out*). As dimensões do corpo de prova seguiram as recomendações do RC6 (RILEM, 1983) e, para que fosse realizado em uma máquina universal de ensaios computadorizados disponível no laboratório, apenas o comprimento da barra foi alterado, passando de 300 mm para 800 mm. Caetano (2008), no entanto, avaliou a diminuição da resistência de aderência através da comparação entre os resultados do ensaio de arrancamento direto e do ensaio de arrancamento excêntrico. Para o ensaio de arrancamento direto, foi utilizado as mesmas dimensões e ajustes realizados por Graeff (2007). Para facilitar a comparação dos resultados, a dimensão do corpo de prova para o ensaio de arrancamento excêntrico seguiu as mesmas dimensões do ensaio *pull-out*, porém, com a presença de uma excentricidade de três vezes o diâmetro da barra em uma das direções e a adição de armaduras transversais.

De acordo com a pesquisa realizada, não foram encontrados trabalhos que utilizassem os ensaios apropriados para a avaliação do comportamento da aderência em barras corroídas através de ensaios de corrosão acelerada.

6 PROPOSIÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE ADERÊNCIA EM BARRAS CORROÍDAS

Para a proposição de um procedimento eficaz para a avaliação da aderência em barras corroídas através do ensaio de aceleração da corrosão, é necessário realizar uma avaliação crítica acerca das metodologias apresentadas nos Itens 3 e 4. O primeiro Item apresenta os procedimentos mais utilizados para a realização de ensaios de aderência, sendo: o ensaio de arrancamento direto, ensaio de arrancamento excêntrico, ensaios de viga e ensaios apropriados.

Para a avaliação do ensaio de arrancamento direto será considerado apenas o procedimento proposto pela RC6 (RILEM, 1983). Este é um ensaio simplificado que não consegue reproduzir fielmente o comportamento da aderência presente em elementos reais, porém é de fácil execução quando comparado com os demais métodos. Possui como vantagem a dimensão reduzida do corpo de prova, que pode ser cúbico, prismático ou cilíndrico com uma barra de armadura com dimensões de aproximadamente de 40 cm. A desvantagem desse tipo de ensaio é encontrada durante a fabricação dos moldes para os corpos de prova, pois é necessário garantir o posicionamento correto da armadura.

Para a avaliação do ensaio de arrancamento excêntrico será considerado o procedimento apresentado na A944-10 (ASTM, 2015). Esse tipo de ensaio é adequado para simular o comportamento da aderência em elementos reais, pois a zona aderida não sofre influência direta das forças de compressão. No entanto, esse tipo de ensaio possui as dimensões dos corpos de prova significativamente maiores que os ensaios *pull-out* e *push-in*, além de possuir a necessidade de reforços longitudinais e transversais.

O ensaio de viga é o que mais se aproxima do campo de tensões encontrado em estruturas reais, possuindo um campo de tensões mais realístico que o encontrado no ensaio de arrancamento excêntrico. No entanto, o corpo de prova é constituído de dois blocos paralelepípedicos de concreto armado conectados na parte inferior por uma barra de armadura e é necessário conter reforços longitudinais e transversais. Portanto, a dificuldade de confecção, a complexidade de procedimentos e as dimensões do corpo de prova podem ser empecilhos para sua utilização.

Tendo em vista as dificuldades encontradas no ensaio de arrancamento direto, é necessário considerar o modelo proposto pelo Grupo APULOT que através do trabalho de Silva (2016) constatou que o ensaio de arrancamento poderia ser realizado através do tipo *push-in*. O método de ensaio possui como vantagem a confecção facilitada do corpo de prova com a garantia de altura, comprimento de ancoragem e a centralização da barra de aço, além da necessidade de barras com apenas 11 cm de comprimento, diferentemente dos 40 cm necessários para o ensaio do tipo *pull-out*.

As vantagens e desvantagens de cada metodologia avaliada para a realização do ensaio de aderência é apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Comparativo das metodologias para ensaio de aderência

Tipo de Ensaio	Procedimento	Formato do Corpo de Prova	Necessidade de Reforços	Vantagens	Desvantagens
Pull-out	RC6 (RILEM, 1983)	Cúbico, Prismático e Cilíndrico	Não	Corpo de prova de pequenas dimensões	Não consegue reproduzir o comportamento de elementos reais; Dificuldade na fabricação do molde.
Beam-end	A944-10 (ASTM, 2015)	Prismático	Sim	Capaz de simular o comportamento de aderência em elementos reais	Corpos de prova de grandes dimensões; Dificuldade na fabricação dos corpos de prova.
Beam test	RC5 (RILEM, 1982)	Prismático	Sim	Capaz de simular o comportamento de aderência em elementos reais	Corpos de prova de grandes dimensões; Dificuldade na fabricação dos corpos de prova.
Push-in	Grupo APULOT	Cilíndrico	Não	Confecção facilitada do corpo de prova	Não consegue reproduzir o comportamento de elementos reais.

Fonte: Autoria própria

O Item 4 apresenta os procedimentos utilizados para a realização do ensaio de aceleração da corrosão, sendo: névoa salina, corrosão eletroquímica e metodologia CAIM.

O ensaio de névoa salina é proposto para simular o processo de corrosão que acontece em regiões com grande influência marítima, sendo utilizada uma câmara de ensaio para a pulverização de uma solução salina. A metodologia consegue reproduzir o processo de corrosão natural que acontece nessas regiões, porém é um ensaio de evolução lenta quando empregado na avaliação de elementos de concreto armado.

O ensaio de corrosão eletroquímica é baseado na aplicação de uma diferença de potencial ou corrente elétrica no corpo de prova para estabelecer uma pilha de corrosão pela formação de zonas anódicas e catódicas. É um ensaio que não possui normativa a respeito da d.d.p ou densidade de corrente que deve ser aplicada, assim o tempo de ensaio depende das considerações de cada autor. Contudo, quando realizado com altas densidades de corrente, gera níveis de fissurações e deformações na superfície da barra diferentes da realidade.

Com o intuito de padronizar o ensaio de aceleração da corrosão por indução elétrica, o grupo de pesquisadores da UFRGS desenvolveram a metodologia CAIM. Atualmente, o ensaio é realizado com a aplicação de uma densidade de corrente de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ em um corpo de prova parcialmente imerso em uma solução salina de 35 g/l. A metodologia possui como vantagem a possibilidade de controlar a evolução da corrosão e ser um ensaio de análise rápida. A desvantagem é a necessidade de acompanhamento constante para garantir uma corrosão eficiente.

As vantagens e desvantagens de cada metodologia avaliada para a realização do ensaio de aceleração da corrosão é apresentado na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Comparativo das metodologias para ensaio de aceleração da corrosão

Tipo de Ensaio	Equipamentos	Vantagens	Desvantagens
Névoa Salina	Câmara de ensaio	Consegue simular a corrosão natural em ambientes marítimos	Ensaio de longa duração para a avaliação de elementos de concreto armado
Aceleração Eletroquímica	Fonte de alimentação	Consegue simular a corrosão natural quando empregado com baixas densidades de corrente	Não possui normativa a respeito da d.d.p ou densidade de corrente
Metodologia CAIM	Fonte de alimentação	Capaz de simular a corrosão natural; Possibilidade de controle e acompanhamento do ensaio.	Necessidade de acompanhamento

Fonte: Autoria própria

Com base nas considerações apresentadas acerca de cada ensaio, propõe-se a utilização conjunta dos ensaios de arrancamento *push-in* e a metodologia CAIM para a avaliação da aderência em barras corroídas pelo processo de aceleração da corrosão. A escolha é baseada na facilidade de execução dos dois ensaios, assim, o procedimento contará com um corpo de prova de dimensões reduzidas e com uma confecção facilitada associado à um ensaio capaz de controlar e acompanhar o processo corrosivo.

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa realizou uma avaliação das metodologias encontradas para a realização de ensaios de aderência e ensaios de aceleração da corrosão. Ao todo, foram avaliados 4 ensaios de arrancamento e 3 tipos de ensaios para a aceleração da corrosão. Para cada ensaio, buscou-se na literatura as modificações e variações mais utilizadas para cada metodologia, identificando os pontos negativos e positivos de cada procedimento de ensaio. A partir da análise crítica, definiu-se que a utilização conjunta dos ensaios de arrancamento *push-in* com a metodologia de aceleração da corrosão CAIM pode configurar um procedimento de ensaio eficiente para a análise experimental da aderência em barras corroídas.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 408. ACI 408-R-03 Bond Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. **American Concrete Institute**, [s.l.], p. 1-49, 2003.

ALMEIDA FILHO, F. M.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests. **Materials and Structures**. Vol. 41, p. 1073–1089, 2008.

AMLEH, L.; MIRZA, S. Corrosion influence on bond between steel and concrete. **ACI Structural Journal**. Vol, 96, n° 3, p. 415-423, 1999.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; DEMIS, S.; PAPADAKIS, V. G. Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth analysis. **Construction and Building Materials**. Vol. 38, p. 139-146, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8094** – Material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição à névoa salina – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

- ASTM A944 – 10. **Standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete beam-end specimens.** ASTM, 2005.
- ASTM B117 – 19. **“Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus.** ASTM, 2019.
- BOŠNJAK, J.; SHARMA, A.; ÖTTL, C. Modified beam-end test setup to study the bond behavior of reinforcement in concrete after fire. **Materials and Structures.** Vol. 51, nº 13, 2018.
- CABRERA, J. G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. **Cement and Concrete Research.** Vol. 18, p. 47-59, 1996.
- CAETANO, L. F. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas.** 2008. 153 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- COCCIA, S.; IMPERATORE, S.; RINALDI, Z. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete. **Materials and Structures.** Vol 49, p. 537–551, 2016.
- FANG, C.; LUNDGREN, K.; CHEN, L.; ZHU, C. Corrosion influence on bonds in reinforced concrete. **Cement and Concrete Research.** Vol. 34, p. 2159-2167, 2004.
- FERNANDES, R. M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto.** São Paulo: PINI, 1995. 265p.
- GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** 2007. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HOSSAIN, K. M. A. Bond Strength of GFRP Bars Embedded in Engineered Cementitious Composite using RILEM Beam Testing. **International Journal of Concrete Structures Materials.** Vol. 12, nº 6, 2018.
- LEI, W.; JIN, Y.; HAILONG, X; LEI, F. Experimental study of a pull-out test of corroded steel and concrete using the acoustic emission monitoring method. **Construction and Building Materials.** Vol. 122, p. 163-170, 2016.
- LORRAIN, M.; BARBOSA, P. M. Controle de qualidade dos concretos estruturais: ensaio de aderência aço-concreto. **Revista Concreto & Construções,** São Paulo, v. 26, n. 51, p 52-27, 2008.
- MAKNI, M.; DAOUD, A.; KARRAY, M. A.; LORRAIN, M. Towards a standard pull-out test specimen: geometrical specifications. **3rd fib International Congress.** Washington. D. C., FIB, 2010.
- PASQUALE, B. T.; MALO, R.; JOLIN, M. Alternative Setup Apparatus to Test ASTM A944-10 Beam-End Specimens. **Journal of Testing and Evaluation.** Vol. 46, nº4, p. 1741–1748, 2018.

- RIBEIRO, J. L. D. **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- RILEM-CEB-FIP-RC5, Bond test for reinforcement steel. 1. Beam Test, 1982.
- RILEM-CEB-FIP-RC6, Bond test for reinforcing steel. 2. Pull-Out Test, 1983.
- SHARMA, A; BOŠNJAK, J.; OZBOLT, J.; HOFMANN, J. Numerical modeling of reinforcement pull-out cover splitting in fire-exposed beam-end specimens. **Engineering Structures**. Vol. 111, p. 217-232, 2016.
- SILVA, B. V. **Proposição de um teste de aderência apropriado para controle tecnológico da resistência à compressão do concreto**. 2014. 281p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1998. 243p.
- STEIN, K. J. **Avaliação experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado**. 2016. 66p. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- STEIN, K. J. **Avaliação experimental de vigas de concreto armado corroídas submetidas a ciclos de carregamentos**. 2019. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- STANISH, K. **Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete**. 1997. 124p. Thesis (Degree of Master's of Applied Science) – Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1997.
- TESTANI, S. P.; PANTAZOPOULOU, S. J. Direct tension pullout bond test: experimental results. **Journal of Structural Engineering**. Vol. 136, nº 6, p. 731-43, 2010.
- TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- YANG, H.; DENG Z.; INGHAM, J. M. Bond position function between corroded reinforcement and recycled aggregate concrete using beam tests. **Construction and Building Materials**. Vol. 127, p. 518-526, 2016.