

## Análise da influência das reações entre o aço galvanizado e o concreto fresco na tensão de aderência do concreto armado

### Analysis of the influence of reactions between galvanized steel and fresh concrete in the bond stress of reinforced concrete

Márcia Suzanna Dutra Abreu Borges da Fonsêca<sup>1</sup>, Erivaldo Lopes de Souza<sup>2</sup>, Gibson Rocha Meira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Produção. João Pessoa, PB, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia de Construção Civil. João Pessoa, PB, Brasil.

e-mail: marciasuzanna@hotmail.com, elopesouza@gmail.com, gibsonmeira@yahoo.com

---

#### RESUMO

O aço galvanizado por imersão a quente é bastante utilizado no controle da corrosão das estruturas em concreto armado expostas à ambientes agressivos. O que torna importante a análise do comportamento deste aço no desempenho estrutural destas estruturas. A literatura apresenta incertezas e poucos trabalhos sobre este tema. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência da corrosão inicial do aço galvanizado devido à alta alcalinidade do concreto fresco na tensão de aderência do concreto armado. Para análise foram utilizados corpos de prova compostos por um cubo de concreto com uma barra localizada no centro com comprimento de aderência definido, utilizando barras em aço (galvanizado e não galvanizado) nos diâmetros de 10 mm e 20 mm. A aderência foi avaliada através do ensaio de arrancamento simples (*pull-out test*). Os resultados mostraram que, a perda de espessura da camada de galvanização para todas as barras devido a corrosão inicial oriunda do contato com o concreto fresco, não acarretou prejuízo significativo na proteção proporcionada por esta camada ao aço e nem diminuição na sua tensão de aderência ao concreto. Desta forma pode-se concluir que essa corrosão inicial do zinco não afeta o desempenho estrutural do concreto armado.

**Palavras-chave:** Corrosão; armadura galvanizada; concreto armado; aderência; galvanização por imersão a quente.

---

#### ABSTRACT

Hot-dip galvanized steel is widely used to control corrosion in reinforced concrete structures exposed to aggressive environments. This makes it important to analyze the behavior of this steel in the structural performance of these structures. The literature presents uncertainties and few studies on this topic. Thus, the objective of this work was to analyze the influence of initial corrosion of galvanized steel due to the high alkalinity of fresh concrete on the bond strength of reinforced concrete. For analysis, specimens composed of a concrete cube with a bar located in the center with a defined length of adhesion were used, using steel bars (galvanized and non-galvanized) in diameters of 10 mm and 20 mm. Adherence was evaluated using the simple pull-out test. The results showed that the loss of thickness of the galvanizing layer for all bars due to initial corrosion arising from contact with fresh concrete did not cause significant damage to the protection provided by this layer to the steel, nor did it decrease its adhesion stress to the steel. concrete.

**Keywords:** Corrosion; galvanized reinforcement; reinforced concrete; bond strength; hot-dip galvanizing.

---

#### 1. INTRODUÇÃO

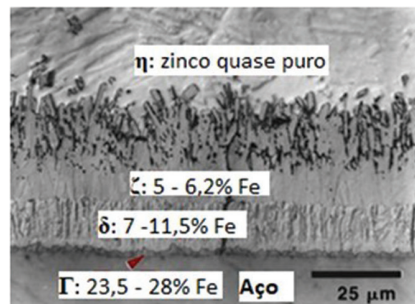
O aço galvanizado por imersão à quente é bastante utilizado no controle da corrosão das estruturas em concreto armado expostas a ambientes agressivos [1]. O que torna de suma importância a análise do comportamento deste tipo de aço no desempenho estrutural destas estruturas.

A galvanização por imersão a quente do aço oferece vantagem econômica, pois não aumenta significativamente o custo da estrutura, e garante uma eficiente proteção contra corrosão das armaduras, pois compreende

uma dupla proteção ao substrato de aço carbono: a barreira física, referente à camada galvanizada, e a proteção anódica de sacrifício, devido ao potencial elétrico do aço carbono ser mais nobre do que o do zinco [2, 3].

A camada da galvanização do aço pode ser formada por diferentes compostos de Fe-Zn intermetálicos, o que depende de vários fatores: composição do aço, temperatura, composição da liga líquida, espessura da parede do componente zincado, tempo de revestimento, estado da superfície, modo e taxa de resfriamento [4].

A reação do processo de galvanização produz um revestimento sobre o aço formado por uma série de camadas de liga de ferro-zinco, sendo elas representadas pelas letras gregas: eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ), delta ( $\delta$ ) e gama ( $\Gamma$ ) (Figura 1). As camadas de revestimento variam em composição e espessura, onde o teor de ferro aumenta na direção do substrato de aço [5].



**Figura 1:** Composição típica do revestimento da galvanização por imersão a quente no aço (Fonte: Adaptado de MARDER [5]).

A superfície da camada de galvanização é composta basicamente de zinco puro, fase eta ( $\eta$ ), e o zinco é um metal de transição anfotérico, que reage muito rapidamente com ácidos e hidróxidos para formar sais bivalentes. A corrosão do zinco depende principalmente do pH do ambiente, onde em um ambiente fortemente ácido ou altamente alcalino o zinco corrói a uma taxa de corrosão inaceitável.

Quando o aço galvanizado entra em contato com o concreto fresco, material altamente alcalino, ocorre uma reação de forma vigorosa entre o zinco e os íons de cálcio existentes no concreto, que cessa após a formação da camada passivadora e do endurecimento do concreto. O resultado dessa reação é a formação de uma camada de barreira de hidroxizincato de cálcio, acompanhada pela evolução do hidrogênio [3, 6].

Alguns autores apontam que, essa corrosão inicial acompanhada da evolução de hidrogênio que se difunde no concreto adjacente, leva a duas preocupações: a primeira é se essa corrosão inicial ocasiona a perda da camada de galvanização, removendo assim a proteção galvânica do aço e a outra é que se a evolução do hidrogênio provoca o aumento irreversível da porosidade do concreto adjacente e conseqüentemente a redução da resistência de aderência entre o aço galvanizado e o concreto [3, 7].

A aderência é uma propriedade do concreto armado que afeta vários aspectos do seu comportamento estrutural, tanto para o seu estado limite último quanto em situações de serviço. Logo, o bom funcionamento das estruturas em concreto armado pressupõe uma eficiente aderência entre o aço e o concreto, para que haja uma adequada transferência de tensões e que ambos atuem de forma integrada [7, 8].

A eficiência na aderência do concreto armado é quantificada através da relação tensão versus deslizamento, a qual expressa o deslizamento relativo da barra devido a uma certa tensão aplicada. Para estudar esse fenômeno da aderência, são utilizados diagramas que relacionam a tensão ao deslizamento relativo da aderência. Estes diagramas são obtidos a partir de ensaios experimentais e dependem de vários parâmetros.

Existem muitos mecanismos de resistência nos quais se baseia a aderência, sendo considerada uma interação complexa resultante dos efeitos da: aderência por adesão superficial, por atrito e aderência mecânica.

A aderência por adesão superficial, primeira fase do fenômeno, é oriunda das forças das ligações físico-químicas produzidas na superfície de contato entre o aço e o concreto durante as reações de hidratação do cimento. Esta adesão depende da rugosidade e estado de limpeza da superfície das barras.

Com o aumento da carga aplicada na estrutura, após superada a aderência por adesão, se desenvolve a aderência por atrito entre o aço e o concreto, que depende principalmente das características e rugosidade superficial da barra. A aderência por atrito se manifesta devido às tensões radiais do concreto sobre a armadura, resultando na resistência de aderência por atrito. Essa aderência pode ser por retração, dado que a barra de aço ao restringir as deformações do concreto origina uma pressão transversal que é exercida pelo concreto sobre a barra, ou por confinamento externo aplicado transversalmente.

Por fim, ocorre a aderência mecânica que é gerada pela irregularidade superficial da armadura, ou seja, devido ao contato do concreto com as nervuras inerentes às barras do aço, que ocasionam o travamento da barra, devido a criação de consoles no concreto em contato com as nervuras [7]. Na ocasião em que a barra é tracionada ou comprimida e tende a deslizar, esses consoles geram forças concentradas de compressão que são perpendiculares às faces das nervuras. A parcela de aderência mecânica é a mais eficaz e confiável. Entretanto, a análise independente destas três parcelas na aderência do aço com o concreto não é possível, não havendo como determinar o valor de cada uma separadamente [8].

A aderência é uma das preocupações no uso do aço galvanizado, que embora esse aço seja utilizado para prolongar a vida útil das estruturas de concreto armado, ainda existe incertezas quanto ao seu comportamento estrutural nestas estruturas. E uma delas está relacionado ao seu comportamento quando em contato com o concreto fresco e como esse comportamento influencia no fenômeno da aderência entre este aço e o concreto.

Alguns estudos apontam perda de aderência quando utilizado o aço galvanizado no concreto armado [9–12]. Podendo este fenômeno estar associado à reação aço galvanizado quando em contato com o concreto fresco, o que pode causar o aumento da porosidade na interface da pasta de cimento, resultado da evolução do hidrogênio que acompanha o processo de passivação do aço galvanizado [4, 13–15].

Por outro lado, estudos relatam que os efeitos de corrosão do revestimento de zinco, em concreto fresco, não afetam significativamente a sua aderência ao concreto [1]. Outros verificaram que, às vezes, a adesão do aço galvanizado ao concreto é até mais elevada do que para o aço não galvanizado [16]. Outros afirmam que, a força de adesão entre o aço galvanizado e o concreto é reduzida apenas durante os primeiros sete dias de cura e que após 28 dias é pelo menos comparável, podendo ser até maior, a encontrada no aço não galvanizado sob as mesmas condições. Este fato é explicado pelo preenchimento gradual dos poros pelos produtos de corrosão do zinco [17–19].

Outro ponto importante está relacionado a perda da camada de galvanização neste processo de corrosão inicial. Segundo estudos, quando o revestimento de zinco entra em contato com concreto fresco cerca de 10  $\mu\text{m}$  do revestimento de zinco é dissolvido. Entretanto, esse fenômeno não acarreta prejuízo significativo na proteção propiciada pela camada de galvanização, assim como também não afeta a resistência de aderência destas estruturas [1].

O que se tem é que, apesar dos estudos realizados, a literatura é escassa e há dúvidas com relação ao comportamento da armadura galvanizada quando utilizada nas estruturas em concreto armado. E como o aço galvanizado vem sendo bastante utilizado nestas estruturas, o presente trabalho aborda a influência da corrosão inicial do aço galvanizado na perda de espessura da camada de galvanização, assim como, essa corrosão influencia na tensão de aderência entre este aço e o concreto.

Este estudo é relevante, dada a importância do fenômeno da corrosão e da significância que o fenômeno de aderência aço-concreto tem na perda de desempenho e da durabilidade das estruturas em concreto armado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Foi utilizado um concreto convencional com resistência característica a compressão ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa, com consistência de  $13 \pm 2$  cm. A relação água/aglomerante foi de 0,55. O cimento utilizado foi o Portland de alta resistência inicial, tipo CP V - ARI MAX, fabricado pela Cimento Nacional, sendo escolhido por ser um cimento com baixo nível de adições de materiais cimentícios suplementares. O agregado miúdo utilizado foi a areia do tipo quartzosa e o agregado graúdo foi a brita de origem granítica em duas dimensões distintas,  $D_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm e  $D_{m\acute{a}x} = 19$  mm. Foi utilizado um aditivo plastificante, isento de cloretos, que segundo o fabricante tem densidade  $1,07 \pm 0,02$  Kg/L e deve ser utilizado no teor de 0,30 a 1,20% em relação à massa do aglomerante. A porcentagem utilizada neste estudo foi de 0,80%. O traço utilizado está apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Traço usado para preparação de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

Cimento	330 kg
Água	183 L
Agregado miúdo – ( $D_{m\acute{a}x} = 2,4$ mm)	881 kg
Agregado graúdo – ( $D_{m\acute{a}x} = 12,5$ mm)	301 kg
Agregado graúdo – ( $D_{m\acute{a}x} = 19$ mm)	692 kg
Aditivo	2,64 kg
Relação água/cimento	0,55

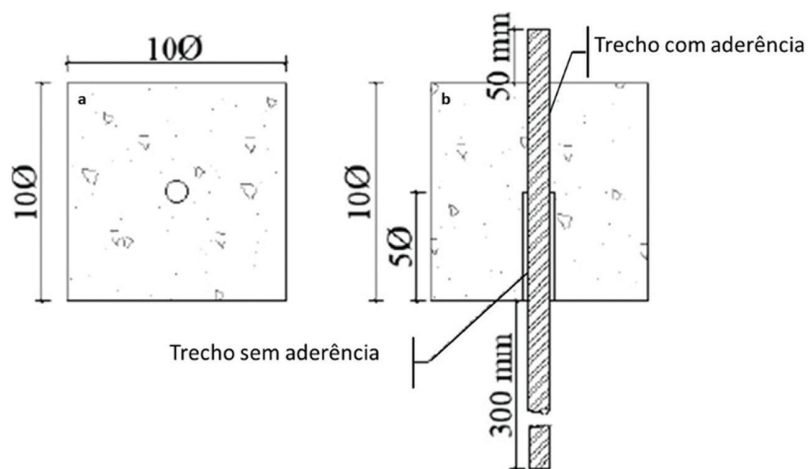
O aço utilizado foi o aço carbono (CA-50) com e sem galvanização, com resistência característica de escoamento ( $f_{yk}$ ) de 500 MPa, comprimento de 550 mm e diâmetros de 10,0 mm e 20,0 mm.

## 2.2. Preparação dos corpos de prova

### 2.2.1. Ensaio de aderência

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de aderência obedeceram às recomendações do RILEM-FIP-CEB [20], e seu arranjo tem a configuração apresentada na Figura 2.

As armaduras não galvanizadas foram limpas mecânica e quimicamente, tendo como base a norma americana [21], enquanto, as barras galvanizadas não passaram por nenhum processo de limpeza. Em seguida, as barras galvanizadas passaram por medições das espessuras de sua camada de galvanização e todas as barras foram pintadas com resina epóxi, deixando apenas um trecho de 100 mm referente ao trecho com aderência.



**Figura 2:** Arranjo empregado nos corpos de prova do ensaio: seção longitudinal e seção transversal (Fonte: Adaptado de RILEM – FIB-CEB. [20]).



**Figura 3:** Corpos de prova durante a concretagem (Fonte: Autor).

A etapa seguinte foi a delimitação do trecho sem aderência, utilizando tubo PVC/mangueira, e para preencher os vazios entre o tubo e o aço, foi utilizado fita crepe, evitando assim deslocamento do tubo/mangueira e a entrada de argamassa durante a concretagem.

Foram utilizadas formas de madeira compensado naval com espessura de 15 mm, antes da moldagem dos corpos de prova, as formas foram revestidas com uma película de desmoldante para facilitar a desmoldagem do bloco. Após isto, as barras foram posicionadas e iniciava-se a concretagem (Figura 3).

O lançamento do concreto foi dividido em três camadas, e o adensamento foi realizado por camada e manualmente, com 25 golpes em cada camada, com auxílio de uma barra de aço, evitando contato com a armadura do corpo de prova.

Ao término da concretagem, os corpos de prova foram cobertos com uma lona plástica, impedindo a evaporação da água presente na mistura. Após 24 horas, foram desmoldados e levados para câmara úmida, com a umidade de aproximadamente 99% e temperatura de  $23 \pm 2$  °C, onde permaneceram por 28 dias.

### 2.3. Procedimento de ensaio

O ensaio utilizado para determinação da tensão de aderência neste trabalho foi o ensaio de arrancamento simples (“pull-out-test”) normalizado pela RILEM - FIB-CEB. [20] e ASTM C234-91a [22]. Para a realização deste ensaio, foi utilizada a máquina universal de ensaios com capacidade de 100 t da empresa Contenco – Pavitest Ref. I3058, com dispositivo de adaptação constituído de duas placas de aço e quatro barras rosqueadas (Figura 4).

O corpo de prova é colocado em contato com o dispositivo, a barra do bloco passa pela placa inferior através de um furo central e é presa na garra inferior da máquina. Na realização do ensaio esta garra é responsável por tracionar a barra. Na parte superior do corpo de prova foi conectado o LVDT (“linear variable differential transformer”), responsável por medir o deslocamento ocorrido na barra. Para sua instalação, foi utilizado uma cantoneira metálica que era mantida sob pressão no corpo de prova e servia de suporte ao LVDT.

A velocidade de aplicação da força ( $V_p$ ) neste ensaio foi calculada conforma a seguinte equação:

$$V_p = 5\varnothing^2 \tag{Equação 1}$$

Onde:  $V_p$ : velocidade de aplicação da força (kgf/s)

$\varnothing$ : diâmetro da barra (cm).

A tensão de aderência foi obtida através da seguinte equação:

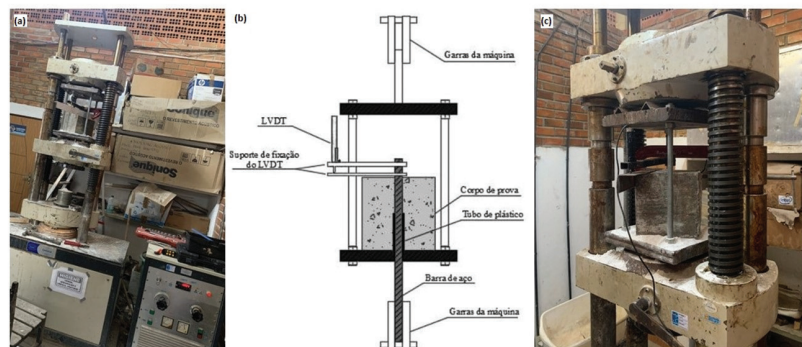
$$\tau_b = \frac{F}{\pi \varnothing l_a} \tag{Equação 2}$$

Onde:  $\tau_b$ : tensão de aderência (MPa);

$F$ : força de tração (N);

$\varnothing$ : diâmetro da barra (mm);

$l_a$ : comprimento do trecho de aderência da barra no corpo de prova (mm).



**Figura 4:** Detalhes do ensaio de arrancamento: (a) máquina universal de ensaios, (b) representação esquemática do dispositivo e instrumentação para o ensaio [23] e (c) visão ampliada do dispositivo acoplado à máquina universal na realização do ensaio, LVDT- linear variable differential transformer (Fonte: Autor).

Para obtenção da resistência de aderência ( $f_{bd}$ ) foi utilizada a Equação 3, que conforme [7], é a tensão de aderência para o qual ocorre um deslocamento ( $s$ ) da barra de 0,1 mm em relação ao concreto.

$$f_{bd} = \frac{F(s = 0,1mm)}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_a} \tag{Equação 3}$$

Onde:  $f_{bd}$ : tensão de aderência para o deslocamento de 0,1 mm (MPa);

$F$ : força de tração para o deslocamento de 0,1 mm (N);

$\varnothing$ : diâmetro da barra (mm);

$l_a$ : comprimento do trecho de aderência da barra no corpo de prova (mm).

Os ensaios de arrancamento foram realizados aos 28 dias após a sua concretagem.

A tensão de aderência última foi calculada utilizando-se a Equação 2, onde a força de tração utilizada foi o valor no momento de ruptura entre a barra de aço e o concreto dos corpos de prova.

O tipo de ruptura predominante neste trabalho foi a ruptura por arrancamento da barra, onde apenas poucos corpos de prova com barra de 20 mm, tiveram sua ruptura ocasionada pelo fendilhamento do concreto.

Ao final do ensaio, o corpo de prova foi levado para a extração da barra de aço. Após a remoção da barra, foi realizado o procedimento para conferência do percentual de perda de espessura. Para tal, a barra passou por limpeza mecânica para remoção de resíduos de concreto e produto de corrosão do aço. Após a limpeza, foi medida a espessura final da camada galvanizada, através do Digi-derm. Essas medidas foram comparadas com as realizadas antes do ensaio, foi utilizada a Equação 4:

$$\eta = \frac{e_0 - e_f}{e_0} \times 100\% \tag{Equação 4}$$

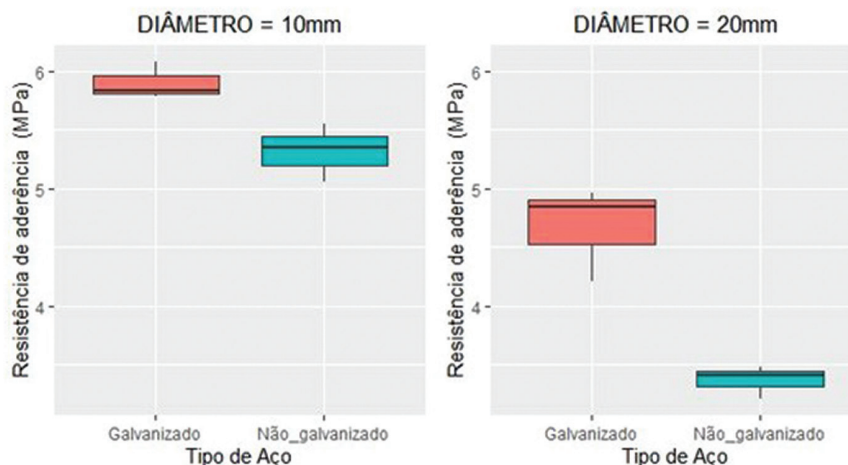
Onde:  $\eta$  = perda de espessura;

$e_0$  e  $e_f$  = as espessuras da camada de galvanização antes e depois da passivação do aço, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados em resposta à influência da corrosão inicial do aço galvanizado, ocasionada pela reação entre o zinco (metal de transição anfotérico) quando em contato com o concreto fresco (ambiente altamente alcalino), no desempenho estrutural do concreto armado.

Na Figura 5 são apresentados os resultados da resistência de aderência em relação ao tipo de aço utilizado.

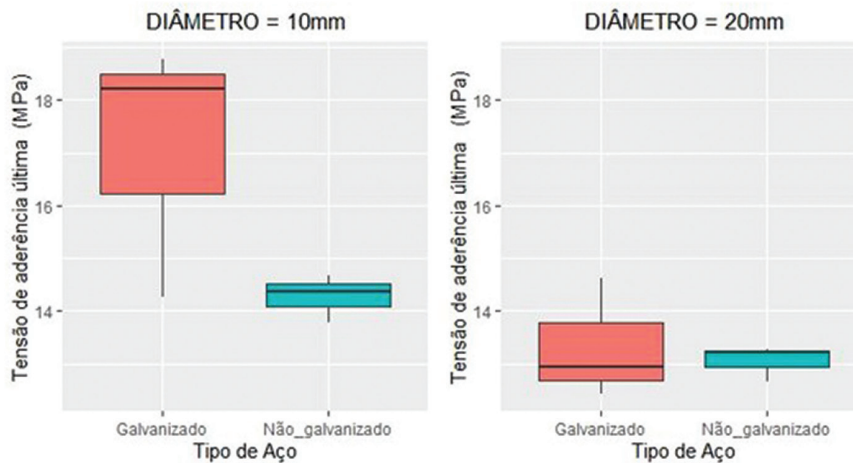


**Figura 5:** Gráficos de comparação da resistência de aderência entre ensaios com diferentes tipos de aço: (a) aço com diâmetro de 10 mm, e (b) aço com diâmetro de 20 mm (Fonte: Autor).

A partir da Figura 5, é possível perceber, independentemente do diâmetro usado nos corpos de prova, uma tendência da resistência de aderência apresentar valores mais altos para o aço galvanizado quando comparados ao aço não galvanizado. Nota-se que o intervalo de variação da resistência de aderência do aço galvanizado e não galvanizado não compartilham nenhum valor, independente do diâmetro utilizado.

Observa-se também que o aço galvanizado apresentou resistência de aderência superior ao aço não galvanizado. Esse comportamento foi semelhante para ambos os diâmetros estudados (10 mm e 20 mm). O que está de acordo com alguns autores da literatura, que sugerem que a resistência de aderência para o aço galvanizado após 28 dias de cura é no mínimo comparável, quando não superior, à do aço não galvanizado [17]. Como a aderência do concreto está relacionada à distribuição de poros e propriedades mecânicas do concreto nas proximidades do reforço, este fato estar relacionado ao aumento da pressão radial exercida, devido ao preenchimento gradual, desses poros, por produtos de corrosão do zinco [17–19].

Na Figura 6 são apresentados os resultados para tensão de aderência última em relação ao tipo de aço utilizado.



**Figura 6:** Gráficos de comparação da tensão de aderência última entre ensaios com diferentes tipos de aço: (a) aço com diâmetro de 10 mm, e (b) aço com diâmetro de 20 mm (Fonte: Autor).

A Figura 6 sugere que não há diferenças significativas entre os níveis de tensão última para os corpos de prova com diâmetro de 20 mm. É possível notar que, não apenas a mediana dos valores registrados é próxima, como a variação resultante dos ensaios resulta em intervalos de registro onde muitos valores poderiam ser compartilhados. Estes corpos de prova também apresentaram tensões de aderência última inferiores aos corpos de prova com aço de menor diâmetro (10 mm). Esse comportamento condiz com alguns estudos da literatura, os quais indicaram que reduzindo o diâmetro das barras, obtém-se uma maior tensão de aderência última [24, 25]. Segundo DUCATTI [24], um dos motivos deve-se ao fato das barras de maior diâmetro reter maior quantidade de água na sua face inferior, o que prejudica a sua aderência. Assim como também, devido as armaduras de maior diâmetro dispõem de nervuras com maior altura, e que essa característica atua de forma negativa na forma de ruptura, pois resulta no desenvolvimento de maiores solicitações de tração no concreto circundante.

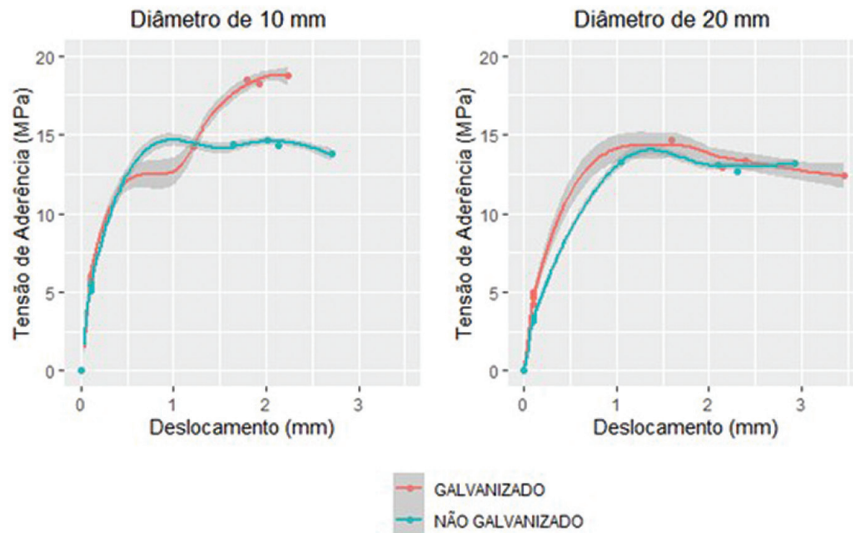
Ainda a partir da Figura 6 observa-se que, no caso dos corpos de prova com o aço de diâmetro de 10 mm, apesar dos valores da tensão de aderência estarem próximos, a mediana para o aço galvanizado é um pouco superior ao aço não galvanizado.

Desta forma, assim como para a resistência de aderência, a tensão de aderência última dos corpos de prova com aço galvanizado apresenta valores, quando não semelhantes, superiores aos do aço não galvanizado. Semelhante ao apresentado por PORTER [16], que relatou que a adesão do aço galvanizado ao concreto é geralmente mais elevada do que para o aço não galvanizado.

Uma outra análise realizada foi a da tensão versus deslocamentos. Os gráficos presentes na Figura 7 apresentam o comportamento médio estimado da relação entre tensão e deslocamento para o conjunto dos corpos de prova composto pelo aço galvanizado e não galvanizado.

Através da Figura 7 é possível observar um padrão de deslocamento bem definido, indicando que não houve problemas de controle dos deslocamentos neste tipo de ensaio. Esse padrão de comportamento foi observado em ambos os diâmetros, tanto para o aço galvanizado quanto para o não galvanizado, com exceção dos corpos de prova composto pelo aço galvanizado com diâmetro de 10 mm que apresentou um comportamento um pouco divergente dos demais.

A partir dos gráficos da Figura 7, é possível notar que, inicialmente grandes aumentos na tensão de aderência tendem a gerar pequenas alterações nos deslocamentos obtidos e há um nível específico dessas tensões, a partir do qual pequenos incrementos na tensão resultam em grandes aumentos nos deslocamentos observados.



**Figura 7:** Comportamento médio da Tensão versus Deslocamento para o aço galvanizado e não galvanizado: (a) diâmetro de 10 mm, e (b) diâmetro de 20 mm (Fonte: Autor).

Observa-se que os corpos de prova com aço não galvanizado de 10 mm apresentaram um crescimento na tensão de aderência até um deslocamento de aproximadamente de 1 mm para um valor de tensão próximo de 15 MPa, a partir deste nível, ocorre uma tendência de estabilização das tensões. Para os corpos de prova de aço galvanizado de 10 mm essa estabilização não pode ser claramente observada, neste caso, obteve-se o valor da tensão de aproximadamente 18 MPa para um deslocamento próximo de 2 mm.

No caso dos corpos de prova contendo o aço de 20 mm, para ambos os tipos aços, galvanizado e não galvanizado, observou-se um crescimento na tensão de aderência até um deslocamento de aproximadamente de 1 mm para um valor de tensão próximo de 13 MPa, a partir deste nível, ocorre uma tendência de estabilização das tensões.

Uma outra preocupação existente, relacionada à corrosão inicial do zinco em concreto fresco, é a perda parcial ou total da espessura da camada de galvanização do aço. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, considerando essa reação inicial entre o aço galvanizado e o concreto fresco.

**Tabela 2:** Resultados de perdas de massa dos corpos de prova (Fonte: Autor).

DIÂMETRO DA BARRA (mm)	ESPESSURA (µm)		ESPESSURA ELIMINADA (µm)	ESPESSURA ELIMINADA (%)
	INICIAL	FINAL		
10	180	172	7,87	4,37
	183	172	8,12	4,51
	179	166	7,97	4,43
	180	172	8,00	4,44
20	189	179	9,81	5,19
	188	175	10,19	5,39
	194	176	10,00	5,29
	189	179	10,00	5,29

A partir dos resultados, apresentados na Tabela 2, o que se observa é que, para ambos os diâmetros, a espessura da camada de galvanização diminuiu ligeiramente quando em contato com o concreto fresco. Acredita-se que isso ocorreu em razão da corrosão inicial do zinco, devido à alta alcalinidade do concreto fresco, durante o processo de passivação do aço galvanizado.

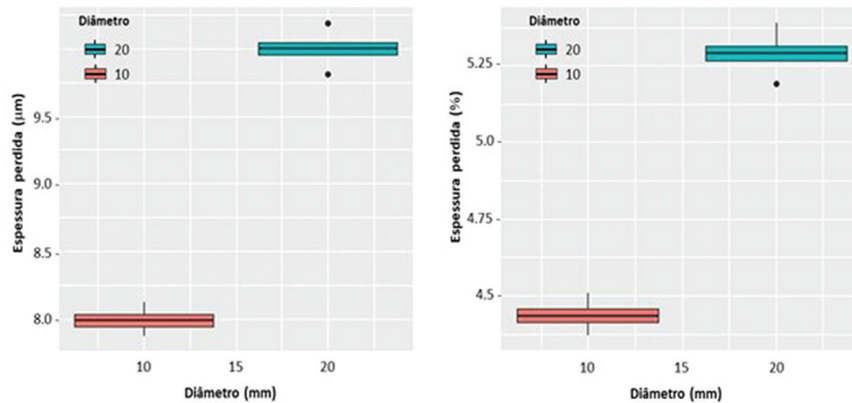
Entretanto, a espessura perdida dos corpos de prova com 20 mm apresentou uma tendência em nível superior a aquela referente aos corpos de prova com 10 mm. Os valores de espessura perdida tiveram uma variação pequena, os quais a espessura corroída variou em torno de 8 µm (≈ 4.5%) e 10 µm (≈ 5.25%), para os



corpos de prova de 20 mm e 10 mm, respectivamente. Essa pequena diferença pode estar associada ao fato de as barras com diâmetro de 20 mm possuírem uma superfície de contato maior que as barras com diâmetro de 10 mm, o que favorece a uma maior reação com o concreto fresco.

O que favorece ao entendimento que a corrosão nos corpos de prova de 20 mm foi maior. Enquanto a espessura corroída variou em torno de 8  $\mu\text{m}$  para os corpos de prova de 10 mm, para aqueles de 20 mm essa espessura variou em torno de 10  $\mu\text{m}$ .

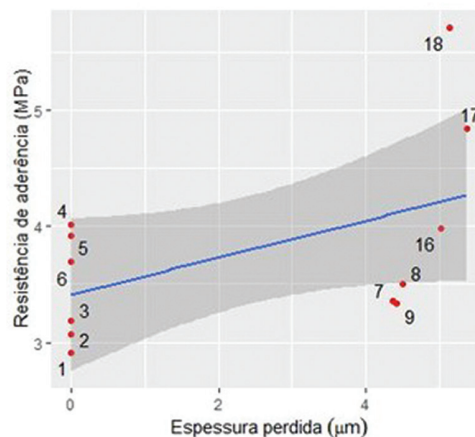
A Figura 8 apresenta os gráficos a partir destes valores de espessura perdida em ambos os corpos de prova.



**Figura 8:** Gráficos da relação entre espessura perdida da camada de galvanização e o diâmetro do aço: (a) espessura em micrometros, (b) espessura em porcentagem (Fonte: Autor).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2 e da Figura 8, constata-se que os resultados obtidos estão de acordo com o discorrido por YEOMANS [1], que constatou através de seus resultados que, quando o revestimento de zinco entra em contato com concreto fresco, cerca de 10  $\mu\text{m}$  do revestimento de zinco é dissolvido, entretanto não acarretando prejuízo significativo na proteção propiciada pela camada de galvanização. Esse comportamento condiz com o apresentado pelos autores TAN e HANSSON [3], que mostraram, através de seus experimentos, que a perda de profundidade do revestimento após dois dias de embutimento em concreto de cimento Portland comum foi insignificante.

A Figura 9 mostra um gráfico de dispersão entre a resistência de aderência e a espessura perdida da camada de galvanização.

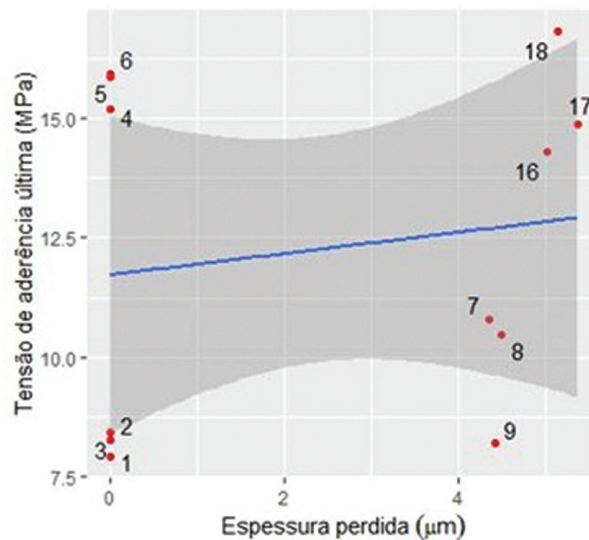


**Figura 9:** Gráfico da relação entre resistência de aderência e espessura perdida da camada de galvanização (Fonte: Autor).

Em um gráfico como o apresentado na Figura 9, a proximidade dos pontos em torno de uma reta de tendência linear representa um indício de que as variáveis estão correlacionadas. No entanto, pelo gráfico, a

expressiva variação em torno da reta de tendência sugere que essa associação pode não ser significativa, ou seja, pode não existir e as duas variáveis serem independentes. Entretanto, cabe ressaltar que, essa dispersão está associada também a variação de diâmetro (10 mm e 20 mm) dos corpos de prova, pois a tensão de aderência também é influenciada pelo diâmetro do aço.

Os indícios de associação com a espessura perdida da camada de galvanização são ainda menos prováveis com a tensão de aderência última. Como pode ser constatado através do gráfico de dispersão presente na Figura 10, onde há uma variação ainda maior dos pontos em torno da reta de tendência.



**Figura 10:** Gráfico da relação entre tensão de aderência última e espessura perdida da camada de galvanização (Fonte: Autor).

A Figura 10 mostra um indício de que existe baixos níveis de associação e possivelmente não significativos, o que sugere a possibilidade de independência destas variáveis para pequenas perdas na espessura da camada de galvanização. Entretanto, como já dito anteriormente, existem outras variáveis que podem também estar influenciando na dispersão destes valores.

Todavia, o que pode ser observado é que, em nenhum dos resultados obtidos houve redução na tensão de aderência devido a corrosão inicial do aço galvanizado com o concreto fresco quando comparado ao aço não galvanizado sob as mesmas condições. O que se verifica são valores ligeiramente superiores de aderência para os corpos de prova utilizando o aço galvanizado.

Sendo assim, tem-se que, considerando os resultados apresentados, não há diferença significativa no desempenho da aderência quando utilizada a barra em aço galvanizado ou não galvanizado. Onde a tensão de aderência dos corpos de prova com aço galvanizado apresentara valores, quando não semelhantes, superiores aos do aço não galvanizado. O que corrobora com o trabalho do professor YEOMANS [1], mencionado anteriormente, que através de testes padronizados (teste de arrancamento e teste de viga) mostrou que a resistência de aderência não é realmente afetada [1].

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que, com relação à influência da corrosão inicial do aço galvanizado devido à alta alcalinidade do concreto fresco no desempenho estrutural do concreto armado, não há diferença considerável no desempenho de aderência entre as barras em aço galvanizado e não galvanizado e que quando não iguais, a resistência de aderência do aço galvanizado apresentou resultados superiores.

Com relação aos deslocamentos durante a realização do ensaio de arrancamento, observou-se que, inicialmente, grandes aumentos na tensão de aderência tendem a gerar pequenas alterações nos deslocamentos e há um nível específico dessas tensões, a partir do qual pequenos incrementos na tensão resultam em grandes aumentos nos deslocamentos.

O que ficou evidente também é que, a espessura da camada de galvanização perdida com a corrosão inicial, devido o contato com o concreto fresco, não acarretou prejuízo significativo na proteção proporcionada por esta camada ao aço e nem diminuição na aderência.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] YEOMANS, S.R., *Galvanized steel reinforcement in concrete*, Canberra, Elsevier, 2004.
- [2] TITTARELLI, F., BELLEZZE, T., “Investigation of the major reduction reaction occurring during the passivation of galvanized steel rebars”, *Corrosion Science*, v. 52, n. 3, pp. 978–983, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.021>
- [3] TAN, Z.Q., HANSSON, C.M., “Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete”, *Corrosion Science*, v. 50, n. 9, pp. 2512–2522, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.035>
- [4] PERNICOVA, R., DOBIAS, D., POKORNY, P., “Problems connected with use of hot-dip galvanized reinforcement in concrete elements. Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016”, *Procedia Engineering*, v. 172, pp. 859–866, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.086>
- [5] MARDER, A.R., “The metallurgy of zinc-coated steel”, *Progress in Materials Science*, v. 45, n. 3, pp. 191–271, 2000. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1)
- [6] YEOMANS, S.R., “Performance of black, galvanized, and epoxy-coated reinforcing steel in chloride-contaminated concrete”, *Corrosion*, v. 50, n. 1, pp. 72–81, 1994. doi: <http://dx.doi.org/10.5006/1.3293496>
- [7] LEONHARDT, F., MOMMIG, E., *Construções de Concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*, 1 ed., Rio de Janeiro, Interciência, 1977.
- [8] FUSCO, P.B., *Técnica de armar as estruturas de concreto*, São Paulo, PINI, 1995.
- [9] ARUP, H., “Galvanized steel in concrete”, *Materials Performance*, v. 18, n. 4, pp. 41–44, 1979.
- [10] MENZEL, K., *Zur Korrosion von verzinktem Stahl in kontakt mit Beton - IWB (Mittelungen)*, Germany, Universität Stuttgart, 1992.
- [11] HIME, W.G., MACHIN, M., “Performance variances of galvanized steel in mortar and Concrete”, *Corrosion*, v. 49, n. 10, pp. 858–860, 1993. doi: <http://dx.doi.org/10.5006/1.3316010>
- [12] CAMÕES, A., CRUZ, P.J., SÁ, J.M.A., “Avaliação da aderência ao betão de varões de aço galvanizado ou com revestimento epoxídico”, In: *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008*, Guimarães, Portugal, 2008.
- [13] ROBINSON, K.E., *The bond strength of galvanized reinforcement - Technical report: TRA220/1956*, London, Cement and Concrete Association, 1956.
- [14] BOWSER, B., BASTIEN, J., GANZ, H.R. et al. *Corrosion protection of reinforcing steels - Technical report - fib - Bulletin 49*, Lousanne, IFSC, 2009.
- [15] POKORNY, P., BALÍK, L., KOLÍSKO, J., et al., “Description of structure of Fe-Zn intermetallic compounds present in hot-dip galvanized coatings on steel”, *Metalurgija*, v. 54, n. 4, pp. 707–710, 2015.
- [16] PORTER, F., *Zinc handbook: properties, processing and use in design*, New York, Marcel Dekker, 1991. doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781482276947>.
- [17] YEOMANS, S.R., “Understanding the corrosion process for galvanized steel reinforcement in concrete”, In: *International Conference on Understanding Corrosion Mechanism of Metals in Concrete*, Boston, MA, USA, 1997.
- [18] BELAID, F., ARLIGUIE, G., FRANCOIS, R., “Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 11, pp. 1561–1566, 2001. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00597-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00597-X)
- [19] POKORNY, P., KOUŘIL, M., HRDLIČKA, L., et al., “Faktory ovlivňující soudržnost povlakované výztuže s betonem”, *Tribotechnika.*, v. 2, pp. 80–82, 2014.
- [20] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, *RILEM-FIP-CEB: bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, recommendation RC 6, Concrete Reinforcement Technology*, Paris, France, CEB, 1983.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM G-1: standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens*, Philadelphia, ASTM, 2011.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C234-91a: standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel*, Philadelphia, ASTM, 1991.
- [23] BELO, G.F., “Aderência entre o aço e concreto fresco em condições de concretagem submetidas a vibrações”, Tese de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2017.
- [24] DUCATTI, V.A., “Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 1993.
- [25] ICHINOSE, T., KANAYAMA, Y., INOUE, Y., et al., “Size effect on bond strength of deformed bars”, *Construction & Building Materials*, v. 18, n. 7, pp. 549–558, Set. 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.014>.