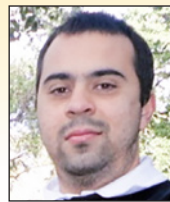
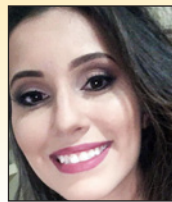


Effect of degree of corrosion on mechanical properties of reinforcements buried for 60 years

Efeito do grau de corrosão em propriedades mecânicas de armaduras enterradas por 60 anos



C. E. T. BALESTRA ^a
carlosbalestra@utfpr.edu.br

M. G. LIMA ^b
magdlima@gmail.com

A. Z. MENDES ^c
adriane.zella25@gmail.com

R. A. MEDEIROS-JUNIOR ^c
ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br

Abstract

This paper studies the influence of the corrosion degree calculated by the mass loss and by the smaller diameters on the yield strength, ultimate strength and final elongation. Reinforcements buried and naturally corroded for 60 years were studied. The mechanical properties of the protruding reinforcing steel were compared to reference bars, which also remained buried for 60 years, but without going through the process of corrosion. Micrographs, besides the chemical composition and the characterization of the aggressiveness of the soil were realized. The micrographs and the chemical composition show the presence of pits in the reinforcements and sulfur contents for steel above the prescriptions of the time when the foundations were initially implement, respectively. The results also show that the effects of pitting corrosion on the mechanical properties of the naturally corroded bars may not be adequately expressed by the mass loss. This type of corrosion (pits) produces geometric variations in the cross sections along the length of the test specimens, generating stress gradients between successive sections. This has a noticeable impact on the mechanical properties of the reinforcements. In general, the effects of corrosion are more pronounced on the ductility of the reinforcement. Regarding the aggressiveness of the soil, high corrosion rates were identified in the reinforcement, even with the soil being classified as essentially non-corrosive.

Keywords: reinforcement corrosion, durability, mass loss, smallest diameter, corrosion degree, mechanical properties.

Resumo

Este artigo estuda a influência do grau de corrosão, calculado pela perda de massa e pelos menores diâmetros, sobre a resistência ao escoamento, limite de resistência e alongamento final em armaduras corroídas naturalmente. Essas armaduras permaneceram enterradas por 60 anos. As propriedades mecânicas das armaduras de espera foram comparadas às de barras de referência, que também permaneceram enterradas por 60 anos, mas sem sofrer o processo de corrosão. Foram realizadas micrografias, além da determinação da composição química e da caracterização da agressividade do solo onde as armaduras estavam enterradas. As micrografias e a composição química mostram a presença de pites nas armaduras e teores de enxofre acima das prescrições recomendadas para o aço na época de execução das fundações, respectivamente. Os resultados também mostram que os efeitos da corrosão por pites sobre as propriedades mecânicas das barras corroídas naturalmente podem não ser adequadamente expressos pela perda de massa. Esse tipo de corrosão (pites) produz variações geométricas nas seções transversais ao longo do comprimento dos corpos de prova, gerando gradientes de esforços entre seções sucessivas, que impactam de forma notória sobre suas propriedades mecânicas. De uma maneira geral, os efeitos da corrosão são mais pronunciáveis sobre a ductilidade das barras. Com relação à agressividade do solo, altas velocidades de corrosão foram identificadas nas armaduras, mesmo com o solo sendo classificado como essencialmente não corrosivo.


Palavras-chave: corrosão de armaduras, durabilidade, perda de massa, menor diâmetro, grau de corrosão, propriedades mecânicas.

^a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, PR, Brasil;

^b Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil;

^c Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

Received: 02 Mar 2017 • Accepted: 14 Oct 2017 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

A limitação da baixa resistência à tração apresentada pelo concreto é suprida pelo uso das armaduras, permitindo a construção de estruturas esbeltas e com maiores vãos. Todavia, a introdução das armaduras no concreto pode resultar em problemas de degradação nas estruturas de concreto armado devido à corrosão, que em estágios avançados pode levar a estrutura à ruína. Neste sentido, estudos ressaltam que a manutenção e a reabilitação de estruturas degradadas pela corrosão envolvem montantes financeiros significativos [1-4].

Os efeitos da corrosão sobre as estruturas de concreto armado envolvem consequências às propriedades mecânicas das barras devido principalmente a uma redução de sua seção transversal e da aderência entre o concreto e as armaduras [5,6]. Além disso, os produtos de corrosão geram tensões na direção radial ao eixo das barras que não são suportadas pela limitada deformação plástica do concreto, levando assim à fissuração e posterior destacamento da camada de revestimento [7-9].

O mecanismo da corrosão que leva à degradação das armaduras têm sido objeto de pesquisa no mundo, entretanto, a influência da corrosão natural sobre as propriedades mecânicas das armaduras representam uma menor parcela desses estudos [6,10,11]. Tem-se observado que a maioria dos trabalhos referentes à avaliação das propriedades mecânicas de armaduras corroídas trata de ensaios de corrosão acelerada em ambiente de laboratório. Ressalta-se que, dependendo da metodologia aplicada para promover a corrosão das armaduras - câmaras salinas, por exemplo - esses trabalhos podem não promover a formação da camada de passivação que reveste a armadura no interior do concreto devido ao pH alcalino do meio; isso resulta em um ataque uniforme, e, conseqüentemente, diferenças em relação ao mecanismo de corrosão [6,8,10,12-16]. Dentro deste contexto, a corrosão das armaduras por ação dos cloretos é caracterizada como sendo por pites, uma vez que os cloretos tem a capacidade de romper localmente a camada passiva existente. Como consequência, a corrosão é propagada no pite, de acordo com a pilha ativa-passiva em condições não polarizadas [1,10,11].

Os estudos de Almussallan [12], Apostolopoulos *et al.* [10] e François *et al.* [8] podem ser citados dentre as pesquisas que contemplam a corrosão de armaduras conduzidas em laboratório. Na perspectiva de armaduras corroídas obtidas de estruturas reais, podem ser citados os estudos de Palsom e Mirza [5], Papadopoulos *et al.* [17], Zhang *et al.* [16] e Balestra *et al.* [11].

A metodologia utilizada por Almussallan [12] consiste em aplicar uma corrente em barras de aço embebidas no concreto para acelerar o processo de corrosão. O autor pontua a ocorrência de fraturas repentinas em barras com grau de corrosão superior a 12%. Já Apostolopoulos *et al.* [10] submetem barras expostas diretamente à névoa salina e também barras embebidas no concreto exposta a mesma névoa. Os autores ressaltam que comparando barras com o mesmo grau de corrosão, as barras imersas no concreto mostram maior redução quanto à resistência ao escoamento e ductilidade e maior profundidade de pites do que às expostas diretamente à névoa salina. No estudo de François *et al.* [8] foram utilizadas barras extraídas de vigas de concreto armado expostas a um ambiente com cloretos. Os resultados mostraram uma redu-

ção das propriedades mecânicas devido à corrosão e a ausência de indicação de estrição nas barras corroídas.

Palsom e Mirza [5] utilizaram 103 amostras de armaduras provenientes do tabuleiro de uma ponte canadense, demolida devido aos problemas de corrosão das armaduras pelo uso de sais de degelo. Papadopoulos *et al.* [17] realizaram ensaios de tração em 96 corpos de prova extraídos de edificações centenárias na Grécia. Recentemente, o estudo de Zhang *et al.* [16] comparou o comportamento à tração e fadiga de armaduras de uma edificação com mais de 30 anos na China e Balestra *et al.* [11] avaliaram o efeito do grau de corrosão na resistência efetiva e nominal de armaduras naturalmente corroídas.

De uma forma geral, independentemente se o método de corrosão das barras é acelerado em laboratório ou em condições naturais, os estudos citados apontam para um decréscimo nos valores referentes à resistência ao escoamento, limite de resistência, alongamento final medido e ductilidade, conforme a perda de massa das armaduras aumenta.

A influência da seção transversal sobre as propriedades mecânicas das armaduras é apresentada nos estudos de Apostolopoulos [18] e Zhu e François [19]. No primeiro estudo, barras foram corroídas em uma câmara de névoa salina por até 120 dias. Os resultados demonstraram uma variação progressiva das propriedades mecânicas das barras à medida que o diâmetro das barras é diminuído pela corrosão. No segundo estudo foram analisados diferentes padrões de corrosão. Os resultados mostraram que formas assimétricas das seções corroídas, com maiores valores de excentricidade, apresentaram os menores valores de alongamento final comparadas às seções simetricamente corroídas. Além disso, nestas seções assimétricas, a excentricidade aumentou a concentração de tensões nas seções transversais, decrescendo drasticamente o alongamento final das barras.

Mediante o exposto, prover mecanismos que permitam avaliar a relação da corrosão com o decréscimo das propriedades mecânicas das armaduras, a fim de verificar a capacidade portante remanescente de uma estrutura de concreto armado degradada se faz necessário, com o objetivo de determinar níveis de segurança. Desta forma, dada a existência de poucos estudos utilizando armaduras corroídas naturalmente, o presente artigo tem como objetivo apresentar resultados referentes aos efeitos do grau de corrosão, expresso pela perda de massa e pelos menores diâmetros, sobre as propriedades mecânicas de armaduras corroídas naturalmente no solo por décadas, provenientes de um antigo conjunto de fundações executadas em concreto armado. Para tal, ensaios de tração em corpos de prova retirados destas armaduras foram realizados.

Este conjunto de fundações era composto por: (i) estacas; (ii) blocos de fundação em concreto armado, com armaduras com diâmetros nominais originais de 5/8" (15,88 mm) e concreto com resistência à compressão de 12 MPa; e (iii) armaduras de espera destinadas à ligação entre os blocos de fundação e os pilares da edificação, com diâmetros nominais originais de 5/8" (15,88 mm) e 3/4" (19,08 mm). O conjunto de fundações pertence ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), localizado em São José dos Campos, Brasil, e permaneceu enterrado por um período de 60 anos, pois não houve a possibilidade de construção de uma parte das edificações na década de 50.

Quando as obras foram retomadas, problemas como destacamentos entre blocos e estacas e a corrosão das armaduras de espera foram verificados *in loco*, o que impossibilitou o uso destas antigas fundações. Desta forma, estas antigas fundações foram descartadas, sendo suas armaduras de espera e um bloco de fundação coletados para pesquisas.

Deve ser ressaltado que as armaduras de espera permaneceram enterradas no solo por décadas, sendo natural o seu processo de corrosão, ou seja, sem a influência de procedimentos acelerados em laboratório que podem não refletir adequadamente a resistência esperada de barras corroídas naturalmente [11,16]. Tal fato permite uma análise quantitativa realista dos efeitos da corrosão determinados através da perda gravimétrica e da redução dos diâmetros das barras sobre as propriedades mecânicas das armaduras.

Uma análise da caracterização do solo como meio corrosivo foi executada. Além disso, fazem parte do escopo deste trabalho a determinação das características químicas das armaduras e uma análise por microscopia, a fim de observar o tipo de corrosão (morfologia).

2. Caracterização do solo como meio agressivo quanto à corrosão

O solo apresenta-se como um dos mais importantes e complexos meios agressivos às estruturas devido à atuação conjunta de múltiplos fatores, como por exemplo, a variação da composição do solo, a umidade presente e a atividade de microrganismos [20]. A interação dos fatores que interferem na corrosão dos metais no solo faz com que seu desempenho apresente características de durabilidade distintas em diferentes regiões [21].

Os principais fatores que influenciam na corrosividade do solo são: a aeração, a resistividade, a presença de íons (cloretos e sulfatos), a umidade, o pH e a atividade de microrganismos [22-25]. Dentre esses fatores, Balestra *et al.* [11] afirmam que a resistividade é um parâmetro indicativo da corrosividade do solo, obtida por meio

Tabela 1

Classificação de agressividade do solo segundo NACE [27]

| Resistividade do solo ($\Omega \cdot \text{cm}$) | Avaliação de corrosividade |
|--|------------------------------|
| > 2000 | Essencialmente não corrosivo |
| 1500 - 2000 | Medianamente corrosivo |
| 1200 - 1500 | Moderadamente corrosivo |
| 1000 - 1200 | Corrosivo |
| 700 - 1000 | Altamente corrosivo |
| < 700 | Extremamente corrosivo |

de ensaios em campo. Neste sentido, a norma ASTM G57-06 [26] estabelece critérios metodológicos para a determinação da resistividade do solo segundo o método dos quatro eletrodos de Wenner. Com relação ao critério utilizado para avaliação da agressividade do solo em campo, NACE [27] estabelece faixas de valores para a caracterização da agressividade do solo segundo sua resistividade. De acordo com esta classificação, apresentada na Tabela 1, solos com resistividade superior a 20000 $\Omega \cdot \text{cm}$ são caracterizados como essencialmente não corrosivos, ao passo que solos com resistividade inferior a 700 $\Omega \cdot \text{cm}$ são extremamente corrosivos.

3. Programa experimental

3.1 Caracterização do local e do solo

Os materiais utilizados para obtenção dos corpos de prova para o ensaio de tração são provenientes de armaduras não corroídas removidas da face inferior de um bloco de fundação (referência) e

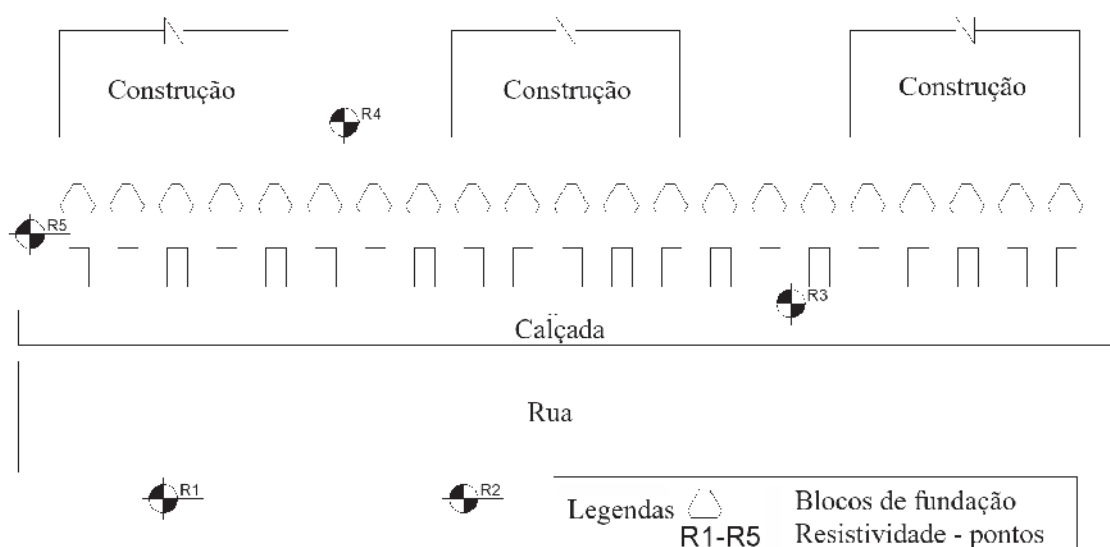


Figura 1

Esquema de localização das antigas fundações e pontos de determinação da resistividade do solo (R1-R5)

Tabela 2

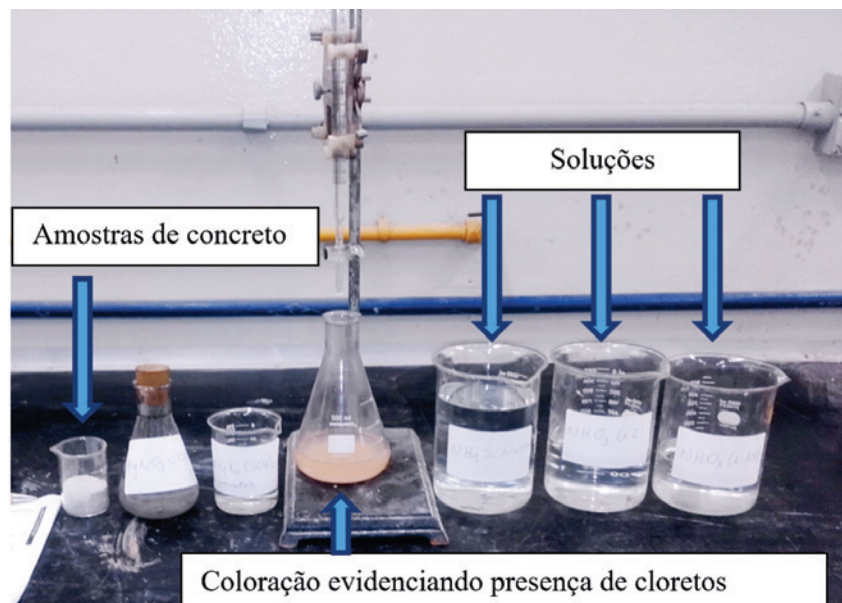
Características químicas do solo

| Parâmetro | Amostra 1 | Amostra 2 |
|------------------------|-----------|-----------|
| pH | 7,10 | 8,97 |
| Sulfetos (%) | 0,004 | 0,004 |
| Óxidos de cálcio (%) | 0,31 | 0,92 |
| Óxidos de magnésio (%) | 0,06 | 0,07 |

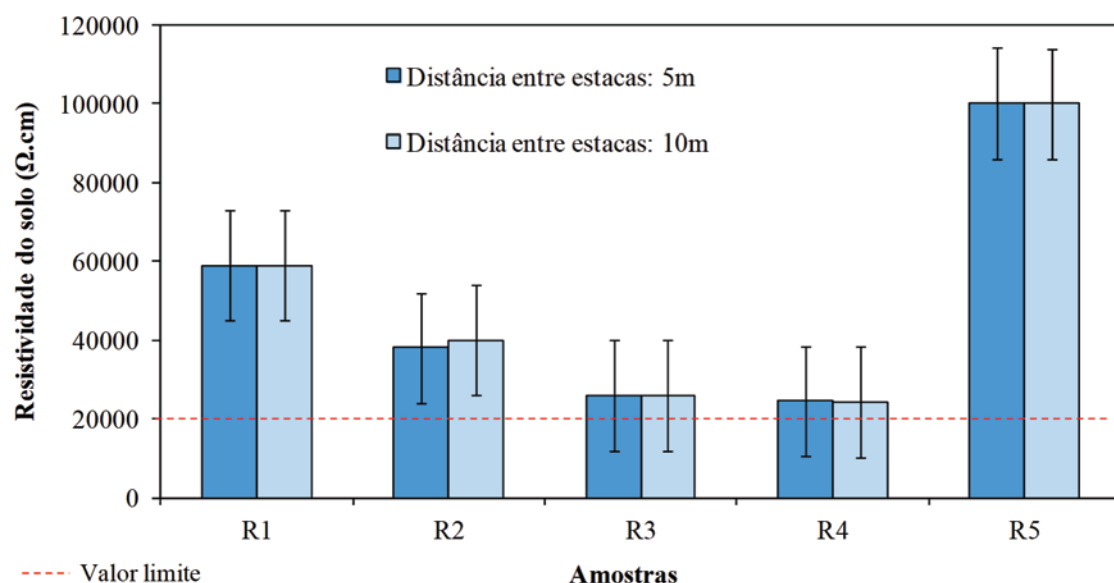
de armaduras de espera em processo de corrosão natural. Deve ser ressaltado que estas armaduras apresentavam 60 anos. As armaduras de espera permaneceram enterradas em processo de corrosão natural no solo por este período, ao passo que, as armaduras do bloco de fundação (região inferior do bloco) permane-

ram protegidas pelo concreto e não apresentavam corrosão. A Figura 1 mostra um esquema de localização das antigas fundações. O solo do local onde as fundações estavam presentes caracterizava-se pela presença de silte e argila, com uma cor predominante avermelhada, indicando a presença de óxidos de ferro. As características químicas do solo do local são apresentadas na Tabela 2. Duas amostras foram coletadas para caracterização do solo, sendo possível observar um pH próximo ao neutro para a amostra 1 e um pH básico na amostra 2. A Tabela 2 também revela uma maior presença de óxido de cálcio na amostra 2. Os teores de sulfetos e óxido de magnésio encontrados foram semelhantes entre as amostras.

A presença de cloretos foi avaliada através de ensaios em amostras de concreto tomadas nas proximidades da face superior do bloco de concreto coletado para estudos, uma vez que a avaliação

**Figura 2**

Análise para verificação da presença de cloretos nas fundações

**Figura 3**

Resistividade do solo no local de estudo



Figura 4
Exposição completa das armaduras do bloco de fundação

de cloretos diretamente no solo é uma atividade complexa, pois a água das chuvas penetra através do solo podendo carregar e distribuir desigualmente os cloretos presentes no mesmo. Desta forma, amostras de concreto em pó foram coletadas em sete pontos do bloco através da execução de furos com diâmetro igual a 19 mm, até a profundidade de 20 mm nas proximidades da superfície do concreto. O material em pó foi coletado e analisado por titulação com uso de uma solução de tiocianato de amônia (0,05M), conforme descreve o procedimento da RILEM TC 178-TMC [28]. A titulação é conduzida até que a solução de tiocianato produza uma coloração marrom que não desaparece com a agitação, indicando, assim, a presença de cloretos (Figura 2).

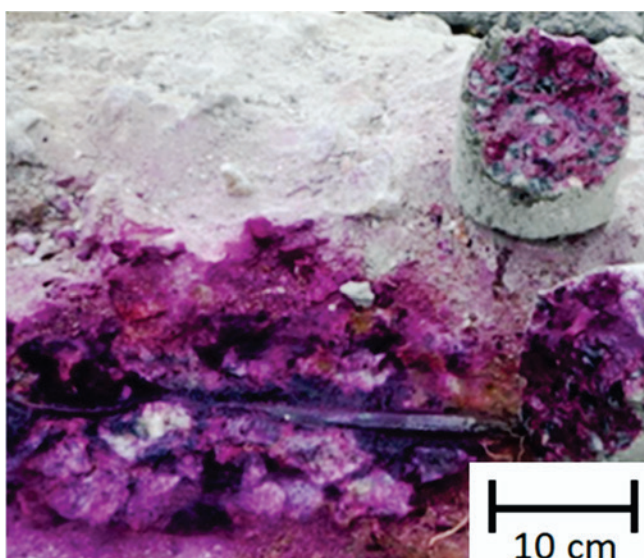


Figura 5
Alcalinidade do concreto avaliada pela aplicação de fenolftaleína

Além disso, um terrômetro analógico foi utilizado para determinar a resistividade do solo em cinco pontos (R1-R5) no local onde as fundações estavam presentes (Figura 1). Em cada ponto foram realizadas duas medidas, variando a distância entre as estacas (5 e 10 metros). Os valores da resistividade do solo são apresentados na Figura 3. Os resultados de resistividade apresentados, com valores acima de 20000 $\Omega \cdot \text{cm}$, classificam o solo como essencialmente não agressivo para ambas as distâncias entre estacas (5 e 10 metros). Além disso, é possível observar que a distância entre as estacas não ocasionou grandes variações nos valores de resistividade obtidos para um mesmo ponto.

3.2 Análise das armaduras

3.2.1 Armaduras do bloco de fundação referência – não corroída)

Um rompedor de concreto foi utilizado para a extração das armaduras presentes no bloco de fundação, e uma esmerilhadeira foi utilizada para o corte das barras. Um conjunto de oito barras com diâmetro original de 5/8" (15,88 mm) foi obtido, conforme observado na Figura 4. Deve ser ressaltado que neste procedimento, a integridade das barras foi preservada, tomando-se cuidados para que a ponteira do equipamento não entrasse em contato com as barras, podendo gerar deformações, fissuras ou rupturas eventuais, danificando as amostras.

A alcalinidade do meio onde as barras estavam inseridas no interior do bloco de fundação foi verificada por meio da pulverização de uma solução de fenolftaleína sobre a superfície do concreto do bloco recém-fraturado, conforme recomendação por EN14630 [29]. Desse modo, a alcalinidade do meio foi verificada pela coloração rosa carmim, conforme observado na Figura 5. A cor rosa carmim do indicador significa que o concreto tem um pH acima de 10. Sendo assim, tendo em vista que as armaduras permaneceram protegidas pelo concreto frente à corrosão, fato constatado tanto visualmente,

Tabela 3

Composição química obtida no ensaio de espectrometria

| Face | Elemento | | | | |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | Carbono (%) | Silício (%) | Manganês (%) | Fósforo (%) | Enxofre (%) |
| 1 | 0,103 | 0,023 | 0,385 | 0,034 | 0,030 |
| 2 | 0,106 | 0,025 | 0,385 | 0,034 | 0,031 |

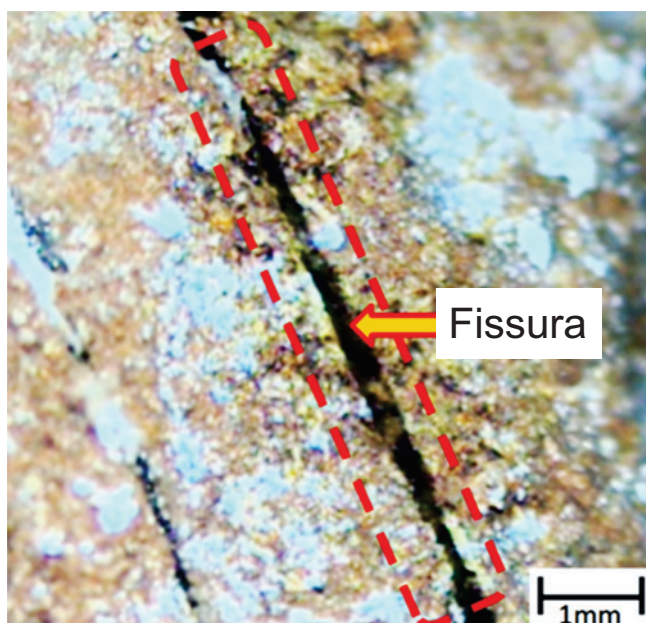
quanto através da pulverização da solução de fenolftaleína, os valores médios das propriedades mecânicas destes corpos de prova foram tomados como valores de referência para fins comparativos das propriedades mecânicas dos corpos de prova advindos das armaduras de espera. Ressalta-se ainda que as armaduras do bloco utilizadas como referência foram extraídas na parte inferior do bloco de fundação, portanto, protegidas da ação dos cloretos em comparação com as armaduras de espera e da parte superior do bloco.

As normas brasileiras NBR 6892 [30] e NBR 7480 [31] prescrevem que o comprimento mínimo onde o alongamento do corpo de prova é determinado deve ser 10 vezes seu diâmetro nominal. Desta forma, sendo o diâmetro das armaduras utilizadas neste estudo igual a 15,88 mm, a dimensão mínima dos corpos de prova utilizados neste estudo foi definida como 330 mm, sendo 160 mm destinado à medida dos alongamentos.

Assim, definidas as dimensões mínimas dos corpos de prova, os trechos mais retilíneos das armaduras obtidas do bloco de fundação foram demarcados e cortados. Seguindo esse procedimento, foram obtidos cinco corpos de prova (BL1-BL5). A escolha de corpos de prova a partir dos trechos mais retilíneos das armaduras se faz necessária a fim de evitar desvios ao longo do eixo axial dos mesmos, podendo influenciar no ensaio de tração.

Em paralelo, um ensaio de espectrometria de emissão óptica foi realizado para determinar as principais espécies químicas presentes nas barras. Um segmento de barra foi cortado e suas duas faces foram analisadas quanto ao percentual de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Os resultados de espectrometria são apresentados na Tabela 3. O teor de ferro observado em ambas as amostras foi de 99,3%.

Mills *et al.* [32] afirmam que para aços da época, com 0,10% de carbono em sua composição, o manganês deveria estar em uma faixa situada entre 0,30 a 0,40%. Clark [33] afirma que a proporção de silício encontrada nos aços, em geral, apresentava-se em uma faixa de 0,10 a 0,30% e que, além disso, a proporção de enxofre e fósforo deveria estar limitada a 0,015% e 0,05%, respectivamente. Entretanto, os resultados da Tabela 3 mostram que a quantidade de enxofre e silício não está em conformidade com os limites descritos na época, fornecendo um indicativo a respeito de um controle de qualidade deficiente na fabricação das barras. Neste contexto, Souza [34] ressalta que a presença do enxofre em excesso impacta negativamente sobre as propriedades mecânicas do aço, reduzindo sua ductilidade. O enxofre, ao se combinar com o ferro, forma sulfeto de ferro (FeS), que possui ponto de fusão menor em relação ao aço, além de se localizar no contorno dos grãos. Tal fato pode ocasionar a fragilidade do aço durante as etapas de conformação

**Figura 6**

Fissura observada na superfície de uma das armaduras do bloco de fundação

**Figura 7**

Exposição de algumas armaduras de espera após abertura da caixa de alvenaria

mecânica, resultando em fissuras. Esse comportamento foi observado nas barras estudadas neste artigo. A Figura 6 apresenta uma fissura identificada em um segmento de barra descartado, obtida a partir das armaduras do bloco de fundação.

3.2.2 Armaduras de espera (corroídas)

Com relação às armaduras de espera, barras com diâmetros nominais originais de 5/8" (15,88 mm) foram coletadas a partir das faces superiores dos blocos de fundação. Para tanto, uma esmerilhadeira foi utilizada para o corte e coleta das barras. Esse procedimento foi executado o mais próximo possível da face superior dos blocos, a fim de obter maiores comprimentos possíveis das barras. Cabe salientar que, na maioria dos casos, as armaduras de espera foram diretamente recobertas pelo solo do local; contudo, em alguns casos, caixas em alvenaria sem tampas ou fundos foram construídas para acondicionamento das armaduras de espera. Neste caso, as caixas de alvenaria foram construídas ao redor das armaduras e preenchidas com areia para acondicionamento das barras. A Figura 7 apresenta um detalhe com a exposição das armaduras após a abertura de uma dessas caixas.

As armaduras de espera originalmente foram dobradas antes de serem enterradas, apresentando desvios ao longo de seu comprimento. Com isso, foram selecionados os comprimentos retilíneos das barras para a extração de corpos de prova para o ensaio de tração, observando as prescrições da NBR 6892 [30] e da NBR 7480 [31] e dimensões mínimas adotadas, conforme descrito anteriormente. Tal medida visa assegurar que efeitos decorrentes de tortuosidades das barras não influenciem nos resultados do ensaio de tração.

Assim, as barras aptas à extração de corpos de prova foram demarcadas, cortadas e submetidas a um procedimento de decapagem química utilizando hexametilenotetramina, segundo a norma ASTM G1 [35]. Uma solução de ácido clorídrico (1:1) foi preparada, sendo adicionados 3,5 g de Hexametilenotetramina.

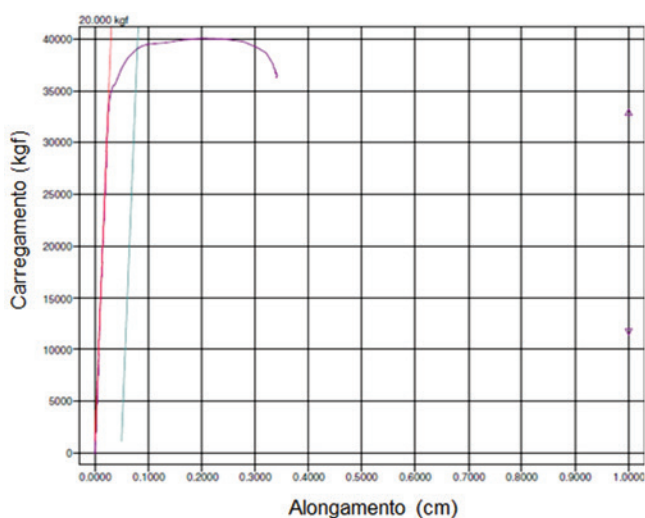


Figura 8
Diagrama carregamento *versus* alongamento – exemplo ilustrativo de um corpo de prova

Os corpos de prova provenientes das armaduras de espera foram imersos nesta solução por um período de 10 minutos (temperatura = 23°C) para a remoção de produtos de corrosão aderidos à superfície dos corpos de prova. Esses 10 minutos caracterizaram 1 ciclo. Dessa forma, a cada ciclo, os corpos de prova foram retirados da solução, lavados em água corrente, secos com um pano, e tiveram sua massa determinada. O processo de decapagem seguiu até que não fossem observadas variações superiores a 0,1 g de massa entre ciclos de decapagem consecutivos, o que ocorreu em aproximadamente 5 ciclos.

Em seguida, as extremidades dos corpos de prova foram analisadas, sendo descartados os corpos de prova que apresentavam deformações ou corrosão acentuada nos locais destinados à fixação dos mesmos nas garras do equipamento de tração. Tal medida visa garantir que a ruptura dos corpos de prova não ocorra nestes locais, prejudicando o ensaio de tração. Após esta triagem, vinte corpos de prova (PB1-PB20) foram obtidos. Uma inspeção visual sobre a superfície dos corpos de prova, além de micrografias, com utilização de um microscópio óptico com aumento de até 10x, foi realizada com o objetivo de identificar a existência de pites na superfície das armaduras de espera.

A determinação da menor seção transversal dos corpos de prova foi feita utilizando um micrômetro dotado de ponteiros cônicos com precisão de 0,004 mm. Neste procedimento, foram realizadas no mínimo 35 medidas ao longo do comprimento dos corpos de prova, sendo o menor valor medido correspondente ao menor diâmetro do corpo de prova analisado. Esta determinação visa o cálculo da velocidade de corrosão no solo das armaduras de espera, segundo a Equação 1 [36], sendo o número de anos que as barras permaneceram enterradas igual a 60 anos. As velocidades de corrosão no solo foram comparadas com os valores propostos pelo CEMCO [37], onde altos níveis de corrosão são observados quando a velocidade de corrosão é superior a 0,010 mm/ano.

$$v_{\text{corr}} = [(\phi_x/2)/n] \quad (1)$$

Onde: v_{corr} = velocidade de corrosão (mm/ano); ϕ_x = maior perda de seção medida na barra (mm); e n = número de anos que a barra permaneceu enterrada (anos).

Além da metodologia de determinação da velocidade de corrosão através dos menores diâmetros, o grau de corrosão (G) também foi determinado por meio da perda de massa, expresso segundo a diferença percentual entre a massa original (M_0) das armaduras, considerando o diâmetro original (15,88 mm) e a massa específica do aço (7,85 g/cm³), e a massa determinada após o procedimento de decapagem química (M_c) [11].

3.2.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração em uma máquina universal de 20.000 kgf de capacidade, conforme as prescrições da NBR 6892 [30], sendo os valores de tensão expressos segundo a área de seção transversal original dos corpos de prova. Os resultados da média dos valores obtidos quanto à resistência ao escoamento, limite de resistência e alongamento final dos corpos de prova BL1 a BL5 foram utilizados como parâmetros de referência para comparação com os resultados obtidos a partir

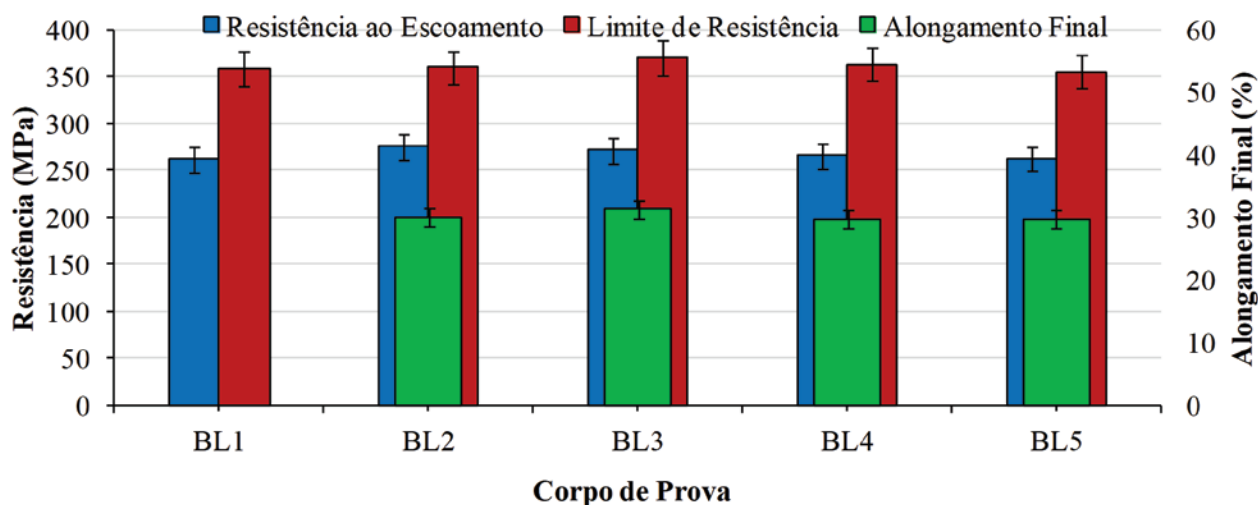


Figura 9

Resistência ao escoamento, limite de resistência e alongamento final dos corpos de prova BL1-BL5

dos corpos de prova PB1 a PB20. A Figura 8 apresenta um diagrama de carregamento *versus* alongamento de um corpo de prova típico utilizado neste estudo. Neste caso, como a determinação do patamar de escoamento não foi nítida graficamente, a resistência ao escoamento foi calculada considerando a deformação plástica de 0,2% [30]. O limite de resistência foi calculado segundo a máxima carga suportada pelo corpo de prova.

4. Resultados e discussões

4.1 Propriedades mecânicas das armaduras do bloco de fundação (BL1-BL5)

Os valores das propriedades mecânicas dos corpos de prova de referência BL1-BL5 são apresentados na Figura 9, sendo seus valores médios iguais a: 267 MPa (± 6 MPa), 361 MPa (± 6 MPa) e 30% ($\pm 0,7\%$), correspondentes à tensão de escoamento, limite de resistência e alongamento final, respectivamente. Estes valores serão utilizados como referência para fins comparativos com as armaduras corroídas neste artigo. Não foi possível determinar o alongamento do corpo de prova BL1 devido a um problema no extensômetro utilizado, sendo este substituído para a continuidade dos ensaios. É possível observar que os corpos de prova BL1-BL5 apresentaram valores próximos quanto às propriedades mecânicas medidas, com desvios padrão relativamente pequenos comparados com os valores absolutos.

4.2 Armaduras de espera

4.2.1 Velocidade de corrosão nos corpos de prova PB1-PB20

As velocidades de corrosão dos corpos de prova PB1 a PB20, calculadas a partir dos menores diâmetros (Eq. 1), são apresentadas na Figura 10, sendo que os pontos acima da linha reta do gráfico apresentam altas velocidades de corrosão, segundo a metodologia proposta por CEMCO [37].

Em primeiro lugar, é possível observar na Figura 10 que todos

os corpos de prova apresentaram altas velocidades de corrosão, segundo o critério descrito pelo CEMCO [37]. Alguns corpos de prova apresentaram valores destoantes do comportamento médio, como por exemplo, as barras PB 16 e PB 20. Neste caso, as armaduras de espera de onde foram tomados estes corpos de prova permaneceram enclausuradas em caixas de alvenaria, construídas para acomodá-las. Dessa forma, uma parcela das barras permaneceu em contato com a areia da caixa e outra parcela em contato com a argila do solo local. Tal fato provocou o surgimento de pilhas de aeração diferencial, o que favorece o processo de corrosão, e, conseqüentemente, contribui para elevar as velocidades de corrosão. Esse comportamento está em concordância com a literatura [38].

A análise conjunta das Figuras 3 e 10 resulta em uma observação interessante. Embora o solo do local tenha sido classificado como essencialmente não corrosivo (Figura 3), altas velocidades de corrosão foram obtidas (Figura 10), demonstrando que expressar a corrosividade do solo somente pelo critério da medida

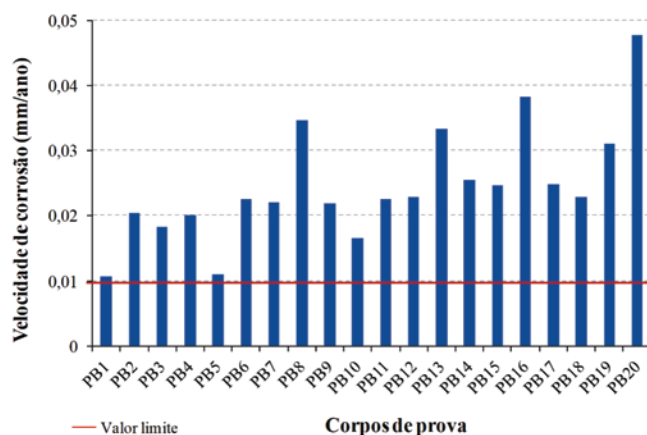


Figura 10

Velocidade de corrosão dos corpos de prova PB1-PB20



Figura 11
 (a) Imagem de pite obtida por inspeção visual; (b) Micrografias mostrando a presença de pites em determinada região de um corpo de prova. Aumento de 10x

de sua resistividade pode não representar adequadamente sua agressividade para com as armaduras enterradas. Dessa forma, outros fatores devem também ser levados em consideração para melhor descrever a agressividade do solo, como a aeração, a umidade, o pH, a presença de atividade de microrganismos, entre outros. Embora todos os valores conduzam a altas velocidades de corrosão, os resultados apresentados na Figura 10 pelas armaduras corroídas foram bastante diversificados. A velocidade de corrosão média obtida foi de 0,0246 mm/ano, porém com um desvio padrão de 0,0089 mm/ano, o que representa um coeficiente de variação de 36%. Isso é um reflexo das características de heterogeneidade do próprio solo, conforme também discutido por Norhazilan *et al.* [20].

4.2.2 Análise da presença de pites nos corpos de prova PB1-PB20

A Figura 11(a) apresenta a imagem de um pite com profundidade de 4 mm obtido por meio da análise visual em um corpo de prova, ao passo que a Figura 11(b) apresenta uma micrografia obtida de um dos corpos de prova provenientes das armaduras de espera, onde é possível observar a presença de pites, por meio de pontos escuros indicados na imagem. Os pites foram verificados em todos os corpos de prova das armaduras de espera. Não foram identificados pites nos corpos de prova da região inferior do bloco de fundação (BL1-BL5, referência).

As armaduras de espera foram coletadas próximo às edificações

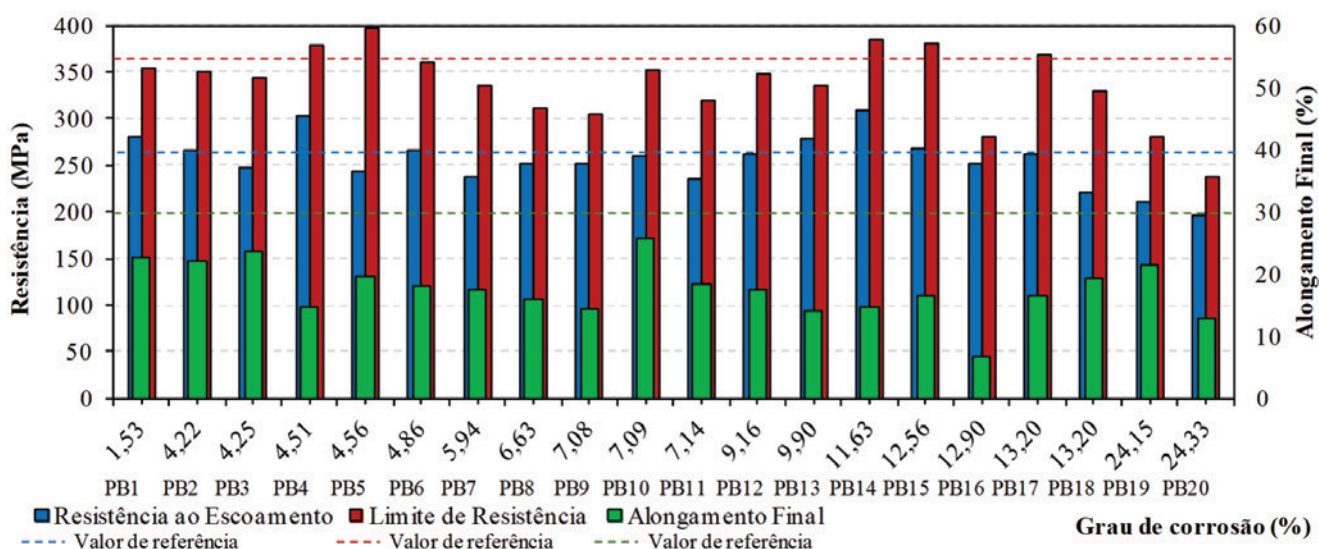


Figura 12
 Relação entre a perda de massa com a resistência ao escoamento, o limite de resistência e o alongamento final dos corpos de prova PB1-PB20

já existentes do ITA desde a década de 50. Desta forma, foi verificado no local que a ausência de sistemas de drenagem de águas superficiais, aliada ao uso de produtos de limpeza a base de cloro para manutenção e limpeza destas edificações existentes, denotou uma fonte externa de cloretos no solo que contribuiu para o surgimento de pites nas armaduras de espera. Esta afirmativa é suportada pelas análises realizadas para verificar a presença de cloretos a partir de amostras em pó retiradas da região superior do bloco de fundação, conforme apresentado na Figura 2.

4.2.3 Propriedades mecânicas, perdas de massa e menores diâmetros dos corpos de prova PB1-PB20

As Figuras 12 e 13 apresentam a relação entre as propriedades mecânicas com a perda de massa e com os menores diâmetros dos corpos de prova PB1-PB20, respectivamente.

De acordo com as Figuras 12 e 13, 25% dos corpos de prova (PB1, PB4, PB13, PB14 e PB15) apresentaram resistência ao escoamento superior ao valor médio dos corpos de prova de referência BL1-BL5 (em tracejado). O mesmo percentual foi observado quanto ao limite de resistência, contudo, não necessariamente as mesmas barras (PB4, PB5, PB14, PB15 e PB17). Deve-se salientar ainda que todos os corpos de prova PB1-PB20 romperam logo após atingir seu limite de resistência, não apresentando sinais de estrição. Este comportamento apresenta-se em consonância com estudos disponíveis na literatura [6, 10]. Neste aspecto, a presença de pites eleva a concentração de tensão nas seções das armaduras. Desta forma, a tensão gerada em uma dada seção corroída por pites aumenta expressivamente à medida que há um incremento de carregamento durante o ensaio, atingindo de forma rápida seu limite de resistência, não sendo observados sinais de estrição. Além disso, sob uma perspectiva química, a elevada concentração de enxofre constatada nas barras contribuiu para o decréscimo na ductilidade,

uma vez que o sulfeto de ferro leva a uma fragilidade do aço.

Uma tendência de decréscimo da resistência ao escoamento e limite de resistência é observada na Figura 12 a partir de uma perda de massa da ordem de 12%, em concordância com o estudo de Almusallan [12]. Para valores mais baixos ao citado, uma tendência progressiva de redução da resistência não é observada, onde mesmo corpos de prova com perda de massa da ordem de 5% apresentaram valores de resistências inferiores a corpos de prova com o dobro de perda de massa. Isso é claramente observado ao comparar as barras PB4 e PB14, por exemplo. A justificativa para tal ocorrência está relacionada aos efeitos da corrosão por pites à seção transversal das armaduras. Isso significa que, para o caso de corrosão por pites, expressar o grau de corrosão por meio da variação gravimétrica das barras pode não ser suficiente para representar as variações nas resistências, pelo menos até um valor de grau de corrosão de 12%. Na Figura 13 é possível notar um comportamento irregular entre o menor diâmetro com a resistência ao escoamento e o limite de resistência. Contudo, é possível observar uma tendência de decréscimo da resistência com a diminuição do diâmetro para valores inferiores a 12 mm, representando uma perda de seção transversal superior à 20% em relação à seção transversal original. Isso significa que para perdas de seção transversal superiores a 20%, há uma tendência de redução progressiva das resistências (escoamento e última) das armaduras.

Neste sentido, o dano produzido por pites às seções transversais das armaduras promove variações na posição do eixo das barras ao longo de seu comprimento, gerando excentricidades entre a posição de eixo de seções sucessivas das barras, produzindo gradientes de esforços entre estas seções quando são submetidas à tração, conforme também encontrado em Zhu and François [19]. Desta forma, os efeitos da corrosão por pites podem se manifestar não apenas pela perda de seção transversal das armaduras, mas também na mudança geométrica do eixo de suas

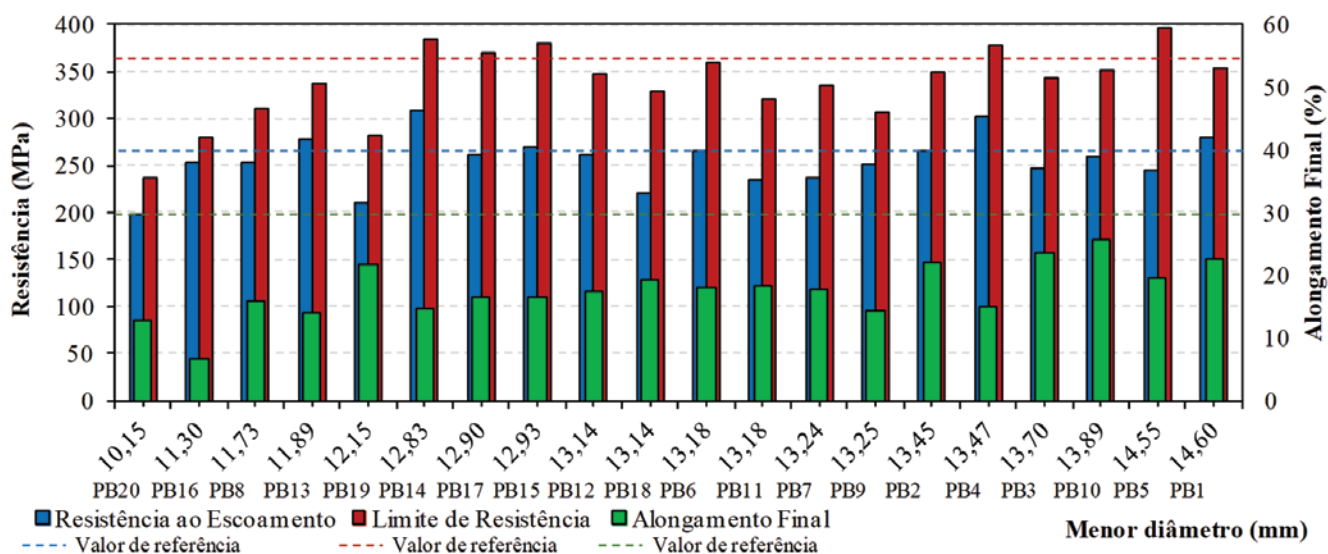


Figura 13

Relação entre o menor diâmetro com a resistência ao escoamento, o limite de resistência e o alongamento final dos corpos de prova PB1-PB20

seções transversais ao longo de seu comprimento, contribuindo para um comportamento irregular e dificultando o enquadramento de uma tendência de decréscimo destas propriedades mecânicas para valores de perda de seção inferiores a 20%.

As Figuras 12 e 13 também revelam que o alongamento final tem um comportamento irregular em ambos os casos (perda de massa e menores diâmetros), dificultando expressar uma tendência de comportamento. Entretanto, pode-se afirmar que os efeitos da corrosão são mais evidentes na redução do alongamento final das barras quando comparados com os valores de referência (linhas tracejadas), concordando com estudos da literatura [8,10]. Neste sentido, todos os corpos de prova, mesmo apresentando pequena perda de massa, demonstraram valores inferiores ao alongamento médio das barras de referência (BL1-BL5). Isto demonstra que os efeitos da corrosão se mostrou mais pronunciável sobre a ductilidade das armaduras.

A Figura 14 apresenta a relação entre a perda de massa e os menores diâmetros dos corpos de prova PB1-PB20. A Figura 14 mostra uma tendência de decréscimo dos diâmetros à medida que a perda de massa aumenta. Além disso, também é possível observar a presença de duas zonas distintas. É interessante perceber que a zona 2 indica a ocorrência de corpos de prova com maior diâmetro e maior perda de massa. Tal fato está associado à corrosão por pites, conforme verificado na Figura 11. Sob esta vertente, os pites têm como característica poder gerar reduções na seção transversal à medida que vão aprofundando-se, porém sem apreciável perda de massa.

5. Conclusões

Neste artigo, uma análise a respeito da influência do grau de corrosão pela perda de massa e pelos menores diâmetros sobre as propriedades mecânicas de armaduras naturalmente corroídas no solo foi realizada. Dessa forma, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- A presença de cloretos no meio onde as armaduras permaneceram enterradas por 60 anos foi constatada, sendo sua

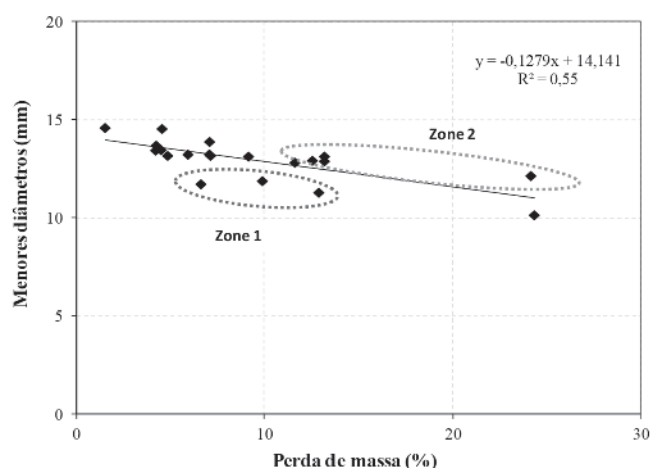


Figura 14

Relação entre os menores diâmetros e a perda de massa dos corpos de prova PB1-PB20

origem dada a partir de uma fonte externa. Tal fato justifica o aparecimento de pites com profundidade de até 4 mm nas armaduras de espera, impactando de forma notória nas propriedades mecânicas das armaduras. Além disso, a caracterização da agressividade do solo unicamente através da medida de sua resistividade se mostrou ineficaz.

- Os efeitos da corrosão por pites mostraram que as análises realizadas a partir do grau de corrosão e dos menores diâmetros não apresentaram uma tendência de decréscimo progressivo das propriedades mecânicas das armaduras, demonstrando que estes parâmetros não são os mais adequados para analisar as propriedades mecânicas de armaduras corroídas submetidas à tração, uma vez que as excentricidades de seção geradas por pites não são expressas pelos parâmetros supracitados. Assim, concomitantemente a este fato, os gradientes de tensão que surgem entre estas seções sucessivas, que contribuem para o decréscimo das propriedades mecânicas das armaduras corroídas, não são expressos pelo grau de corrosão e pelos menores diâmetros, justificando a irregularidade de comportamento observada.
- Os efeitos da corrosão são mais pronunciáveis no que tange a redução da ductilidade das barras, tendo em vista que nenhum corpo de prova corroído alcançou o valor de alongamento final de referência; além disso, não foram observadas estricções das barras com grau de corrosão superior a 12%. Isto demonstra que elementos estruturais com armaduras cujo grau de corrosão seja superior a 12% podem apresentar colapsos repentinos.
- Duas zonas distintas foram identificadas, representando que mesmo corpos de prova com maior perda de massa, não necessariamente apresentaram menores diâmetros. Esse comportamento é característico da corrosão por pites, pois reduções na seção transversal podem ser identificadas à medida que os pites se aprofundam, porém, sem necessariamente apreciável perda de massa.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

7. Referências bibliográficas

- [1] PAPE, T. M.; MELCHERS, R. E. Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams. *Structures and Buildings*, v.166, n.SB10, 2012, p. 547-559.
- [2] REHMAN, S.; AL-HADHRAMI, L. M. Web-based national corrosion cost inventory system for Saudi Arabia. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, v.61, n.2, 2013, p. 77-92.
- [3] SURNAM, B. Y. R. Prevention and cost of atmospheric corrosion in Mauritius. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, v.60, n.2, 2013, p. 77-83.
- [4] MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; BRITO, P. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions. *Ocean Engineering*, v.103, 2015, p.78-87.

- [5] PALSSOM, R.; MIRZA, M. S. Mechanical Response of Corroded Steel Reinforcement of Abandoned Concrete Bridge. *ACI Structural Journal*, v.99, n.2, 2002, p. 157-162.
- [6] APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, v.22, 2007, p. 2316-2324.
- [7] AZAD, A. K.; AHMAD, S.; AZHER, S. A. Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams- *ACI Materials Journal*, v. 104, n.1, 2007, p. 40-47.
- [8] FRANÇOIS, R.; KHAN, I.; DANG, V. H. Impact of corrosion on mechanical properties of steel embedded in 27-year-old corroded reinforced concrete beams. *Material and Structures*, v.46, 2013, p. 889-910.
- [9] MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência   compress o e da resistividade el trica de concretos com diferentes tipos de cimento, *Revista ALCONPAT*, v.4, 2014, p.116-132.
- [10] APOSTOLOPOULOS, C. A.; DEMIS, S.; PAPADAKIS, V. G. Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth analysis. *Construction and Building Materials*, v. 38, 2013, p. 139-146.
- [11] BALESTRA, C. E. T.; LIMA, M. G.; SILVA, A. R.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of naturally corroded reinforcement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, 2016, p. 04016103.
- [12] ALMUSALLAN, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing. *Construction and Building Materials*, v.15, 2001, p. 361-368.
- [13] APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADOPOULOS, M. P.; PANTELAKIS, Sp. G. Tensile Behavior of Corroded Reinforcing Steel Bars BSt 500s. *Construction and Building Materials*, v.20, 2005, p. 782-789.
- [14] APOSTOLOPOULOS, C. A.; MICHALOPOULOS, D.; KOUTSOUKOS, P. The corrosion effects on the structural integrity of reinforcing steel. *Journal of Materials and Engineering and Performance*, v.17, n. 4, 2008, p. 506-516.
- [15] ZHANG, W. P.; DAI, H. C.; GU, X. L.; WU, S. N. Effect of Corrosion Pits on Mechanical Properties of Corroded Steel Bars. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, construction and Operations in Challenging Environments*, 2010, p. 3504-3511.
- [16] ZHANG, W.; SONG, X.; GU, X.; LI, S. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars. *Construction and Building Materials*, v.34, 2012, p. 409-417.
- [17] PAPADOPOULOS, M. P.; APOSTOLOPOULOS, C. A.; ZERVAKI, A. D.; HAIDEMENOPOULOS, G.N. Corrosion of exposed rebars associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion test. *Construction and Building Materials*, v. 23, n.8, 2011, p. 3367-3374.
- [18] APOSTOLOPOULOS, C. A. The influence of corrosion and cross-section diameter on the mechanical properties of B500c steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.18, n.2, 2009, p. 190-195.
- [19] ZHU, W.; FRANÇOIS, R. Experimental investigation of the relationship between residual cross-section shapes and the ductility of corroded bars. *Construction and Building Materials*, v.69, 2014, p. 335-345.
- [20] NORHAZILAN, N. M.; NORDIN, Y.; LIM, K. S.; SITI, R. O.; SAFUAN, A. R. A.; NORHAMIMI, M. H. Relationship between soil properties and corrosion of carbon steel. *Journal of Applied Science Research*, v.8, n.3, 2012, p. 1739-1747.
- [21] REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. *Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Fourth Edition, 2008.
- [22] LOUREIRO, A.; BRASIL, S.; YOKOYAMA, L. Estudo da Corrosividade de Solo Contaminado por Substâncias Químicas Através de Ensaio de Perda de Massa e  ndice de Steinrath. *Corrosão e Protec o de Materiais*, v.26, n.4, 2007, p. 113-121 (in Portuguese).
- [23] ISMAIL A. I. M.; EL-SHAMY, A. M. Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel. *Applied clay science*, v. 42, 2009, p. 356-362.
- [24] SILVA, J. M.; BRASIL, S. L. Critérios de avalia o da corrosividade de solos baseado na sobretensão de hidr g nio. *Corrosão e Protec o de Materiais*, v.29, n.1, 2010, p. 19-25 (in Portuguese).
- [25] PRITCHARD, O.; HALLETT, S. H.; FAREWELL, T. S. *Soil Corrosivity in the UK – Impacts on Critical Infrastructure*. ITRC – Infrastructure Transition Research Consortium, Cranfield University, 2013.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G57-06: Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method. Pennsylvania, 2012.
- [27] NACE INTERNATIONAL – Soil Corrosion. Available in: <http://www.nace.org/StarterApps/Wiki/Wiki.aspx?wiki=141>; Accessed in jan. 29, 2017.
- [28] REUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES ET EXPERTS DES MATERIAUX, SYSTEMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES. RILEM TC 178-TCM: Testing and Modelling Chloride Penetration in Concrete. Madrid, 2002.
- [29] EUROPEAN STANDARDS. EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Committee B/517/8, Brussels, 2006.
- [30] ASSOCIA O BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892: Materiais Met licos – Ensaio de Traço   Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro, 2002.
- [31] ASSOCIA O BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: A o destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especifica o. Rio de Janeiro, 2007.
- [32] MILLS, A. P.; HAYWARD, H. W.; RADER, L. F. *Materials of Construction – Their Manufacture and Properties*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1939.
- [33] CLARK, D. A. R. *Engineering Materials - Materials and Structures*. Middlesbrough, Blackie & Son Limited, 1949.
- [34] SOUZA, S. A. *Composi o Química dos A os*, 1  Edi o, São Paulo, Edgard Bluncher, 1989.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test. Pennsylvania, 2003.
- [36] ULLER, L. & TROC NIS, O. *Manual de Inspeccion Evalu-*

ation Y Diagnostico de Corrosion em Estruturas de Hormigon Armado. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - Rio de Janeiro: CYTED, 1997.

- [37] CEMCO. Durabilidad del Hormigón y Evaluation de Estructuras Corroídas. Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, 2001.
- [38] BERTOLINI, L. Materiais de construção: Patologia, reabilitação e prevenção. Oficina de Textos. Rio de Janeiro, 2010