

## Definição e preparação de corpos de prova de concreto armado destinados a ensaios acelerados de corrosão de armaduras

*Definiton and preparation of test specimens intended for accelerated corrosion tests of bars for concrete reinforcement*

Adriana Araujo<sup>a\*</sup>, José Luis Serra Ribeiro<sup>b</sup>, Juliana Lopes Cardoso<sup>c</sup>, Mayara Stecanella Pacheco<sup>c</sup>, Carlos Alberto da Silva<sup>c</sup>, Cesar Henrique Rufino<sup>c</sup>, Marcos Vinício da Silva Braga<sup>c</sup>, Renata Angelon Brunelli<sup>c</sup>, Thales Gomes Rosa<sup>c</sup>, Zehbour Panossian<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Programa Novos Talentos, IPT, São Paulo-SP, Brasil.

<sup>c</sup> Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: aaraujo@ipt.br

Palavras-chave:

corrosão; armadura; concreto armado; corpo de prova; revestimento; aço inoxidável lean duplex; aço inoxidável lean duplex, aço inoxidável UNS 32604; aço inoxidável AISI 304, proteção catódica.

*Keywords:*

*corrosion; reinforcement; reinforcement concrete; specimen; coating; lean duplex stainless steel, UNS 32604; AISI 304, cathodic protection.*

### Resumo

A corrosão das barras de aço-carbono do concreto armado é considerada um dos maiores problemas na durabilidade das construções civis em ambientes marinhos. Por essa razão, muitos estudos são desenvolvidos objetivando o entendimento dos mecanismos envolvidos na corrosão das armaduras e a procura de métodos de mitigação desta corrosão nos referidos ambientes. Para o sucesso desses estudos, é de suma importância a definição e a preparação de corpos de prova, a serem utilizados em ensaios acelerados de corrosão, que representem as condições de instalação das estruturas armadas e da corrosividade do ambiente que se deseja explorar. Este trabalho teve como objetivo a definição e a preparação de corpos de prova de concreto armado para serem utilizados em um estudo que busca alternativas às barras de aço-carbono comum e aplicação de técnicas de proteção contra corrosão para estruturas de concreto instaladas em ambiente marinho tropical, típica da costa brasileira. Isso foi feito utilizando como referência as normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007. Ensaios preliminares foram realizados para avaliar alguns dos parâmetros propostos pelas referidas normas. Considerou-se que a realização desses ensaios foi importante para adequar as metodologias recomendadas pelas normas para os objetivos pretendidos. Os ensaios preliminares permitiram ainda planejar a logística e prever o tempo para a preparação dos 300 corpos de prova considerados necessários para o desenvolvimento do estudo pretendido. Esse elevado número foi necessário, pois foram incluídas no estudo as seguintes barras alternativas: aço-carbono revestido (zincado e zincado com revestimento epóxi), aço inoxidável AISI 304 e aço inoxidável UNS 32604 (lean duplex). Os aços revestidos

foram incluídos por serem amplamente utilizados em estruturas instaladas em ambientes sujeitos à contaminação com íons cloreto, como os ambientes marinhos, e os aços inoxidáveis por serem utilizados em obras, também nesses ambientes, mas que requerem vida útil muito longa ou há restrições de manutenção. Também para extensão da vida útil das barras de aço-carbono comuns, foram incluídos corpos de prova para a avaliação da eficiência de proteção catódica. Finalmente, corpos de prova com barras de aço-carbono comuns sem nenhuma proteção foram incluídos como referência.

## Abstract

*Carbon-steel-bar corrosion of reinforced concrete is considered one of the biggest problems in civil construction durability in marine environments. Thus, many studies are developed aiming at understanding bar corrosion mechanisms and at finding corrosion mitigation methods for concrete structures installed in the mentioned environments. To achieve the success in these studies, the definition and preparation of test specimens for the accelerated corrosion tests, which should represent the installed conditions and the environment corrosivity of the studied reinforced concrete, are very important. This work aimed at the definition and the preparation of reinforced concrete specimens which will be used to help find alternatives for carbon steel bars and also to use for protection-technique-efficiency evaluations of concrete structures installed in tropical marine environments, typical of Brazilian coasts. The specimens were defined based on the ASTM A955: 2015 and ASTM G109: 2007. Preliminary tests were taken to assess some of the parameters proposed by these standards. These tests were important for adapting the recommended methodologies to the proposed goals. The preliminary tests also allowed for planning the logistic and predicting the necessary time for preparing the 300 specimens necessary for the intended studies. This large number was necessary because the study included the following alternative bars: coated carbon steel (zinc coated and zinc plus epoxy dual-coated) and AISI 304 and UNS 32604 (lean duplex) stainless steels. The coated steel bars were considered in the studies because they are widely used in reinforced structures installed in chloride-contaminated environments, as marine environments. The stainless steels were also considered since they are typically used when a very long useful life is required or when there are restrictions for the structure maintenance. Test specimens were included to evaluate the efficiency of cathodic protection of carbon steel bars. Finally, protection-system-free carbon steel bars were included as a reference.*

## 1 Introdução

O aço-carbono, quando embutido no concreto íntegro, fica protegido contra corrosão, física e eletroquimicamente. A proteção física é conferida pelo concreto de cobrimento e a proteção eletroquímica pela formação de uma camada protetora de óxidos/hidróxidos (passivação) formados na superfície do aço em contato com o concreto alcalino. Porém, a contaminação do concreto pode provocar a quebra da camada passiva, que ocorre tanto pela diminuição do pH causada pela carbonatação do concreto, quanto por sua contaminação com íons cloreto. Em ambiente marinho, o principal agente da quebra da camada passiva é a contaminação por cloretos que, quando atinge uma concentração superior a um nível crítico no concreto, desestabiliza localmente a camada passiva das armaduras e desencadeia um processo de corrosão (WANG et al., 2010; NEVILLE, 2008).

A corrosão das armaduras por contaminação com cloretos é considerada um dos maiores problemas na durabilidade das construções civis em ambientes agressivos, como os marinhos. No exterior, a mitigação dessa corrosão ou a garantia de uma vida útil elevada das estruturas de concreto instaladas nesses ambientes é feita, além da adequada especificação do concreto e da espessura de cobertura, pela adoção de materiais alternativos às barras de aço-carbono e/ou pelo emprego de técnicas de proteção das armaduras. Dentre os materiais alternativos, é comum o revestimento das barras de aço-carbono, como o de zinco e o duplex (zinco + epóxi), ou o emprego de armaduras de aços inoxidáveis.

O revestimento de zinco e o duplex atuam como barreira física e oferecem proteção por sacrifício ao aço exposto em falhas e apresentam a vantagem de custo/benefício. As armaduras de aços inoxidáveis são as preferidas quando a vida útil requerida é alta (superior a 100 anos) ou há restrições de manutenção tais como, inacessibilidade da estrutura, custos elevados e transtornos à população (ANACO STAINLESS, 2016; ARAUJO; MOREIRA; PANOSSIAN, 2014; MAGEE; SCHNELL, 2002; MCGURN, 2016). Já a técnica de proteção catódica das barras por corrente impressa é adotada no exterior, em obras novas, como uma medida preventiva contra a corrosão e, também, em estruturas que já apresentam processo de corrosão como medida mitigadora (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2012; WANG et al., 2010; PEDEFERRI, 1996).

No Brasil, o controle da corrosão é feito essencialmente pela adequada especificação do concreto e da espessura de cobertura. Recentemente, o revestimento de zinco começou a ser utilizado no país, sendo isto possível por haver infraestrutura instalada para a produção de armaduras zincadas. Já o revestimento duplex e as armaduras de aço inoxidável não são encontrados no mercado brasileiro (ARAUJO; SILVA SOBRINHO; PANOSSIAN, 2015).

Diante desse cenário, a Petrobras solicitou um estudo para verificar a viabilidade técnica e econômica da adoção de alternativas para estender a vida útil de suas estruturas instaladas na orla brasileira. Antes de iniciar esse estudo, foi feita uma ampla pesquisa bibliográfica para verificar o estado da arte dessas alternativas (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2016). Nessa revisão, atenção especial foi dada para os tipos de corpos de prova utilizados na avaliação do desempenho de armaduras metálicas e da qualidade de concreto. Verificou-se que os trabalhos de maior relevância utilizavam corpos de prova confeccionados tendo como base as normas da ASTM, especificamente, a ASTM A955 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015) e ASTM G109 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007 - reprovada em 2013). Esses corpos de prova são destinados a ensaios acelerados de corrosão em concreto (ensaios de desempenho acelerado). A primeira avalia o desempenho de aços inoxidáveis em concreto e a segunda avalia a influência de aditivos na corrosividade do concreto ao aço-carbono. Essas normas foram utilizadas para definição da metodologia de avaliação para alcançar os objetivos do referido estudo.

O presente artigo apresenta a definição e a preparação de corpos de prova utilizando como base as normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007, juntamente com a realização de ensaios preliminares para avaliar os parâmetros propostos pelas normas e adequar as metodologias propostas para o

estudo pretendido. Inicialmente, é apresentada uma análise dessas duas normas, visando destacar as indicações de cada uma a respeito da preparação dos corpos de prova. Em seguida, são apresentadas as especificações dos materiais utilizados e os ensaios preliminares que auxiliaram na definição dos detalhes da execução dos corpos de prova e montagem de ensaios.

## 2 Análise das normas ASTM quanto aos ensaios de desempenho relacionados à corrosão da armadura no concreto armado

As normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 adotam uma metodologia que tem por princípio simular uma macrocélula de corrosão em barras embutidas em concreto recém-executado e expostas aos íons cloreto.

As normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 adotam uma metodologia que tem por princípio simular uma macrocélula de corrosão em barras embutidas em concreto recém-executado e expostas aos íons cloreto.

O conceito de macrocélula fundamenta-se no mecanismo eletroquímico da corrosão de um metal que envolve a formação de células de corrosão constituídas por um anodo, onde ocorre preferencialmente a reação de oxidação ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ), e por um catodo, onde ocorre preferencialmente a reação de redução do oxigênio dissolvido na água de poro ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ), conforme ilustrado na **Figura 1a**. Uma corrente elétrica circula entre o anodo e o catodo, sendo esta composta por uma corrente eletrônica no metal, por uma corrente de transferência de cargas no anodo, por uma corrente iônica na água de poro e por uma corrente de transferência de cargas no catodo. Quando o anodo está fisicamente separado do catodo em distância macroscópica visível à vista desarmada, com dimensões em milímetros ou centímetros, como no caso dos corpos de prova a serem descritos, as células de corrosão são chamadas de macrocélulas de corrosão (ANDRADE; GARCÉS; MARTÍNEZ, 2008).

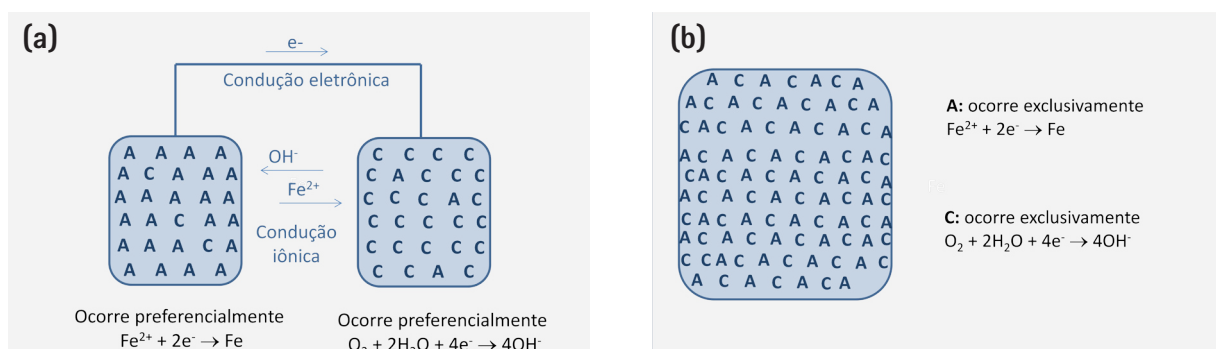


Figura 1 – Representação de uma macrocélula (a) e microcélula de corrosão (b).

É importante mencionar ainda que, quando as áreas catódicas e anódicas são imediatamente adjacentes, em distâncias microscópicas (da ordem de micrometros), essas são denominadas de microcélulas de corrosão (ANDRADE; GARCÉS; MARTÍNEZ, 2008). No anodo, ocorre puramente a reação anódica e, no catodo, puramente a reação catódica, podendo essas se alternar com o avanço da corrosão. A corrosão ocorre de maneira generalizada, estando os anodos e os catodos distribuídos aleatoriamente de maneira dinâmica.

Os corpos de provas indicados pelas normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007 são blocos prismáticos de dimensões 300 mm x 180 mm x 150 mm e 280 mm x 150 mm x 115 mm, respectivamente, com uma barra inserida na parte superior do bloco e duas barras curto-circuitadas e inseridas na parte inferior, ambas paralelas à primeira (ver **Figura 2**). A barra superior é conectada às duas inferiores por meio de um resistor ( $10 \Omega$  na norma ASTM A955: 2015 e  $100 \Omega$  na ASTM G109: 2007). A macrocélula é formada entre a barra superior, que funciona como anodo, e as duas barras inferiores, que funcionam como catodo.

Conforme mostra a **Figura 2**, a concepção dos corpos de prova permite o armazenamento de uma solução de NaCl na face superior cujo objetivo é desencadear a corrosão na barra superior (anodo da macrocélula). Na ASTM A955: 2015, esse armazenamento é feito em um rebaixo, produzido durante a moldagem. Já na norma ASTM G109: 2007, isso é feito em um recipiente retangular fixado na face superior do corpo de prova. Em ambas as normas, a exposição do concreto à solução salina é feita de maneira intermitente com o objetivo de simular, de forma acelerada, a condição à qual as estruturas aéreas estão expostas em ambiente marinho (zona de respingos, zona de variação de maré e outras zonas aéreas expostas à névoa salina).

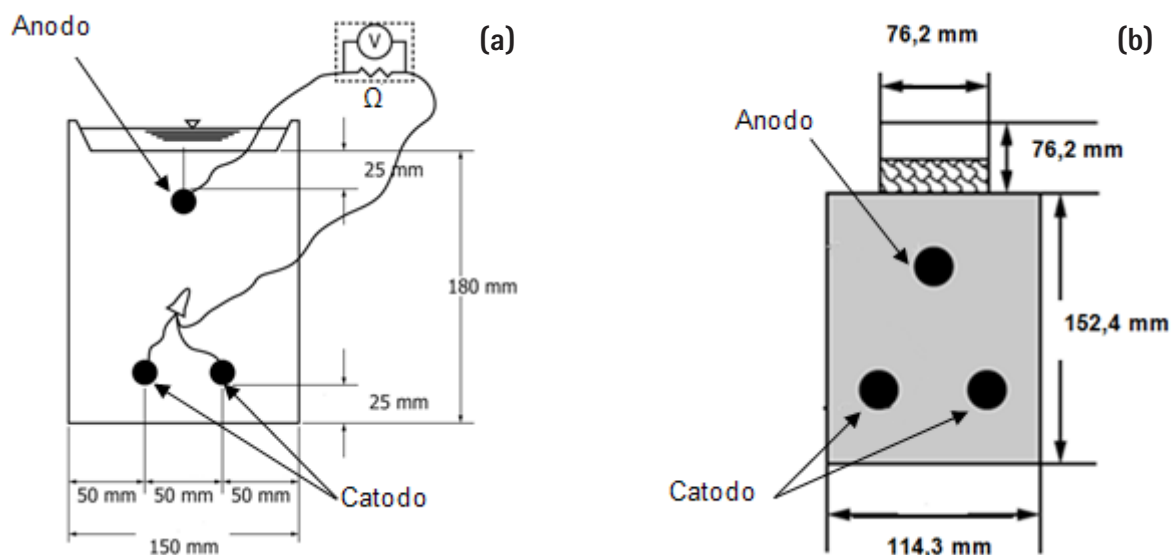


Figura 2 - Corpo de prova sugerido pelas normas ASTM A955: 2015 (a) ASTM G109: 2007 (b).

A superfície do concreto exposto e a concentração da solução salina são diferentes em cada norma. Por tratar de aços inoxidáveis que são matérias de alta resistência à corrosão, a ASTM A955: 2015 adota condições mais agressivas: solução a 15 % de cloreto de sódio e uma fissura no concreto de cobrimento, alinhada com a barra superior para diminuir o tempo para início da corrosão. Essa fissura é obtida pela inserção, na fôrma dos corpos de provas, de uma lâmina de aço inoxidável. Após o período inicial de pega do concreto, essa lâmina é removida, gerando uma fissura artificial com 0,3 mm de abertura, 150 mm de comprimento e 25 mm de profundidade. Essa norma recomenda que a lâmina seja retirada entre 8 h e 24 h após a concretagem. Na norma ASTM G109: 2007, a solução recomendada é de 3 % de NaCl e o concreto de cobrimento permanece íntegro (sem fissura) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007; 2015).

Essas normas recomendam ainda que, durante todo o ensaio, o corpo de prova fique apoiado em suportes de modo que a superfície inferior não pintada fique em contato direto com o ar atmosférico. A configuração descrita tem por objetivo o acesso facilitado de oxigênio apenas nas armaduras inferiores, permitindo a ocorrência preferencial da reação catódica da macrocélula.

A cura do concreto e o preparo dos corpos de prova são feitas também de forma distinta. A ASTM A 955: 2015 recomenda o acondicionamento dos corpos de prova por 48 h em sacos de material polimérico contendo água destilada, seguida de cura ao ar por 25 dias. Alguns dias antes do início dos ensaios de desempenho, a norma recomenda o lixamento da superfície superior dos corpos de prova e a pintura das superfícies laterais do bloco de concreto. Já a ASTM G109: 2007 recomenda 28 dias de cura em câmara úmida seguida de 14 dias em atmosfera com umidade relativa de 50 % para secagem concreto seguida da pintura das superfícies laterais do bloco. Finalmente, é feita a fixação do recipiente com silicone e pintura da superfície restante da face superior.

Em relação as barras metálicas, a norma ASTM G109: 2007 indica, ainda, a proteção das extremidades com fita isolante, similar à utilizada em processos de eletrodeposição, seguida de inserção de um tubo de neoprene e finalmente aplicação, sobre o tubo, de tinta epóxi. A norma ASTM A955: 2015, por outro lado, não cita a necessidade de revestimento das extremidades das barras.

Em ambas as normas, é recomendada a medição da intensidade da corrente da macrocélula de corrosão formada entre a barra superior e as duas barras inferiores determinada por meio da diferença de potencial medida entre as extremidades do resistor, conforme ilustrado na **Figura 2a**.

A norma ASTM G109: 2007 recomenda a medição mensal do potencial de circuito aberto em cada uma das barras dos corpos de prova, com o auxílio de um eletrodo de referência, após a desconexão do resistor.

### 3 Definição das características dos corpos de prova para as barras alternativas às de aço-carbono

Devido às particularidades do estudo a ser desenvolvido, optou-se por adotar o mesmo princípio de macrocélula das normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007, porém definir características do corpo de prova adequadas para contemplar toda a variedade de barras usadas, as quais estão descritas a seguir.

#### 3.1 Configuração do corpo de prova

Para a avaliação do desempenho das diferentes barras e da técnica de proteção catódica por corrente impressa, definiu-se como corpo de prova padrão, um bloco prismático de concreto com dimensões de 400 mm x 150 mm x 150 mm. Três barras, com comprimento de 500 mm cada, foram embutidas no bloco, uma na parte superior e duas na parte inferior, com disposição triangular, descrita em ambas as normas discutidas (**Figura 3**). A espessura de cobrimento da barra superior foi fixada em 20 mm. Uma fissura artificial 0,3 mm de abertura, 260 mm de comprimento e 15 mm de profundidade foi feita na parte central da superfície superior do bloco de concreto, alinhada com a barra superior (**Figura 3b** e **Figura 3c**). Com essas dimensões, a fissura ficou posicionada a uma distância de 5 mm da barra superior.

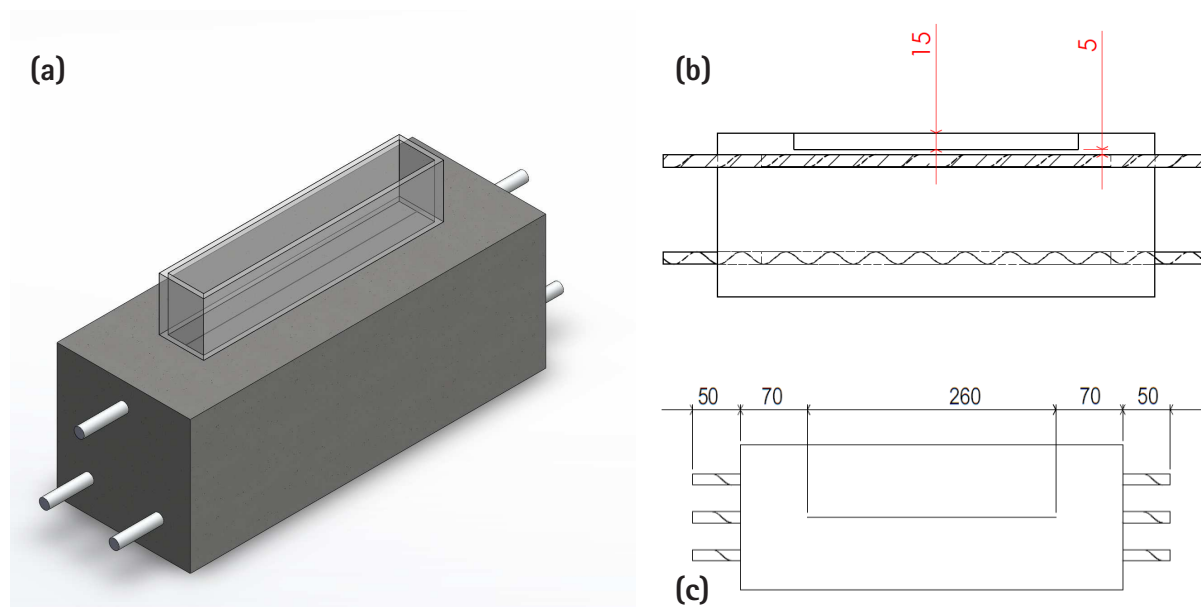


Figura 3 – Configuração do corpo de prova. As medidas apresentadas estão em milímetros.

### 3.2 Preparação das barras

Antes de serem embutidas no concreto, as barras passaram por um processo de preparação de superfície e fixação de contato elétrico. Esse processo foi diferente para cada tipo de barra.

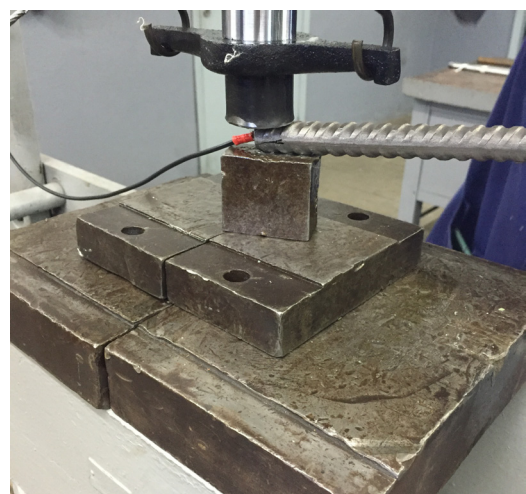
Para o aço-carbono, as barras foram rebarbadas. Em uma das extremidades, foi usinado um furo centralizado para posterior conexão elétrica. Após a usinagem, as barras foram desengorduradas por imersão em desengraxante alcalino comercial (*Hepta Clean da marca Chemicals Universal*) mantido a aproximadamente 70 °C por 10 min. Após o desengraxe e lavagem em água corrente, as barras foram decapadas em ácido clorídrico concentrado até a remoção total dos produtos de corrosão. Após a limpeza, as barras foram lavadas com água e sabão, até a completa remoção do ácido. Em seguida, foram aspergidas com acetona (para acelerar a secagem) e finalmente secas com ar quente. Um fio de cobre com 1,5 mm de diâmetro foi soldado no furo usinado, usando solda de Sn/Pb e ar quente e o restante do cabo exposto foi protegido com tubo termo retrátil (**Figura 4**).



**Figura 4 – Fio de cobre soldado para a conexão elétrica da barra de aço-carbono.**

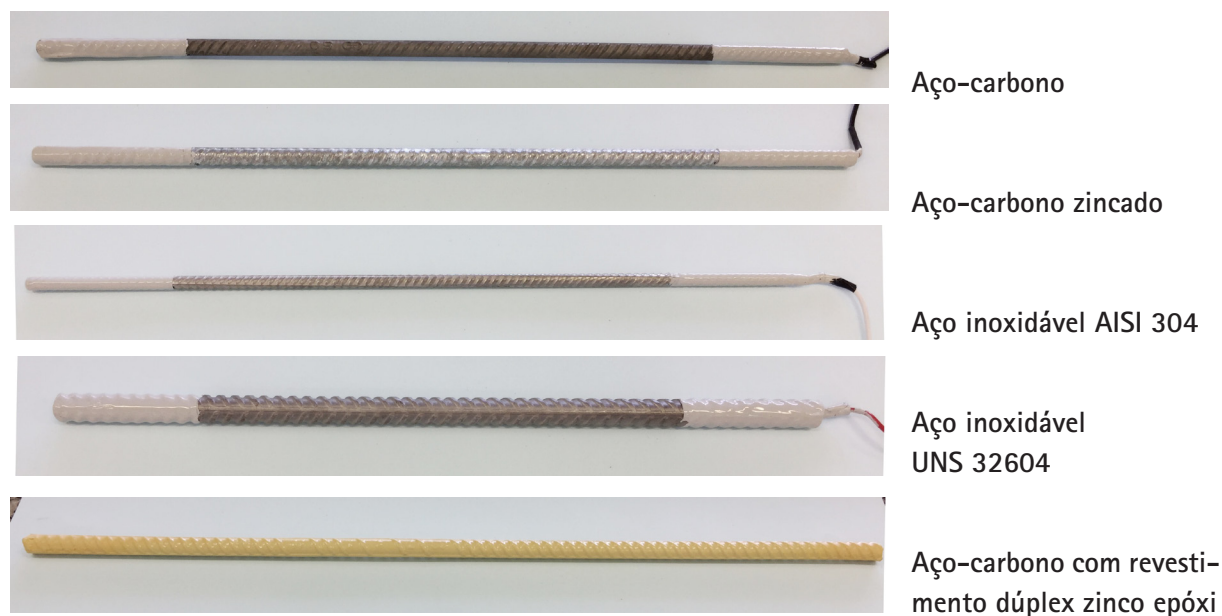
No caso do aço zincado, a rebarbagem e a furação foram realizadas antes da zincagem. As barras zincadas foram lavadas com água e sabão, foram aspergidas com acetona e, por fim, secas com ar quente. O fio de cobre foi fixado às barras da mesma maneira à das armaduras de aço-carbono.

Para os aços inoxidáveis AISI 304 e UNS 32604, as barras foram rebarbadas, quando necessário. Devido à maior dificuldade em soldar o aço inoxidável, nessas barras foi feito um pequeno rasgo com serra em uma das extremidades, para a conexão elétrica. Um fio com terminal olhal, para contato elétrico, foi colocado no rasgo e prensado (**Figura 5**). Por fim, as barras foram lavadas com água e sabão, aspergidas com acetona e secas com ar quente.



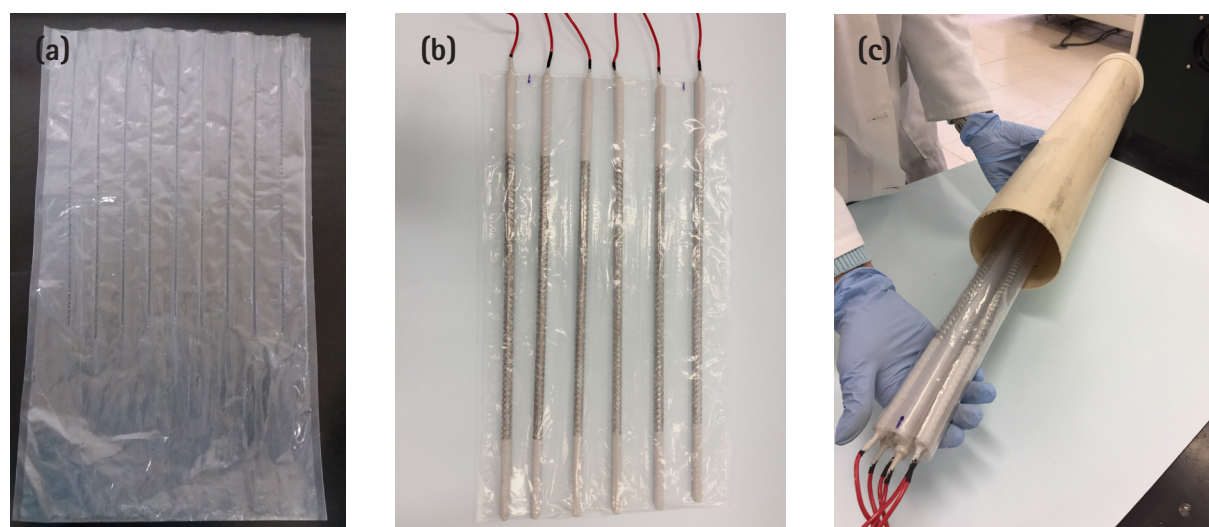
**Figura 5 – Instalação do fio de cobre para conexão elétrica da barra de aço inoxidável.**

Com exceção do revestimento dúplex, antes do embutimento, as extremidades das barras foram protegidas com tintas de alto desempenho (veja mais adiante), de modo a expor no concreto apenas um comprimento de 320 mm (**Figura 6**).



**Figura 6** – Aspecto das barras estudadas prontas para serem embutidas em concreto.

Para a preservação física, as barras preparadas foram colocadas em sacos de filme polimérico com vincos feitos a quente para possibilitar a separação entre as mesmas e, posteriormente, embaladas em tubos de PVC tampados até o momento da concretagem (**Figura 7a e 7b**). Para evitar a oxidação das barras de aço-carbono, foi colocado sílica gel dentro de tubos de PVC tampados, conforme mostra a **Figura 7c**.



**Figura 7** – Filme polimérico com vincos para separação das barras (a), barras posicionadas dentro do filme polimérico (b) e barras posicionadas dentro de tubo de PVC (c).

### 3.3 Formação da fissura nos corpos de prova

A fissura dos corpos de prova foi feita utilizando uma lâmina de aço-carbono com alto teor de carbono (SAE 1070) temperado, com 0,3 mm de espessura,  $(260 \pm 4)$  mm de comprimento e  $(32 \pm 1)$  mm de altura. Optou-se por utilizar uma lâmina de aço-carbono ao invés da lâmina de aço inoxidável indicada pela ASTM A955: 2015 devido à maior facilidade de aquisição no mercado.

Conforme mencionado anteriormente, a norma ASTM A955: 2015 recomenda que as lâminas usadas para fazer as fissuras nos corpos de prova sejam retiradas do concreto entre 8 h e 24 h após a concretagem. No primeiro ensaio exploratório realizado em laboratório, as lâminas foram retiradas após 20 h. Apesar de se adotar um período 4 h inferior ao limite máximo fixado pela norma, houve grande dificuldade na remoção das lâminas, pois essas já estavam quase completamente aderidas ao concreto. Foi feito um novo ensaio com 10 lâminas parcialmente imersas (**Figura 8a**) num concreto com a mesma dosagem prevista para os corpos de prova (ver **item 3.6**). As lâminas foram retiradas periodicamente, a partir de 4 h até 24 h após a concretagem (**Figura 8b**). As lâminas retiradas nos tempos de 4 h e 6 h foram as que melhor se comportaram: saíram com facilidade, sem danificar as bordas da fissura. A partir de 7 h, teve-se dificuldade de retirar as lâminas e as bordas das fissuras começaram a quebrar e, depois de 11 h, as lâminas só saíram com auxílio de ferramentas apropriadas. Com base nesses resultados, foi decidido retirar as lâminas a partir de 4 h porque o número de corpos de prova era grande (aproximadamente 100 unidades em cada concretagem). Assim, houve tempo suficiente para retirar as lâminas de todos os corpos de prova no máximo até 6 h após concretagem.

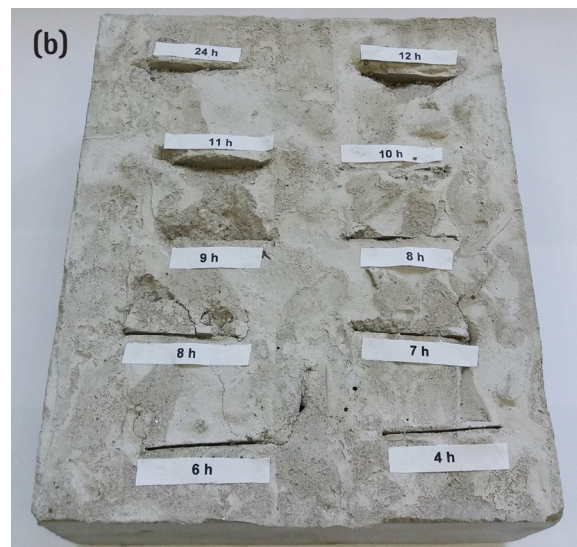
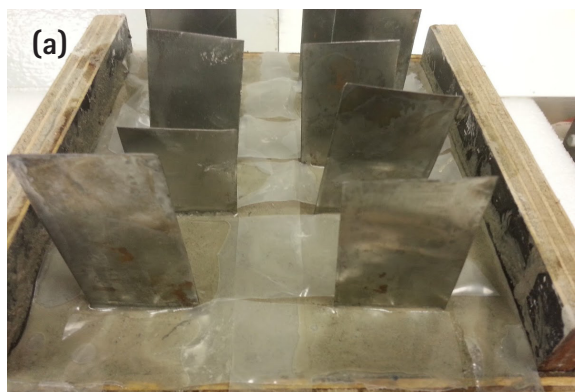


Figura 8 – Ensaio exploratório para verificação do momento adequado de retirada das lâminas, durante a cura do concreto com as lâminas (a) e após a retirada das mesmas (b).

### 3.4 Instalação do recipiente acrílico nos corpos de prova

Na parte superior do corpo de prova e centralizada na fissura, foi instalado o recipiente de acrílico sem fechamento no fundo, com dimensões 270 mm x 60 mm x 56 mm. Esse recipiente foi utilizado para a solução salina usada para a contaminação do concreto com íons cloreto. Optou-se pelo

emprego do recipiente retangular apresentado na norma ASTM G109: 2007, ao invés do rebaixo apresentado na ASTM A955: 2015, uma vez que, na concepção apresentada nessa norma, o corpo de prova não apresenta bordas frágeis, que poderiam ser danificadas durante sua desforma.

A fixação do recipiente de acrílico no concreto foi feito com cola de silicone diretamente sobre o concreto conforme recomenda a ASTM G109: 2007. Em ensaios preliminares realizados em laboratório, verificou-se que, quando o recipiente de acrílico era fixado diretamente na superfície do concreto, ocorria vazamento da solução salina através dos poros do concreto que funcionavam como vasos comunicantes. Isso foi percebido pela formação de poças de água ao redor do recipiente, conforme mostra na **Figura 9a**. Após várias tentativas, esse problema foi resolvido com a pintura da superfície superior dos corpos de prova antes da fixação do recipiente de acrílico. Assim, a pintura (ver **item 3.5**) foi feita nas laterais dos blocos de concreto (conforme recomendam ambas as normas) e na superfície superior dos corpos de prova, deixando sem pintura apenas um retângulo ao redor da trinca com as dimensões internas do recipiente de acrílico, conforme ilustrado na **Figura 9b**. Após a cura da tinta, o recipiente de acrílico foi fixado sobre a camada de tinta, usando cola de silicone, conforme ilustrado na **Figura 9c**.

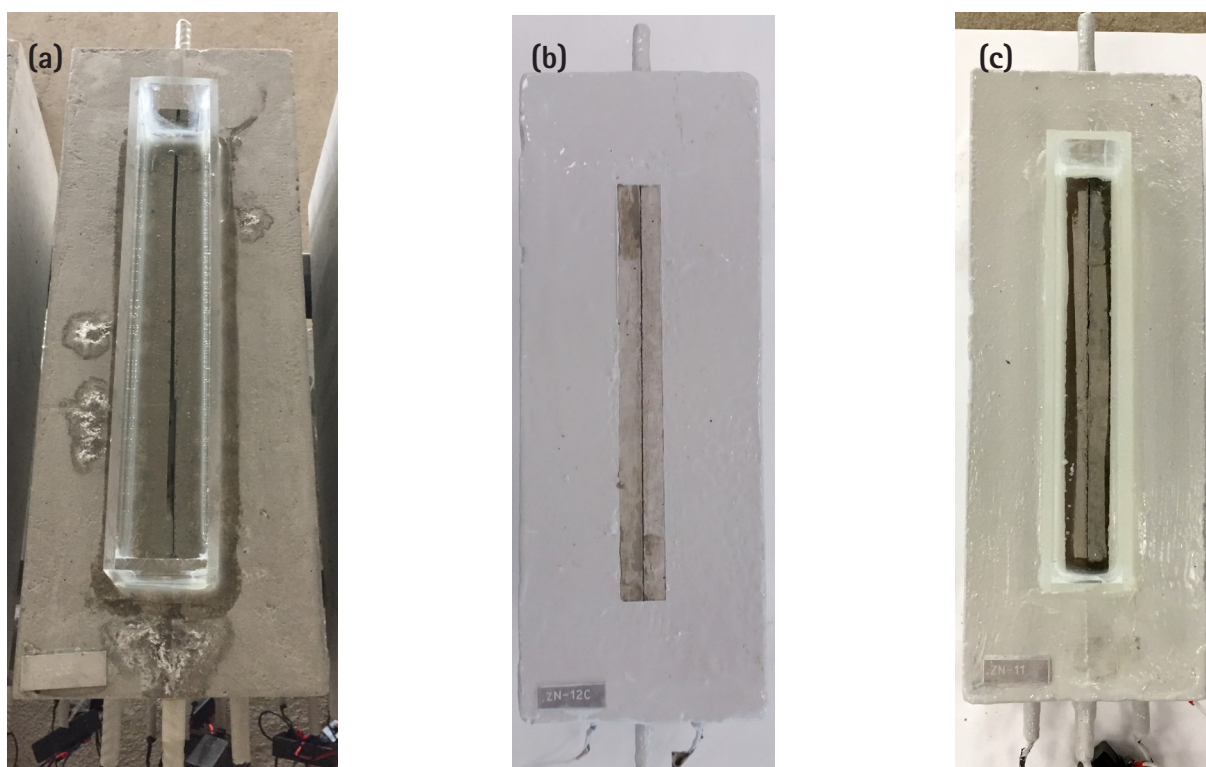


Figura 9 – Corpo de prova usado no ensaio preliminar em que houve vazamento da solução salina (a) pintura da superfície superior do corpo de prova (b) e corpo de prova pintado e com o recipiente acrílico instalado (c).

### 3.5 Pintura dos corpos de prova

A tinta utilizada para revestir os corpos de prova foi selecionada criteriosamente. Isso porque, em trabalho anterior (ARAUJO, 2004) foi verificado que qualquer elemento parcialmente embutido no concreto, como as barras dos corpos de prova em desenvolvimento, constituía uma fonte potencial de ingresso de agentes no concreto, pois as interfaces aço revestido/concreto funcionavam como caminhos preferenciais. Verificou-se que a penetração de água contaminada com íons cloreto na interface concreto/barras de aço-carbono revestido era consequência do baixo desempenho do revestimento aplicado nas barras e falha de aderência da tinta ao concreto. Nesse mesmo trabalho, foi verificada também a necessidade de ter-se um número grande de corpos de prova de concreto armado para ensaios de desempenho, pois a reprodutibilidade era baixa em razão da heterogeneidade intrínseca do concreto.

Sendo assim, foram realizados ensaios preliminares para avaliar vários revestimentos de alto desempenho capazes de impedir a entrada de contaminação pela interface barra/concreto e pela superfície do concreto pintado. Para isso, foram preparados corpos de prova com uma única barra de aço-carbono. As extremidades das barras e as faces laterais menores dos blocos de concreto foram protegidas com os revestimentos em avaliação. Optou-se por não utilizar as três camadas de revestimentos das barras indicadas na norma ASTM G109: 2007, pois a diferença entre o diâmetro da barra revestida e não revestida seria minimizado. Uma maior diferença entre os diâmetros poderia dificultar a aderência do concreto em toda a barra.

Os blocos de concreto foram expostos em uma câmara de névoa salina (**Figura 10**), de maneira alternada com períodos fora da câmara para secagem. Após um mês de exposição na câmara, o concreto foi fraturado e a superfície fraturada foi aspergida com uma solução de nitrato de prata para revelar a presença de cloretos (ARAUJO, 2004).

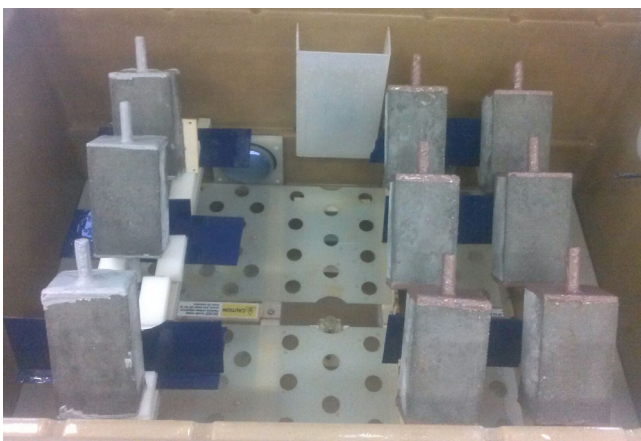


Figura 10 – Ensaio preliminar para a seleção da tinta de proteção das extremidades das barras e da superfície do concreto. Blocos posicionados na câmara de névoa salina, com indicação da extremidade da barra e da face do bloco pintadas.

Para todos os revestimentos estudados, o exame visual da superfície aspergida mostrou que o concreto das vizinhanças da interface barra/concreto e a camada de concreto abaixo da superfície pintada ficaram escuras, o que indicava que a solução salina não atingiu essas áreas. As regiões abaixo do concreto não pintado ficaram brancas, quando em contato com a solução de nitrato de prata, indicando contaminação com cloretos.

Como todos os revestimentos ensaiados apresentaram desempenho satisfatório como barreira à entrada de solução salina no concreto, optou-se pela tinta de menor viscosidade e, portanto, de mais fácil aplicação, que foi a Resicor E tipo II, da marca Resinar.

### 3.6 Definição do traço de concreto e das fôrmas dos corpos de prova

A especificação do traço de concreto utilizado na confecção dos blocos levou em consideração a disponibilidade no mercado do tipo de cimento com características mais próximas àquelas indicadas pelas normas ASTM A955: 2015 e ASTM G109: 2007. Segundo a ASTM G109: 2007, a dimensão dos agregados deve estar entre 9,5 mm e 19 mm. Optou-se pelo uso de agregados de até 9,5 mm para ser compatível com cobrimento de 20 mm adotado para a armadura superior. O traço utilizado incluiu 420 kg/m<sup>3</sup> de cimento CP V ARI, 30 kg/m<sup>3</sup> de metacaulim, 225 kg/m<sup>3</sup> de areia de quartzo, 439 kg/m<sup>3</sup> de areia artificial, 924 kg/m<sup>3</sup> de brita 0 (4,8 mm a 9,5 mm), 0,65 L/m<sup>3</sup> de glemium e 225 kg/m<sup>3</sup> de água. A relação água/cimento foi de 0,535 e o abatimento foi de (100 ± 20) mm. Adotou-se cura por quatro semanas em câmara úmida e exposição à atmosfera natural interna por quatro semanas para a secagem dos corpos de prova.

As fôrmas dos corpos de prova foram confeccionadas usando folhas de compensado naval de 17 mm de espessura, impermeabilizado, para permitir boa aparência aos corpos de prova e o máximo de reaproveitamento, pois foram feitas três concretagens de 100 corpos de provas cada, num total de 300 corpos de prova.

Primeiramente, as folhas foram cortadas usando um único molde, para uniformizar as dimensões das fôrmas. Após o corte, furos foram feitos nas peças destinadas às laterais das fôrmas para posicionar as três barras de maneira padronizada dentro de cada prova de prova. Comenta-se que o fundo da fôrma foi projetado bipartido, de modo que se pudesse inserir a lâmina de aço-carbono, usada para a formação da fissura no corpo de prova (**Figura 11a**). Essa prática garantiu o alinhamento da fissura sobre a barra superior. Em seguida, as fôrmas foram montadas já com as lâminas posicionadas, usando parafusos adequados (**Figura 11b**).

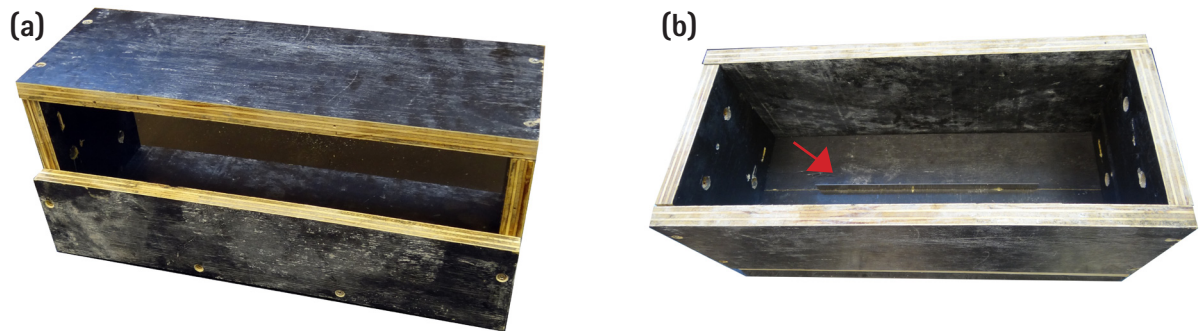


Figura 11 – Fôrmas dos corpos de prova, mostrando o fundo bipartido parcialmente montado (a) e lâmina posicionada do fundo montado (b).

### 3.7 Instalações elétricas

Antes do uso dos corpos de prova, um resistor foi inserido entre a barra superior e as barras inferiores curto-circuitadas, de modo a ser possível medir a corrente de macrocélula que circula entre a armadura superior e as duas armaduras inferiores. A ligação elétrica entre as barras foi feita de modo a ser possível, quando necessário, desconectar uma das outras para que se pudesse medir o potencial de circuito aberto individual. Para isso, foi utilizado um borne de pressão com cinco entradas, conforme mostrado na **Figura 12a**.

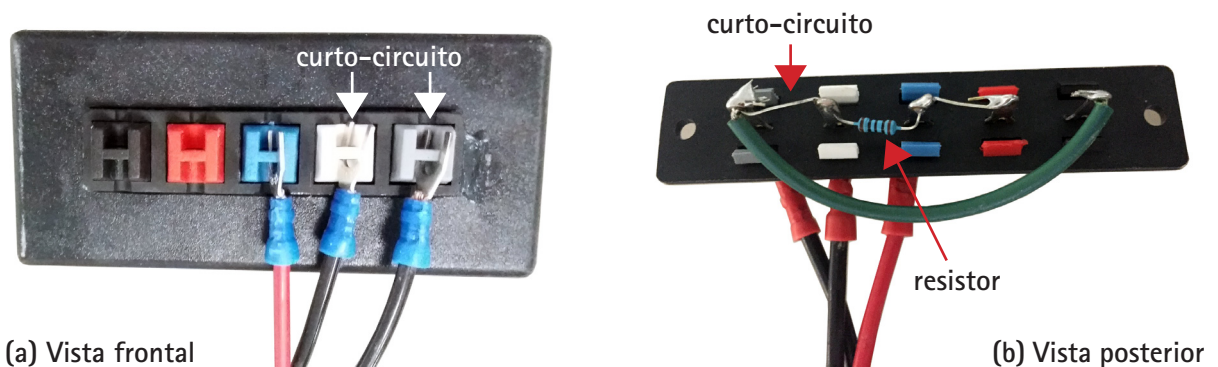


Figura 12 – Borne de pressão utilizado para curto-circuitar as barras inferiores e ligá-las à barra superior por meio de um resistor.

O resistor foi posicionado na parte posterior do borne (**Figura 12b**) entre o terminal azul (destinado à barra superior) e os terminais cinza e branco (destinados às barras inferiores). Os terminais vermelho e preto serão utilizados como contatos do multímetro para a medida da diferença de potencial no resistor. O resistor utilizado foi de filme metálico com resistência de  $100 \Omega \pm 1 \%$ , conforme recomendado pela ASTM G109: 2007.

## 4 Definição das características dos corpos de prova para sistemas de proteção catódica por corrente impressa

A proteção catódica por corrente impressa é um método de controle da corrosão que consiste em polarizar a estrutura a se proteger, tornando-a o catodo de uma célula eletroquímica. Para isso, um anodo inerte é instalado na superfície do concreto e uma fonte de corrente é utilizada para injetar uma corrente entre a armadura e o anodo de forma a polarizar catodicamente a armadura. A polarização catódica diminui consideravelmente a corrosão em curso das armaduras de obras existentes e de evitar início da corrosão das armaduras de obras novas (BEAMISH; EL-BELBOL, 1998).

Para os ensaios acelerados destinados ao estudo da eficiência de proteção catódica, foi adotada a mesma concepção de corpos de prova descrito no **item 3.1**, com algumas modificações. Para permitir a instalação do sistema de proteção catódica, duas fitas Ti/MMO<sup>a</sup> foram embutidas na superfície superior dos blocos de concreto para serem usadas como anodos inertes para o sistema de proteção catódica, conforme mostra a **Figura 13a**. Cita-se que esse tipo anodo é o mais utilizado em sistemas de proteção catódica por corrente impressa de estruturas de concreto (DAVIES, 1998; DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG, 2012).

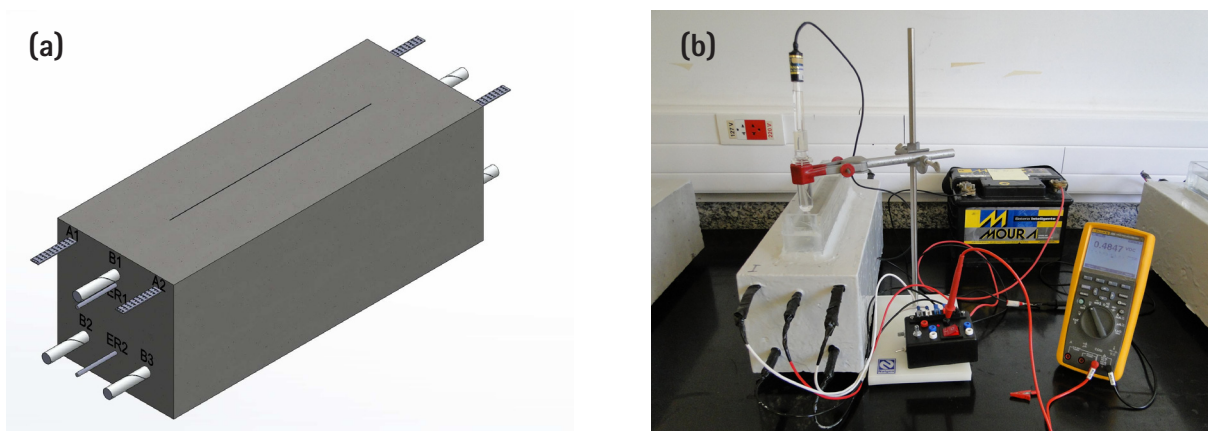


Figura 13 - Corpo de prova com anodos inertes e eletrodos de pseudorreferência, ambos de Ti/MMO, para os ensaios de proteção catódica por corrente impressa (a) e sistema de proteção catódica montado em ensaio preliminar (b).

<sup>a</sup> Ti/MMO - titânio coberto com uma mistura de óxidos de metais nobres (irídio, rutênio e cobalto), do inglês *mixed metals oxides* (V&C Cathodic Protection, 2010).

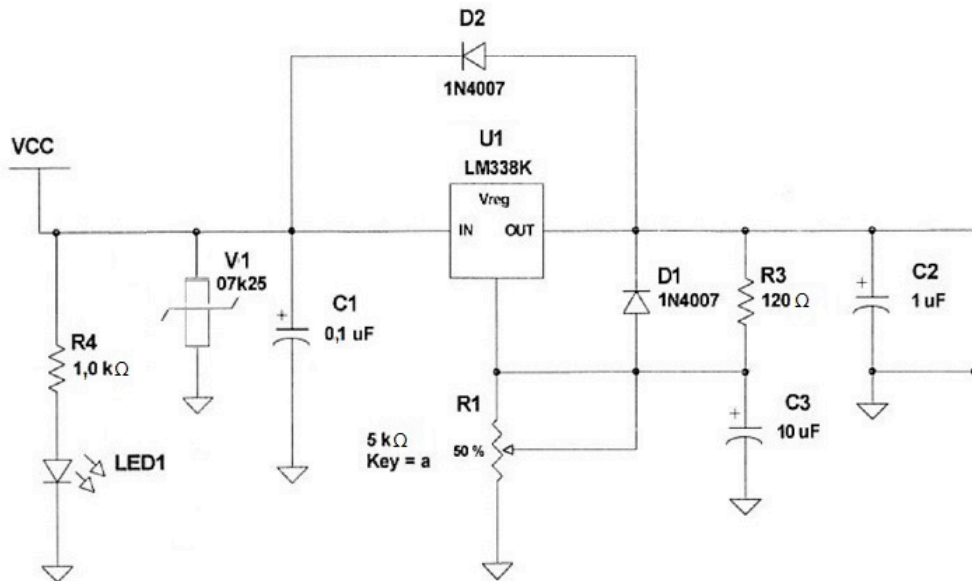
Adicionalmente, foram embutidos dois fios de Ti/MMO no corpo de prova para serem usados como eletrodo de pseudorreferência (BERTOLINI et al., 2009; DUFFÓ; FARINA; GIORDANO, 2009). Um dos fios foi instalado sob a barra superior e, outro, entre as duas barras inferiores (**Figura 13a**). O objetivo do uso desses fios é para o ajuste e o monitoramento do potencial de proteção catódica aplicado na barra superior de aço-carbono do corpo de prova.

Ensaio preliminares foram realizados para o estabelecimento das condições dos ensaios de proteção catódica (**Figura 13b**), incluindo o sistema elétrico de alimentação, o sistema elétrico de medição de potencial e o estabelecimento do potencial inicial. Para isso, foi montado um sistema de proteção catódica com uma única fonte de tensão (bateria) para atender a demanda de corrente de proteção em dois corpos de prova, sendo que o potencial aplicado em cada corpo de prova era controlado individualmente com o uso de um potenciômetro linear (resistor ajustável linearmente posicionado em série com o ensaio, com função de divisor de tensão).

Durante o ensaio, verificou-se a impossibilidade de controle individualizado dos ensaios, pois houve aumento do potencial aplicado em um dos corpos de prova quando era feito o desligamento do outro. Com isso, somente com o desligamento geral do sistema era possível fazer leituras adequadas do potencial de proteção assumido pelas barras de cada corpo de prova. Além disso, observou-se que o potencial necessário para atendimento aos critérios de proteção catódica era muito baixo, requerendo um ajuste fino que era impossível fazer por meio do sistema inicialmente proposto.

Face ao exposto, foi proposto um novo sistema de controle do potencial dos corpos de prova com uso de um regulador ajustável (LM338T), que permite o ajuste do potencial de saída entre 1,2 V até aproximadamente o potencial da bateria, com corrente de até 5 A, em cada corpo de prova. O circuito elétrico do sistema montado está apresentado na **Figura 14a**. O projeto desse circuito foi baseado em modelos de fontes retificadoras ajustáveis para bancada, em que o regulador (LM338T) é responsável pelo controle da tensão de saída da fonte. Capacitores de acoplamento (C1, C2 e C3) e diodos (D1 e D2) foram incluídos conforme recomendação do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 1998).

(a)



(b)

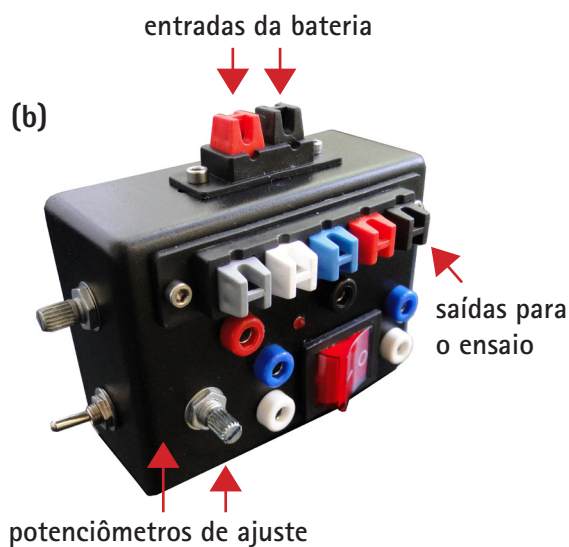


Figura 14 – Circuito elétrico (a) e dispositivo de controle individual (b) do potencial aplicado nos corpos de prova de proteção catódica.

Para que fosse possível o controle de potenciais abaixo de 1,2 V, manteve-se o potenciômetro anteriormente utilizado, agora na saída do circuito regulador (Figura 14b). Com o uso do circuito regulador individualizado, tornou-se possível fazer o desligamento individual para monitoramento de potencial, sem interferências mútuas.

## 5 Execução dos corpos de prova

### 5.1 Concretagem dos corpos de prova

Devido à grande heterogeneidade do concreto, deve-se produzir corpos de prova em quantidade suficiente para se verificar uma tendência do processo corrosivo. No estudo de desempenho conduzido, estabeleceram-se doze corpos de prova de cada material da armadura ou condição de ensaio, de modo a obter maior confiabilidade nos resultados. Foram realizadas três concretagem de 100 corpos de prova, totalizando 300 corpos de prova.

Antes da concretagem, as fôrmas, com a lâmina de formação de fissuras já instalada, foram untadas com desmoldante para facilitar a desforma e evitar a aderência do concreto (**Figura 15a**). Em seguida, as barras foram desembaladas e posicionadas nos furos das formas (**Figura 15b**).

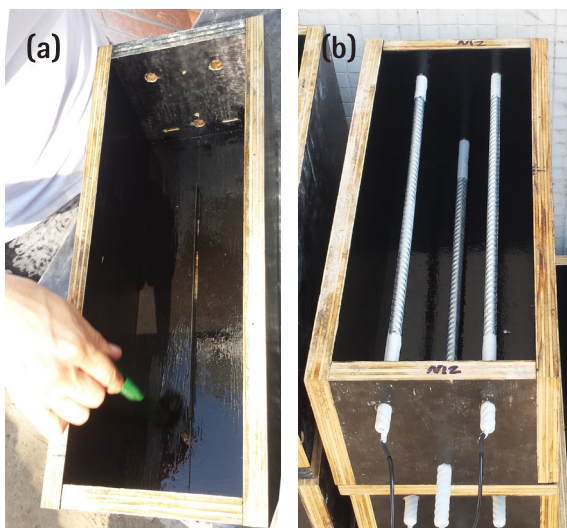


Figura 15 – Preparação das formas antes da concretagem, com a aplicação de desmoldante (a) e o posicionamento das barras (b).

Foi utilizado concreto usinado com o traço definido em 3.6. As fôrmas foram preenchidas com concreto usinado até a metade da sua altura e colocadas em mesa vibratória por 30 s com uma amplitude de 0,15 mm e frequência de 60 Hz (**Figura 16a**). Após essa etapa, as formas foram preenchidas com o restante do concreto até a borda superior, tendo sido submetidas à vibração novamente e, em seguida, a superfície do concreto foi uniformizada com uma colher de pedreiro (**Figura 16b**).

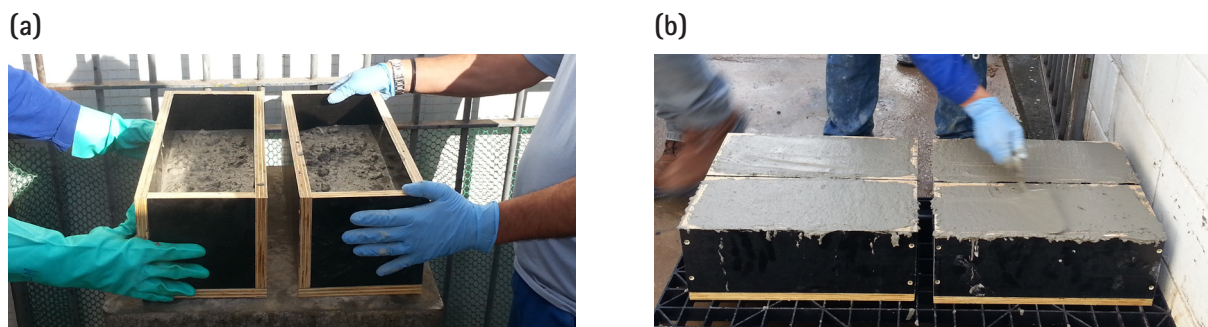


Figura 16 – Vibração da fôrma após o preenchimento parcial do corpo de prova (a) e acabamento da superfície do concreto (b).

As lâminas de fissura foram retiradas a partir de 4 h após a concretagem, por meio da retirada da metade do fundo da forma para sua parcial exposição. Para essa remoção, utilizou-se alicate torquês. Decorridas 24 h da concretagem, os corpos de prova foram desformados e levados para cura em uma câmara úmida com umidade relativa de 100 % por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram expostos ao ar atmosférico em ambiente fechado por quatro semanas.

## 5.2 Preparação dos corpos de prova para início dos ensaios de desempenho

Na segunda semana de secagem, as superfícies laterais e superior do concreto foram lixadas com lixa ferro de granulometria P36 (Figura 17a). Na terceira semana, as superfícies laterais e superior dos corpos de prova foram pintadas com a tinta epóxi de alto desempenho (Figura 17b), com exceção das vizinhanças da fissura conforme mencionado no item 3.3. Somente a face superior dos corpos de prova usados para a avaliação de proteção catódica foram pintados. Após a cura da tinta, os recipientes de acrílico foram fixados com silicone neutro. Após a cura do silicone, os circuitos elétricos foram instalados e os corpos de prova foram transportados ao local onde iriam ser realizados os ensaios de desempenho (Figura 17c).

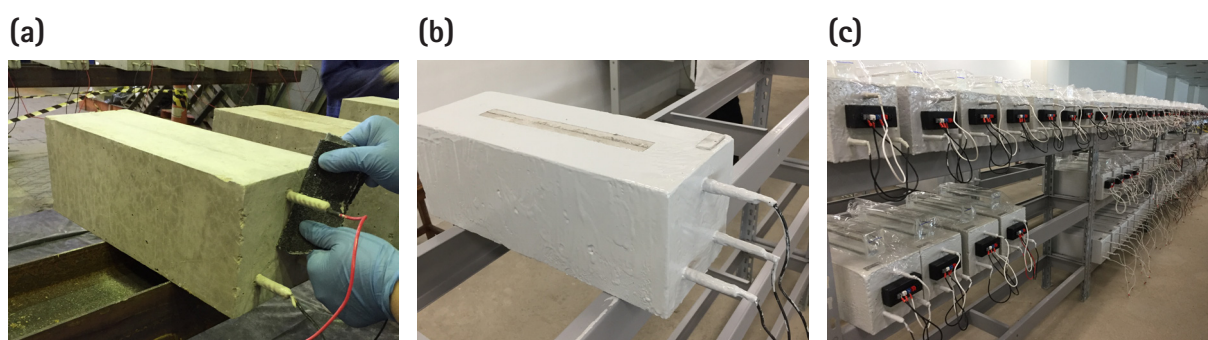


Figura 17 – Preparação dos corpos de prova para os ensaios de desempenho: lixamento dos corpos de prova (a), corpos de prova após a pintura (b) e corpos de prova prontos para o início dos ensaios de desempenho (c).

## 6 Conclusões

A consulta às ASTM A955: 2015 3e ASTM G109: 2007 foi essencial para a definição dos corpos de prova destinados a ensaios acelerados de desempenho de barras de concreto armado. A realização dos ensaios preliminares auxiliou na identificação de possíveis problemas que poderiam ocorrer tanto na preparação dos corpos de prova como durante a realização dos próprios ensaios de desempenho. Destaca-se como principais problemas, o tempo de retirada das lâminas usadas na formação de fissuras artificiais, que poderia gerar a perda total dos corpos de prova, e o vazamento da solução salina pelo concreto, que poderia contaminar o concreto de maneira não prevista, introduzido mais um parâmetro para a baixa reprodutibilidade dos ensaios em concreto. Como exemplo de problema do sistema de proteção catódica, destaca-se o circuito elétrico proposto inicialmente que, se não corrigida, que poderia comprometer também a reprodutibilidade.

## 7 Agradecimentos

Agradecemos à Arminox pelas amostras de barras AISI 304, ao ICZ e à Zink Power pela zincagem por imersão a quente das barras de aço-carbono e à Gerdau pelas amostras da barra com revestimento duplex.

## 8 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G109: standard test method for determining effects of chemical admixtures on corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments. West Conshohocken: ASTM, 2007. 6 p. (Reapproved 2013).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A955: deformed and plain stainless-steel bars for concrete reinforcement. West Conshohocken: ASTM, 2015. 14 p.

ANACO STAINLESS. Experts in Stainless Steel for Engineering and Construction. Stainless steel reinforcing and related accessories. Disponível em: <<http://www.anacotrading.com/rebar.htm>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

ANDRADE, C.; GARCÉS, P.; MARTÍNEZ, I. Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide. Corrosion Science, v. 50, n. 10, p. 2959-2964, 2008.

ARAUJO, A. Estudo para o estabelecimento de metodologia de seleção de vernizes na proteção ao concreto armado contra a penetração de agentes agressivos. 2004. 391 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia e Construção de Edifícios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARAUJO, A.; MOREIRA, A. R.; PANOSSIAN, Z. Extensão da vida útil das estruturas de concreto com uso de armaduras de aço-carbono revestidas ou de aço inoxidável. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CORROSÃO, INTERCORR, 2014, Fortaleza. Proceedings... Rio de Janeiro: ABRACO, 2014. 15 p.

ARAUJO, A.; SILVA SOBRINHO, P.; PANOSSIAN, Z. Estruturas zincadas por imersão a quente em concreto armado. *Corrosão e Proteção*, v. 55, n. 12, p. 18-254, fev./mar. 2015. 7 p.

BEAMISH, S.; EL-BELBOL, S. Appraisal of corrosion-damaged structures. In: CHESS, P. M. (Ed.). *Cathodic protection of steel in concrete*. London: E & FN Spon, 1998. p. 30-31

BERTOLINI, L.; BOLZONI, F.; GASTALDI, M.; PASTORE, T.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E. Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete. *Electrochimica Acta*, v. 54, p. 1452-1463, 2009.

DAVIES, K. Impressed current cathodic protection systems for reinforced concrete. In: CHESS, P. (Ed.). *Cathodic protection of steel in concrete*. London: E & FN SPON, 1998.

DUFFÓ, G. S.; FARINA, S. B.; GIORDANO, C. M. Characterization of solid embeddable reference electrodes for corrosion monitoring in reinforced concrete structures. *Electrochimica Acta*, v. 54, p. 1010-1020, 2009.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 12696: cathodic protection of steel in concrete. Brussels: DIN, 2012. 38 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Tecnologias para novos projetos e prolongamento de vida útil de armaduras de concreto armado. São Paulo: IPT, 2016. 136 p.

MAGEE; J. H.; SCHNELL, R. E. Stainless steel rebar for concrete reinforcement: an update and selection guide. *Advanced Materials and Process*, p. 1-3, Oct. 2002.

MCGURN, F. Stainless steel reinforcing bars in concrete. Disponível em: <[www.americanarminox.com/NiDi\\_Rpt.-\\_Schaffhausen\\_Bridge\\_LCC.pdf](http://www.americanarminox.com/NiDi_Rpt.-_Schaffhausen_Bridge_LCC.pdf)>. Acesso em: Abril de 2016.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 4th ed. Harlow: Pearson Education, 2008.

PEDEFERRI, P. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 5, p. 391-402, 1996.

TEXAS INSTRUMENTS. LM138/LC338 – 5-Amp adjustable regulators. maio de 1998. Revisado em abril de 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2016.

V&C CATHODIC PROTECTION. Cathodic protection of reinforcement structures. Pressbaum: V&C, 2010. 12 p. Disponível em: <[http://www.vc-austria.com/fileadmin/media/downloads/broschueren/englisch/vc\\_reinforced\\_concrete\\_protection.pdf](http://www.vc-austria.com/fileadmin/media/downloads/broschueren/englisch/vc_reinforced_concrete_protection.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2016.

WANG, X. et al. Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure – part 1: mechanisms, practices, modeling and simulations – a review. Canberra: CSIRO, 2010. 84 p.