

por Mounir Khalil El Debs, professor Associado - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo e

Angelo Rubens Migliore Júnior, professor Assistente - Departamento de Engenharia de Materiais - Universidade Federal de São Carlos.

Estudo Comparativo de Corrosão de Armadura entre Argamassa Armada e Concreto Armado por Meio de Teste Acelerado

No duelo decisivo contra a corrosão de armadura, a argamassa e o concreto confrontam suas armas. Quem ganha nessa disputa é o bolso do construtor, que dispõe de tecnologia apurada para escolher o melhor material.

Um dos aspectos mais importantes da tecnologia da argamassa armada é o que diz respeito à proteção contra a corrosão da armadura conferida pelo reduzido cobrimento utilizado nestas peças, quando comparada à proteção conferida no concreto armado tradicional. Este assunto tem merecido a atenção de vários pesquisadores e foi objeto de diversos trabalhos apresentados nos II e III Simpósios Internacionais de Ferrocimento.

Os aspectos que tem sido considerados de maior influência com relação à corrosão da armadura do concreto armado, e por extensão com a da argamassa armada, são: (a) o cobrimento da armadura e a qualidade do concreto e (b) a abertura das fissuras. Não existe consenso sobre qual destes aspectos é mais importante [1]. Neste trabalho é analisado apenas o primeiro deles.

O objetivo deste trabalho é o de apresentar os resultados de um estudo comparativo do grau de proteção da armadura de peças de argamassa armada em relação ao

grau de proteção de peças de concreto armado tradicional, considerando a influência do cobrimento da armadura e da qualidade da argamassa, mediante um procedimento experimental em que foi acelerada a corrosão e o grau de proteção da armadura foi avaliado a partir de medidas do potencial eletroquímico.

MATERIAIS

O traço da argamassa que tem sido empregado comumente nas construções de argamassa armada, no Brasil é de uma parte de cimento, duas partes de agregados miúdos e relação água/cimento (x) de 0,4, em massa de material seco (1:2 $x=0,4$).

MATERIAL	ARGAMASSAS			CONCRETO
	A	B	C	D
Relação cimento agregados	1:2	1:2,5	1:3	1:3,01:3,68
Relação água cimento	0,40	0,48	0,56	0,72
Consumo de cimento (Kg/m^3)	679	574	497	281
Quantidade de água (Kg/m^3)	272	276	278	202
f_{c28} (MPa)	35	31	20	14

Tab.1 - Características dos Materiais Empregados

0844338

Nas argamassas utilizadas neste trabalho foi adotado esse traço, denominado de material A, e outros dois traços mais pobres em cimento, isto é, $1:2,5 \times 0,48$ e $1:3,0 \times 0,56$, denominados de materiais B e C, respectivamente. As relações água/cimento dos materiais B e C foram determinadas de modo a se ter o mesmo índice de consistência do material A. O traço do concreto empregado neste estudo foi de uma parte de cimento, 3,01 partes de agregado miúdo, 3,68 partes de agregados graúdos e relação água/cimento de 0,72 ($1:3,01:3,68 \times 0,72$). Este concreto foi denominado de material D.

Os materiais empregados nas argamassas e no concreto foram: cimento portland comum; agregado miúdo - areia quartzosa com diâmetro máximo característico de 2,4mm, módulo de finura 2,61; e agregado graúdo - basalto britado com diâmetro máximo característico de 12,5mm.

Na tabela 1 são apresentadas as principais características dos materiais estudados, bem como a resistência média à compressão aos 28 dias (f_{c28}), medida em corpos de prova cilíndricos.

A armadura utilizada em todos os corpos de prova foi uma única tela eletro-soldada de aço, tipo Q-120 (tela de malha quadrada, abertura de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ e fio de aço de diâmetro 2,77mm, com resistência $f_y = 600 \text{ MPa}$). A preparação da armadura consistiu em corte, desengrenamento e decapagem com ácido clorídrico. Os cobrimentos das armaduras adotados neste estudo foram os indicados na tabela 2.

Os corpos de prova eram de forma prismática com superfície exposta no ensaio acelerado de $150 \times 150 \text{ mm}^2$ e espes-

Material	Cobrimento (mm)			
	3	6	9	12
A	3	6	9	12
B	3	6	9	12
C	6	9	12	15
D	15	20	25	30

Tab. 2 - Cobrimentos da armadura no estudo

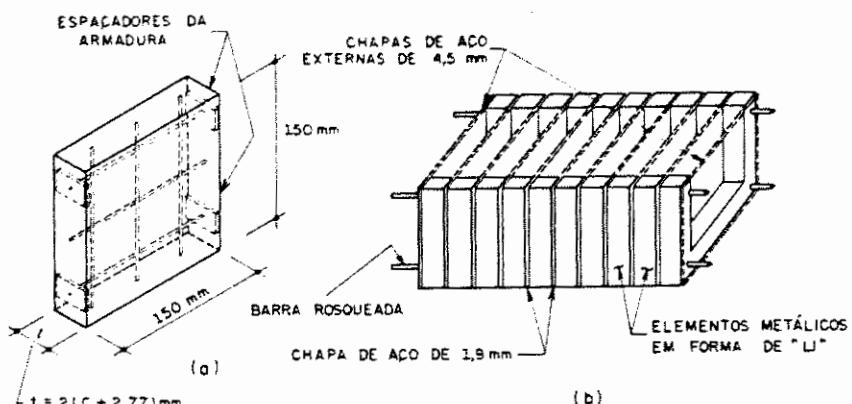


Fig. 1 - Dimensões dos corpos de prova, posição dos espaçadores e esquema da fórmula

sura de modo a se ter o mesmo cobrimento estipulado da armadura nas duas faces. Para manter a armadura na posição, foram utilizados espaçadores de poliestireno em forma de lâminas. A figura 1-a mostra as dimensões dos corpos de prova e o posicionamento dos espaçadores.

Na moldagem dos corpos de prova foi empregada fórmula metálica para garantir uma boa precisão dimensional e condições idênticas para as superfícies expostas (Fig. 1-b). O adensamento foi feito em mesa vibratória para todos os corpos de provas.

Os corpos de prova foram retirados da fórmula, de 24 a 48 horas após a moldagem, e mantidos imersos em tanque de água por 28 dias. Em seguida os corpos de prova foram secos ao ar, pintados com tinta a base de epóxi nas faces que não eram expostas e identificados. Foram moldadas quatro réplicas dos corpos de prova, para cada material e cada cobrimento, num total de 64 amostras.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental realizado consistiu em submeter as amostras a ciclos de imersão em um banho salino e emergência em ambiente aquecido por lâm-

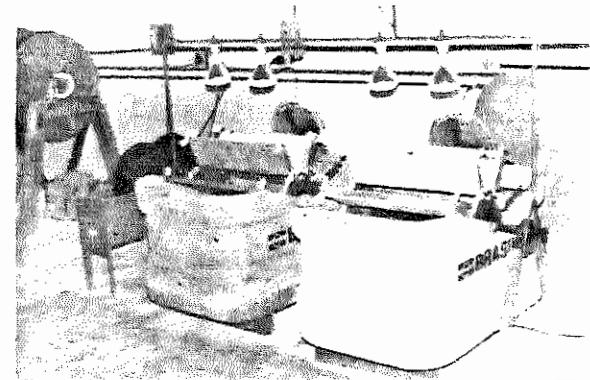


Foto 1 - Vista Geral do equipamento de aceleração de corrosão

padas de infravermelho e com ventilação forçada para acelerar a secagem [2].

O tempo do ciclo de imersão e emergência foi de cerca de 58 minutos sendo que durante um terço do tempo as amostras ficavam em contato com o banho.

O equipamento de aceleração de corrosão consiste basicamente de um eixo horizontal no qual são posicionadas radialmente aletas metálica que suportam as amostra. As aletas são fixadas por parafusos com porcas tipo borboleta e engastes simples para permitir a retirada e colocação das mesmas com o equipamento em movimento. As amostras são fixadas nas aletas simplesmente por pressão (Foto 1 e 2).

O banho utilizado foi água do mar produzida artificialmente contendo os principais sais nas concentrações encontradas nas costas brasileiras, ou seja: 0,55M de cloreto de sódio, 0,053M de

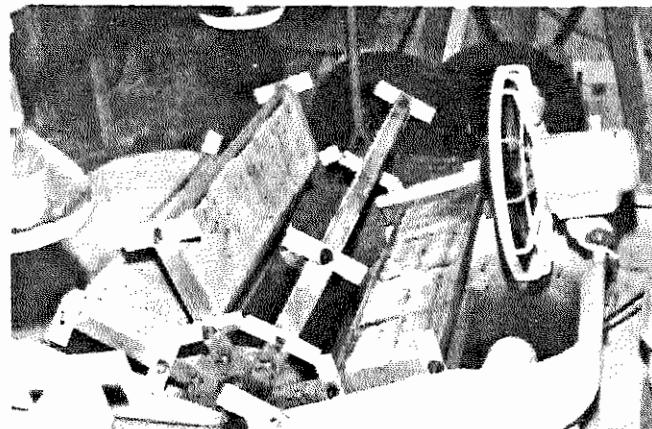


Foto 2 - Detalhes do equipamento em operação

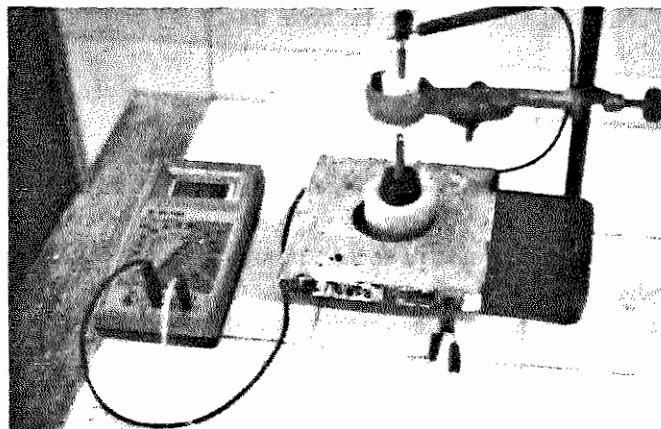


Foto 3 - Medida do Potencial Eletroquímico

sulfato de magnésio e PH estabilizado em torno de 8 [3].

As medidas de corrosão das armadura foram executadas segundo ASTM C876-87 [4] com o auxílio de uma meia cela de sulfato de cobre (CSE). Para a medida do potencial eletro-químico, foi exposta uma extremidade da armadura pela retirada de um espaçador e conectada ao polo positivo de um multímetro de alta impedância.

A meia cela compõe-se de um tubo de vidro com um filtro poroso de granulometria média na base e tampa rosqueável de teflon no topo. A meia cela é preenchida com uma solução obtida pela dissolução de cristais de sulfato de cobre de pureza analítica até a saturação em água de-ionizada. O elemento metálico de contato é um varão de cobre de pureza comercial que fica com uma extremidade imersa na solução e a outra extremidade fica externa para conexão ao polo negativo do multímetro (Foto 3).

Para garantir a conexão elétrica da meia cela com a superfície do concreto foi utilizada um espuma de poliuretano tipo poliéster de cela aberta com densidade aparente de $21,5 \text{ kg/m}^3$ recortada em forma de tampa e que se ajusta perfeitamente à base do tubo de vidro. Esta espuma foi mantida úmida com uma solução de contato composta de 1 litro de água destilada e 5 ml de agente molhante comercial.

RESULTADOS OBTIDOS

Após 180 dias de ataque acelerado, os corpos de prova apresentaram as medidas de potencial de meia cela mostradas na Tabela 3.

As séries B9 e B12 foram descartadas devido a problemas relacionados com a moldagem e posicionamento da armadura nas superfícies que não iriam ser proporcionalmente expostas. Na época da sua ex-

Amostra (*)	Potencial eletroquímico (-mV CSE)				
	1	2	3	4	Média
A3	537	594	595	622	587
A6	504	431	463	522	480
A9	399	519	452	371	435
A12	451	486	392	476	443
B3	597	608	626	599	583
B6	504	505	618	596	556
B9	Descartados				-
B12	Descartados				-
C6	574	538	580	552	561
C9	523	569	512	538	536
C12	421	522	477	457	469
C15	453	500	487	401	459
D15	514	581	474	560	532
D20	501	524	461	411	474
D25	381	500	426	547	464
D30	471	379	466	437	438

Tab.3 - Medidas do Potencial Eletroquímico

(*) O primeiro carácter correspondente o material e as outras correspondem ao cobrimento de armadura.

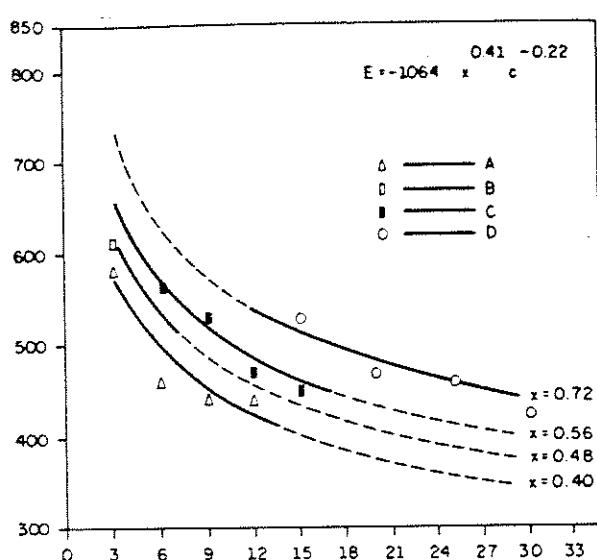


Fig. 2 - Curvas das equações obtidas com regressão multipla e valores médios experimentais

cução julgou-se que não haveriam consequências; no entanto, os resultados obtidos revelaram-se discrepantes e por isto foram abandonados.

Cabe destacar ainda que os espaçadores criaram um caminho preferencial de ataque às armaduras. A pintura a base de epóxi não produziu o efeito pretendido, que seria garantir que o ataque ocorresse apenas nas faces não pintadas dos corpos de prova. Como consequência, observou-se que, praticamente todas as amostras, tanto as mais protegidas como as menos protegidas, apresentaram corrosão da armadura nas extremidades das telas junto às faces em que foram posicionados os espaçadores.

Embora o caminho preferencial de ataque à armadura promovido pelos espaçadores não fosse desejado, tal ocorrência não comprometeu este estudo, pois a medida do potencial eletroquímico foi feita no meio da peças, fora da região de maior influência desse tipo de ataque.

De certa forma, este caminho preferencial de ataque pode ser relacionado com situações que ocorrem em obras nas regiões junto aos espaçadores, junto às deficiências localizadas e junto às fissuras.

Na análise dos resultados adotou-se a seguinte relação empírica:

$$E = \alpha x^{\beta} c^{\varphi}$$

onde:

E = medida do potencial eletroquímico (mV CSE);

x = fator água/cimento;

c = cobrimento da armadura (mm);

α, β e φ = coeficiente de ajuste.

Fazendo uma regressão linear múltipla entre o logaritmo do potencial em função dos logaritmos das relações água/cimento e do cobrimento obtem-se a equação (2),

onde o coeficiente de correlação foi de 0,76.

$$E = -1064 x^{0,41} c^{-0,22} \quad (2)$$

A figura 2 mostra as curvas obtidas com a equação (2) considerando todos os materiais, juntamente com os valores médios dos potenciais de cada série apresentados na tabela 3. A figura 3 mostra em diagrama tridimensional os valores obtidos com esta mesma equação.

A partir da equação determinada com a regressão podem ser feitas algumas simulações, como avaliar o cobrimento da armadura de peças de argamassa armada com uma determinada relação água/cimento que confere o mesmo grau de proteção de um concreto com determinados cobrimentos e relação água/cimento; ou então, avaliar a relação água/cimento de uma argamassa para um determinado cobrimento, que propicia o mesmo grau de proteção de um concreto com determinados cobrimentos e relação água/cimento.

Com base nessas considerações, resulta que uma argamassa com relação água/cimento 0,4 deverá ter um cobrimento de 6,7mm para resultar a mesma proteção da armadura de um concreto com relação água/cimento de 0,72 com cobrimento da armadura de 20mm.

Após a medida do potencial eletroquímico, as amostras foram cuidadosamente fragmentadas para a retirada da armadura e em seguida procedeu-se a inspeção visual, onde constatou-se qualitativamente uma boa concordância com os valores medidos. Na foto 4 é mostrado o aspecto final das telas de algumas amostras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados mostram a grande importância de se empregar baixos valores de relação água/cimento para a argamassa armada. Por exemplo, para uma peça com cobrimento de 5mm, quando se aumenta a relação água/cimento de 0,4 para 0,48 (+20%), o cobrimento deve ser aumentado, conforme a equação (2), para 7mm (+40%), para resultar o mesmo grau de proteção para idênticas condições de adensamento, cura, etc.

Embora possam ser feitas avaliações, a partir da equação (2), do cobrimento da armadura de peças de argamassa armada para resultar o mesmo grau de proteção de peças de concreto armado (cujos cobri-

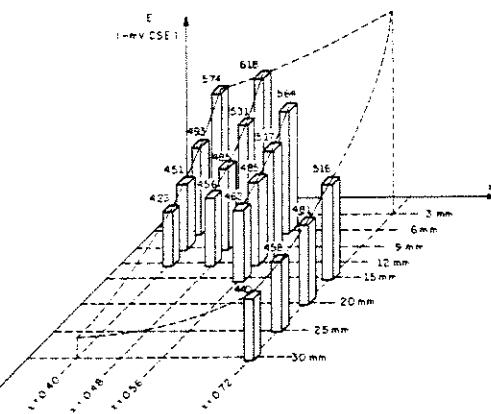
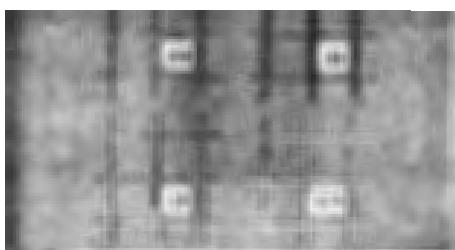


Fig. 3 - Valores do potencial eletroquímico determinados com a equação.

**Foto 4 - Aspecto de algumas armaduras**

mentos são estabelecidos em geral pelos regulamentos), para aplicações práticas são necessários mais estudos, enfocando outros fatores não foram considerados neste trabalho, tais como a formação e a abertura de fissuras, controle de qualidade, tolerância de execução, etc.

O procedimento de aceleração de corrosão descrito mostrou-se simples e adequado para o estudo de placas de concreto armado e de argamassa armada. Os resultados obtidos indicam a possibilidade de utilizar o mesmo procedimento para a realização de estudos comparativos de cor-

rosão de armaduras em concretos em geral, considerando-se outras variáveis além daquelas aqui estudadas, como por exemplo, as condições de cura, as condições de adensamento, o emprego de pintura protetora, a composição da solução do banho, o emprego de inibidores de corrosão, etc., de uma forma bastante simples.

AGRADECIMENTOS

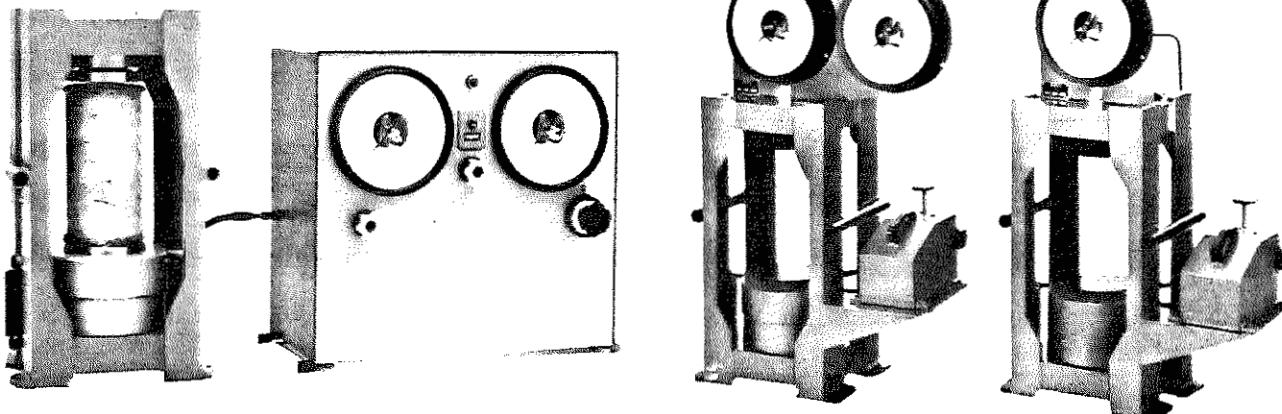
Os autores agradecem a Sérgio M.O. Benedicto, aluno do Curso de Engenharia Civil da UFSCar e bolsista de Iniciação Científica pela valiosa colaboração e ao CNPq e à FAPESP pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DARWIN, D. (moderator) Debate: crack width, cover and corrosion. Concrete International, 7(5): 20-35, May, 1985.
2. MIGLIORE JR, A. R. & EL DEBS, M. K. descrição de um procedimento para comparação de corrosão da armadura de concretos estruturais através de ensaio acelerado. In: 4o. SEMINÁRIO NACIONAL DE CORROSÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Rio de Janeiro, ABRACO, dez. 1990, 53-63.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C876-87 Standart test method for half-cell potentials of uncoated reforing steel in concret. In 1987 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARTS. Philadelphia, ASTM, 1987. Vol.03.02 420-24.
4. PRUDÊNCIO, W. J. Durabilidade das estruturas de concreto em água do mar. In: COLÓQUIO DE PATOLOGIA DO CONCRETO E RECUPERAÇÃO DAS ESTRUTURAS. São Paulo, IBRACON, dez. 1978.

PRENSAS HIDRÁULICAS, MANUAIS E ELÉTRICAS

CAPACIDADE: 120 TONELADAS PARA ROMPER CORPO DE PROVA DE CONCRETO

**SOLOTEST****Aparelhos p/ Mec. Solo Ltda.**

R. Cons. Carrão, 275 - CEP 01328-000 - São Paulo-SP - Fone: 011-298.0211 - Fax: 5511-289.4516 - Tlx 11-36698