

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil



ISSN 0103-9830
BT/PCC/272

**RESISTÊNCIA À CORROSÃO NO CONCRETO
DOS TIPOS DE ARMADURAS BRASILEIRAS
PARA CONCRETO ARMADO**

Oswaldo Cascudo
Paulo Roberto do Lago Helene

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830
BT/PCC/272

**RESISTÊNCIA À CORROSÃO NO CONCRETO
DOS TIPOS DE ARMADURAS BRASILEIRAS
PARA CONCRETO ARMADO**

Oswaldo Cascudo
Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo – 2001

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico - Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Antônio Marcos de Aguirra Massola
Vice-Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. João da Rocha Lima Junior

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves
Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico
Prof. Dr. Alex Abiko

RESISTÊNCIA À CORROSÃO NO CONCRETO DOS TIPOS DE ARMADURAS BRASILEIRAS PARA CONCRETO ARMADO

CORROSION RESISTANCE IN CONCRETE OF BRAZILIAN CARBON STEELS FOR REINFORCED CONCRETE

Oswaldo Cascudo - Pesquisador na Universidade de São Paulo e Professor da Universidade Federal de Goiás (E-mail: hcarasek@cultura.com.br)

Paulo Helene - Professor Titular da Universidade de São Paulo

RESUMO

O presente boletim apresenta e discute os principais resultados de uma pesquisa experimental cujo objetivo foi verificar a resistência à corrosão dos diferentes aços carbonos destinados ao uso como armaduras para concreto armado, a partir de uma avaliação de desempenho com corpos-de-prova de concreto. O estudo avaliou três armaduras normalizadas no Brasil, as barras CA-25 e CA-50, e o fio CA-60, sendo que uma delas, a barra CA-50, apresentou-se sob duas condições: contendo a carepa de laminação e com a remoção mecânica desta carepa. A avaliação de desempenho contemplou uma faixa relativamente grande de resistência do concreto ($f_{ck} = 10$ a 55 MPa), com os corpos-de-prova tendo sido submetidos à iniciação da corrosão por cloretos ou por carbonatação do concreto. Ainda como variáveis independentes do estudo, estabeleceu-se duas condições superficiais para as barras de aço: elas foram embutidas no concreto após decapagem mecânica ou foram concretadas na condição pré-corroída. Após 14 meses de ensaio visando a aceleração do processo corrosivo, a corrosão foi então avaliada através da determinação da taxa de corrosão gravimétrica. Os resultados gerais mostraram que o aço CA-50 sem carepa apresentou taxas de corrosão em média 45% mais altas do que as registradas para o aço CA-50 com carepa, 79% mais altas do que as do aço CA-60 e 126% maiores do que as do aço CA-25.

ABSTRACT

The present work aims to present and discuss the main results of an experimental research whose purpose was to verify the corrosion resistance of carbon steels used as reinforcement for reinforced concrete, after a performance assessment employing concrete specimens. The study evaluated three types of Brazilian standard reinforcing steels, the CA-25 and CA-50 bars, and the CA-60 wire, emphasizing that one of them, the CA-50 bar, was studied under two conditions: with and without millscale. The performance evaluation comprised a significant range of concrete strength ($f_{ck} = 10$ to 55 MPa), with the specimens have been submitted to the attack of chlorides or exposed to the action of CO_2 (concrete carbonation). On yet the independent factors stated in the study, the steels were also evaluated considering two conditions: containing a clear surface by degreasing it with a steel brush or pre-rusted. After 14 months of testing to induce and accelerate the corrosive process, the corrosion assessment was carried out by determining the gravimetric corrosion rates. The general results showed that CA-50 steel (without millscale) presented corrosion rates about 45% higher than CA-50 with millscale, 79% higher than CA-60 and 126% higher than CA-25.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão de armaduras em estruturas de concreto constitui um dos problemas de maior exponência no contexto da *Patologia das Construções*. Atualmente é crescente e de certa forma relevante a mobilização de vários segmentos da engenharia civil no sentido de combater este fenômeno tão danoso e que tantos prejuízos econômicos traz para a sociedade de uma forma geral.

No meio acadêmico e científico, a grande maioria dos estudos que avalia o desempenho quanto à corrosão de peças de concreto armado trata de aspectos próprios do concreto como condicionantes da corrosão, tais como: características da porosidade, presença de contaminantes, presença de fissuras e deficiências na espessura de cobrimento, entre outros. Neste sentido, são muitos os trabalhos nacionais e internacionais que seguem esta vertente. Ainda são poucos, porém, os estudos que analisam a participação da variável “tipo de aço” na corrosão.

Embora as características e condições do meio (concreto) que envolve a armadura sejam muito importantes para o estabelecimento e desenvolvimento da corrosão, está provado pelos casos práticos que o concreto é falível e em condições de uso freqüentemente tornam as armaduras vulneráveis aos processos corrosivos, pela permissão à sua despassivação. A partir deste momento, a variável aço passa a ter uma influência no desenvolvimento dos processos corrosivos, uma vez que os diferentes tratamentos térmicos e mecânicos por que passam as armaduras para concreto, bem como a composição química variada e os diversos níveis de inclusão apresentados pelos tipos de aço, alteram a microestrutura do material, tornando-o mais ou menos susceptível à corrosão. Por esta razão não são incomuns os casos práticos em que se observam aços menos processados industrialmente, em obras antigas, praticamente sem apresentar corrosão; enquanto aços com elevada energia de produção, de altas dureza e resistência mecânica, mostram sinais visíveis e acentuados de corrosão, mesmo em estruturas de concreto relativamente novas e muitas vezes contendo até concretos mais nobres.

Dentro deste contexto, propõe-se este trabalho, cujos objetivos são apresentar e discutir os resultados de uma avaliação experimental com corpos-de-prova de concreto, com o intuito de verificar a resistência à corrosão dos diferentes aços carbono normalizados no Brasil destinados ao uso como armaduras para concreto armado, mediante a indução da corrosão pela ação de cloretos e pela ação da carbonatação do concreto. O estudo, realizado com corpos-de-prova de concreto, contemplou três tipos de armadura, a saber, as barras CA-25 e CA-50, e o fio CA-60, sendo que a barra CA-50 foi avaliada sob duas condições: com e sem a carepa de laminação. Ele ainda estabeleceu duas condições para a superfície dos aços: condição íntegra, obtida por decapagem com escova de aço, e condição pré-corroída, após a permanência dos aços por 8 dias em água. A faixa de concretos estudada compreendeu relações água/cimento que variaram de 0,35 a 0,8, mantendo-se fixa a consistência em 60 mm; tais concretos apresentaram resistências características à compressão que variaram de 10 a 55 MPa.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Variáveis

- *Tipo de aço disponível como armadura para concreto armado*: CA-25, CA-50 com carepa de laminação (denominado neste trabalho de CA-50c), CA-50 com remoção mecânica da carepa de laminação (denominado CA-50) e CA-60.

- *Relação água/cimento (a/c):* 0,35; 0,45; 0,55; 0,65 e 0,80.
- *Estado superficial do aço:* com a superfície íntegra (na condição de metal branco), obtida por processo mecânico de escovação por meio cerdas de aço, e apresentando uma pré-corrosão.
- *Condição de agressividade:* ataque por carbonatação e ataque por cloretos.

2.2 Materiais

2.2.1 Concretos utilizados na confecção dos corpos-de-prova

Foram estabelecidos 5 traços de concreto para a moldagem dos corpos-de-prova, mantendo-se fixa a consistência com abatimento do tronco de cone igual a 60 ± 10 mm, variando-se a relação água/cimento (a/c): 0,35; 0,45; 0,55; 0,65 e 0,8. Para a preparação destes concretos empregou-se como aglomerante o cimento Portland CP II-F-32, de acordo com a ABNT NBR 11578: 1991; e, como agregados, areia natural de leito de rio (classificada como areia média - zona 3) e pedra granítica (classificada como brita 1), de acordo com a ABNT NBR 7211:1983. A Tabela 1 apresenta as principais características e propriedades dos concretos empregados na pesquisa.

Tabela 1 - Características e propriedades dos concretos empregados na pesquisa.

CONCRETOS	Classificação-NBR 8953	C55	C40	C25	C15	C10
	f_{ck} (MPa)	55	40	25	15	10
	Relação água/cimento	0,35	0,45	0,55	0,65	0,80
Traço em massa (cimento:areia:pedra)		1:1,02: 2,00	1:1,66: 3,04	1:2,19: 3,46	1:2,86: 3,87	1:3,75: 4,75
Consumo de cimento (kg/m^3)		542	386	327	270	225
Resistência à compressão (MPa) - NBR 5739	28 dias	60,1	47,2	30,3	23,7	15,2
	90 dias	62,8	44,4	35,4	25,1	19,4
Módulo de elasticidade (Gpa) - ASTM C 469	28 dias	23,78	21,38	21,28	18,08	17,26
	90 dias	23,74	23,18	24,34	21,82	17,70
Coeficiente de Poisson ASTM C 469	28 dias	0,19	0,20	0,18	0,17	0,16
	90 dias	0,19	0,20	0,18	0,19	0,15
Resistência à tração por compres- são diametral (MPa) - NBR 7222	28 dias	3,99	3,20	3,10	2,42	2,07
	90 dias	3,19	---	3,69	2,96	2,14
Massa específica - NBR 9778	28 dias	2,39	2,39	2,38	2,36	2,33
Índice de vazios (%) - NBR 9778	28 dias	8,30	8,77	10,31	11,06	13,30
Absorção de água por imersão* (%) - NBR 9778	28 dias	3,59	3,80	4,50	4,90	5,99
Absorção de água por capilaridade (g/cm^2) - NBR 9779	28 dias	0,13	0,20	0,21	0,32	0,31
Coeficiente de permeabilidade à água (cm/s) - NBR 10786	60 dias	1,22 $\times 10^{-10}$	3,45 $\times 10^{-10}$	3,60 $\times 10^{-10}$	5,57 $\times 10^{-10}$	7,72 $\times 10^{-9}$

Os resultados de absorção de água por imersão são do concreto apenas saturados (sem fervura).

2.2.2 Aços empregados

Foram empregados barras de aço CA-25 e CA-50, e o fio de aço CA-60¹, todos com diâmetro nominal de 8,0 mm e pertencentes ao maior produtor nacional. Os aços em questão atendem à norma brasileira ABNT NBR 7480 (1996) e sua caracterização está descrita a seguir, ao longo deste subitem.

Os aços foram submetidos a um exame metalográfico, através da ASTM E 3: 1995, com o objetivo de caracterizar suas microestruturas, identificando assim as fases metálicas presentes em cada caso. Constatou-se, então, que as barras CA-25 e CA-60 apresentam uma estrutura ferrita – perlita, com a diferença de que os grãos do CA-60 são alongados, típicos de deformação plástica a frio (aço trefilado). O aço CA-50 apresenta uma estrutura perlita – ferrita (com alto teor de perlita) no seu núcleo; enquanto, perifericamente, a estrutura desse aço é martensítica. Esta estrutura é típica de aço carbono temperado e revenido.

Na seqüência, os aços foram avaliados quanto aos níveis de inclusões apresentados, segundo a ASTM E 45 - Método A: 1998, conforme se vê na Tabela 2. Pode-se observar que os aços CA-50 e CA-60 apresentam tipos e níveis de inclusões mais acentuados que o CA-25. O CA-60 contém inclusões finas e grossas de sulfetos, e finas de óxidos. O CA-50 tem inclusões finas de sulfetos, e finas e grossas de óxidos. O CA-25 tem apenas inclusões finas de sulfetos e óxidos, no nível 2, enquanto a maioria das inclusões do CA-50 e 60 são do nível 3.

Tabela 2 – Tipos e níveis de inclusões presentes nos aços CA-25, CA-50 e CA-60.

AMOSTRA	TIPO A (SULFETO) Série Fina	TIPO A (SULFETO) Série Grossa	TIPO D (ÓXIDO) Série Fina	TIPO D (ÓXIDO) Série Grossa
CA-25	2	---	2	---
CA-50	3	---	3	2 ^(*)
CA-60	2	3 ^(*)	3	---

^(*) As amostras CA-50 e CA-60 apresentaram regiões com inclusões de dimensões maiores que as mostradas na “Plate” I da ASTM E 45: 1998, sendo:

- amostra CA-50: inclusão tipo D, série grossa - maior diâmetro medido = 6 mm;
- amostra CA-60: inclusão tipo A, série grossa - largura = 4 mm.

A composição química dos aços estudados foi realizada inicialmente através de espectrometria de fluorescência de Raios X, para identificação dos elementos, e, posteriormente, através do método de combustão (ASTM E 1019: 1994) ou por espectrometria de emissão óptica (ASTM E 415: 1995), para quantificação dos teores. Dos elementos químicos quantificados (Tabela 3), pode-se observar que os teores observados no CA-25 são muito próximos aos do CA-60. Considerando suas estruturas serem bastante similares, do tipo ferrita – perlita, depreende-se que estes dois tipos de

¹ De acordo com a ABNT NBR 7480 (1996), classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal 5,0 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente e como fios os produtos de diâmetro nominal 10,0 mm ou inferior, obtidos por trefilação ou processo equivalente. Neste trabalho as barras CA-25 e CA-50 e o fio CA-60 serão indiscriminadamente chamados de “barras”, para efeito de simplificação do texto. Também terão conotação muito similar à barra, os termos aço e armadura; estes três termos serão basicamente empregados como sinônimos ao longo do texto.

aço são basicamente os mesmos, com a diferença do encruamento por que passa o CA-60. Já o CA-50 apresenta praticamente o dobro do teor de carbono dos outros dois e também um maior teor de manganês; em contrapartida tem menos enxofre. Os teores de fósforo são muito próximos entre os três aços.

Tabela 3 – Composição química das barras de aço CA-25, CA-50 e CA-60, obtida por análise química quantitativa.

ELEMENTOS DETERMINADOS (%)	AÇOS		
	CA-25	CA-50	CA-60
Ferro (Fe)	99,00	98,77	99,05
Carbono (C)	0,12	0,26	0,12
Manganês (Mn)	0,82	0,91	0,78
Fósforo (P)	0,02	0,03	0,02
Enxofre (S)	0,040	0,026	0,031

A característica física de dureza, bem como as propriedades mecânicas de tração e dobramento das barras, estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de dureza Vickers.

AMOSTRA	DUREZA VICKERS (HV1)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
CA-25	137	138	138
CA-50 (superfície)	296	293	296
CA-50 (núcleo)	219	217	215
CA-60	256	256	262

Segundo a Tabela 4, a maior dureza registrada foi verificada nas amostras CA-50, em sua superfície. Este elevado índice, que implica valores superiores ao dobro dos valores encontrados para as amostras CA-25, reflete a alta dureza da estrutura periférica martensítica apresentada pelas barras CA-50. A dureza no núcleo desta barra é mais baixa, haja vista a estrutura nesta região ser mais mole, do tipo perlita-ferrita, conforme ressaltou o estudo metalográfico. As amostras CA-60 têm elevada dureza também, mesmo apresentando sua composição química e constituição microestrutural basicamente iguais as do aço CA-25. No caso, o aspecto encruado do aço CA-60, devido às operações de trefilação a frio, explica o seu nível significativamente elevado de dureza, a despeito da estrutura ferrita-perlita ser originalmente mole, como se observa nas barras CA-25. Neste caso em particular, a estrutura é predominantemente ferrítica, típica de baixos teores de carbono e com resfriamento lento, o que explica os reduzidos valores de dureza.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas determinadas para as barras de aço empregadas na pesquisa.

Categoria da Barra/Fio	PROPRIEDADE DETERMINADA							
	Ensaio de Tração (NBR 6152)						Ens. Dobramento a 180° (NBR 6153)	
	Limite de escoamento (MPa)		Limite de resistência (MPa)		Alongamento em 10 ϕ (%)		Aspecto observado	Diâm. de pino (mm) (exig. NBR 7480)
	Valor determ.	Exigênc. NBR 7480	Valor determ.	Exigênc. NBR 7480	Valor determ.	Exigênc. NBR 7480		
CA-25	432	≥ 250	522	≥ 518 ($\geq 1,20f_y$)	25,0	≥ 18	Sem ruptura ou fissuração	16
CA-50	617	≥ 500	708	≥ 679 ($\geq 1,10f_y$)	11,0	≥ 8	Sem ruptura ou fissuração	32
CA-60	740	≥ 600	791	≥ 777 ($\geq 1,05f_y$)	6,2	≥ 5	Sem ruptura ou fissuração	40

Os resultados da Tabela 5 mostram que as armaduras estudadas atendem perfeitamente aos requisitos de escoamento, resistência à tração, alongamento e dobramento, estabelecidos pela ABNT NBR 7480 (1996).

2.3 Metodologia de Ensaio

A seguir são descritos o corpo-de-prova, os métodos para indução e aceleração da corrosão e o método para a avaliação do processo corrosivo.

2.3.1 Corpo-de-prova

Os corpos-de-prova, executados com os vários concretos em estudo, foram prismáticos, nas dimensões 7,5 cm x 10,0 cm x 10,0 cm, sendo que em cada um deles estavam presentes os quatro tipos/condições de aço definidos para o experimento, a saber: aços CA-25, CA-50 (sem carepa de laminação), CA-50c (com carepa) e CA-60. Com tal concepção, os quatro tipos de aço, para cada situação individual, foram sempre inseridos no mesmo corpo-de-prova de concreto, eliminando assim, individualmente, eventuais influências da parte executiva do corpo-de-prova no comportamento dos aços frente à corrosão, com real contribuição à análise comparativa entre os aços. Tais influências podem ser efeitos de pequenas variações na mistura, adensamento e cura do concreto, entre outros.

As barras empregadas possuíam 13,0 cm de comprimento e 8,0 mm de diâmetro nominal, estando inseridas parcialmente no corpo-de-prova de concreto. A extensão da barra embutida no concreto correspondia a 8,0 cm e o comprimento da parte metálica que se projetava para fora do corpo-de-prova era de 5,0 cm. A espessura do concreto de cobertura das armaduras foi definida em 1,0 cm para todos os casos e na base do corpo-de-prova, em relação à extremidade embutida da barra, a espessura de concreto foi de 2,0 cm. As barras foram posicionadas próximas dos cantos ou vértices do corpo-de-prova, resguardando-se rigorosamente 1,0 cm para cada um dos dois lados correspondentes ao vértice ao qual se posicionava o aço.

É importante salientar que todas as barras foram decapadas mecanicamente com escova de aço, em momento imediatamente anterior ao seu processo de envolvimento com fitas isolantes². No caso das barras pré-corroídas, logo após o envolvimento das fitas procedia-se sua imersão em uma lâmina de água, imersão esta realizada na parte exposta à corrosão, correspondente aos 5,0 cm de comprimento. Assim elas permaneciam por 8 dias, com a renovação da água a cada 3 dias. Após este processo de pré-corrosão, as barras estavam, então, aptas para ser embutidas no concreto.

Concluída a moldagem dos corpos-de-prova, os concretos foram curados durante 24 horas no interior das fôrmas e por mais 27 dias em câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade superior a 90%.

2.3.2 Métodos para indução e aceleração da corrosão nos corpos-de-prova de concreto

Após o período de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova ficaram por exatamente 62 dias estocados em sala climatizada com temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 55%, antes do início dos ensaios para indução da corrosão. Na seqüência estão apresentados os métodos de indução e aceleração da corrosão através de cloretos e através da carbonatação do concreto.

a) Indução e aceleração da corrosão através do ataque por cloretos

Para indução e aceleração da corrosão via ação de cloretos foram utilizados dois métodos, a saber, o método de imersão parcial dos corpos-de-prova em solução agressiva e o método de imersão alternada ou imersão-emersão dos corpos-de-prova (também conhecido por molhagem e secagem). Dentro do tempo total de ensaio de 14 meses, os primeiros oito meses foram destinados à imersão parcial e os outros seis meses seguintes foram dedicados aos ciclos de molhagem e secagem.

A solução utilizada na imersão parcial foi uma solução contendo cloreto de sódio diluído a 5%, teor este próximo ao valor relatado pela literatura científica para a concentração de NaCl encontrada na água do mar, em torno de 3,5%. Nos ciclos de molhagem e secagem, o teor de 5% foi aumentado para 10%, conforme empregado também em outros trabalhos (BROWN et al., 1978; JOHN et al., 1981 e CASCUDO, 1991), com o objetivo de aumentar ainda mais a concentração de íons Cl⁻ na solução e,

² As barras foram envolvidas por um sistema duplo de fitas isolantes. Inicialmente passou-se uma fita muito flexível e razoavelmente aderente, que recebia sobre si um segundo tipo de fita mais espessa e resistente, para dar proteção adicional. Foi deixado um comprimento de barra exposto dentro do concreto de 5,0 cm, correspondente a áreas expostas de 12,57 cm², para as barras CA-25 e CA-60, e 12,88 cm², para as barras CA-50 e CA-50c (o acréscimo de área neste caso deve-se à presença de nervuras neste tipo de armadura).

por conseqüência, sua eficácia para promover e acelerar a corrosão, mormente naqueles concretos de estrutura de pasta mais compacta, de relações água/cimento 0,35 e 0,45.

O procedimento da imersão parcial consistiu em colocar os corpos-de-prova em um recipiente contendo a solução descrita anteriormente, de tal forma que o nível dessa solução correspondesse a 1/3 da altura dos corpos-de-prova, ou seja, 3,3 cm aproximadamente da base do corpo-de-prova. A solução era substituída a cada mês, de maneira a garantir o nível de aeração adequado ao desenvolvimento da corrosão.

Os períodos de molhagem e secagem que compreendiam a totalidade de um ciclo correspondiam a 7 dias, sendo que durante três dias procedia-se a imersão em solução e nos quatro dias complementares realizava-se a secagem. A imersão foi realizada em um reservatório igual ao da imersão parcial, desta feita com o nível da solução atingindo quase a altura total dos corpos-de-prova, deixando-se uma margem de aproximadamente 1,0 cm da face de topo do corpo-de-prova, para que a solução não atingisse diretamente as partes externas das barras de aço. A secagem, por sua vez, foi implementada por meio de uma estufa com circulação forçada de ar, na qual os corpos-de-prova mantiveram-se à temperatura de 50°C durante os quatro dias de secagem.

b) Indução e aceleração da corrosão através do ataque por carbonatação do concreto

Neste caso a indução da corrosão deu-se pela submissão dos concretos ao ataque do CO₂, através da inserção dos corpos-de-prova em uma câmara de carbonatação com controle de temperatura, umidade e concentração de CO₂ no ar. No presente caso ficaram estabelecidas uma temperatura de 28°C, uma umidade relativa de 59% e um teor de CO₂ de 5%.

Após o ensaio de carbonatação do concreto, que durou no total cerca de oito meses, os corpos-de-prova foram colocados sob condição de imersão parcial em água (com a lâmina de água atingindo a 1/3 da altura do corpo-de-prova) por um período de três meses. Nos três meses restantes, perfazendo assim o tempo total de ensaio de 14 meses, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem rigidamente iguais aos empreendidos no caso do ataque por cloretos, exceto pela solução, que, no caso em questão, era água da rede pública de distribuição. Similarmente ao que ocorria com a solução de cloretos, procedia-se a troca da água a cada mês, com o propósito de manter elevado o nível de aeração.

2.3.3 Método empregado para a avaliação da corrosão

A corrosão foi avaliada mediante a determinação da taxa de corrosão gravimétrica, dividindo-se a massa corroída (em mg) pela área lateral exposta da barra (em dm²) e pelo tempo de corrosão ativa (em dias), obtendo-se assim as taxas de corrosão em mg/dm²/dia (mdd). Pela lei de Faraday, através de fatores de conversão, as referidas taxas de corrosão em mdd foram então convertidas e expressas em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Para a limpeza e remoção dos produtos de corrosão, objetivando a determinação da massa corroída, seguiu-se o procedimento descrito pela ASTM G 1: 1988, empregando-se uma solução à base de ácido clorídrico, com diluição de 50% em água destilada (em volume), contendo 3,5 gramas de hexametenotetramina por litro de solução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados inicialmente os resultados de taxa de corrosão gravimétrica e em seguida esses resultados são discutidos com base em uma análise estatística realizada.

3.1 Resultados Obtidos

Os resultados de taxa de corrosão gravimétrica, que expressam a velocidade com que o aço se dissolve dentro do período ativo de corrosão, são apresentados a seguir. As Figuras 1 a 4 mostram os valores médios de taxa de corrosão gravimétrica para os quatro tipos de barras, considerando as várias relações água/cimento. Nesses gráficos, além dos valores médios, são expressos também os desvios padrão das amostras (s), que dão uma idéia da dispersão dos resultados.

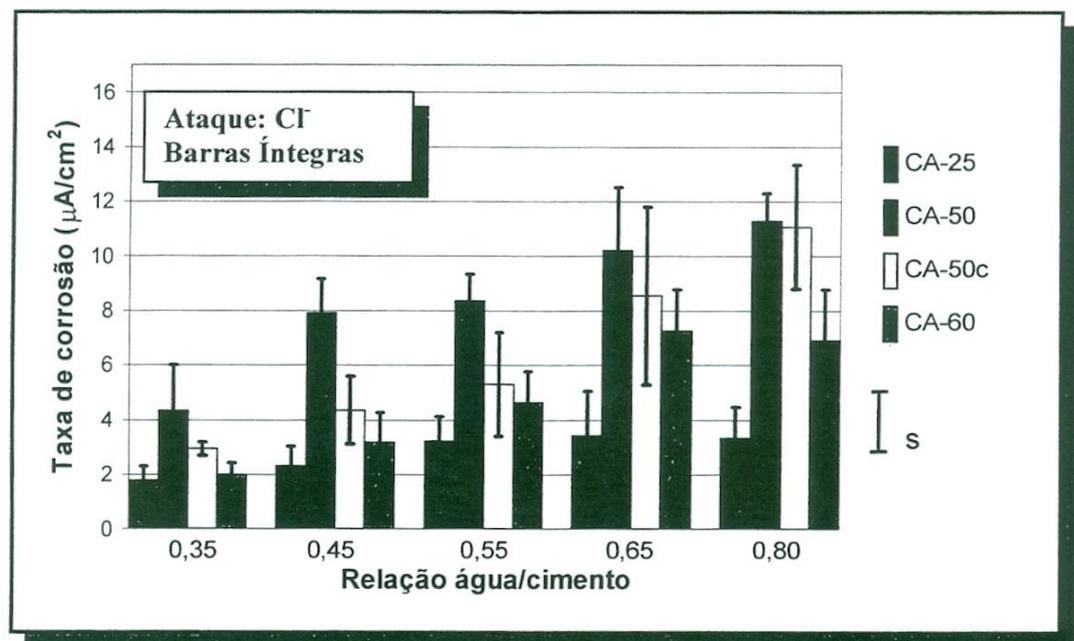


Figura 1 – Taxa de corrosão gravimétrica média das barras de aço, em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, variando com a relação água/cimento. Situação: corpos-de-prova atacados por cloretos, contendo barras inicialmente íntegras.

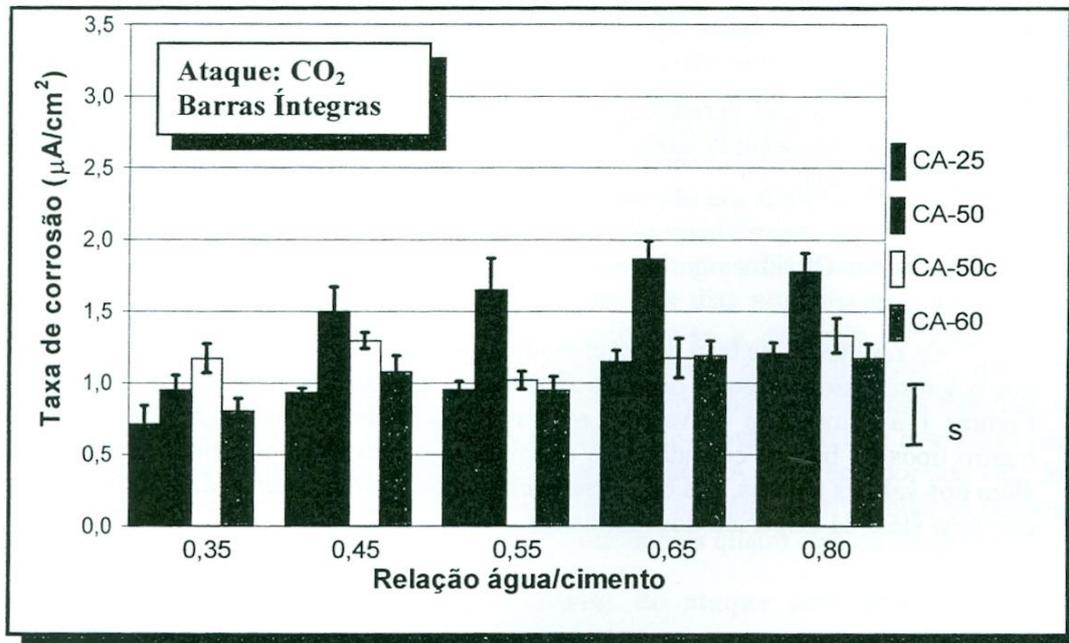


Figura 2 – Taxa de corrosão gravimétrica média das barras de aço, em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, variando com a relação água/cimento. Situação: corpos-de-prova atacados por carbonatação, contendo barras inicialmente íntegras.

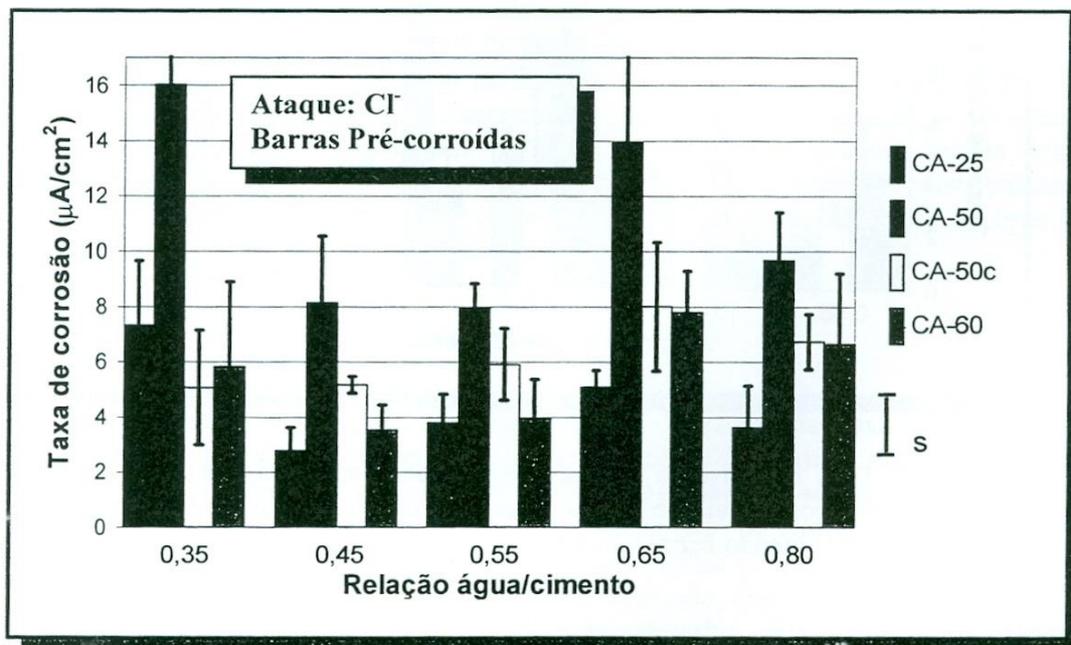


Figura 3 – Taxa de corrosão gravimétrica média das barras de aço, em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, variando com a relação água/cimento. Situação: corpos-de-prova atacados por cloretos, contendo barras inicialmente pré-corroídas.

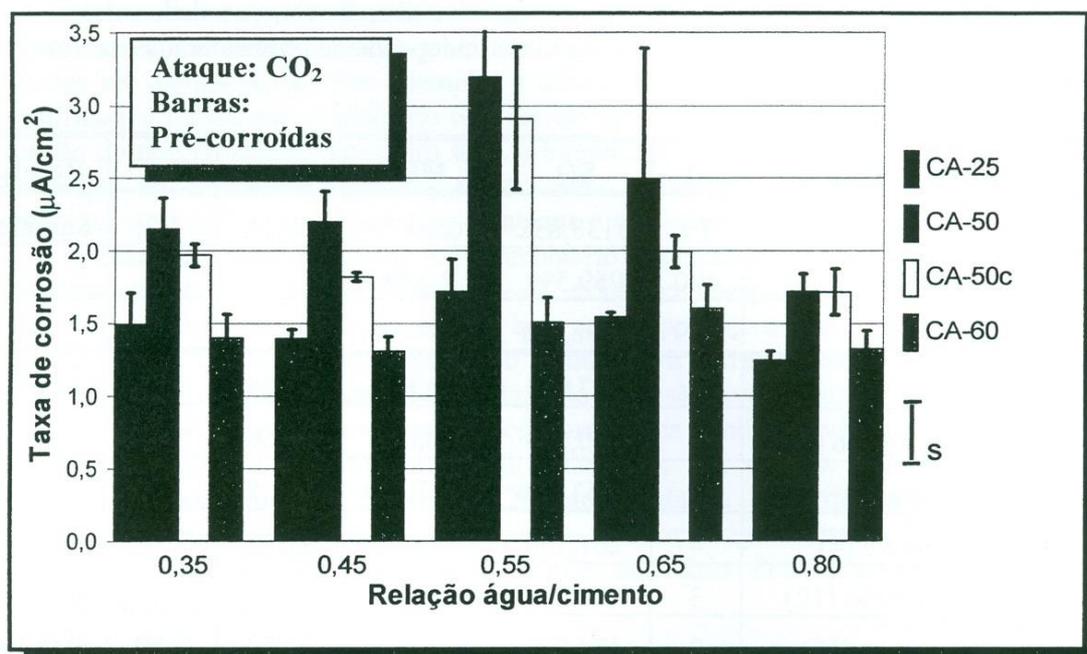


Figura 4 – Taxa de corrosão gravimétrica média das barras de aço, em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, variando com a relação água/cimento. Situação: corpos-de-prova atacados por carbonatação, contendo barras inicialmente pré-corroídas.

3.2 Análise Estatística e Discussão dos Resultados

Os valores de taxa de corrosão gravimétrica foram submetidos a uma análise estatística de variâncias (ANOVA), segundo o modelo fatorial com 4 fatores fixos (variáveis independentes: tipo de aço, condição superficial do aço, tipo de ataque, relação água/cimento). A Tabela 6 resume os resultados obtidos nessa análise, onde os valores de F obtidos (F_{calc}) foram comparados com os valores de F tabelados (F_{tab}) para um nível de significância de 5%. Tais resultados mostraram que o modelo fatorial adotado é significativo, uma vez que o valor de F_{calc} do modelo é maior que o F_{tab} , e que 84% da variação total dos dados é explicada pelo modelo ($R^2 = 0,84$).

A análise de variâncias também mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais analisados: tipo de aço, condição superficial dos aços, tipo de ataque e relação água/cimento, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na taxa de corrosão. Uma importante consideração sobre este aspecto diz respeito à intensidade de influência dos fatores. Neste sentido, tomando-se como base a magnitude dos valores de F_{calc} , pode-se constatar que o fator mais influente na taxa de corrosão foi o *tipo de ataque*, que resultou indiscutivelmente no efeito mais importante. Em segundo lugar, também com destacada relevância, apresentou-se a variável *tipo de aço*, que resultou em um valor de F significativamente maior em comparação com os fatores *condição superficial do aço* e *relação água/cimento*, os quais se posicionaram, respectivamente, em terceiro e quarto lugares, no que se refere ao grau de influência sobre a taxa de corrosão.

Tabela 6 - Resultados da análise de variâncias realizada com os dados de taxa de corrosão, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

Efeito	GL	SQ	MQ	F _{calc.}	F _{tab.}	Result.
Modelo	79	5138,832	65,048	27,11	1,3	Signific.
Erro (resíduo)	400	959,599	2,399	---	---	---
Total	479	6098,431	---	---	---	---
Aço (1)	3	707,055	235,685	98,24	2,60	Signific.
Condição do aço (2)	1	100,003	100,003	41,68	3,84	Signific.
Ataque (3)	1	2763,280	2763,280	1151,85	3,84	Signific.
Relação a/c (4)	4	207,736	51,934	21,65	2,37	Signific.
Aço x condição (12)	3	39,636	13,212	5,51	2,60	Signific.
Aço x ataque (13)	3	414,039	138,013	57,53	2,60	Signific.
Condição x ataque (23)	1	7,760	7,760	3,24	3,84	Não sig.
Aço x relação (14)	12	76,440	6,370	2,66	1,75	Signific.
Condição x relação (24)	4	191,568	47,892	19,96	2,37	Signific.
Ataque x relação (34)	4	195,068	48,767	20,33	2,37	Signific.
Aço x cond. x ataque (123)	3	41,430	13,810	5,76	2,60	Signific.
Aço x cond. x rel. (124)	12	80,880	6,740	2,81	1,75	Signific.
Aço x ataque x rel. (134)	12	92,520	7,710	3,21	1,75	Signific.
Cond. x ataque x rel. (234)	4	150,200	37,550	15,65	2,37	Signific.
Aço x cond. X ataque x relação (1234)	12	71,208	5,934	2,47	1,75	Signific.
Erro (resíduo)	400	959,599	2,399	---	---	---

$$R^2_{\text{mod}} = 0,84, \text{ sendo: } R^2_{\text{mod}} = 1 - \text{SQ}_{\text{erro}}/\text{SQ}_{\text{total}}$$

$$R_{\text{mod}} = 0,92$$

Onde: GL = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados;
 F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;
 Result. = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não;
 R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo; e
 R_{mod} = coeficiente de correlação do modelo.

Com relação às interações duplas e triplas, pode-se observar que todas elas resultaram significativas, com exceção da interação *condição superficial do aço x tipo de ataque*. Esse resultado global indica uma sinergia dos fatores, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a taxa de corrosão é dependente da outra variável associada a ela (no caso de uma determinada interação dupla ser significativa),

dependente de mais duas variáveis (no caso de uma dada interação tripla ser significativa) ou dependente de mais três variáveis (no caso da interação de quatro fatores ser significativa). Por exemplo, a interação *tipo de aço x tipo de ataque* ser significativa indica que o efeito do tipo de aço sobre a taxa de corrosão é alterado em função do tipo de ataque; por outro lado, a interação *condição superficial do aço x tipo de ataque* não ter sido significativa, mostra que o efeito da condição superficial sobre a corrosão não é influenciado pelo tipo de ataque e vice-versa.

Sobre o resultado global, um comentário é pertinente. Para cada combinação estudada *tipo de aço x relação água/cimento*, existe um comportamento distinto quando é alterada a condição superficial do aço, bem como, principalmente, quando se altera o tipo de ataque. Isto é reflexo da interação significativa entre os quatro fatores. De uma maneira geral, os maiores resultados de taxa de corrosão foram obtidos com o aço CA-50 (sem carepa), submetido ao ataque por cloretos, na condição pré-corroída e para os concretos de relação água/cimento igual a 0,65. Por sua vez, os menores resultados foram registrados para as barras CA-25, submetidas à ação de carbonatação, na condição superficial íntegra e para os concretos de relação água/cimento 0,35.

A seguir são então comentados os efeitos dos vários fatores na taxa de corrosão gravimétrica.

3.2.1 Influência do tipo de aço

Tendo em vista a influência da variável *tipo de aço* mostrar-se significativa, realizou-se uma comparação múltipla de médias pelos testes de Duncan e Tukey, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si e separar aquelas que diferem, distinguindo assim os grupos. Os dois testes apresentaram o mesmo resultado, mostrando a existência de quatro grupos distintos de aços referentes aos seus resultados de taxa de corrosão. Isto significa que, do ponto de vista estatístico, todos os quatro aços em estudo são diferentes no que diz respeito aos seus comportamentos frente à corrosão. No sentido de ratificação dessa tendência geral e tendo em vista os resultados de carbonatação terem apresentado, visualmente, valores mais próximos entre os tipos de aço, em comparação aos observados para o ataque por cloretos (conforme as Figuras 1 a 4), realizou-se os testes de Duncan e Tukey separadamente para os dados relativos ao ataque por cloretos e para aqueles relacionados à ação da carbonatação. Os resultados referentes aos cloretos ratificaram a tendência geral, com os quatro aços pertencentes a grupos distintos. Todavia, referente aos dados de carbonatação, a comparação de médias agregou os aços CA-25 e CA-60 em um único grupo, posicionando o CA-50c em um outro grupo e o CA-50 num terceiro grupo. Deduz-se deste resultado, que a forma mais branda e homogênea do ataque por carbonatação do concreto levou a uma aproximação dos valores de taxa de corrosão comparativamente entre os tipos de aço, principalmente entre o CA-25 e CA-60, que passaram a não demonstrar mais diferença significativa entre eles. É importante frisar que estes aços apresentam basicamente a mesma microestrutura, composta por ferrita e perlita, e também uma composição química bastante similar, diferenciando-se apenas pelo trabalho mecânico a frio (trefilação) aplicado ao fio CA-60.

A Figura 5 expressa a estimativa da média global para cada um dos quatro aços, bem como o erro padrão da média e o desvio padrão, delimitando, entre as linhas tracejadas, os quatro grupos distintos ressaltados pela comparação múltipla de médias. É importante observar nessa figura, a qual expõe o resultado global do experimento sob o

ponto de vista de análise dos aços, a tendência geral da corrosão, cujos resultados, relativos aos tipos de aço, evoluem de forma crescente obedecendo à seguinte ordem: CA-25, CA-60, CA-50c e CA-50.

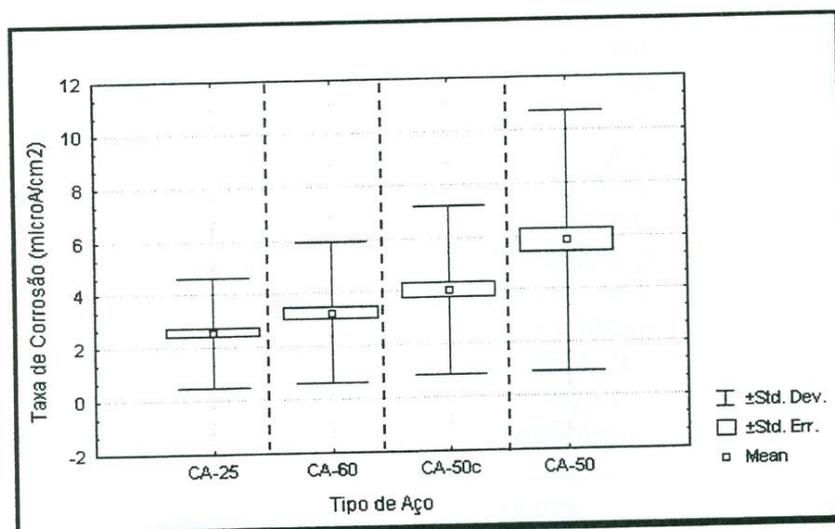


Figura 5 - Estimativa da média dos valores de taxa de corrosão gravimétrica, com seu erro padrão e desvio padrão, para cada tipo de aço. As linhas tracejadas definem os grupos que se diferem significativamente.

Deste quadro geral da Figura 5, pode-se observar que, do aço CA-25 para o CA-50, há um crescimento médio na taxa de corrosão de 126%. Este incremento é de aproximadamente 56% do CA-25 para o CA-50c e de cerca de 26% do CA-25 para o CA-60. Comparando-se o CA-60 com o CA-50, o acréscimo na taxa é de 79%, diferença esta que passa a ser de 24% confrontando-se o CA-60 com o CA-50c. Por fim, entre o CA-50c e o CA-50, o aumento é da ordem de 45%. Esta última diferença de quase 50% nos valores globais da taxa de corrosão entre o CA-50c e CA-50, o que foi considerada uma diferença significativa pela ANOVA, ressalta a importância que a carepa de laminação possui na proteção contra a corrosão. Este resultado obtido por meio de análise realizada no interior do concreto confirma uma tendência geral de proteção que a carepa exerce contra a corrosão, destacada por um segmento relevante do meio técnico-científico. Citando alguns exemplos da literatura acerca da carepa, registra-se aqui a posição de HELENE (1993), que salienta uma possível proteção da carepa contra a corrosão durante o transporte de armaduras e o seu armazenamento em canteiros de obras, desde que elas não tenham sido dobradas para não comprometer a integridade da camada de óxidos. O mesmo autor já se referia, em meados dos anos oitenta (HELENE, 1986), a uma provável proteção da carepa de laminação contra a corrosão úmida, de natureza preponderantemente eletroquímica (como a que ocorre no interior do concreto), fato este devidamente comprovado no presente trabalho. Por sua vez, PANOSSIAN (1993), reportando-se a metais enterrados, destaca a função protetora da carepa de laminação, chamando a atenção para o fato de que falhas ou descontinuidades nessa camada de óxidos propiciam a ocorrência de corrosão localizada.

Os resultados evidenciam, de uma forma geral, que o aço de estrutura martensítica (CA-50 e CA-50c) apresenta maior propensão à corrosão do que os aços de

estrutura ferrita-perlita (CA-25 e CA-60), ressaltando que esta diferença é fortemente acentuada quando a estrutura superficial martensítica apresenta-se sem carepa, que é o caso do CA-50, o qual se mostrou muito menos resistente à corrosão em comparação com os demais aços. É importante ainda enfatizar que a diferença nos resultados de corrosão entre o CA-50 e CA-50c é superior à diferença entre os aços CA-25 e CA-60, denotando que a ausência da carepa de laminação para o aço CA-50 é um fator mais negativo, no tocante à ocorrência da corrosão, do que é a trefilação para os aços doce de estrutura ferrita-perlita.

Depreende-se, então, que o efeito da dissolução forçada do carbono na rede cristalina da ferrita, gerando uma solução sólida supersaturada de carbono, altamente tensionada (estrutura martensítica), mostrou-se mais significativa para o desenvolvimento da corrosão do que o efeito da formação de pares galvânicos entre a ferrita e perlita, conforme destacado por TREJO (1997) e ASKELAND (1990), ou do que a passivação mais imperfeita existente na estrutura bifásica do aço CA-60 e CA-25 (ferrita-perlita), conforme salientado por DOBBELAAR et al. (1992) e PAVARTHARTHINI et al. (1996). Assim, a estrutura martensítica com teor de carbono igual a 0,26%, correspondendo ao dobro do valor determinado para os aços de estrutura ferrita-perlita (conforme destaca a Tabela 3), tem certamente um nível muito elevado de tensões internas, o que confere às barras CA-50 (principalmente) e CA-50c, uma propensão maior à corrosão. Ressalta-se ainda, relativo à composição química, que, além do carbono, o aço CA-50 apresentou também um maior teor de manganês em relação aos aços CA-25 e CA-60. De acordo com COLPAERT (1974) e PANNONI et al. (1994), C e Mn são elementos que contribuem para reduzir a resistência à corrosão em aços carbono.

3.2.2 Influência da condição superficial do aço

A Figura 6 apresenta a estimativa da média das taxas de corrosão gravimétrica, com seu erro padrão e desvio padrão, para cada uma das duas condições superficiais do aço estabelecidas na pesquisa.

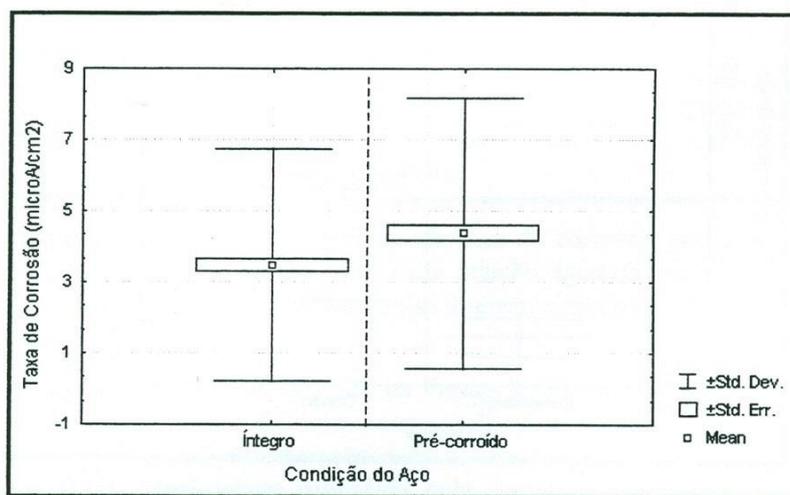


Figura 6 - Estimativa da média dos valores de taxa de corrosão gravimétrica, com seu erro padrão e desvio padrão, para cada uma das condições superficiais dos aços, a saber, barras íntegras e pré-corroídas. A linha tracejada separa os dois grupos que se diferem significativamente.

Pode-se observar, da comparação entre as médias gerais, que existe uma nítida tendência de maior desenvolvimento à corrosão quando a superfície dos aços apresentasse previamente corroída. O aumento médio na taxa de corrosão foi de cerca de 27% ao se mudar a superfície decapada mecanicamente, via escovação com cerdas de aço, para uma superfície decapada mecanicamente no início e posteriormente submetida a um processo de corrosão em água (conforme comentado no subitem 2.3.1). Vale salientar que o efeito da condição superficial do aço foi significativo também analisando-se separadamente os resultados oriundos de corpos-de-prova atacados por cloretos e por carbonatação do concreto, o que confirma a hipótese de maior propensão à corrosão para a superfície pré-corroída, pois tem-se um resultado não apenas geral, mas departamentado por formas de ataque bem distintas.

Este resultado significativo da condição superficial do aço está de acordo com JOHN et al. (1981), que relatam que o aço pré-corroído, mesmo de maneira branda, tem propensão à corrosão maior do que o aço de superfície totalmente íntegra. Segundo os referidos pesquisadores, as superfícies metálicas pré-corroídas e irregulares, com textura rugosa (áspera) e não uniforme, não permitem uma formação adequada da película de passivação, havendo assim a presença de defeitos no filme de óxidos ao longo da extensão metálica, defeitos estes que contribuiriam no sentido de abreviar a vida útil das armaduras. Tal linha de resultados é também respaldada por KREIJER et al. (1977), que afirmam que limpeza superficial induz um efeito positivo sobre a sensibilidade de armaduras protendidas no tocante ao desenvolvimento de corrosão sob tensão.

3.2.3 Influência do tipo de ataque

A Figura 7 apresenta a estimativa da média dos valores de taxa de corrosão gravimétrica para cada um dos dois processos empregados para induzir e acelerar a corrosão nos corpos-de-prova de concreto, quais sejam, ataque via cloretos e via carbonatação do concreto.

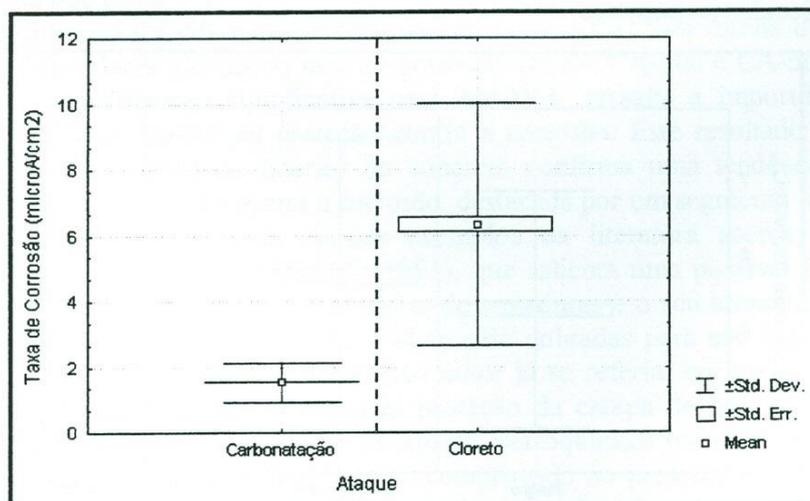


Figura 7 - Estimativa da média dos valores de taxa de corrosão gravimétrica, com seu erro padrão e desvio padrão, para cada um dos tipos de ataque, a saber, indução e aceleração da corrosão mediante a ação de cloretos e de carbonatação do concreto. A linha tracejada separa os dois grupos que se diferem significativamente.

Pode-se observar, da figura anterior, que foi incontestável a diferença nos resultados conforme o tipo de ataque. Para os corpos-de-prova cujo processo de indução e aceleração da corrosão deu-se através da ação de solução contendo cloretos, a média geral das taxas de corrosão foi aproximadamente 4,2 vezes o valor médio obtido quando o processo de corrosão foi iniciado pela carbonatação do concreto, o que significa um aumento da ordem de 316%.

Procede aqui um comentário, qual seja, o de que não foi objeto deste trabalho a comparação direta entre os tipos de ataque. É possível que, diante das condições estabelecidas no experimento, a ação de cloretos tenha sido potencializada, enquanto o processo de carbonatação adotado tenha sido brando, diante da amplitude de agressividade que esta forma de ataque pode resultar. Todavia, o objetivo de submeter os corpos-de-prova à ação de cloretos e carbonatação foi a de estender o campo de observação, visando uma análise mais abrangente e, por conseguinte, mais consistente, a respeito do comportamento relativo entre os tipos de aço.

3.2.4 Influência da relação água/cimento

A Figura 8 apresenta as médias gerais dos valores de taxa de corrosão para cada relação a/c.

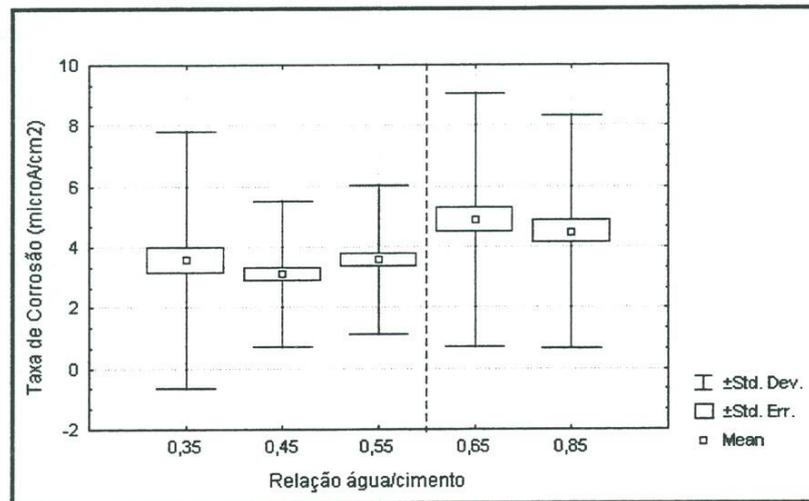


Figura 8 - Estimativa da média dos valores de taxa de corrosão gravimétrica, com seu erro padrão e desvio padrão, para cada relação água/cimento. A linha tracejada divide os dois grupos de valores que se diferem significativamente.

O comportamento global descrito na Figura 8 mostra valores mais altos de taxa de corrosão para a relação a/c 0,35 em comparação com a relação a/c 0,45, bem como para a relação a/c 0,65 em comparação com a relação a/c 0,8. Este resultado foge à expectativa natural, amplamente difundida pela literatura, de que relações a/c mais baixas resultam em menores dados de corrosão, haja vista o referido parâmetro do concreto representar um dos principais elementos definidores da porosidade da pasta de cimento endurecida, tanto no que se refere à quantidade total de vazios quanto relativo à interconexão de poros. Portanto, uma menor relação a/c implica em menor porosidade

do concreto, maior compactidade, menor índice de vazios, menor permeabilidade e, referindo-se a uma característica mais ligada à corrosão, maior resistividade do concreto. Com o intuito de entender melhor o porquê do resultado expresso na Figura 8, empreendeu-se a análise em função da relação a/c considerando as duas condições superficiais do aço em separado, conforme pode-se ver na Figura 9.

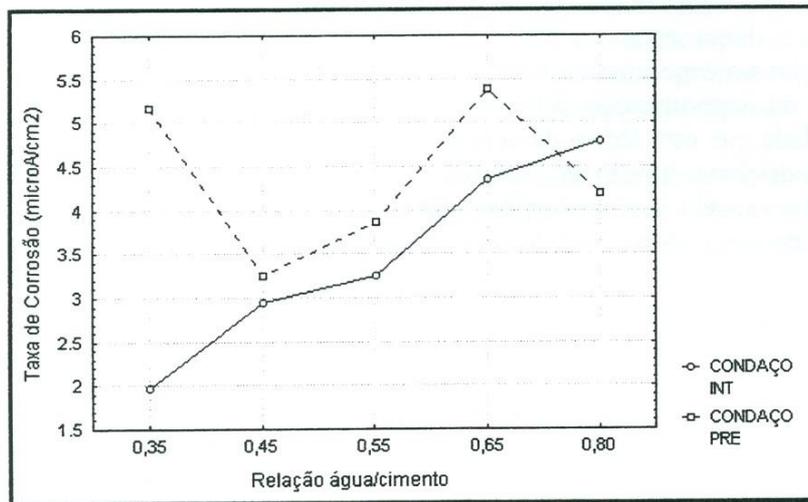


Figura 9 - Valores médios da taxa de corrosão em função da relação água/ cimento, considerando separadamente as duas condições superficiais do aço: íntegra e pré-corroída.

Observa-se, da figura anterior, que os dados de corrosão para a condição inicialmente íntegra seguem perfeitamente a tendência de crescimento com o aumento da relação a/c, como esperado. Porém o mesmo não acontece com os dados para a condição pré-corroída, sendo eles, inclusive, responsáveis por alterarem o comportamento geral (Figura 8), desvirtuando-o da tendência clássica esperada.

O que parece ter ocorrido para explicar este comportamento mais incoerente na condição pré-corroída é que, com a pré-corrosão, alteram-se os requisitos da plena ou mais adequada passivação, conforme discutido por JOHN et al. (1981). Desta feita, a influência da relação a/c é minorada em função da debilidade e falhas do filme passivo, ou seja, uma significativa contribuição que uma relação a/c mais baixa poderia dar no sentido de aumentar o tempo de iniciação da corrosão (até a despassivação) não ocorre ou é minimizada, tendo em vista as deficiências do filme de passivação.

Um outro fator que a pré-corrosão incorporou aos resultados foi o aumento em sua variabilidade, o que significou um comprometimento da representatividade do valor médio, principalmente no caso do ataque por cloretos, para a relação a/c 0,35, onde os coeficientes de variação variaram de 31,8% a 52,8% (em função do tipo de aço), e também para a relação a/c 0,8, onde os coeficientes de variação variaram de 14,5% a 41,5%. Justamente nestas duas relações a/c, os valores médios, constantes na Figura 9, são incoerentes com a expectativa, o que denota que a estimativa da média nessas duas situações pode não ter sido boa, ante a variabilidade elevada constatada em cada caso.

Para analisar quais as relações a/c que se diferem significativamente, realizou-se a comparação múltipla de médias através dos testes de Duncan e Tukey, os quais indicaram sempre o mesmo resultado. Tomando-se inicialmente todos os dados, os

testes concluíram haver dois grupos distintos, sendo um deles composto pelas relações a/c 0,45; 0,35 e 0,55, e o outro pelas relações 0,8 e 0,65.

Retirando da comparação de médias os dados de corrosão referentes às barras pré-corroídas, pelas razões já discutidas anteriormente, os testes indicaram a existência de três grupos: um de melhor desempenho para a relação a/c 0,35, um segundo e intermediário para as relações a/c 0,45 e 0,55 e, por fim, um terceiro grupo com o pior desempenho referente às relações a/c 0,65 e 0,8. Este resultado é mais adequado para representar o comportamento da relação a/c como um fator de proteção contra a corrosão da armadura no concreto.

4. CONCLUSÕES

Deste trabalho, as seguintes conclusões puderam ser tiradas:

- Houve diferenças significativas entre os três tipos de aço, sob as quatro condições estudadas, no tocante ao seu comportamento frente à corrosão.
- Estatisticamente os aços se situaram em quatro grupos distintos, mostrando que, sob as mesmas condições gerais (concreto, ambiente, etc.), eles se diferenciaram quanto à resistência à corrosão. Assim, a variável *tipo de aço carbono* representa um fator importante a ser considerado no contexto dos processos corrosivos das estruturas de concreto armado.
- A maior propensão à corrosão foi verificada nas barras de aço CA-50 sem carepa, vindo em seguida a barra CA-50 com carepa, posteriormente o fio CA-60 e, com o melhor desempenho, mostrou-se a barra CA-25. As diferenças entre as médias gerais dos valores de taxa de corrosão foram de 45% entre as barras CA-50 e CA-50c, 24% entre as barras CA-50c e CA-60 e 26% entre as barras CA-60 e CA-25.
- O pior desempenho do aço de estrutura martensítica (CA-50 e CA-50c) em relação aos de estrutura ferrita-perlita (CA-60 e CA-25) deve-se provavelmente ao maior nível de tensões internas daquela estrutura, associado ainda ao fato de que ela apresentou maiores teores de carbono e manganês, que são elementos tidos como redutores da resistência à corrosão de aços carbono.
- Verificou-se influência significativa da pré-corrosão como um fator negativo à durabilidade das armaduras, tendo os valores médios da taxa de corrosão sido 27% mais altos quando as barras foram avaliadas na condição pré-corroída.
- Verificou-se também uma influência significativa da carepa de laminação como elemento protetor do aço CA-50, tendo os valores médios de taxa de corrosão sido 45% mais altos quando se empregou a barra de aço CA-50 sem carepa.
- Na análise dos concretos, pôde-se observar que o comportamento quanto à corrosão registrou um salto de qualidade significativo quando a relação água/cimento diminuiu de 0,65 para 0,55. Na série de corpos-de-prova com barras íntegras, atingiu-se ainda mais um patamar de qualidade, desta feita quando a relação água/cimento mudou de 0,45 para 0,35.
- Foi muito significativa a influência do tipo de ataque na corrosão, tendo a ação de cloretos um efeito muito mais deletério do que a ação da carbonatação do concreto.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. 2. SI ed. London, Chapman & Hall, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado**; especificação; NBR 7480. Rio de Janeiro, 1996.
- BROWN, B. L.; HARROP, D.; TREADAWAY, K. W. J. Corrosion testing of steels for reinforced concrete. **British Research Establishment**, Current Paper CP 45/78. BRE, Garston, 1978.
- CASCUDO, O. **Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado**. São Paulo, 1991. 230 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974. 412 p.
- DOBBELAAR, J. A. L.; HERMAN, E. C. M.; WIT, J. H. W. The influence of the microstructure on the corrosion behavior of Fe-25Cr. **Corrosion Science**, v. 33, n. 5, p. 779-90, 1992.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- _____. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1. ed. São Paulo, PINI/IPT, 1986. 47 p.
- JOHN, D. G.; SEARSON, P. C.; DAWSON, J. L. Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions. **British Corrosion Journal**, v.16, n.2, p. 103-6, 1981.
- KREIJGER, P. C.; SLUIJTER, W. L.; BERGSMA, F.; ETIENNE, C. F.; BOON, J. W. Stress corrosion in prestressing steel. **Heron** 22, n. 1, p. 1-76, 1977.
- PANNONI, F. D.; DOI, S. N.; SOUZA, W.; LOURENÇO, P. T.; WOLYNEC, S. Efeito da composição química sobre a resistência à corrosão atmosférica de chapas de aço destinadas à estampagem - um estudo em escala laboratorial. In: COLÓQUIO NACIONAL DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA, 2., São Paulo, 1994. **Anais**. São Paulo, IPT/ABRACO, 1994. p. 41-50.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1. ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993. v. 2.
- PARVATHAVARTHINI, R. K.; DAYAL, R. K.; GNANAMOORTHY, J. B. Effect of microstructure on corrosion behavior of 9 % chromium – 1 % molybdenum steel. **Corrosion**, v. 52, n. 7, p. 540-51, Jul., 1996.
- TREJO, D. **Microstructure design and electrochemical evaluation of Fe/2Si/01C dual phase ferritic martensitic steel for concrete reinforcement**. Berkeley, USA, 1997. PhD thesis – University of California, Berkeley.

BOLETINS TÉCNICOS PUBLICADOS

- BT/PCC/253 Avaliação de Áreas Urbanas através dos Usuários: O Caso do Centro de Guaratiguetá. MAURICIO MONTEIRO VIEIRA, WITOLD ZMITROWICZ. 20p.
- BT/PCC/254 O Conceito de Tempo Útil das Pastas de Gesso. RUBIANE PAZ DO NASCIMENTO ANTUNES, VANDERLEY MOACYR JOHN. 15p.
- BT/PCC/255 Impactos Ambientais Causados por Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso de Maringá/PR. GENEROSO DE ANGELIS NETO, WITOLD ZMITROWICZ. 24p.
- BT/PCC/256 Produção e Obtenção de Barras de Fios de Aço para Concreto Armado. OSWALDO CASCUDO MATOS, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 16p.
- BT/PCC/257 Influência do Tipo de Cal Hidratada na Reologia de Pastas. FABÍOLA RAGO, MARIA ALBA CINCOTTO. 25p.
- BT/PCC/258 Metodologia para Análises Ergonômicas de Projetos Arquitetônicos com Base na Teoria dos Sistemas Nebulosos. ANA LÚCIA NOGUEIRA DE CAMARGO HARRIS, CHENG LIANG-YEE. 33p.
- BT/PCC/259 Estudo da Água do Poro de Pastas de Cimento de Escória pelo Método da Água de Equilíbrio. CLÁUDIA T. A. OLIVEIRA, VAHAN AGOPYAN. 12p.
- BT/PCC/260 Concreto com Fibras de Aço. ANTÔNIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO. 68p.
- BT/PCC/261 Alocação de Espaços em Arquitetura: Uma nova metodologia utilizando lógica nebulosa e algoritmos genéticos. MARIO MASAGÃO ANDREOLI, DANTE FRANCISCO VICTÓRIO GUELPA. 24p.
- BT/PCC/262 Contribuição ao Estudo da Resistência à Corrosão de Armaduras de Aço Inoxidável. LEONEL TULA, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 20p.
- BT/PCC/263 Ferramentas e Diretrizes para a Gestão da Logística no Processo de Produção de Edifícios. FRED BORGES DA SILVA, FRANCISCO FERREIRA CARDOSO. 25p.
- BT/PCC/264 Indicadores de Salubridade Ambiental em Favelas Localizadas em Áreas de Proteção aos Mananciais: O caso da favela Jardim Floresta. MARCO ANTONIO PLÁCIDO DE ALMEIDA, ALEX KENYA ABIKO. 28p.
- BT/PCC/265 Difusão de Cloretos e a Influência do Grau de Saturação do Concreto: Ensaio em laboratório e medição de obra em uso. ANDRÉ T. C. GUIMARÃES, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 19p.
- BT/PCC/266 Análise Econômica de Empreendimentos de Longo Horizonte de Maturação: Taxa de Retorno Compensada. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 15p.
- BT/PCC/267 Arbitragem de Valor de Hotéis. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 55p.
- BT/PCC/268 Diretrizes para Produção de Contrapisos Estanques. EDUARDO HENRIQUE PINHEIRO DE GODOY, MERCIA M. S. BOTTURA DE BARROS. 36p.
- BT/PCC/269 Produtividade da mão-de-obra na execução de alvenaria: detecção e quantificação de fatores influenciadores. LUÍS OTÁVIO COCITO DE ARAÚJO, UBIRACI ESPINELLI LEMES DE SOUZA. 24p.
- BT/PCC/270 Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. ELIANE PEREIRA DE LIMA, PAULO R. L. HELENE. 13p.
- BT/PCC/271 Difusão de cloretos e a influência do grau de saturação do concreto: ensaio em laboratório e medição de obra em uso. ANDRÉ TAVARES DA CUNHA GUIMARÃES, PAULO R. L. HELENE. 20p.
- BT/PCC/272 Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. OSWALDO CASCUDO MATOS, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 20p.

BOLETINS TÉCNICOS PUBLICADOS

- BT/PCC/253 Avaliação de Áreas Urbanas através dos Usuários: O Caso do Centro de Guaratiguetá. MAURICIO MONTEIRO VIEIRA, WITOLD ZMITROWICZ. 20p.
- BT/PCC/254 O Conceito de Tempo Útil das Pastas de Gesso. RUBIANE PAZ DO NASCIMENTO ANTUNES, VANDERLEY MOACYR JOHN. 15p.
- BT/PCC/255 Impactos Ambientais Causados por Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso de Maringá/PR. GENEROSO DE ANGELIS NETO, WITOLD ZMITROWICZ. 24p.
- BT/PCC/256 Produção e Obtenção de Barras de Fios de Aço para Concreto Armado. OSWALDO CASCUDO MATOS, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 16p.
- BT/PCC/257 Influência do Tipo de Cal Hidratada na Reologia de Pastas. FABÍOLA RAGO, MARIA ALBA CINCOTTO. 25p.
- BT/PCC/258 Metodologia para Análises Ergonômicas de Projetos Arquitetônicos com Base na Teoria dos Sistemas Nebulosos. ANA LÚCIA NOGUEIRA DE CAMARGO HARRIS, CHENG LIANG-YEE. 33p.
- BT/PCC/259 Estudo da Água do Poro de Pastas de Cimento de Escória pelo Método da Água de Equilíbrio. CLÁUDIA T. A. OLIVEIRA, VAHAN AGOPYAN. 12p.
- BT/PCC/260 Concreto com Fibras de Aço. ANTÔNIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO. 68p.
- BT/PCC/261 Alocação de Espaços em Arquitetura: Uma nova metodologia utilizando lógica nebulosa e algoritmos genéticos. MARIO MASAGÃO ANDREOLI, DANTE FRANCISCO VICTÓRIO GUELPA. 24p.
- BT/PCC/262 Contribuição ao Estudo da Resistência à Corrosão de Armaduras de Aço Inoxidável. LEONEL TULA, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 20p.
- BT/PCC/263 Ferramentas e Diretrizes para a Gestão da Logística no Processo de Produção de Edifícios. FRED BORGES DA SILVA, FRANCISCO FERREIRA CARDOSO. 25p.
- BT/PCC/264 Indicadores de Salubridade Ambiental em Favelas Localizadas em Áreas de Proteção aos Mananciais: O caso da favela Jardim Floresta. MARCO ANTONIO PLÁCIDO DE ALMEIDA, ALEX KENYA ABIKO. 28p.
- BT/PCC/265 Difusão de Cloretos e a Influência do Grau de Saturação do Concreto: Ensaio em laboratório e medição de obra em uso. ANDRÉ T. C. GUIMARÃES, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 19p.
- BT/PCC/266 Análise Econômica de Empreendimentos de Longo Horizonte de Maturação: Taxa de Retorno Compensada. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 15p.
- BT/PCC/267 Arbitragem de Valor de Hotéis. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 55p.
- BT/PCC/268 Diretrizes para Produção de Contrapisos Estanques. EDUARDO HENRIQUE PINHEIRO DE GODOY, MERCIA M. S. BOTTURA DE BARROS. 36p.
- BT/PCC/269 Produtividade da mão-de-obra na execução de alvenaria: detecção e quantificação de fatores influenciadores. LUÍS OTÁVIO COCITO DE ARAÚJO, UBIRACÍ ESPINELLI LEMES DE SOUZA. 24p.
- BT/PCC/270 Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. ELIANE PEREIRA DE LIMA, PAULO R. L. HELENE. 13p.
- BT/PCC/271 Análise Econômica de Empreendimentos de Longo Horizonte de Maturação - Indicadores Avançados para Análise da Qualidade do Investimento. JOÃO DA ROCHA LIMA JR. 24p.
- BT/PCC/272 Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. OSWALDO CASCUDO, PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE. 20p.