



Influência da espessura de cobrimento dos elementos de concreto armado expostos a processos de corrosão e submetidos a cargas externas

R. S. Meneses¹, J. M. Moro¹, R. R. Aveldaño¹, N. F. Ortega¹

¹Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.134>

Artículo recibido el 02 de febrero de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 11 de Abril de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 2, Mayo – Agosto 2016., es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893 ,

alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.revistaalconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717303000-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de mayo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

Ao realizar estudos sobre corrosão em concreto armado, é importante considerar nos ensaios a ação de cargas externas, pois esta situação é mais frequente nas estruturas. Neste artigo apresentam-se os resultados obtidos ao expor vigas de concreto armado a um processo de corrosão acelerada, submetidas a esforços de flexão materializados com cargas que geram tensões constantes de tração nas armaduras corroídas. As vigas foram elaboradas com diferentes espessuras de cobrimento das armaduras e com um concreto de resistência característica de 25MPa. Este estudo coloca em evidência a influência da espessura de cobrimento das armaduras, sobre o processo de corrosão e sua manifestação externa (fissuração do cobrimento), frente às mesmas solicitações mecânicas.

Palavras-chave: corrosão de armaduras tracionadas; cobrimento; fissuração.

ABSTRACT

When carrying out corrosion studies on reinforced concrete, it is important to consider the action of external loads in the tests, as this situation is the most frequent in the structures. In this work, we show the results obtained from exposing beams of reinforced concrete subjected to flexional effects, materialized with loads that generate equal tensile stress on the corroded reinforcement, to an accelerated corrosion process. The beams were manufactured with different coating thicknesses on the reinforcement and with a concrete of 25 MPa characteristic resistance. This study evidences the influence of the coating thickness of the reinforcement on the corrosion process and its external manifestation (cracking of the coating), compared with the same mechanical requests.

Keywords: corrosion of tensile reinforcement; coating; cracking.

RESUMEN

Al realizar estudios sobre corrosión en hormigón armado, es importante considerar en los ensayos, la acción de cargas externas, pues esta situación es la más frecuente en las estructuras. En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos al exponer a un proceso de corrosión acelerada, a vigas de hormigón armado sometidas a esfuerzos flexionales, materializados con cargas, que generan iguales tensiones de tracción en las armaduras corroídas. Las vigas se fabricaron con diferentes espesores de recubrimiento de las armaduras y con un hormigón de resistencia característica 25 MPa. Este estudio pone en evidencia la influencia del espesor de recubrimiento de las armaduras, sobre el proceso de corrosión y su manifestación externa (fisuración del recubrimiento), frente a las mismas solicitudes mecánicas.

Palabras claves: corrosión de armaduras traccionadas; recubrimiento; fisuración.

Autor de contacto: Romina S. Meneses (romina.meneses@uns.edu.ar)

1. INTRODUCCIÓN

O concreto é o material de construção mais amplamente usado em todo o mundo. Estruturas feitas com este material tem certa vida útil, alguns processos que causam sua degradação podem afetar sua estética e, principalmente, o seu desempenho, evidenciado, no caso de corrosão de armaduras, pelo aparecimento de manchas, fissuras, desplacamento do cobrimento e outros.

Uma das manifestações patológicas que ocorre com mais frequência nas estruturas de concreto armado ou protendido, é a corrosão de sua armadura. O aço das armaduras é protegido contra a corrosão por uma camada passiva de produtos de hidratação do cimento, formado num ambiente alcalino. No entanto, em ambientes marinhos, os íons cloretos se acumulam na superfície do concreto e penetram lentamente para o seu interior, até chegar na armadura, de tal forma que, a partir de uma certa concentração dissolve a camada de passivação do aço e inicia um processo de corrosão. Estes produtos de corrosão têm um volume muito maior do que aço que os originou; inicialmente, eles se alojam na estrutura de poros do concreto e uma vez que a mesma colmata, tensões internas começam a surgir (Peralta, 2009), resultando em fissuras no cobrimento (Alonso, 1996; Andrade, 1993).

Estas fissuras no cobrimento favorecem o avanço da deterioração das estruturas afetadas, porque permitem o aumento do ingresso de agentes externos (cloretos, água e oxigênio) até as armaduras, causando uma diminuição na seção da armadura que pode afetar a aderência entre ambos os materiais (Al-Sulaimani, 1990; Almusallam, 1996; Rodrigues, 1993). Assim, à medida que a deterioração avança, diminui o momento resistente do elemento estrutural afetado, apresentando consequências negativas sobre a capacidade portante e a vida útil da estrutura afetada (Melchers, 2001; Rodrígues, 1996; Rodrígues, 1998; Torres-Acosta, 2007).

Existe uma série de fatores que controlam o processo de fissuração do cobrimento (Alonso, 1998), entre os quais se destacam: o ambiente em que está exposta a estrutura (Aveldaño, 2011) e as propriedades do concreto, a partir do ponto de vista a resistência mecânica do cobrimento (Rodriguez, 1998), e também pela necessidade de ter uma estrutura de poros que proporcione estanqueidade; portanto, dentro das propriedades do concreto, a absorção capilar (relacionada com a estrutura de poros) desempenha um papel muito importante, o que levou vários países a definir normas que fixam seus valores máximos (Instituto Argentino de Normalização e Certificação, 2005). Em trabalhos anteriores, realizados no laboratório onde estes estudos foram feitos (Schierloh, 2001; Schierloh, 2003), com vigas feitas com diferentes concretos e livre de cargas externas, foi estabelecido que a absorção capilar influencia no surgimento das primeiras fissuras por corrosão e a evolução dos potenciais de corrosão, durante o tempo dos ensaios de corrosão acelerada, sem correlações significativas entre o quadro de fissuração causado pela corrosão, com o comportamento eletroquímico registrado durante os ensaios. Outros fatores a considerar no processo de corrosão e seus efeitos estão relacionados com a forma em que está distribuída a armadura da estrutura (Aveldaño, 2009; Hariche, 2012) e as solicitações mecânicas a que estão sujeitas as armaduras no processo de corrosão que, inevitavelmente, estão associados com o estado de tensão do concreto que as circunda (Aveldaño, 2013).

Em relação ao estado de tensão das armaduras pode-se dizer que a tensão introduz uma incerteza nos processos corrosivos e suas consequências. Apesar da importância do assunto, no caso de armaduras sob tensões de tração, pode ocorrer o fenômeno conhecido como "corrosão sob tensão", mas são escassas as pesquisas em estruturas de concreto. No entanto, nos últimos anos alguns estudos foram realizados (Calabrese, 2013; Elfergani, 2012, Fumin, 2011; Ortega, 2011). Embora as estruturas de concreto armado sofram corrosão em serviço, normalmente sob cargas estáticas e / ou dinâmicas (por exemplo, pontes), poucos estudos têm sido realizados, em comparação com a análise das estruturas sob processo de corrosão, na ausência de cargas externas. O comportamento

esperado de uma estrutura que está sujeita aos efeitos da corrosão e, simultaneamente, sob a ação de cargas externas (tanto estáticas como dinâmicas), é a diferença na evolução da corrosão que estão atuando essas cargas, por estas razões, algumas investigações foram destinados para o estudo deste tema; Hariche et al. (2012) estudaram vigas de concreto armado expostas à corrosão acelerada, onde os principais parâmetros que variaram em seu estudo foram a disposição da armadura e a magnitude das cargas externas. Hariche et al. (2012) e Yu et al. (2015) analisaram a evolução da corrosão e a fissuração em vigas fissuradas sob a ação constante de cargas externas e expostas em câmara salina, realizando dois conjuntos de vigas com diferentes direções de moldagem, em relação à armadura de tração. Linwen, 2015 e Malumbela et al. (2009) estudaram vigas sob corrosão acelerada com cargas aplicadas muito inferiores à de ruptura, onde se monitorava a variação da profundidade da linha neutra, a curvatura e o momento de inércia.

Este artigo apresenta os resultados de ensaios realizados em vigas de concreto armado com diferentes espessuras de cobrimento, sujeitas a um processo de corrosão acelerada e sob a ação de cargas estáticas externas. Tais ensaios têm como objetivo avaliar o comportamento das vigas, do ponto de vista da corrosão de armadura e seus efeitos externos (fissuração do cobrimento de concreto) e internos (potencial de corrosão). Neste assunto, muitos trabalhos foram desenvolvidos em vigas sem cargas externas, não tendo sido encontrados trabalhos semelhantes ao apresentado neste artigo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados nos traços de concreto foram os seguintes:

- Cimento: foi empregado cimento Portland comum (CPN40) proveniente de uma fábrica localizada na província de Buenos Aires (zona central da Argentina).
- Agregado miúdo: constituído por areia natural silicosa de um porto localizado ao sul da província de Buenos Aires, que atenda às especificações de qualidade dadas pela norma IRAM 1627. (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1997).
- Agregado graúdo: constituído por seixo rolado cuja dimensão máxima nominal era de 25 mm, o que satisfaz os limites granulométricos indicados na norma IRAM 1627 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1997)

O concreto foi preparado com uma relação água/cimento (a/c) de 0,50, valor adotado pela normalização argentina (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2005), para estruturas resistentes que encontram a mais de 1km da costa, em uma zona influenciada por ventos com névoa salina. A dosagem utilizada está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição e características do concreto

Materiais constitutivos	kg/m ³ de concreto
Cimento Portland Comum	350
Agregado miúdo (areia natural silicosa)	895
Agregado graúdo (seixo rolado)	920
Água potável de rede	190
Relação água/cimento	0,50

2.2 Elaboração das amostras

Foram moldadas quatro vigas de concreto armado onde se variou a relação cobrimento/diâmetro das barras para simular diferentes graus de proteção das armaduras, e foram moldados corpos de prova cilíndricos visando caracterizar o seu comportamento mecânico (compressão e tração) e físico (ensaio de absorção capilar).

As vigas tinham uma seção de 8 x 16 cm e 220 cm de comprimento, as armaduras longitudinais eram barras de aço corrugado de dureza natural (ADN 420, IRAM-IAS U 500-528) (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1989) que é o aço mais utilizado nas construções da Argentina, com um diâmetro de 4,2 mm (duas barras na parte superior e duas na parte inferior) e estribos fechados de aço liso de diâmetro 2,1 mm, espaçados a cada 10 cm, com um cobrimento que variou entre 10 mm e 25 mm. Deve ser esclarecido que a escolha dos diâmetros empregados nos ensaios foi devida à intenção de manter a semelhança geométrica das vigas do laboratório (na ordem de 1/3 do tamanho da estrutura real), com vigas utilizadas nas construções reais, para as quais foram usadas barras comercialmente disponíveis neste país. A Tabela 2 mostra as características das armaduras.

Tabela 2. Características das armaduras

	Tipo de aço	Diâmetro (mm)	Límite elástico (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Armadura longitudinal	Dureza Natural	4 x 4,2	680	690
Estríbos	Liso	2,1	640	640

O concreto foi lançado em fôrmas e adensado por vibração mecânica, as quais sofreram cura úmida durante os primeiros 7 dias. Posteriormente, a cura foi realizada em ambiente de laboratório (temperatura \approx 20°C, umidade relativa \approx 50%) por aproximadamente 60 dias. Também foram elaborados corpos de prova cilíndricos de concreto (15 x 30 cm), utilizados nos ensaios físico da capacidade e velocidade de sucção capilar (IRAM 1871) (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2005) e mecânicos: resistência à compressão (IRAM 1546) (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1992) e à tração indireta (IRAM 1658) (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1992). Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com a norma IRAM 1534 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1985).

2.3 Processo de corrosão acelerada

Para efeitos de aplicação dos esforços de tração, as armaduras superiores (que seriam aquelas que seriam posteriormente submetidas a um processo de corrosão acelerada), foram inseridas cargas nas extremidades das vigas, sendo adotada como uma área a corroer uma zona intermediária, deixando balanços nas duas laterais. Na Figura 1 está apresentado o esquema estrutural adotada. A área compreendida entre os apoios tem uma solicitação de flexão quase constante, por conseguinte, toda a área das barras afetadas pela corrosão está submetida a uma tensão praticamente de igual intensidade, ao estar sujeita em cada caso, ao seu peso próprio, além da ação de diferentes cargas que variam de 90 kg a 100 kg.

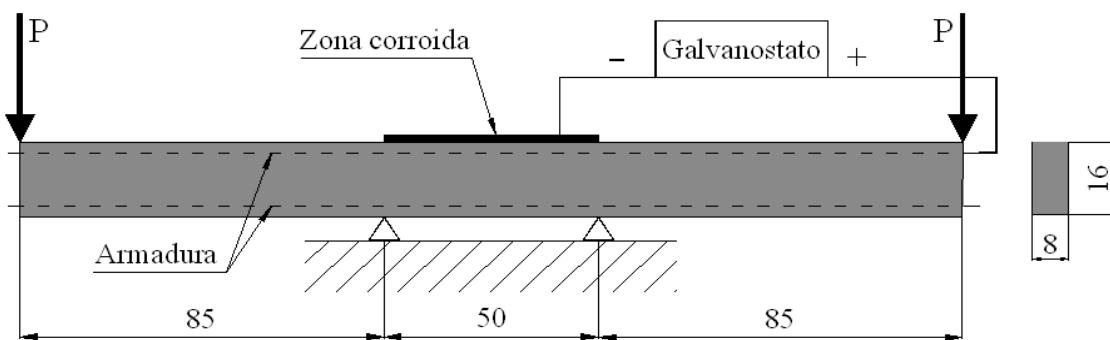


Figura 1. Esquema do ensaio.

Os elementos foram submetidos à corrosão acelerada por aproximadamente 160 dias, através da aplicação de uma corrente impressa externa, fornecida por um galvanostato ligado entre a extremidade de armadura superior exposta (ânodo) e um contra eletrodo (cátodo) formado por uma malha de aço inoxidável (50 cm de comprimento e mesma largura da viga) localizado em sua face superior. Sobre o mesmo foi disposta uma esponja (de mesmas dimensões), que foi mantida úmida com uma quantidade controlada de uma solução aquosa contendo 0,3% (em peso) de cloreto de sódio (NaCl) (3 g de NaCl / litro de água). Antes de ligar o galvanostato, durante 2 dias foi iniciado a molhagem da área central, a fim de assegurar que todo o cobrimento tivesse a umidade necessária para permitir a circulação da corrente. A fim de ter uma molhagem controlada (reduzindo a evaporação), as vigas foram cobertas com uma placa de acrílico e, em seguida, com uma capa de nylon. A densidade de corrente aplicada foi de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, que é cerca de dez vezes a medida em estruturas de concreto armado altamente corroídas (Rodriguez, 1993), que foi escolhida por ter sido adotada em estudos de diferentes grupos que trabalham sobre o assunto (Acosta, 1998; Alonso, 1994; Alonso, 1998; Avendaño, 2011), de modo que no final do processo em estudo se obtenham penetrações de corrosão superiores a 0,30 mm nas barras num prazo razoável.

É interessante esclarecer que com este método empregado para se alcançar uma corrosão acelerada, o processo de corrosão inicia simultaneamente em todas as vigas ao conectá-las ao galvanostato, independentemente do seu cobrimento. Portanto, o que está sendo estudado neste trabalho são o processo de corrosão e os sintomas gerados a partir da aplicação de corrente externa. Logicamente, as estruturas existentes, afetadas por um ambiente com cloretos, as armaduras que têm um maior cobrimento demoram mais para despassivar (início da corrosão) e este processo que antecede a corrosão é estudado por pesquisadores que trabalham na penetração de cloretos e em carbonatação, linhas de pesquisa diferentes deste trabalho. A análise apresentada neste artigo representa o período posterior à iniciação (denominado período de propagação da corrosão). Estes dois períodos mencionados são estudados e definidos por Tuutti (Tuutti, 1982), em seu conhecido diagrama de vida útil das estruturas de concreto armado com base na corrosão de suas armaduras.

Supõe-se que as armaduras afetadas pela corrosão têm uma superfície de 162 cm^2 (determinada pelos 50 cm centrais das barras e pelos 6 estribos localizadas nesta região, assumindo que a corrosão foi estendida até um comprimento no ramo vertical dos estribos de 1 cm). Para fornecer uma densidade de corrente de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, os galvanostatos forneceram uma corrente de 16,2 mA. Após a conclusão do ensaio, as armaduras foram descobertas, onde foi observado um ataque não uniforme, com sinais de pites (indicando que os cloretos atuaram na superfície das barras) e estabeleceu-se que na armadura longitudinal, a corrosão havia ultrapassado os 50 centímetros centrais, em alguns centímetros de cada lado desta área (à medida que se chegou umidade no

cobrimento) com uma pequena profundidade de corrosão (se via claramente as corrugações das barras) e, em menor grau, algo semelhante aconteceu com os estribos.

Na Tabela 3, as vigas ensaiadas são identificadas de acordo com a relação da espessura de cobrimento das armaduras/diâmetro adotados em cada viga (r/ϕ) e da carga aplicada (P), cuja magnitude é variada, de modo a produzir a mesma tensão nas armaduras tracionadas em todos os casos. As análises foram realizadas utilizando esta relação, como em grande parte da literatura sobre o assunto e não apenas com o cobrimento, a fim de generalizar os resultados obtidos. Além disso, é interessante notar que, independentemente do cobrimento utilizado, enquanto que a mesma proporção r/ϕ for mantida, o processo de fissuração será praticamente idêntico. No trabalho de Peralta M. H. et al. (2006) pode ser visto um estudo numérico, onde a evolução das tensões localizadas em diferentes partes do cobrimento do concreto, antes da fissuração, determinando a relevância da análise usando esta relação.

Tabela 3. Denominação das vigas

Denominação	Relação cobrimento/diâmetro (r/ϕ)	Carga aplicada (P) (kg)
V90	6,0	90
V93	4,8	93
V96	3,6	96
V100	2,4	100

2.4 Determinações realizadas durante os ensaios

Primeiramente, as vigas foram carregadas e antes do início de molhagem, foram medidas as fissurações de flexão iniciais. O monitoramento da superfície das vigas foi realizado através da observação diária e registrando o momento de aparição das primeiras manchas e das primeiras fissuras por corrosão. A partir do surgimento destas primeiras fissuras, foi realizada periodicamente a medição da largura (por comparação com uma régua graduada, com uma divisão mínima de 0,05 mm (ver Figura 2) e ao longo das mesmas (com uma régua graduada, que tem uma precisão milimétrica). Este procedimento foi realizado para encontrar as larguras máximas de fissuras, e as áreas de fissuração, obtidas com a soma dos comprimentos de cada fissura, multiplicadas pela sua respectiva largura.

Do mesmo modo, os potenciais de corrosão foram registados de modo a efetuar um processo de controle de corrosão eletroquímica (Figura 3), de acordo com um procedimento normalizado (American Society for Testing and Materials, 1980). Estes foram medidos com um voltímetro marca CANIN (PROCEQ) utilizando um eletrodo de referência de cobre - Sulfato de Cobre (CSC), construído especialmente para medições em estruturas de concreto. Os potenciais de corrosão nos 50cm centrais da área central afetada por corrosão foram determinados em cinco pontos equidistante, realizando a média dos valores.

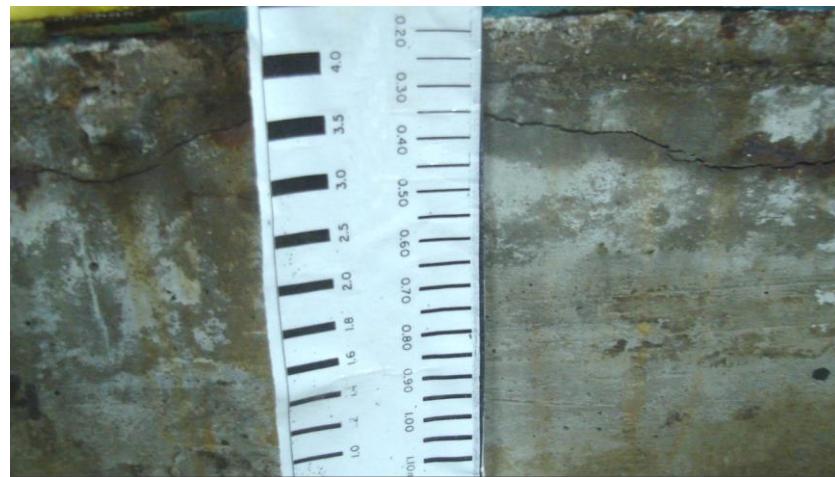


Figura 2. Medição da espessura de uma fissura gerada por corrosão acelerada.

Antes de iniciar as medições, as regiões foram umedecidas durante dois dias, até se obter um umedecimento constante com a referida solução de NaCl a 0,3%, em massa, e, subsequentemente, foi aplicada galvanostaticamente uma densidade de corrente constante durante todo o ensaio. Sob estas condições, que continuou durante todo o ensaio, a evolução do potencial de corrosão em vários pontos característicos da viga (em áreas secas e molhadas, em coincidência ou não com os estribos). Todas as medições foram realizadas desconectando previamente o galvanostato, e o concreto era umedecido nas áreas onde seriam realizadas as determinações posteriormente, de modo que as medições dos potenciais estabilizavam rapidamente. Este processo de umedecer, normalmente, durou várias horas.

A penetração teórica do ataque nas barras foi determinada a partir da Lei de Faraday (Alonso, 1998), assumindo uma corrosão uniforme das armaduras, portanto, pode-se dizer que a penetração determinada é um valor médio, e pode ser estimado pela expressão:

$$x = 0,0116 * i_{corr} * t \quad (1)$$

Onde:

x: profundidade do ataque [mm];

0,0116: fator de conversão de unidades;

i_{corr} : densidade de corrente de corrosão [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

t: duração do ataque [anos].

Esta profundidade de ataque média nas barras, é obtida através da velocidade de corrosão, que está representada por i_{corr} , que é mantido constante pelo galvanostato.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização

Na Tabela 4 pode-se observar um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades do concreto.

Tabela 4. Características do concreto empregado nas vigas ensaiadas

Compressão (MPa)	Tração Indireta (MPa)	Capacidade de Sucção Capilar (g/m ²)	Velocidade de Sucção Capilar (g/m ² .s ^{1/2})
27,0	2,5	2.773	3,45

De acordo com os resultados obtidos experimentalmente, a velocidade de sucção capilar é inferior a 4 g/m².s^{1/2}, valor máximo de velocidade de sucção capilar permitido pela norma argentina (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2005), portanto, adequado para estruturas de concreto localizadas em presença de cloreto.

3.2 Monitoramento eletroquímico

Na Figura 3 se apresenta o comportamento eletroquímico da armadura, em que a evolução de potenciais de corrosão está ilustrada graficamente, representado a média das medições obtidas em 5 pontos situados na zona central afetada pela corrosão, em cada uma das quatro vigas ensaiadas. No eixo x existem duas escalas, uma representada pelo tempo decorrido desde o início do ensaio e na parte superior desta figura foi inserida a penetração teórica do ataque, que é um valor médio definido com a lei de Faraday (equação (1)), aplicado às perdas significativas de material nas armaduras situadas na área central das vigas.

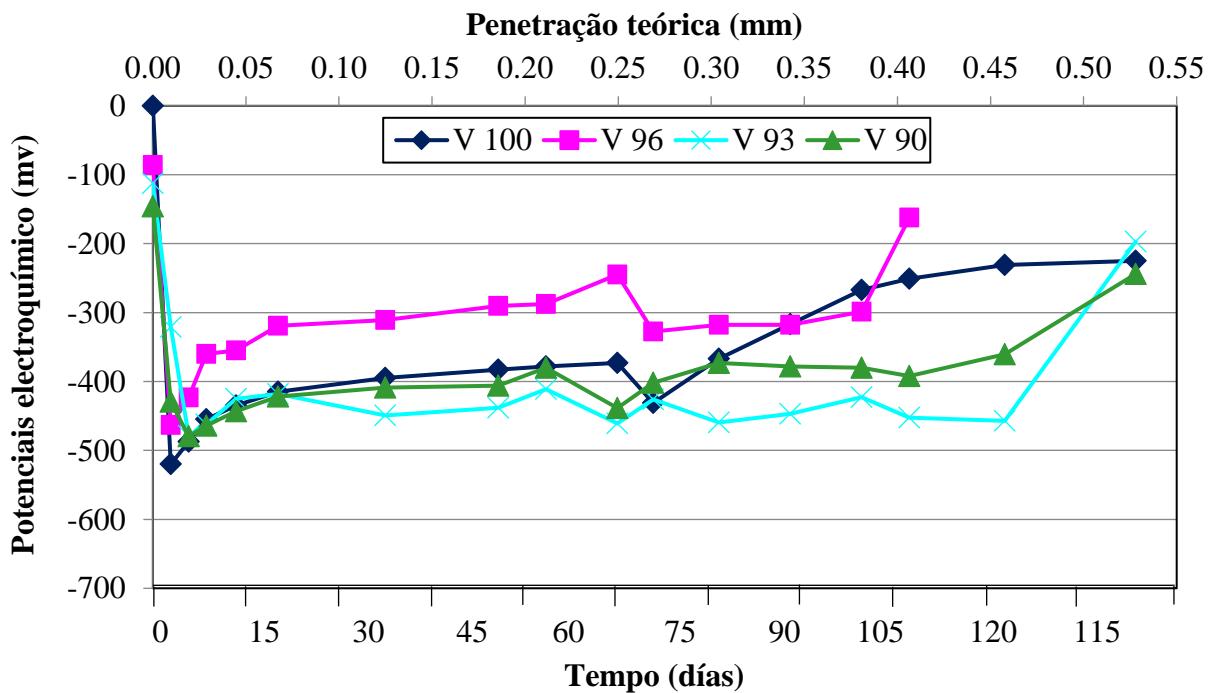


Figura 3. Potenciais de corrosão médios (zona hidratada), em função da penetração teórica e de tempo

Deve notar-se que, mesmo que o ensaio durou cerca de 160 dias, quando superou os 140, a viga V96 entrou em colapso (Figura 4) devido a uma significativa redução na seção transversal de sua armadura, produzida pela profundidade dos pites gerados pela corrosão. Enquanto a viga V100 rompeu aos 160 dias, momento em que se terminaram os ensaios. Isto indica que o processo de

corrosão, es aleatório, como é sabido, y afeta a vida residual do elemento estrutural afetado, mas em particular, os pites podem diminuir ainda mais.



Figura 4. Viga V96 após o colapso.

O comportamento eletroquímico analisado nas quatro vigas, através do monitoramento de seus potenciais de corrosão, mostrou que após os primeiros 5 dias, uma vez que o processo de corrosão acelerada foi conectado, foi obtido o valor mínimo de potencial, onde a viga com menor cobrimento (V96 e V100) foram as que completaram primeiro o seu período de ativação (com potenciais mínimos entre -478 e -531mV). Posteriormente, observa-se um aumento destes potenciais que pode ser considerado como um processo de pseudo-passivação, que é acompanhado pela fissuração generalizada (ver Figura 5), que foi semelhante em todas as vigas, embora o potencial das duas vigas com as menores relações cobrimento / diâmetro de armadura seja um pouco mais elevado do que as outras duas, de modo que se pode dizer que estão mais passivadas por apresentar uma maior facilidade de ingresso de oxigênio do exterior. Este processo mencionado também foi encontrado em trabalhos anteriores realizados neste laboratório (Aveldaño, 2011; Aveldaño, 2013; Schierloh, 2001).

3.3 Monitoramento das áreas de fissuração

Sabe-se que em estruturas de concreto sujeitas à flexão, quando as tensões na zona de tração superam a resistência de concreto, são geradas fissuras que são chamadas de "fissuras de flexão", identificáveis pela sua direção transversal à armadura principal da viga. Isso é inevitável, com ou sem problemas de corrosão. Se, além disso, as armaduras estão em processo de corrosão, o quadro de fissuração é agravado, porque ambos os efeitos se sobrepõem: fissuras por flexão e corrosão.

Devido ao fato dos produtos de corrosão apresentar um volume maior do que o material original, pressões internas são geradas, que fazem que parte desses produtos enchem os poros do concreto e outros saltam para fora através das fissuras por flexão (se houver). À medida que a corrosão progride e com a saturação dos poros, os óxidos produzem tensões que, ao superar as tensões de ruptura por tração do concreto, estes se fissuram na direção longitudinal. Estas são as denominadas "fissuras por corrosão". É necessário esclarecer que a divisão entre fissuras de flexão e por corrosão não é um conceito de definição muito clara, porque à medida que o processo de corrosão evolui, o progresso de ambas é interligado, podendo reforçar-se mutuamente, como especificado no parágrafo seguinte. A diferença mencionada na direção das fissuras é o que permite classificá-las desta forma. A presença de fissuras por flexão (quando a carga é de magnitude suficiente para gerá-las), faz com que a penetração de oxigênio, água e cloretos na armadura acelere, favorecendo o processo de corrosão das mesmas (ajudando a aumentar as áreas de fissuras por corrosão). Por outro lado, ao reduzir a seção das barras devido à corrosão, o equilíbrio interno da seção faz com que aumente as

fissuras por flexão aumentem. Além disso, pelo fato das fissuras de flexão serem rotas para o lado externo, uma parte dos produtos de corrosão pode crescer em espessura e comprimento, o que pode aumentar ainda mais as áreas de fissuras de flexão. Isto é, o crescimento total da fissuração envolve a redução da seção resistente da viga (pela redução da seção das armaduras e da seção útil mecanicamente do concreto), de tal modo que, no caso de cargas muito próximas da ruptura do elemento, a estrutura pode entrar em colapso, como aconteceu com a viga V96 aos 140 dias de ensaio.

Uma vez que as cargas externas foram aplicadas, iniciou-se a medição das fissuras. Na Figura 5 se apresenta a evolução das áreas de fissuração totais em cada viga; isto é, aquelas obtidas pela soma das áreas de fissuração por flexão e da fissuração por corrosão (na mesma direção que a armadura principal da viga). Vale lembrar que a chamada Área de Fissuração é a somatória dos produtos do comprimento pela largura de cada fissura.

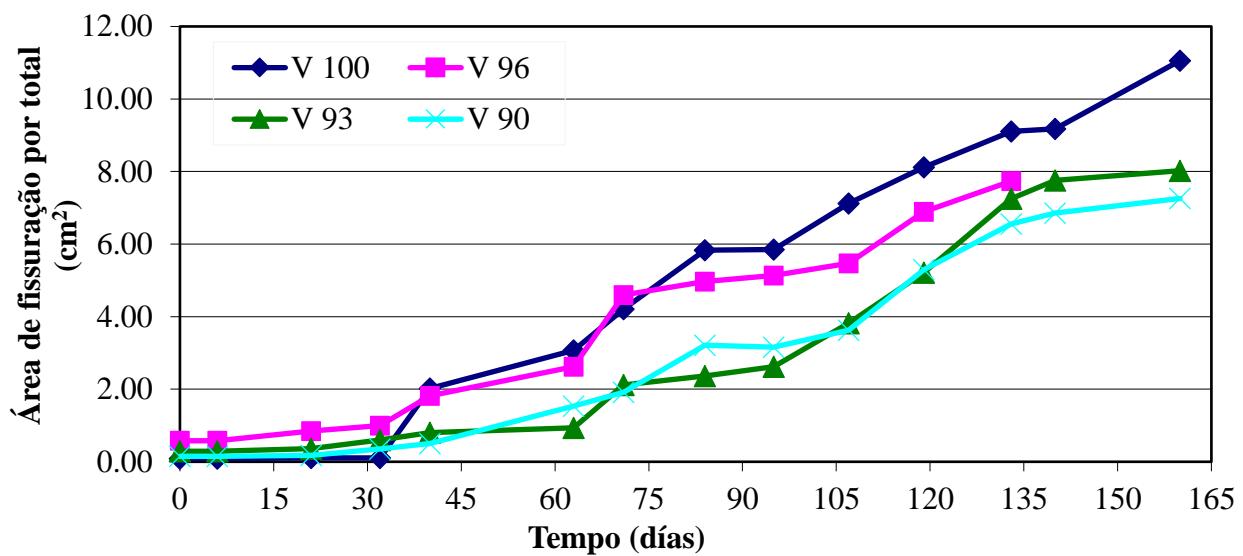


Figura 5. Área de fissuração total, em função do tempo.

Como era esperado, o aparecimento das fissuras de corrosão se manifestou mais tarde nas vigas com maior cobrimento. As vigas V90 e V93 tiveram uma evolução de área de fissuração total semelhante durante o tempo de ensaio, tendo em conta o grau de dispersão que geralmente aparece na maior parte dos trabalhos experimentais; enquanto que as vigas V96 e V100 mostraram um comportamento diferente, com áreas de fissuração totais superiores às vigas restantes, por apresentar uma relação r/ϕ mais baixa das armaduras. No entanto, quando analisado em separado a área de fissuração por flexão (Figura 6), verifica-se que a viga V96 apresentou valores muito superiores aos demais; isto é claramente visto no estado em que a viga chegou, onde a deterioração por corrosão ocorreu mais na zona das fissuras por flexão, enquanto o resto das vigas apresentou uma fissuração mais generalizada. Obviamente, esta maior fissuração inicial devida à flexão foi um importante via de entrada de cloretos, que chegaram até a armadura, apresentando a viga V96 as maiores áreas de fissuração total (Figura 5), durante os primeiros 30 dias de ensaio, em seguida, o seu comportamento esteve dentro das expectativas.

Este comportamento observado na viga V96 explica seu colapso prévio ao da viga V100, e destaca, por um lado, a influência da menor relação r/ϕ da viga V100, a qual, apresentando a menor fissuração por flexão na maior parte do ensaio, apresentou fissuração por corrosão superior às

demais; e por outro lado, a importância que têm as fissuras de flexão na deterioração de uma estrutura sujeita à corrosão, como é o caso da viga V96.

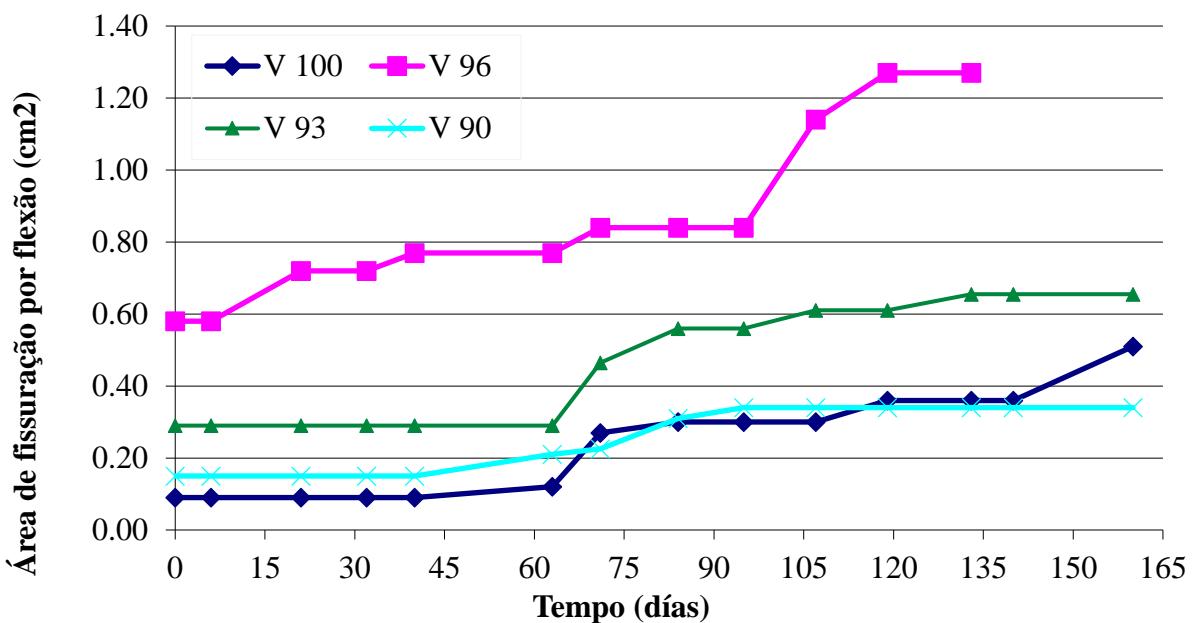


Figura 6. Área de fissuração por flexão, em função do tempo.

Enquanto neste trabalho é analisado o comportamento frente a um processo de corrosão de vigas com diferentes relações r/ϕ de suas armaduras, as quais estão sujeitas à mesma tensão, gerada por cargas externas, pode-se fazer uma comparação da evolução da fissuração do cobrimento observado com o obtido em outros estudos realizados pelo mesmo grupo de pesquisa (Moro, 2012), em vigas de concreto com qualidades semelhantes às deste trabalho, elaboradas com ou sem agregados reciclados de concreto e submetidas ao mesmo processo corrosivo, mas sem a aplicação de cargas externas. Neste caso, a viga padrão (sem agregado reciclado) tem uma relação r/ϕ de 2,4 e, portanto, é comparável com a viga V100 deste trabalho, e para realizar uma análise de regressão das áreas de fissuração totais em ambas as vigas, pode-se observar que a inclinação é superior na V100 ($y = 0,074x - 0,9502$) do que na viga padrão sem cargas externas ($y = 0,068x - 0,7688$). Isto se deve à presença de tensões de tração da V100 nas barras, gerando fissuras por flexão, que facilitam o ingresso de agentes agressivos exteriores, causando uma aceleração no processo de corrosão.

Na Figura 7 observa-se que o aparecimento da primeira fissura visível de corrosão é retardado (a profundidade média de ataque é proporcional ao tempo, expressão (1)), na medida em que se aumenta a espessura do cobrimento (maior proporção r/ϕ). O aumento da espessura do cobrimento faz com que ocorra o atraso no aparecimento das primeiras fissuras por corrosão (Figura 7) e a sua evolução seja mais lenta (ver Figura 5), porque os elementos agressivos exteriores (cloretos, oxigênio e água) levam mais tempo para chegar à armadura. Esta situação, no caso de armaduras tracionadas com menores relações r/ϕ , é preocupante, uma vez que essa maior profundidade de ataque nas barras, com sintomas externos inferiores (fissuração), contém um risco considerável, porque reduz o tempo de aviso de colapso estrutural, sendo mais preocupante se houver cloretos que geram pites. Na Figura 7 é também adicionado um ponto que corresponde à viga padrão (sem cargas externas e razão $r/\phi = 2,4$) do trabalho mencionado acima (Moro, 2012), onde se observa que é necessária uma maior profundidade de ataque para o aparecimento das primeiras fissuras visíveis.

A equação obtida na Figura 7 por uma análise de regressão ($y = a + bx$) pode ser comparada com a obtida em outros estudos (Alonso, 1998), onde foram utilizados concretos elaborados com relações água/cimento entre 0,52 e 0,65, em quanto as outras condições de ensaio são semelhantes, entre as quais se destacam: a faixa de variação da relação cobrimento / diâmetro um pouco mais ampla do que a adotada nesta publicação, em ambos os trabalhos foram colocados estribos e foi empregada a mesma intensidade de corrente. Os resultados obtidos no trabalho citado foram: $a = 7,53$ e $b = 9,32$, com $R^2 = 0,92$. O declive desta linha é muito mais baixo do que o obtido no presente trabalho ($a = 13,71$), portanto, pode-se dizer que, em estruturas sujeitas a cargas externas, se acelera a degradação gerada pela corrosão de suas armaduras, mesmo para concretos feitos com uma relação água/cimento ligeiramente inferior as de referência.

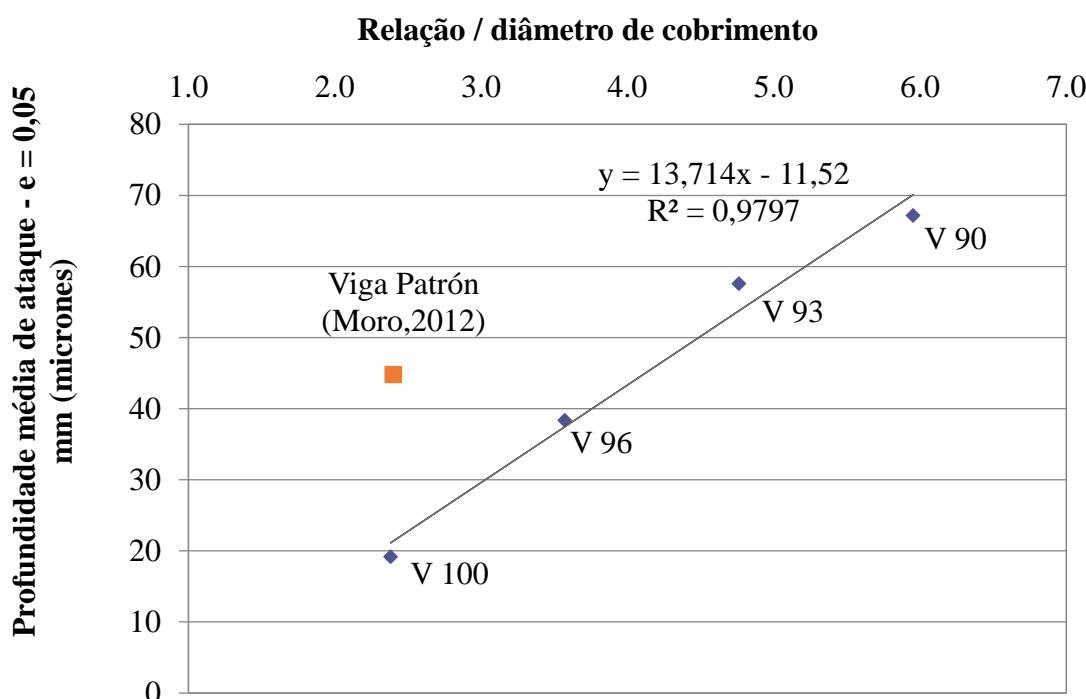


Figura 7. Relação entre a profundidade média de ataque aos reforços produziu a primeira fissura visível ($e = 0,05$ mm) por corrosão e relação / diâmetro de cobrimento da barra.

Depois de concluir o ensaio, as armaduras foram descobertas, retirando seus cobrimentos. Na inspeção visual, observou-se que, devido à ação de cloreto (apesar da baixa concentração adotada), a corrosão nas barras geralmente não era uniforme, mas observaram-se algumas áreas de corrosão localizada (pites), sem mostrar nenhum padrão particular. No entanto, em alguns casos foram encontrados maiores pites nas áreas perto de fissuras de flexão, como na viga V96, onde a seção de colapso coincidiu com uma fissura de flexão.

3.4 Monitoramento das larguras máximas das fissuras

Na Figura 8, é apresentada a variação da largura máxima de fissuração, em função do tempo.

Pode-se observar que a largura máxima de fissuração, durante a maior parte do ensaio, foi maior na viga V96, pela influência de fissuração por flexão. Na evolução do resto das vigas, não foram notadas grandes diferenças, pois a distribuição de fissuração se desenvolveu de maneira diferente em cada viga, seja de forma mais generalizada ou mais localizada, sem gerar diferenças evidentes entre as várias amostras testadas.

Se a evolução da largura máxima de fissuração for comparada com as áreas de fissuração (Figura 5), pode-se notar que os últimos são mais representativos da evolução geral da deterioração, porque a largura máxima é comum variar de localização na viga durante o processo de corrosão; também tende a evoluir em saltos, dependendo do aparecimento de novas fissuras que provocam a redistribuição das tensões internas no cobrimento. Por exemplo, na Figura 8 pode ser visto que a viga V90 é a que tem maior fissuração entre 40 e 90 dias, quando, na realidade, teria que ser a que apresentava os valores mais baixos. Esta situação também é encontrada em outros estudos (Avendaño, 2009, Avendaño, 2013). No entanto, se inclui esta figura porque nas normas é comum limitações de largura máxima de fissuras, portanto é usada como uma referência em diversas literaturas internacionais. Deve-se notar que devem ser realizadas pesquisas para normalizar a área de fissuração, a fim de fazer comparações válidas entre diferentes vigas danificadas, por exemplo, em função do comprimento do elemento afetado ou da largura da área corroída, e depois estabelecer indicadores representativos de insuficiência e limitá-los.

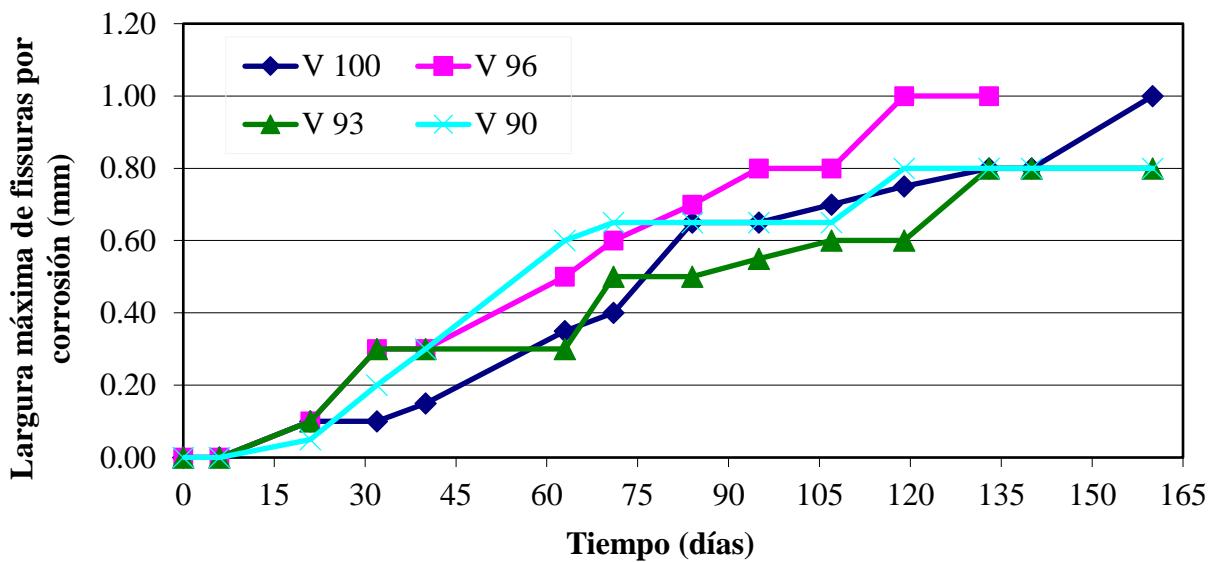


Figura 8. Largura máxima de fissuras em função do tempo

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho experimental, verificou-se que a deterioração por corrosão das armaduras de vigas expostas a cargas externas foi maior do que se não estivessem carregadas e que a espessura do cobrimento tem influência sobre este processo, todos os quais afetam a vida residual e capacidade de carga da estrutura afetada. Em particular, verificou-se que:

- Em vigas carregadas, com armaduras afetadas pela corrosão acelerada, com o aumento da relação cobrimento de concreto / diâmetro das armaduras, leva mais tempo para aparecer as primeiras fissuras por corrosão e sua evolução é mais lenta, tornando-se evidentes nas áreas de fissuração totais. O efeito protetor gerado pelo maior cobrimento faz com que os elementos agressivos do exterior (cloretos, oxigênio, água) demandem mais tempo para alcançar a armadura, reduzindo a velocidade do processo;
- As fissuras do cobrimento de concreto, causadas pela deformação gerada por cargas externas, favoreceram o aumento de fissuração por corrosão das armaduras, aumentando a fissuração total, e consequentemente influenciando subsequente degradação da estrutura.

De um ponto de vista prático, as conclusões acima podem determinar que em construções de concreto armado carregadas e inseridas em ambientes agressivos, deve ser reduzida, tanto quanto possível, as fissuras de flexão, causadas por cargas de serviço, aumentando ainda mais a relação cobrimento /diâmetro das armaduras, para reduzir os efeitos da corrosão sobre as mesmas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Dr. Carla Priano, Ing. Lilia Sinais e técnicos J. P. Gorordo Laboratório de Modelos Estruturais e de D. Smith Laboratório de Materiais de Estudo e Testing, U.N.S., por sua assistência na preparação de ensaios. Além disso, a Secretaria-Geral da Ciência e Tecnologia e do Departamento de Engenharia da Universidade Nacional do Sul pelo apporte financeiro e institucional para a realização destas investigações.

6. REFERÊNCIAS

- Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Aziz, A. R. (1996), “*Effect of reinforcement corrosion on bond strength*”, Construction and Building Materials, V. 10, No. 2, pp. 123-129.
- Alonso, M. C., Andrade, C., Rodríguez, J., Diez, J. M. (1998), “*Factors controlling cracking in concrete affected by reinforcement corrosion*”, Materials and Structures, Nr. 31, pp. 435-445.
- Alonso, M. C., Andrade, M. C., Rodríguez, J., Casal, J., García, M. (1994), “*Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras*”, Hormigón y Acero, No. 194, pp. 29-42.
- Al-Sulaimani, J., Kaleemullah, M., Basunbul, I. A., Rasheeduzafar (1990), “*Influence on corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members*”, ACI Structural Journal, V. 87, Nr 2, pp. 220-231.
- American Society for Testing and Materials: ASTM C876, “*Standard test method for half cell potential of reinforcing steel in concrete*”, Philadelphia, U.S.A, (1980).
- Andrade, M. C., Alonso, M. C., Molina, F. J. (1993), “*Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – Experimental test*”, Materials and Structures, Nr. 26, pp. 453-464.
- Aveldaño, R. R., Ortega, N. F. (2009), “*Influence of reinforcement distribution in the corrosive process of reinforced concrete beams*”, Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, V. 61, Nr. 3, pp. 213-220.
- Aveldaño, R. R., Ortega, N. F. (2011), “*Characterization of Concrete Cracking due to Corrosion of Reinforcements in Different Environments*”, Construction and Building Materials, V.25, pp.630-37.
- Aveldaño, R. R., Ortega, N. F. (2013), “*Behavior of concrete elements subjected to corrosion in their compressed or tensed reinforcement*”, Construction and Building Materials, Nr. 38, pp. 822–828.
- Calabrese, L., Campanella, G., Proverbio, E. (2013), “*Identification of corrosion mechanisms by univariate and multivariate statistical analysis during long term acoustic emission monitoring on a pre-stressed concrete beam*”, Corrosion Science, V. 73, pp. 161-171.
- Elfergani, H. A., Rhys, P., Holford, K. M. (2013), “*Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission*”, Construction and Building Materials, V. 40, pp. 925–933.
- Fumin, L., Yingshu, Y., Chun-Qing, L. (2011), “*Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack*”, Construction and Building Materials, V. 25, Nr. 10, pp. 3878-3885.

- Hariche, L., Ballim, Y., Bouhicha, M. Kenai, S. (2012), “*Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion*”, Cement and Concrete Composites, V. 34, Nr. 10, pp. 1202–1209.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1627: “*Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón*”, Buenos Aires, (1997).
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales – Instituto Argentino de Siderurgia, Norma U 500-528: “*Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón*”, Buenos Aires, (1989).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1871: “*Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*”, Buenos Aires, (2005).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1546: “*Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión*”, Buenos Aires, (1992).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1658: Hormigón. “*Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral*”, Buenos Aires, (1995).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1534: “*Hormigón de cemento portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio*”, Buenos Aires, (1985).
- Malumbela, G., Moyo, P., Alexander, M., (2009), “*Behaviour of RC beams under sustained service loads*”, Construction and Building Materials, V. 23, Nr. 11, pp. 3346–3351.
- Melchers, R. (2001), “*Assessment of existing structures, approaches and research needs*”, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 406-411.
- Moro, J. M., Meneses, R. S., Ortega, N. F., Aveldaño, R.R., Señas, L., Priano C. V. (2012), “*Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Reciclado con Tratamientos Previos*”, CINPAR 2012, VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 11 páginas.
- Ortega, N. F., Alonso, M. C., Andrade, M. C., López, C. (2001), “*Análisis de la fisuración ocasionada por la corrosión de las armaduras activas de elementos pretensados*”, Coloquia, Madrid.
- Peralta, M. H., Rivas, I. E., Ortega, N. F. (2006), “*Análisis Numérico de la Fisuración Superficial de Estructuras de Hormigón Armado por Efecto de la Corrosión*”, Informes de la Construcción, V. 58, No. 501, pp. 51-58.
- Rodríguez, J., Ortega, L. M., Casal, J., Vidal, M. A. (1993), “*Disminución de la adherencia entre hormigón y barras corrugadas debido a la corrosión*”, Hormigón y Acero, No 189, pp. 49-65.
- Rodríguez, J., Ortega, L. M., García, A. M. (1993), “*Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón, mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU 401*”, Hormigón y Acero, No. 189, pp. 79-91.
- Rodríguez, J., Ortega Basagoiti, L. M., Casal, J., Diez, J. M. (1996), “*Comportamiento estructural de vigas de hormigón con armaduras corroídas*”, Hormigón y Acero, No. 200, pp.113-131.
- Rodríguez, J., Ortega Basagoiti, L. M., Casal, J., Diez, J. M. (1998), “*La corrosión de armaduras y la vida residual de las estructuras de hormigón*”, Hormigón y Acero, No. 208, pp. 63-78.
- Schierloh M. I. (2003)., “*Corrosión de armaduras. Características que debe tener el hormigón para aumentar la protección*”, Tesis de Magíster en Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Director de Tesis: Ortega N.F.
- Schierloh M. I., Ortega N. F., Señas L. N. (2001), “*Relación entre Algunas Propiedades del Hormigón del*

Recubrimiento y el Proceso Corrosivo de las Armaduras”, 14° Reunión de Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, pp. 125-132.

Torres-Acosta, A. A., Navarro-Gutierrez, S., Terán-Guillén, J. (2007), “Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams”, Engineering Structures, V. 29, Nr. 6, pp. 1145-1152.

Tuutti K. (1982); “*Corrosion of steel in concrete*”, Swedish Cement and Concrete Institute (CIB) pp. 4-82, Stockholm, Sweden

Yu, L., François, R., Dang, V. H., L'Hostis, V., Gagné, R., “*Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions*”, Cement & Concrete Research, N°67, 2015, pp.246-258.