

**FERNANDA WANDERLEY CORRÊA DE ARAÚJO**

**ESTUDO DA REPASSIVAÇÃO DA ARMADURA EM CONCRETOS  
CARBONATADOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
de título de Doutor em Engenharia.

**São Paulo  
2009**

**FERNANDA WANDERLEY CORRÊA DE ARAÚJO**

**ESTUDO DA REPASSIVAÇÃO DA ARMADURA EM CONCRETOS  
CARBONATADOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
de título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:  
Prof. Dr. Paulo Helene

**São Paulo  
2009**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

**Araújo, Fernanda Wanderley Corrêa de**  
**Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química / F.W.C. de Araújo. -- São Paulo, 2009.**  
**217 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.**

**1. Estruturas (Recuperação) 2. Eletroquímica 3. Concreto armado I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.**

*Aos meus pais e à minha família,  
Agradeço todo amor, investimento e carinho dedicados a mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Professor Paulo Helene pela confiança, orientação, ensinamentos e chances de aprendizado durante esses quatro anos e meio de convivência.

Agradeço aos Professores Enio Pazini Figueiredo e Eliana Monteiro por terem me aberto as portas para a realização deste projeto de vida, além de terem confiado na minha capacidade.

Agradeço à Escola Politécnica da USP e a todos os seus professores e funcionários pelo suporte, amizade e carinho durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Engrácia, ao Paulinho e à Fátima pelo carinho e pela ajuda com a parte burocrática do curso.

Agradeço aos amigos reencontrados (Marcelo e Fer Giannotti), e aos amigos conquistados (Luciana, Betinha, Odair, Maurício, Atabyrio, Clebão, Juarez, Clóvis, Flávio e Cris, Leo Grilo e Karlinha, e Leandro e Rejane), não somente pela ajuda durante a realização dos experimentos e análise dos resultados, mas também pelos momentos de alegria e descontração, essenciais para superarmos as dificuldades.

Agradeço à tia Clarinha pelo carinho, abrigo, conselhos e os eventos com o grupo dos culturais e étlicos.

Agradeço ao Antônio Acácio por ter feito essa etapa da minha vida fluir mais tranquilamente, não somente por suas sugestões e mediações, mas principalmente por seu carinho e companheirismo.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa de doutorado.

Agradeço ao IPT pelos ensaios realizados, e à ABCP e à Holcim (Brasil) pelos materiais doados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.*

(Cora Coralina)

Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – USP – Brasil

## ESTUDO DA REPASSIVAÇÃO DA ARMADURA EM CONCRETOS CARBONATADOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA<sup>1</sup>

Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

### Resumo

---

Esta pesquisa estudou o método de realcalinização química (RAQ), através da absorção e difusão de soluções alcalinas na superfície do concreto carbonatado. Neste estudo foram utilizadas três espécies químicas para obtenção das soluções alcalinas: carbonato de sódio, hidróxido de potássio, e hidróxido de cálcio. Para avaliar a eficácia desta nova técnica de reabilitação, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação e de realcalinização, medidas eletroquímicas de potencial de corrosão e de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) para a verificação do estado da armadura, ensaios de imersão, absorção e ascensão capilar em concretos de referência, carbonatados e realcalinizados.

Em razão da falta de conhecimento sobre a eficácia da técnica de realcalinização eletroquímica (RAE) em relação à repassivação da armadura, em paralelo foi realizado o estudo da repassivação das armaduras na RAE. Em relação à durabilidade da técnica, foi avaliada a resistência do concreto recuperado quando submetido a um novo ciclo de carbonatação acelerada, analisando as novas profundidades de carbonatação para cada solução alcalina estudada.

Na repassivação da armadura com a técnica de RAE, a solução de carbonato de sódio proporcionou valores de potencial de corrosão mais eletropositivos do que a solução de KOH, e gráficos de EIE similares aos obtidos com a solução de KOH. Na RAQ, a solução de KOH foi mais eficiente, sendo os resultados de potencial de corrosão similares aos obtidos com a solução de carbonato de sódio, no entanto, com valores de impedância e ângulo de fase superiores aos obtidos com carbonato de sódio. A solução de hidróxido de cálcio foi a que obteve os melhores valores de potencial de corrosão, proporcionando às barras valores mais eletropositivos do que antes da carbonatação. No entanto, a RAQ utilizando a solução de hidróxido de cálcio não propiciou a realcalinização do cobrimento do concreto, devendo então ser melhor estudada e, até que sua eficácia seja melhor entendida, sua aplicação deve ser vista com ressalvas.

Ao final dos experimentos foi possível verificar que a RAQ aumentou bastante a durabilidade do cobrimento do concreto quando submetido a um novo ciclo de carbonatação acelerada. Enquanto os corpos-de-prova de referência ao final dos 45 dias de ensaio de carbonatação acelerada foram quase que totalmente carbonatados, os corpos-de-prova realcalinizados com as soluções de carbonato de sódio e hidróxido de potássio não apresentavam qualquer indício de carbonatação.

Palavras-chave: concreto; carbonatação; realcalinização eletroquímica (RAE); realcalinização química (RAQ); repassivação.

---

<sup>1</sup> ARAUJO, F.W.C. Estudo da repassivação das armaduras em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química. 2009. 217p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Polytechnic School – University of São Paulo – USP - Brazil

## CARBONATED CONCRETE STEEL REPASSIVATION STUDY THROUGH CHEMICAL REALKALISATION TECHNIQUE<sup>2</sup>

Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

### Abstract

---

This research studied the method of chemical realkalisation (CRA), through the absorption and diffusion of alkalis in the carbonated concrete surface, as a new technique of rehabilitation. The experimental program was conducted in three set of concrete specimens: reference, carbonated and CRA treated. The CRA method was studied with three types of alkaline solutions: sodium carbonate, potassium hydroxide and calcium hydroxide. To evaluate the effectiveness of CRA treatment was carried out measures of depths of carbonation and realkalisation; electrochemical measurements of potential and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to verify the condition of steel bars; immersion, absorption and capillary tests.

Besides these tests, the study of repassivation in corroded steel bars when applied the technique of electrochemical realkalisation (ERA) was also performed in parallel, since their effectiveness is considered unclear in various studies regarding the durability of the technique. The concrete treated with CRA method was submitted to a new accelerated carbonation cycle, and new measurements of carbonation depth were made for each alkaline solution applied.

The repassivates reinforcements with ERA technique showed that the sodium carbonate solution provided corrosion potential values more electropositive than the KOH solution, and EIS graphics are similar those obtained with the KOH solution. In CRA technique, the KOH solution was more efficient, and the results of corrosion potential are similar those obtained with the sodium carbonate solution, however, with the results of impedance and phase angle higher than for sodium carbonate solution. The calcium hydroxide solution showed the best results of corrosion potential, providing bars more electropositive than before carbonation. However, the calcium hydroxide solution not provided the concrete realkalisation, and this alkaline solution should be more studied. Their implementation must be viewed with exceptions until its effectiveness has been proved.

At the end of durability experiments was possible to verify that the CRA greatly increased the concrete durability when subjected to a new accelerated carbonation cycle. After 45 days of testing, the reference concrete specimens were almost totally carbonated. Therefore, the concrete specimens realkalised with sodium carbonate and potassium hydroxide solutions were no carbonation indication.

Keywords: concrete; carbonation; electrochemical realkalisation (ERA); chemical realkalisation (CRA); repassivation.

---

<sup>2</sup> ARAUJO, F.W.C. A study on the carbonated concretes steels repassivation through chemical realkalisation technique. 2009. 217p. PhD Thesis – Polytechnic School – University of São Paulo.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Origem das manifestações patológicas com relação às etapas de produção e uso das obras civis de concreto armado (Helene, 2007).....	1
Figura 1.2. Lei da evolução dos custos das intervenções, Lei de Sitter (1984).....	2
Figura 2.1. Diagrama de Pourbaix com o sistema Fe – H <sub>2</sub> O a 25°C para um eletrodo padrão de hidrogênio, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade (Medeiros, 2002).....	8
Figura 2.2. Avanço do processo de carbonatação, segundo o CEB/BI 152 (1984).....	11
Figura 2.3. Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (Andrade, 1992).....	13
Figura 2.4. Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (Verbeck, 1950, apud Figueiredo et al., 1993). ....	13
Figura 2.5. Estudo da profundidade carbonatada verso umidade relativa para diferentes classes de concreto realizado por (adaptado de Roy et al., 1999, por Abreu, 2004). ....	14
Figura 2.6. Efeito isolado do percentual de CO <sub>2</sub> na profundidade de carbonatação (Pauletti et al., 2007). ....	15
Figura 2.7. Influencia do tipo de cimento e sua quantidade por m <sup>3</sup> sobre a profundidade de carbonatação (Ho e Lewis, 1987, apud Figueiredo et al., 1993). ....	17
Figura 2.8. Coeficiente de carbonatação médios, para cada relação água/aglomerante, para concretos que passaram por cura úmida (Castro, 2003). ....	18
Figura 2.9. Influencia da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação (Figueiredo et al., 1993). ....	18
Figura 2.10. (a) Valores de potencial da armadura imersa em argamassa por 300 horas. (b) Valores de potencial da armadura imersa por 300 horas em solução de poros formuladas (Poursaee e Hansson, 2007). ....	22
Figura 2.11. Potenciais de corrosão obtidos através do GECOR6 para concreto de relação a/c 0,40 (Araujo, 2004). ....	23
Figura 3.1. Velocidade da realcalinização química com diferentes soluções alcalinas utilizadas por Araujo e Figueiredo (2005).....	26
Figura 3.2. Princípio da realcalinização eletroquímica (adaptada de Araujo, 2004).....	29
Figura 3.3. Esquema da realcalinização química (adaptada de Araujo, 2004).....	30
Figura 3.4. Realcalinização química por absorção e difusão para relação água/cimento 0,4 (Teixeira, 2002). ....	31
Figura 3.5. Quantidade de argamassa AC I retida após o ensaio de arrancamento em diferentes substratos (Araujo et al., 2009).....	36
Figura 3.6. Quantidade de argamassa AC II retida após o ensaio de arrancamento em diferentes substratos (Araujo et al., 2009).....	36
Figura 3.7. Porcentagem de área removida para cada um dos sistemas de pintura estudados (Araujo et al., 2009).....	36

Figura 3.8. Redução da absorção de água em função da RAE (baseado dos dados de Yeih e Chang, 2005).....	38
Figura 3.9. Redução da absorção de água em função da densidade de corrente aplicada durante o tratamento de RAE (baseado dos dados de Yeih e Chang, 2005).....	38
Figura 3.10. (a) Influência da quantidade de corrente aplicada durante a RAE na resistência à compressão. (b) Influência da quantidade de corrente aplicada durante a RAE no módulo de elasticidade (Yeih e Chang, 2005).....	39
Figura 3.11. Resultados de resistência à compressão em corpos-de-prova de referência, carbonatados e realcalinizados. ....	40
Figura 3.12. (a) Influência da quantidade de corrente aplicada durante a RAE no potencial de corrosão. (b) Influência da quantidade de corrente aplicada durante a RAE na taxa de corrosão (Yeih e Chang, 2005).....	42
Figura 3.13. Comparação das barras com baixo (passivo) e alto grau (ativo) de corrosão para diversos tempos de realcalinização e a intensidade de corrosão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (a), e em argamassa alcalina (b) (González et al., 2000).....	43
Figura 3.14. Comparação para diversos tempos de imersão em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e de velocidade de corrosão de barras com diferentes graus de pré-corrosão, onde: (a)0; (b) 145; (c) 280; e (d) 4300 $\text{mg}/\text{dm}^3$ de ferro corroído (Miranda et al., 2003). ....	44
Figura 4.1. Concreto de relação a/c 0,46. (a) Aparência dos agregados devidamente envolvidos pela argamassa. (b) Abatimento de tronco de cone. ....	51
Figura 4.2. Concreto de relação a/c 0,65. (a) Aparência dos agregados devidamente envolvidos pela argamassa. (b) Abatimento de tronco de cone. ....	51
Figura 4.3. Concreto de relação a/c 0,93. (a) Aparência dos agregados devidamente envolvidos pela argamassa. (b) Abatimento de tronco de cone. ....	51
Figura 4.4. Diagrama de dosagem para concretos de abatimento de tronco de cone de $6\pm 1$ cm e teor de argamassa de 52%.....	52
Figura 4.5. Modelo de corpo-de-prova para os ensaios eletroquímicos.....	53
Figura 4.6. Limpeza das barras com imersão em solução de ácido clorídrico, água destilada e hexametilenotetramina.....	53
Figura 4.7. As barras após a secagem e armazenadas em um dessecador com sílica gel. ....	54
Figura 4.8. Esquema da delimitação da área a ser despassivada. ....	54
Figura 4.9. (a) Fôrma para moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de medidas eletroquímicas. (b) Detalhe das armaduras cobertas com fita isolante e alinhadas devido às guias. ....	55
Figura 4.10. Fôrma montada e pronta para a realização da moldagem, com as armaduras revestidas com fita isolante e devidamente alinhadas através das guias. ....	55
Figura 4.11. (a) Corpos-de-prova cobertos por papel filme para evitar perda de água para o ambiente. (b) Corpos-de-prova depois de 24 horas de moldagem. ....	55

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

