



POLI/USP – PCC2526

METODOLOGIA PARA RECUPERAÇÃO/ PROTEÇÃO ELETROQUÍMICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Professor: Dr. Paulo Helene
Palestrante: M.Sc. Fernanda Araújo

POLI/USP – PCC2526

Métodos eletroquímicos de recuperação/proteção

Proteção direta da armadura

- Proteção Catódica.

Proteção indireta da armadura (através do concreto)

- Extração Eletroquímica de Cloretos.
- Realcalinização.
 - Método eletroquímico.
 - Método por difusão iônica.

2

POLI/USP – PCC2526

Métodos eletroquímicos

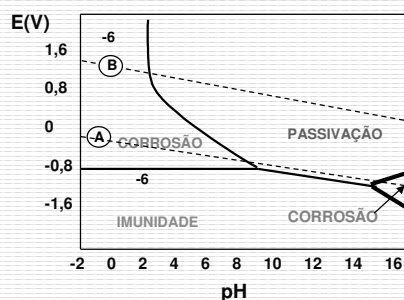
FUNDAMENTO

Assim denominam-se os métodos que adotam como princípio básico a redução dos potenciais das armaduras para valores abaixo do potencial de passivação (região de imunidade nos diagramas de Pourbaix).

3

POLI/USP – PCC2526

Diagrama Pourbaix



(PAGE, 1988)

4

POLI/USP – PCC2526

-560 mV

Fe

Cu

E

-

+

distancia

5

POLI/USP – PCC2526

-500 mV

Fe

Cu

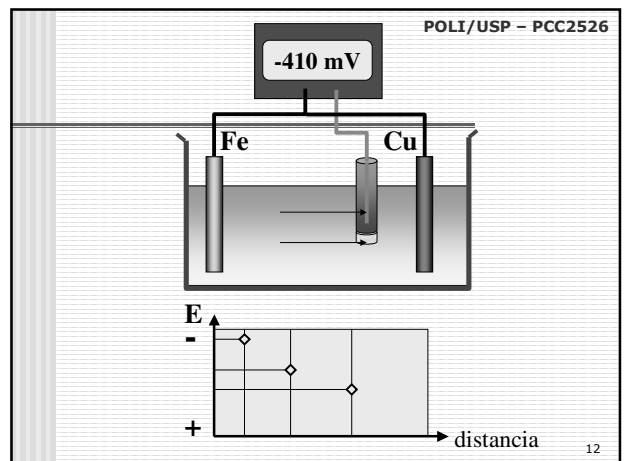
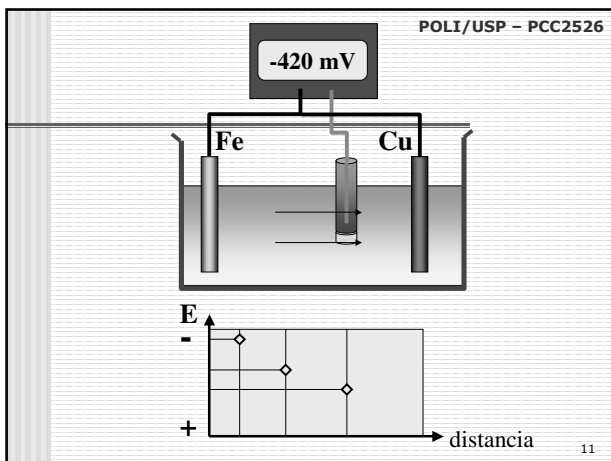
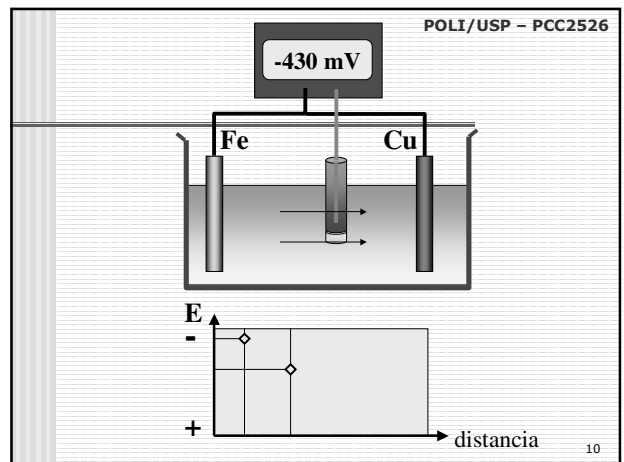
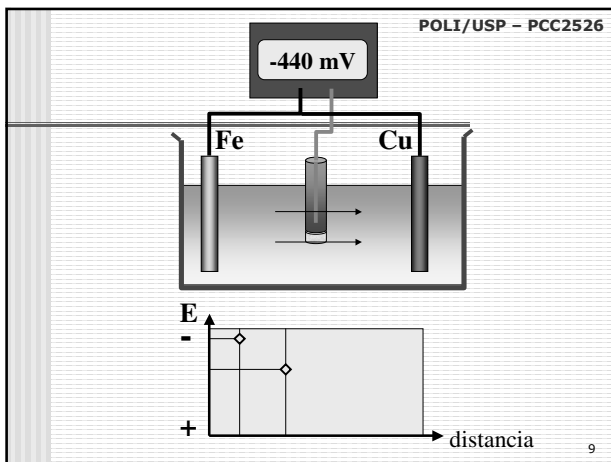
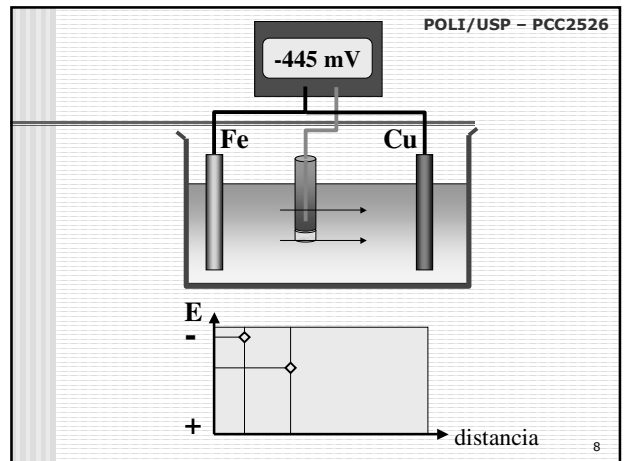
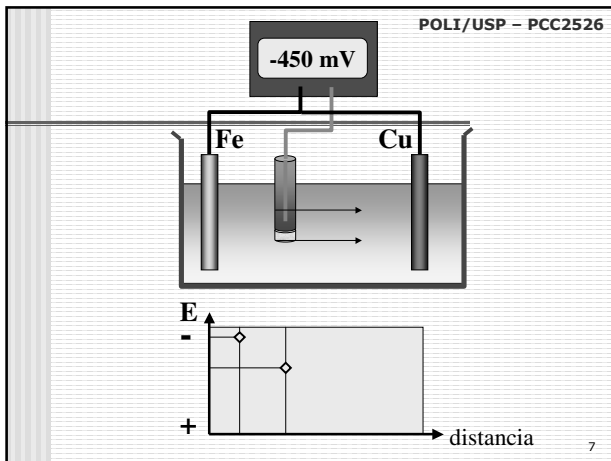
E

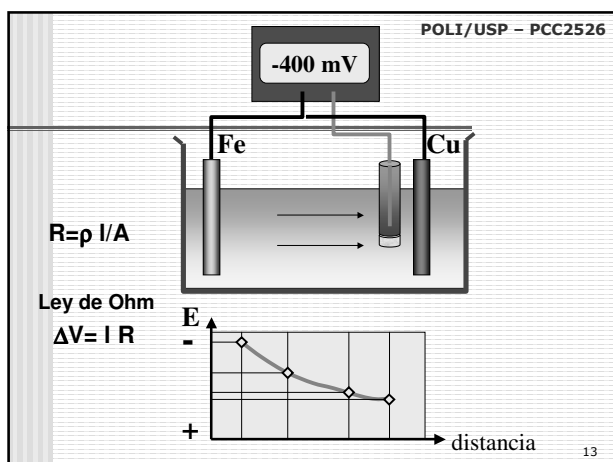
-

+

distancia

6





POLI/USP – PCC2526

Proteção catódica

Consiste na proteção da armadura através da interrupção ou controle da corrosão, convertendo o estado das armaduras de anódico para catódico.

- Por corrente impressa.
- Por ânodo de sacrifício.

14

POLI/USP – PCC2526

PC – corrente impressa

A técnica envolve a aplicação de uma corrente contínua entre um ânodo permanentemente posicionado na superfície do concreto e a armadura dentro do concreto.

Qualquer material pode ser utilizado como ânodo.

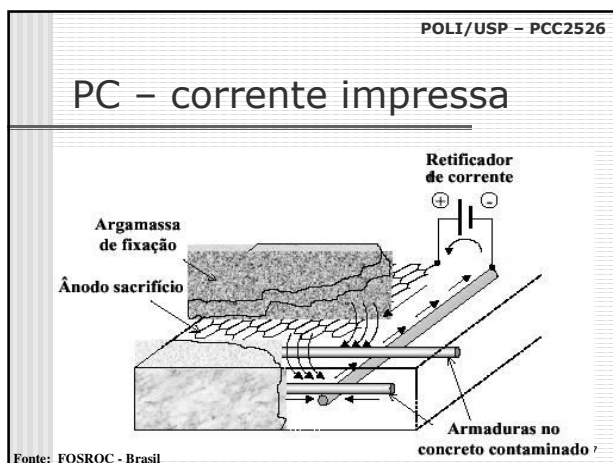
15

POLI/USP – PCC2526

PC – corrente impressa

- São utilizados metais mais nobres como o titânio, cujos produtos de corrosão são menos expansivos.
 - Para malha condutora de corrente contínua, a densidade de corrente máxima é de 100mA/m².
- Para pintura eletroativa a densidade máxima de corrente é de 30mA/m².
- A tensão aplicada depende:
 - Resistividade do concreto.
 - Espessura de cobrimento.

16



POLI/USP – PCC2526

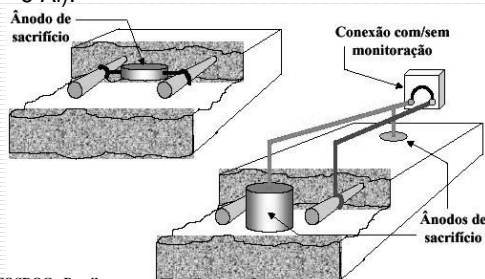
PC – ânodo de sacrifício

A técnica utiliza ânodos de sacrifício como uma conexão elétrica entre a armadura e um material mais ativo que o aço, que atuaria como ânodo.

18

PC – ânodo de sacrifício

- Metals com menor potencial de redução (Zn e Al).



Fonte: FOSROC - Brasil

19

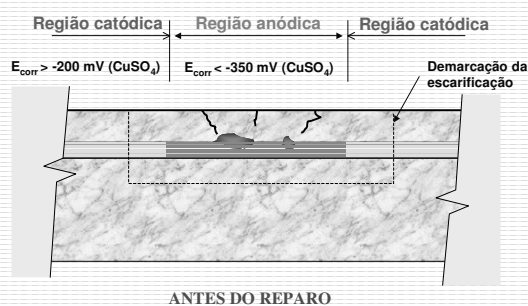
Proteção catódica

Quando é conveniente aplicar a Proteção Catódica?

- Elevada contaminação ou perigo de contaminação por cloretos.
- Alta durabilidade requerida sem manutenção durante a vida de serviço.
- Reparos localizados.
- Recuperação de armaduras galvanizadas.

20

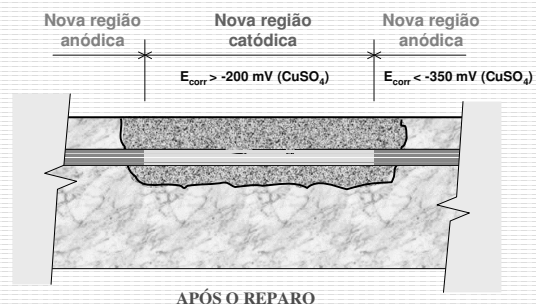
Proteção catódica



Fonte: FOSROC - Brasil

21

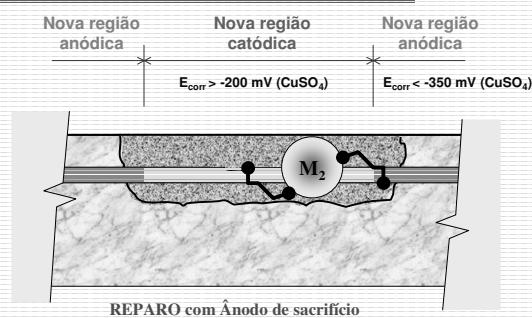
Proteção catódica



Fonte: FOSROC - Brasil

22

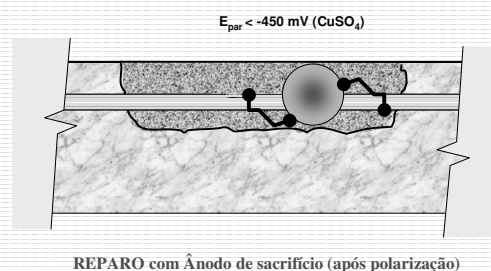
Proteção catódica



Fonte: FOSROC - Brasil

23

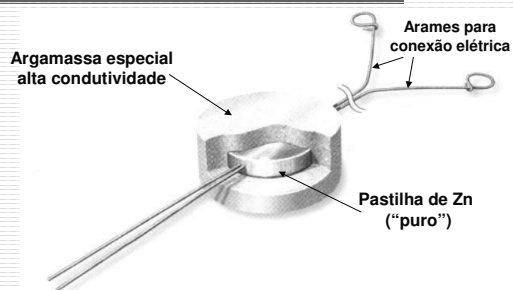
Proteção catódica



Fonte: FOSROC - Brasil

24

Proteção catódica



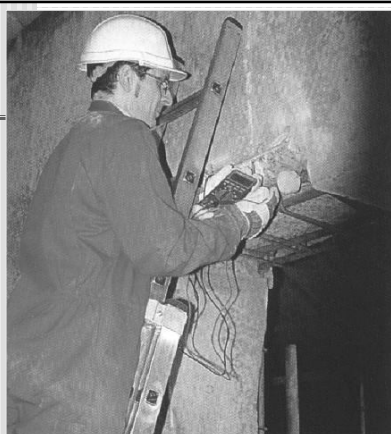
Fonte: FOSROC - Brasil

25



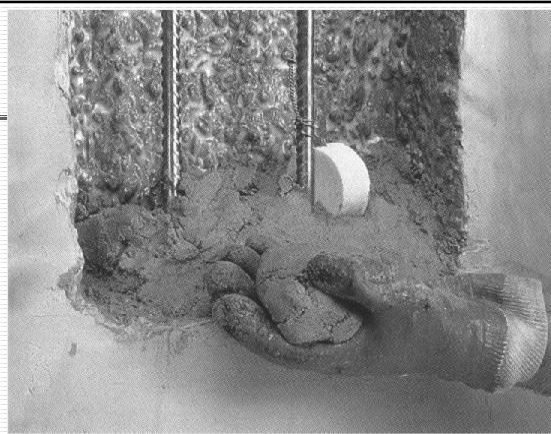
Fonte: FOSROC - Brasil

26



Fonte: FOSROC - Brasil

27



Fonte: FOSROC - Brasil

28

Memorial Bridge - Daytona Beach, FL (134 Pilares)



Fonte: FOSROC - Brasil

29

Loxahutchee River - Jupiter, FL (12 Pilares)



Fonte: FOSROC - Brasil

30

Proteção catódica

EFICIÊNCIA

- Potenciais dos metais no meio em questão.
- Polarização da reação catódica sobre a superfície do metal mais nobre e da reação anódica do metal menos nobre.
- Natureza do meio.
- Fatores geométricos: área relativa dos metais e distância entre os mesmos.

31

Proteção catódica

PREVENÇÃO CATÓDICA

Tipo de proteção catódica que é utilizada para Prevenção. Quando o aço está passivado, para se conseguir a sua polarização para um potencial de proteção, é suficiente a aplicação de densidades de corrente elétrica inferiores a 2 mA/m².

32

Proteção catódica

CORRENTE IMPRESSA		ÂNODO DE SACRIFÍCIO	
VANTAGENS	DESVANTAGENS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Ânodo de grande vida útil	Requer fonte externa	Não requer fonte externa	Limitada capacidade de corrente
Não há limitação de tensão	Alto custo de instalação	Baixo custo de instalação	Limitada capacidade de polarização
Ajustável em uma ampla faixa	Alto custo de manutenção	Baixo custo de manutenção	Área de atuação limitada
Controle de funcionamento		Sistema relativamente simples e viável	

33

A realcalinização e a extração de cloretos são métodos eletroquímicos de reparo que detêm a corrosão e promovem a repassivação das armaduras, ampliando a vida útil das estruturas

(EGGERS & OLIVEIRA, 1997)

34

HISTÓRICO

Técnicas desenvolvidas nos Anos 80 na Noruega pela empresa NORCURE
Neste momento pertence a FOSROC INTERNATIONAL

35

EMPREGO

Europa → **Mais de 10 anos**

EUA, Japão e alguns países árabes

Na atualidade existem mais de 1/2 milhão de m² já aplicados

No Brasil????

Foi realizado um estudo de doutorado (Monteiro, 2002) na USP, patrocinada pela FAPESP e a FOSROC

36

POLI/USP – PCC2526

Castelo de Osaka, Japão

- Realcalinização
- Data: 1996
- Área Tratada: 5000 m²



Fonte: FOSROC - Brasil

POLI/USP – PCC2526

Prédios Residenciais, Noruega

- Realcalinização
- Data: 1995
- Área Tratada: 2400 m²

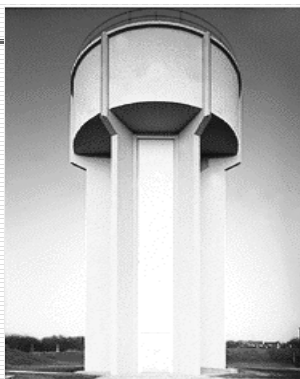


Fonte: FOSROC - Brasil

POLI/USP – PCC2526

Caixa d'água, Reino Unido

- Realcalinização
- Data: 1991
- Área Tratada: 600 m²

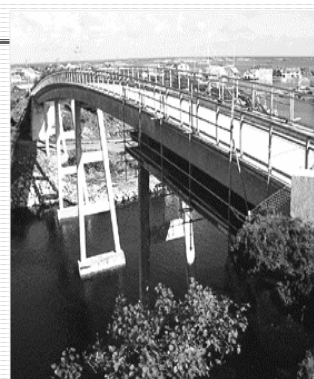


Fonte: FOSROC - Brasil

POLI/USP – PCC2526

Ponte Salvøy, Noruega

- Extração eletroquímica de cloretos
- Data: 1995
- Idade: 41 anos
- Área Tratada: 1000 m²



Fonte: FOSROC - Brasil

POLI/USP – PCC2526

Rodovia Interestadual #395, Virginia, USA

- Extração eletroquímica de cloretos
- Data: 1995
- Área Tratada: 733 m²
- Valor Contrato: US\$ 75,000.00



Fonte: FOSROC - Brasil

POLI/USP – PCC2526

Estacionamento, Reino Unido

- Extração eletroquímica de cloretos
- Data: 1995
- Área Tratada: 3000 m²



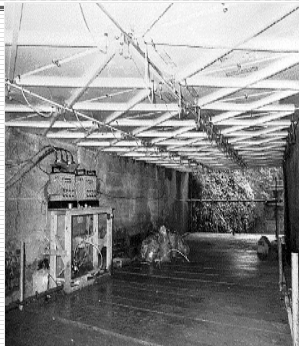
Fonte: FOSROC - Brasil

Ponte Market Harborough, Reino Unido

• Extração eletroquímica de cloretos

• Data: 1993

• Área Tratada: 200 m²

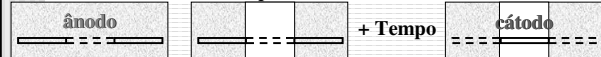


Fonte: FOSROC - Brasil

POR QUE SÃO UTILIZADAS ESTAS TÉCNICAS?

Dois tipos de reparo
Tradicional
Eletroquímico

A) No caso do Reparo Tradicional Localizado
reparo



B) Cl⁻ e CO₂ ainda estão no concreto

44

Corrosão das Armaduras $\Rightarrow$ Fenômeno Eletroquímico

Realcalinização
Extração de Cloretos $\Rightarrow$ Técnicas Eletroquímicas

Mesma Natureza

45

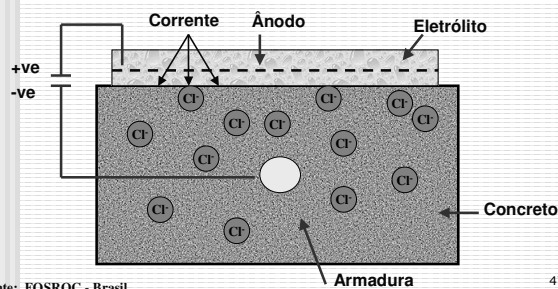
Extração eletroquímica de cloretos

FUNDAMENTO

Remove os íons cloreto do concreto sob a influência de uma corrente eletroquímica temporária, repassivando as barras de aço

46

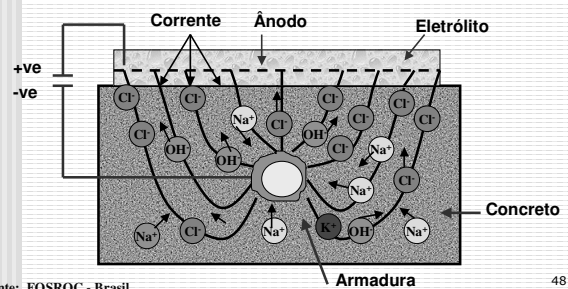
Extração de cloretos

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

47

Extração de cloretos

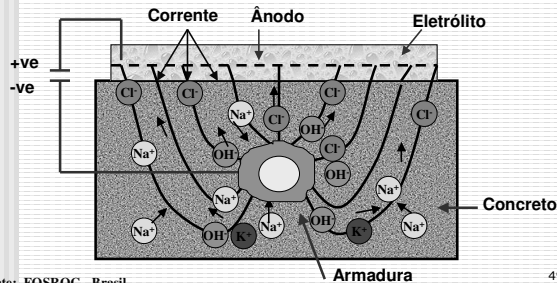
PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

48

Extração de cloretos

PRINCÍPIO

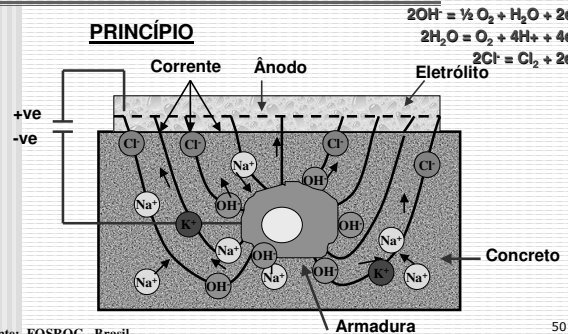


Fonte: FOSROC - Brasil

49

Extração de cloretos

PRINCÍPIO



Fonte: FOSROC - Brasil

50

Extração de cloretos

PRINCÍPIO

- ✓ Remove íons cloreto do interior do concreto, por migração, através da indução de uma corrente elétrica entre 0,5 e 2 A/m².
- ✓ Ocorre a migração de cátions para as armaduras, a migração de ânions para um eletrodo metálico e a produção de íons hidroxila na superfície das armaduras, como consequência da reação catódica.
- ✓ A velocidade com que os cloretos são removidos é diretamente proporcional ao fluxo de corrente que atravessa o concreto.

51

Extração de cloretos

COMPONENTES

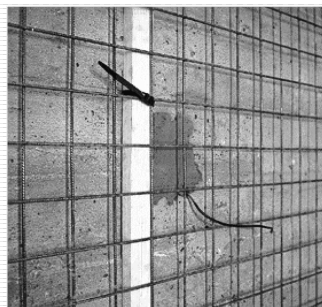
- ELETROLITO → Água Tratada
- RESERVATÓRIO → Fibra de Celulose
Pano de Feltro
Tanques de aço inoxidável
- ELETRODO EXTERNO → Malha Metálica
 - Aço Comum
 - Aço Inoxidável
 - Titânio

52

Extração de cloretos

Eletrodo externo

Malha metálica

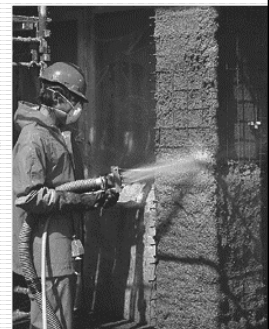


Fonte: FOSROC - Brasil

Extração de cloretos

Reservatório

Jateamento de fibra de celulose



Fonte: FOSROC - Brasil

Extração de cloretos

Reservatório
Tanques de aço inoxidável



Fonte: FOSROC - Brasil

Etapas da EEC

Inspeção inicial

Etapa 1

- ✓ Identificar características do concreto.
- ✓ Identificar fissuras e destacamentos.
- ✓ Determinar perfis de cloretos iniciais.
- ✓ Determinar a densidade da armadura.
- ✓ Observar a continuidade das armaduras.

56

Etapas da EEC

Planejamento

Etapa 2

- ✓ Fazer cronograma de tratamento.
- ✓ Identificar equipamentos necessários.
- ✓ Determinar eletrólito que será utilizado.
- ✓ Determinar ânodo externo que será utilizado.

57

Etapas da EEC

Preparação

Etapa 3

- ✓ Remover pintura ou revestimento.
- ✓ Reparar fissuras e áreas de cobrimento danificado ou destacado.
- ✓ Limpar as armaduras e reparar com uma argamassa a base de cimento.
- ✓ Determinar onde serão retiradas amostras.
- ✓ Estabelecer conexões elétricas e instalar o ânodo externo.

58

Etapas da EEC

Tratamento

Etapa 4

- ✓ Aplicar e monitorar a densidade de corrente.
- ✓ Retirar amostras para verificar o teor de cloretos.
- ✓ Desligar corrente quando terminar a extração.

59

Etapas da EEC

Conclusão

Etapa 5

- ✓ Remover ânodo.
- ✓ Limpar a superfície do concreto.

60

Etapas da EEC

Manutenção

Etapa 6

- ✓ Realizar pintura de proteção para evitar contaminação.

61

Extração de cloretos

AMBIENTE

Recomendações

INVERNO - O eletrólito não pode estar congelado

VERÃO - Cobrir o reservatório quando em altas temperaturas e baixas umidade

62

Extração de cloretos

PREPARAÇÃO DA ESTRUTURA

Cuidados

- ✓ Distribuição da corrente.
- ✓ Fuga de corrente.
- ✓ Intensidade de corrente.
- ✓ Densidade de corrente.

63

Extração de cloretos

AVALIAÇÃO TÉCNICA

- ✓ Determinação do teor de cloretos.

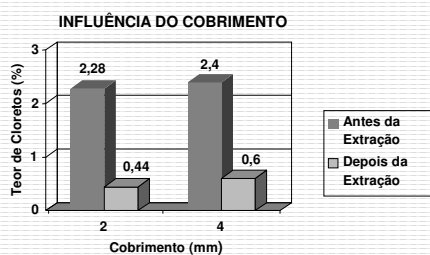
Métodos

- ASTM D 1411 (1985)
- ASTM C 1152 (1992)

64

Extração de cloretos

RESULTADOS

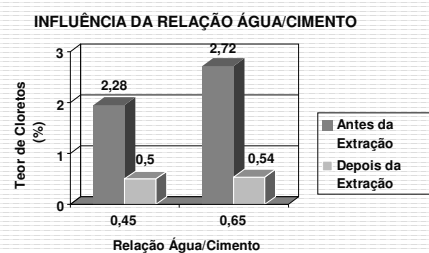


(BARBOSA,2001)

65

Extração de cloretos

RESULTADOS

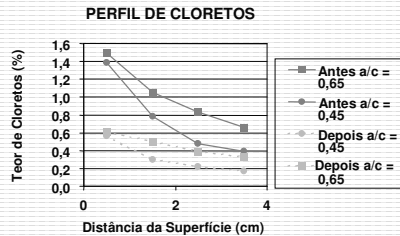


(BARBOSA,2001)

66

Extração de cloretos

RESULTADOS



(BARBOSA, 2001)

67

Extração de cloretos

TEMPO DE APLICAÇÃO

Depende:

■ Proporção de Cloroaluminatos

- ✓ quantidade de aluminatos (C_3A).
- ✓ pH do concreto.
- ✓ quantidade e tipo dos íons cloretos.

68

Extração de cloretos

TEMPO DE APLICAÇÃO

Depende:

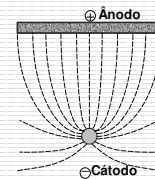
- ✓ Tipo de contaminação.
- ✓ Tipo de sal.
- ✓ Concentração dos cloretos no concreto.
- ✓ Distribuição dos cloretos no concreto.
- ✓ Espessura de carbonatação.
- ✓ Qualidade do concreto.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Densidade de armadura.
- ✓ Espessura de cobrimento.

69

Extração de cloretos

TEMPO DE APLICAÇÃO

✓ Influência do Cobrimento



Linhas padrão num campo não homogêneo entre a barra e a superfície

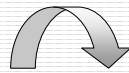
(ELSENER, 1990)

70

Extração de cloretos

TEMPO DE APLICAÇÃO

6 a 10 semanas



com períodos de repouso

71

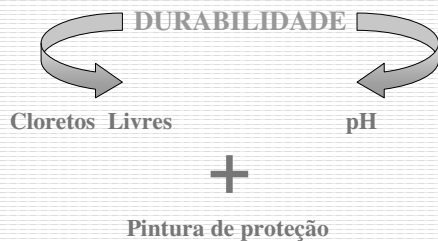
Extração de cloretos

TIPO DE ELETRÓLITO

- ✓ A acidificação do eletrólito e a formação de gás cloro são consideradas indesejáveis.
- ✓ O uso de um eletrólito alcalino, como uma solução saturada de $Ca(OH)_2$ ou de borato de sódio, pode evitar estes tipos de problemas.

72

Extração de cloretos



73

Extração de cloretos

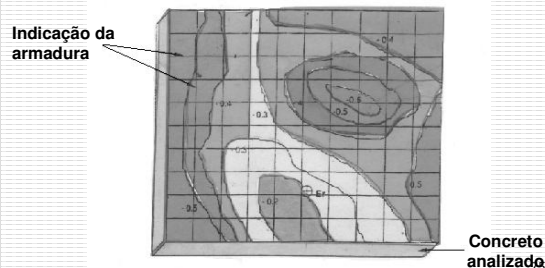
Avaliação da eficácia do método

- ✓ Análise do teor de cloretos no interior do concreto.
- ✓ Medida do potencial de corrosão antes e depois do tratamento, depois de um período de "descanso" para a armadura.
- É necessário realizar a impermeabilização da superfície.

74

Extração de cloretos

Mapa de potencial de corrosão

Concreto
analisado

Extração de cloretos

Possíveis efeitos colaterais

- ✓ Aderência aço/concreto
- ✓ Reação álcali/agregado

76

Extração de cloretos

Desvantagens dos reparos eletroquímicos

- ✓ Custo inicial elevado.
- ✓ Quantidade de conexões.
- ✓ Têm que ser feitos reparos tradicionais antes.
- ✓ Necessita de outros tratamentos se a estrutura tem o risco de ser contaminada novamente.
- ✓ Extração de cloretos é para o caso de penetração de cloretos.

77

Extração de cloretos

Desvantagens dos reparos eletroquímicos

Não é utilizado
em áreas imersa
ou de maré



Extração de cloretos

Vantagens dos reparos eletroquímicos

- ✓ Repassivação da armadura.
- ✓ Técnica menos destrutiva, causa pouca poluição, pó e barulho.
- ✓ Detalhes arquitetônicos são mantidos.
- ✓ Utilizada também para proteção do concreto.
- ✓ Curta duração.
- ✓ Instalação temporária.
- ✓ Não necessita de monitoramento permanente.

79

Realcalinização

FUNDAMENTO

Restituir a alcalinidade que existia no concreto após a hidratação dos materiais aglomerantes, sob a influência de uma corrente eletroquímica temporária repassivando as barras de aço.

80

Realcalinização

**REALCALINIZAÇÃO
ELETROQUÍMICA
(RAE)**



Patenteada na
década de 80
pela NORCURE

**REALCALINIZAÇÃO
IÔNICA
(RAI)**



Primeiro estudo
realizado em
2002 pela UFG

81

Realcalinização

Tempo de aplicação

**REALCALINIZAÇÃO
ELETROQUÍMICA**

1 Semana

**REALCALINIZAÇÃO
IÔNICA**

3 Semanas

82

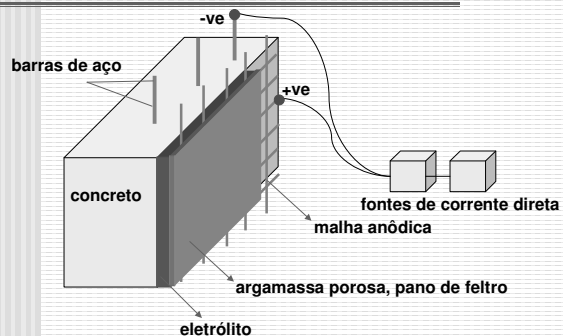
Realcalinização

Tipo de eletrólito

- ✓ A utilização de água como eletrólito provoca a acidificação do mesmo, e a formação de gás cloro, que é considerado indesejável.
- ✓ O uso de um eletrólito alcalino, como uma solução de 1Mol de CaCO_3 , ou KOH ou ainda de Ca(OH)_2 , evita este tipo de problema e ainda favorece a realcalinização pela absorção de íons.

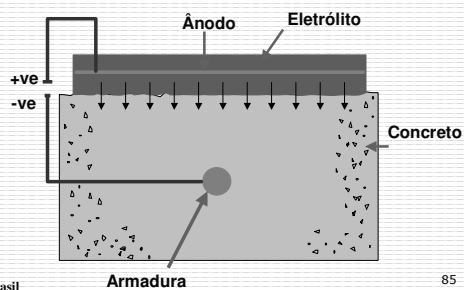
83

Realcalinização eletroquímica



84

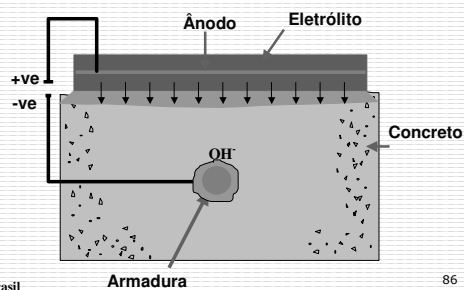
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

85

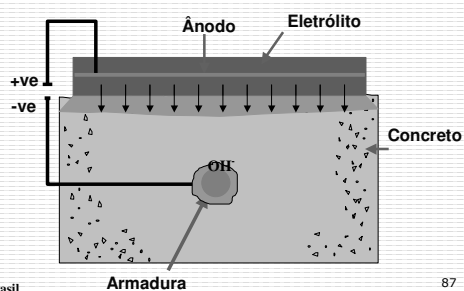
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

86

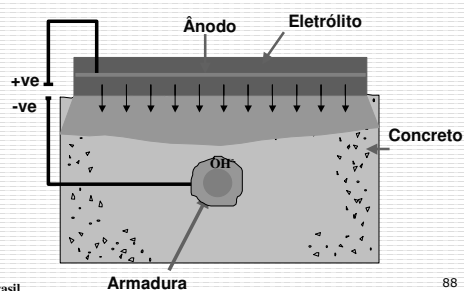
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

87

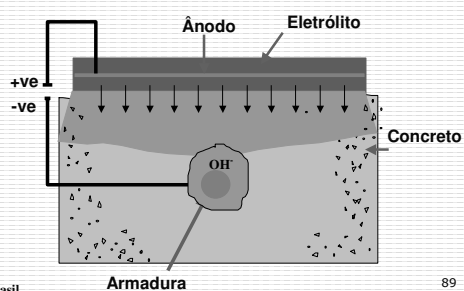
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

88

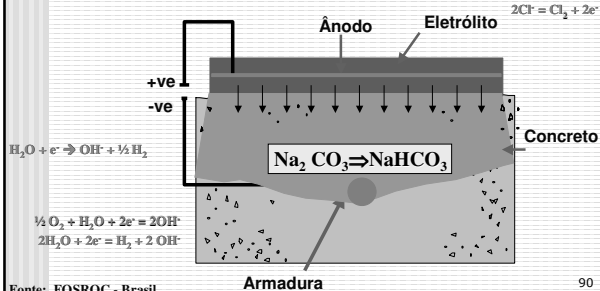
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

89

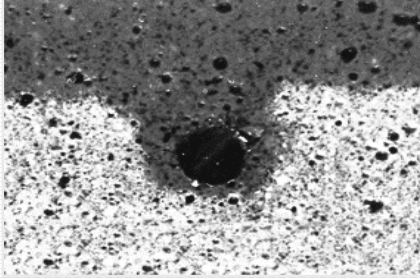
Realcalinização eletroquímica

PRINCÍPIO

Fonte: FOSROC - Brasil

90

Realcalinização eletroquímica

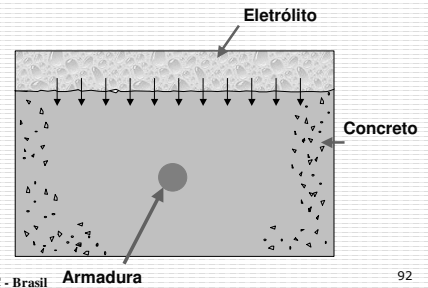


Mecanismo de realcalinização - indicador de fenolftaleína

91

Realcalinização iônica

PRINCÍPIO



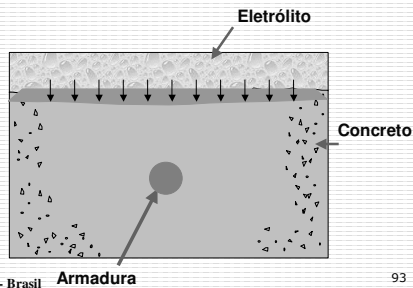
Fonte: adaptado da FOSROC - Brasil

Armadura

92

Realcalinização iônica

PRINCÍPIO



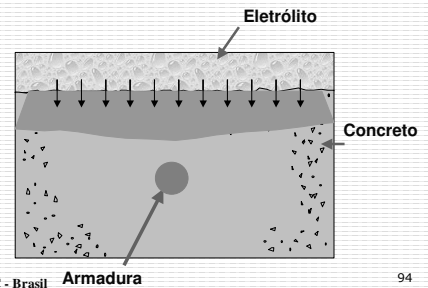
Fonte: adaptado da FOSROC - Brasil

Armadura

93

Realcalinização iônica

PRINCÍPIO



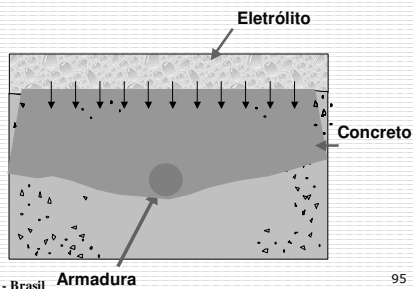
Fonte: adaptado da FOSROC - Brasil

Armadura

94

Realcalinização iônica

PRINCÍPIO



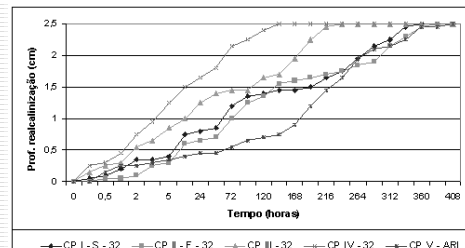
Fonte: adaptado da FOSROC - Brasil

Armadura

95

Realcalinização iônica

Tempo de aplicação

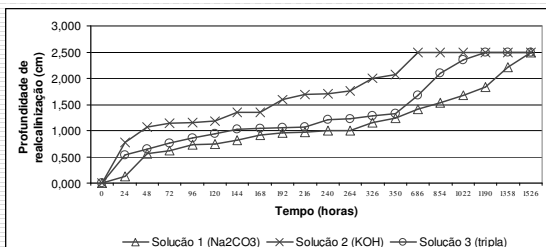


(TEIXEIRA, 2002)

96

Realcalinização iônica

Tipo de eletrólito



(ARAÚJO,2004)

97

Realcalinização

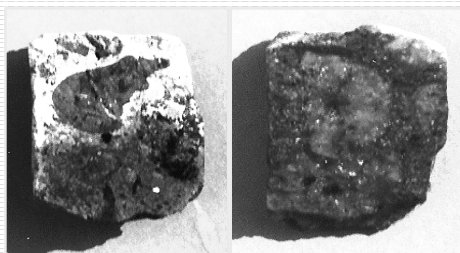
Avaliação da técnica

- ✓ Empregando soluções de indicadores químicos de pH.
(fenolftaleína ou timolftaleína)
- ✓ Empregando técnicas mais sofisticadas (tipo DTG, Rx).
- ✓ Medidas eletroquímicas.

98

Realcalinização

Teste através do indicador químico - Fenolftaleína



Antes

Depois

99

Realcalinização

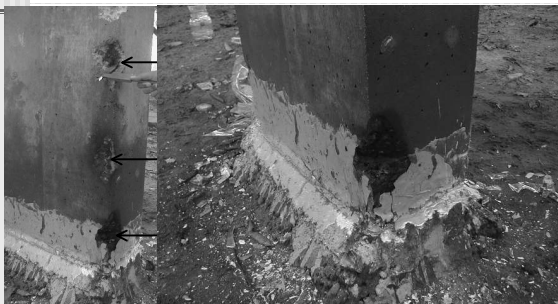


PROFUNDIDADE MÁXIMA DE CARBONATAÇÃO: 1,9 CM

(ARAÚJO,2004)

100

Realcalinização



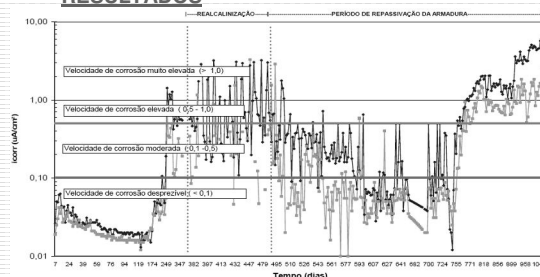
DEPOIS DE 10 DIAS REALCALINIZOU 1,9 CM NA REGIÃO IMERSA NA SOLUÇÃO

(ARAÚJO,2004)

101

Realcalinização

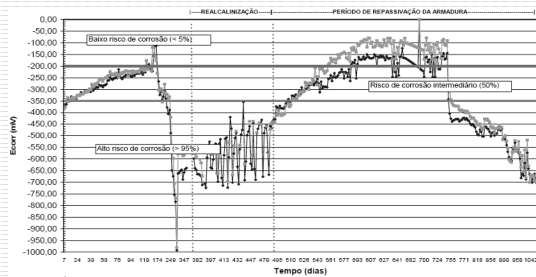
RESULTADOS



(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

Realcalinização

RESULTADOS

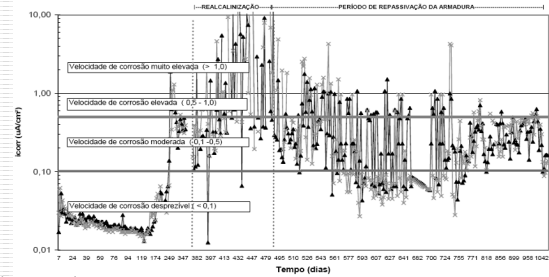


(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

— ME 1 — ME 2 — LIMITE 1 — LIMITE 2

Realcalinização

RESULTADOS

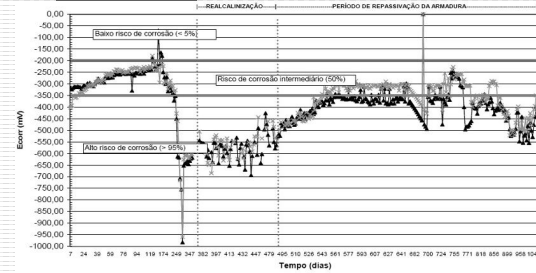


(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

— ME 3 — ME 4 — LIMITE 1 — LIMITE 2

Realcalinização

RESULTADOS

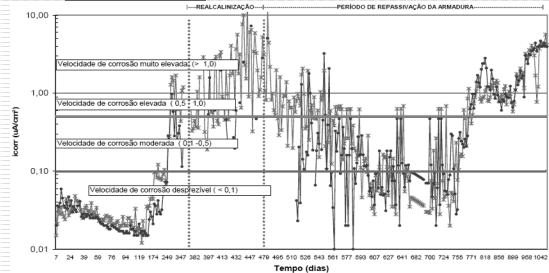


(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

— ME 3 — ME 4 — LIMITE 1 — LIMITE 2

Realcalinização

RESULTADOS

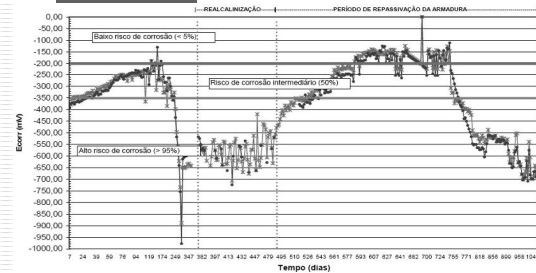


(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

— ME 5 — ME 6 — LIMITE

Realcalinização

RESULTADOS



(ARAÚJO,2004; SÁ, 2007)

— ME 5 — ME 6 — LIMITE 1 — LIMITE 2

Realcalinização

Vida útil

✓ Estima-se mais de 10 anos, uma vez que a técnica é recente e ainda não à casos de insucessos.

Realcalinização

Possíveis efeitos colaterais

- ✓ Fragilização por hidrogênio (RAE).
- ✓ Aderência aço/concreto (RAE).
- ✓ Reação álcali-agregado (RAE e RAI).
- ✓ Aderência revestimento/substrato (RAE e RAI).

109

Realcalinização

Possíveis efeitos colaterais

- ✓ Alteração das propriedades químicas e físicas do concreto (RAE e RAI).
- Aumento da velocidade ultra-sônica.
- Aumento da resistência à compressão.
- Crescimento do módulo de elasticidade dinâmico.
- Aumento da resistência à flexão.
- Diminuição do diâmetro dos poros.

110

Realcalinização

Durabilidade

- Do pH final alcançado na fase aquosa dos poros do concreto.
- Do tipo de cimento, sendo o tratamento menos durável para os cimentos que contêm adições.
- Utilizar pintura de proteção.
- Compatibilizar o sistema de pintura com a superfície do concreto realcalinizado (tinta não saponificável).

111

Resumo

TÉCNICA ELETROQUÍMICA	OBJETIVO DE PROTEÇÃO	CORRENTE APLICADA	TEMPO DE TRATAMENTO	MÉTODO DE MEDIDA
PROTEÇÃO CATÓDICA	Polarização da armadura a um potencial de imunidade	10 mA/m ²	Permanente	Potencial e Corrente Saída
REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	Aumentar pH do concreto Passivação	0,8 - 2 A/m ²	1 a 2 semanas	Teste de Fenolftaleína
EXTRAÇÃO DE CLORETOS	Remoção de cloretos Passivação	0,8 - 2 A/m ²	4 - 10 semanas	Teor de Cloretos

112

Resumo

TÉCNICA ELETROQUÍMICA	APLICABILIDADE	VANTAGENS	DESvantagens
PROTEÇÃO CATÓDICA	Qualquer estrutura	Única e eficaz na corrosão já iniciada	Pessoal qualificado Monitoramento
REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	Estruturas em ambientes úmidos e carbonatados	Nenhuma remoção de concreto contaminado	Custo e Dificuldades de Aplicação em Campo
EXTRAÇÃO DE CLORETOS	Estruturas em ambientes úmidos e com cloretos	Nenhuma remoção de concreto contaminado	Custo e Dificuldades de Aplicação em Campo

113

Custo

PROTEÇÃO CATÓDICA (US\$ 100 a 300) m ²	EXTRAÇÃO CLORETOS (US\$ 150) m ²
REPARO LOCALIZADO (US\$ 50 a 500) m ²	REALCALINIZAÇÃO (US\$ 100) m ²
(COST 521, 2002)	

114