



## Métodos de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras

Eng. Maurício Grochoski

1



## Sumário

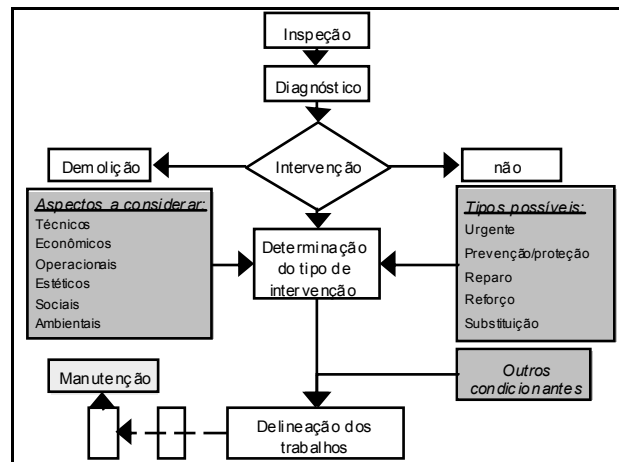
- Introdução
- Sistemas de reparo
- Inibidores de corrosão
  - Definição;
  - Mecanismos;
  - Classificação;
  - Tipos;
  - Controle;
  - Ensaios;
- Extração de Concretos
- Realcalização
- Proteção Catódica

2



## Introdução

3

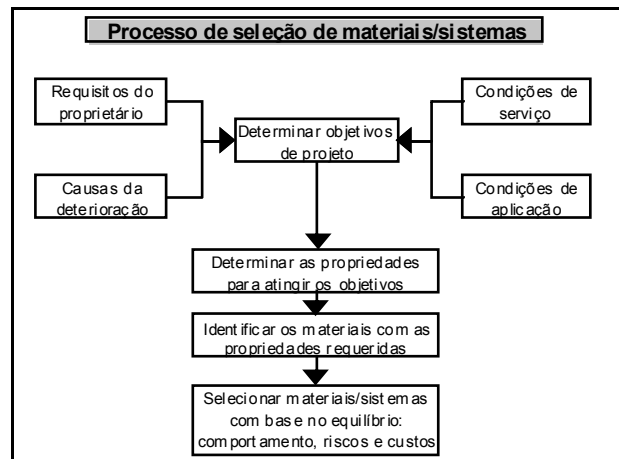


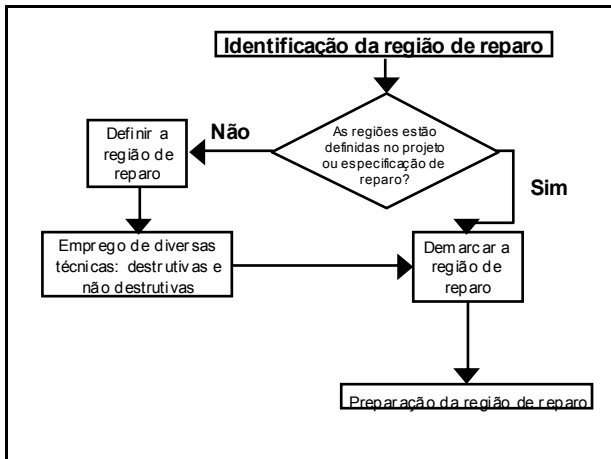
## Introdução

### **Materiais e sistemas:**

- Concreto, argamassas e grautes;
- Argamassas e grautes orgânicos;
- Aditivos (inibidores\* entre outros);
- Revestimento monolíticos e sistemas de polímeros reforçados com fibras-PRF\*;
- Silicatação;
- Tintas, vernizes e hidrofugantes\*;
- Produtos para ancoragem e emendas de barras de aço;
- Sistemas eletroquímicos\*;
- Etc.

5






---

# Sistemas de reparo

8

## Sistemas de reparo

---

- O concreto exerce no aço proteção:
  - Física → espessura do material de cobertura;
  - Química → pH elevado da água do poro;

**Passivo!!!!**

9

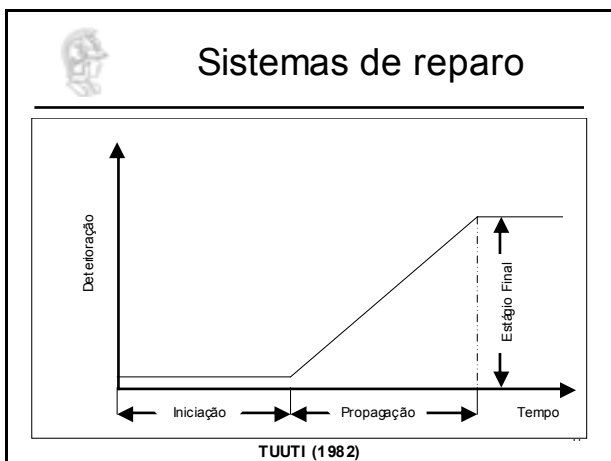
## Sistemas de reparo

---

Mecanismos de Corrosão:

- Corrosão por carbonatação
- Corrosão por íons cloreto

10



## Sistemas de reparo

---

**Fatores necessários para a Corrosão de Armaduras**

- Eletrólito:
  - Água do poro;
- O<sub>2</sub>;
- Dif. de potencial;
- Contato elétrico;

12



## Sistemas de reparo

### Classificação:

- Segundo Helene (1993):
  - Sistemas de reparo por passivação da armadura;
    - Argamassas, grutes, micro-concretos e concretos;
  - Sistemas de reparo por barreira física sobre a armadura;
    - Argamassas base epóxi;
    - Argamassas base poliéster;
    - Primers, adesivos e tintas base epóxi;

13



## Sistemas de reparo

### Classificação:

- Segundo Helene (1993):
  - Sistemas de reparo por barreira física sobre o concreto;
    - Vernizes e tintas base epóxi e acrílica;
    - Entre outros;
  - Sistemas de reparo por barreira química (inibição);
    - Inibidores;
    - Protegem o reparo e região adjacente;
  - Sistemas de reparo por proteção catódica;

14



## Reparo Tradicional

15



## Reparo Tradicional

### Esquema geral de um reparo tradicional:

- Delimitação da área de reparo;
- Remoção do concreto deteriorado e/ou contaminado;
- Limpeza do substrato;
- Remoção e/ou limpeza das armaduras;
- Substituição e/ou acréscimo de armaduras;
- Reconstituição da peça;
- Injeção de fissuras;
- Proteção;

16



## Reparo tradicional

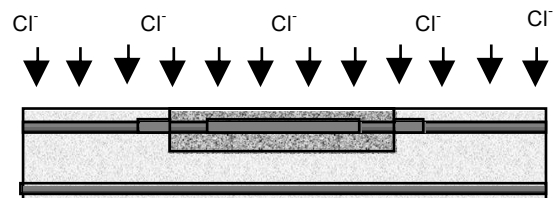
### Cuidados com material de reparo:

- Cura adequada → fissura de retração na interface concreto antigo/material de reparo
- Compatibilidade física;
- Compatibilidade química;
- Compatibilidade eletroquímica;

17



## “Inversão de Pilha”



18



## Inibidores de corrosão

19



## Inibidores de corrosão

### Definição:

Inibidores químicos de corrosão são substâncias que tem a propriedade de atuar impedindo ou retardando as reações de formação dos produtos de corrosão.

20



## Inibidores de corrosão

### Histórico:

- Teve início na década de 60;
- Segundo **BERKE & ROSENBERG (1990)**, primeiro marco na literatura: **MONFORE & VERBECK (1960)**;
  - Queda de pontes atribuída a ação dos cloretos;
    - Sais de degelo;
    - Aceleradores de pega
- Aceleradores de pega sem cloretos;
  - Cloreto de cálcio;

21



## Inibidores de corrosão

### Histórico:

- TREADWAY & RUSSEL (1968);
  - Nitrito de sódio\*;
- CRAIG & WOOD (1970);
  - Cromato de potássio;
  - Benzoato de sódio;
  - Nitrito de sódio\*;
- Primeiro aplicação em campo → antiga URSS
  - RATINOV (1972) apud ALONSO & ANDRADE (1990);
  - AKINOVA & IVANOV (1976) apud ALONSO & ANDRADE (1990);
  - *Inibir corrosão por sais de degelo*;

22



## Inibidores de corrosão

### Histórico:

- Várias pesquisas na década de 70;
  - Nitrito de sódio e cálcio (LIMA, 1996);
- 1983 - Federal Highway Administration (FHWA);
  - Nitrito de cálcio;
- 1986 - VUKASOVICH & FARR;
  - Molibdato de sódio;
- 1º trabalho no Brasil;
  - LIMA (1996);
  - Nitrito de sódio;

23



## Inibidores de corrosão

### Histórico:

- Década de 90 → intensificação dos estudos de inibidores por migração;
- Atualmente:
  - Amíniocool;
  - MFP – mono-fluorofato;
  - Silano orgânico-funcional base flúor;

24



## Inibidores de corrosão

### Tipos disponíveis no mercado:

- Adicionados à massa de concreto/argamassa;
- Utilizados como pintura de proteção sobre as armaduras;
- Como pintura superficial no concreto – “migrating inhibitors”;

25



## Inibidores de corrosão

### Mecanismos de ação:

- Adsorção na superfície do aço → impedindo a dissolução do metal – efeito barreira;
- Melhorando a estabilidade do filme passivo;
- Impedindo ou dificultando as reações catódicas e/ou anódicas;

26



## Inibidores de corrosão

### Classificação:

- Segundo a natureza química:
  - Inorgânicos;
    - Por ex.: nitritos;
  - Orgânicos;
    - Por ex.: benzoatos;

27



## Inibidores de corrosão

### Classificação:

- Segundo à necessidade de oxigênio:
  - Não-oxidantes;
    - Requerem oxigênio dissolvido na fase líquida para a manutenção do filme de passivação composto por óxidos;
  - Oxidantes;
    - Não requerem oxigênio para a manutenção do filme de passivação;

28



## Inibidores de corrosão

### Classificação:

- Quanto ao teor crítico:
  - Seguros;
    - Quantidade insuficiente → não inibe; pode reduzir a corrosão;
  - Perigosos;
    - Quantidade insuficiente → intensifica a corrosão; localizada;

29



## Inibidores de corrosão

### Classificação:

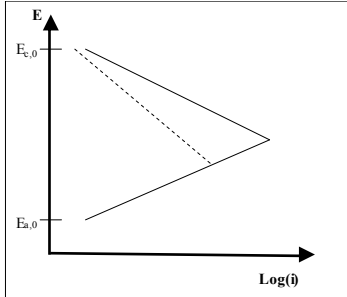
- Segundo a polarização:
  - Catódicos;
  - Anódicos;
  - Mistos;

30



## Inibidores de corrosão

### Catódicos:

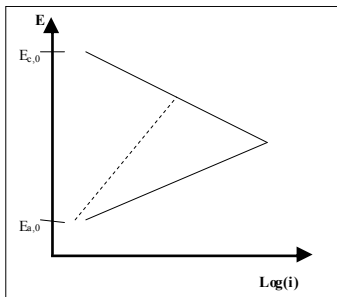


31



## Inibidores de corrosão

### Anódicos:

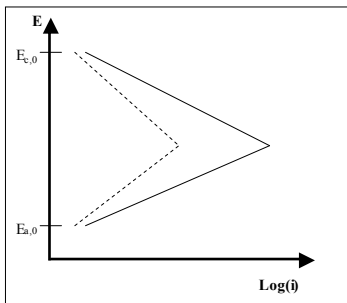


32



## Inibidores de corrosão

### Mistos:



33



## Inibidores de corrosão

### Nitrito de cálcio:

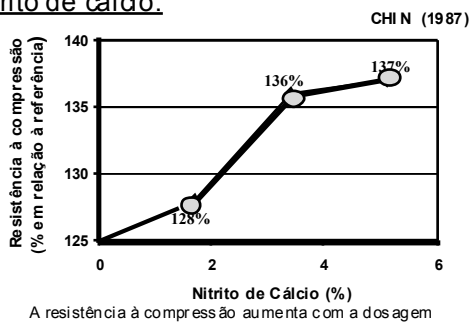
- Fórmula química -  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$
- Inibidor anódico;
- Auxilia a não dissolução da camada natural de passivação, formando nós complexos com íons agressivos, como os cloretos;

34



## Inibidores de corrosão

### Nitrito de cálcio:

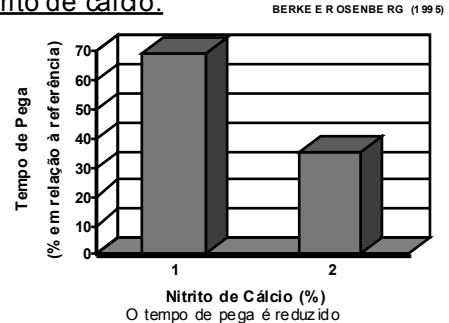


35



## Inibidores de corrosão

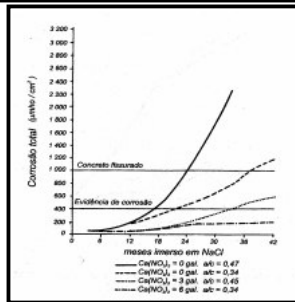
### Nitrito de cálcio:



36



## Inibidores de corrosão



BENKEE ROSENBERG (1999)

A taxa de corrosão em função do tempo de exposição em solução de NaCl, cresce mais lentamente

37



## Inibidores de corrosão

### Aminas:

- Podem ser usados no concreto fresco ou por impregnação;
- Influem na diminuição da penetração de íons cloreto;
- Inibição por adsorção – efeito barreira (não é consenso);
- A resistência à compressão e o tempo de pega podem se alterar em até 20%;
- Sua eficiência como inibidor por impregnação é questionada;

38



## Inibidores de corrosão

### Monofluor fosfato de sódio:

- Utilizado por impregnação;
- Não pode ser utilizado do misturado no concreto/ argamassa fresca;
- Adsorção no aço – efeito barreira;
- $MFP/Cl^- > 1,0$ ;
- Eficiência da impregnação questionável;
- Não existe dados sobre comportamento a longo prazo;

39



## Inibidores de corrosão

### Aminoalcool:

- Utilizado por impregnação;
- Mecanismo de ação provável:
  - Adsorção no aço – efeito barreira;
- Eficiência da impregnação questionável;
- Não existe dados sobre comportamento a longo prazo;

40



## Inibidores de corrosão

### Aspectos a serem considerados:

- Efeitos nas propriedades físicas do concreto;
- Teor crítico;
- Muitos não possuem eficiência a longo prazo comprovada;

41



## Inibidores de corrosão

### Avaliação em campo:

- Ensaio eletroquímico:
  - Potencial de corrosão (Ecorr);
    - ASTM C 876;
  - Velocidade de corrosão (icorr);
    - Resistência de polarização (GECO RR);
    - Método do pulso galvânico (Galva Pulse);

42



## Inibidores de corrosão

### Controle:

- ASTM C 494/C 494M-05 – Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- ASTM G 180-04 – Standard Test Method for Initial Screening of Corrosion Inhibiting Admixtures for Steel in Concrete
- ASTM G 109-99a(2005) – Standard Test Method for Determining the effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments
- JIS A 6205 (2003) – Corrosion inhibitor for reinforcing steel in concrete

43

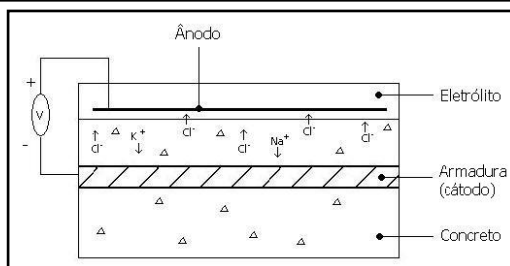


## Extração eletroquímica de cloretos

44



## Extração eletroquímica de cloretos



MIETZ (1998)

45



## Extração eletroquímica de cloretos

- Técnica não destrutiva;
- Não requer a retirada do concreto contaminado;
- Deve-se garantir a boa distribuição de corrente:
  - Reconstrução das áreas deterioradas;
  - Distância entre eletrodos pequena;
  - Remoção de pintura ou revestimento superficial;
- Corrente = 0,5 a 2 A/m<sup>2</sup>;

46



## Extração eletroquímica de cloretos

### Duração depende:

- Tipo de contaminação (externa ou não);
- Tipo de sal (CaCl<sub>2</sub>, NaCl);
- Concentração;
- Distribuição;
- Carbonatação;

47



## Extração eletroquímica de cloretos

### Duração depende:

- Qualidade do concreto (C<sub>cim</sub>, a/c, tipo de cimento);
- Temperatura;
- Densidade de armadura;
- Espessura de cobertura;
- Fluxo de corrente:
  - Umidade;
  - Concentração de íons cloretos;

48





## Extração eletroquímica de cloretos

### Eletrodo externo:

- Malha metálica;
- Não necessita recobrimento cimentício – Polpa de celulose;
- Úmido;
  - Água da rede de abastecimento;
  - Solução alcalina\*;
    - Solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
    - Solução de hidróxido de sódio;
    - Solução de borato de sódio;

49



## Extração eletroquímica de cloretos

### Ânodo:

- $2\text{OH}^- = \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
- $2\text{Cl}^- = \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$

### Cátodo:

- $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^-$
- $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

50



## Extração eletroquímica de cloretos



GONÇALVES (2003)

51



## Extração eletroquímica de cloretos

### Desvantagens:

- Elevado custo
- Efeitos colaterais;
  - Aumento da porosidade;
  - Fragilização da armadura por hidrogênio;
  - Reação álcali-agregado;
  - Redução da aderência aço/concreto;

52



## Extração eletroquímica de cloretos

### Vantagens:

- Realcalinização da estrutura;
- Aumento da vida útil;

53

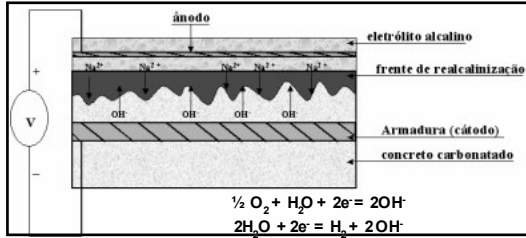


## Realcalinização

54



### Esquema da realcalinização eletroquímica



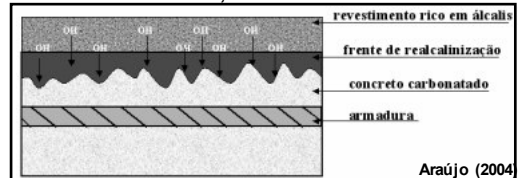
Araújo (2004) 55



### Realcalinização passiva

- Atinge no máximo até a profundidade de 2 cm, dependendo da porosidade e da manutenção da umidade da argamassa.

- Processo lento, até 2 anos.



Araújo (2004) 56



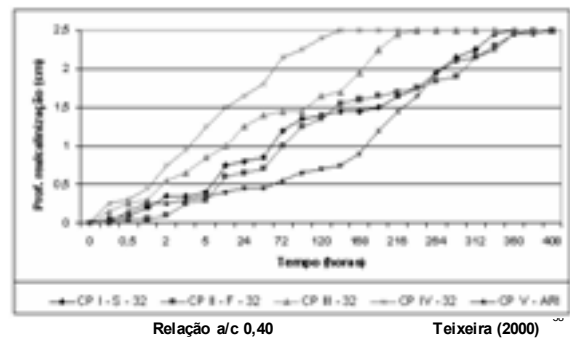
### Realcalinização natural

- Não se trata de uma “des-carbonatação”.
- É uma metodologia nova, ainda em desenvolvimento, que tem o Brasil como precursor.
- Teve como embasamento as bibliografias referentes a realcalinização eletroquímica.
- Até o momento tem mostrado ser uma técnica viável tecnologicamente.

57



### Realcalinização natural



Relação a/c 0,40

Teixeira (2000)



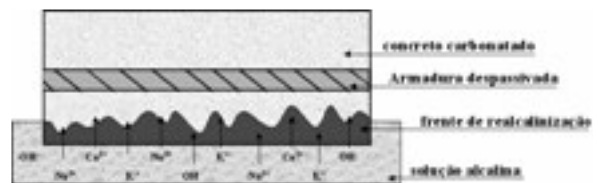
### Realcalinização natural

- **HÁ** necessidade de remoção e reparo do concreto apenas nas regiões com presença de destacamento, mal aderência ou ninhos de concretagem e retirar qualquer revestimento existente da superfície da estrutura.
- Restabelece a alcalinidade e a passivação da armadura **SEM** aplicação de corrente elétrica e necessidade de remoção do concreto contaminado.

59



### Esquema da realcalinização natural



Araújo (2004) 60



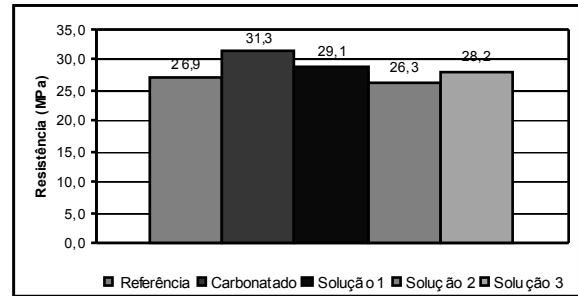
## Eletrólitos

- Carbonato de sódio
- Carbonato de potássio
- Hidróxido de Lítio
- Mistura: carbonato de sódio, e hidróxidos de sódio e potássio

SOLUÇÕES	pH	CONCENTRAÇÕES INICIAIS (g/100 ml)		
		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH	KOH
KOH	13	10	-	-
NaOH	14	-	-	51
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	3	7	17
Tripla	13	-	21	-



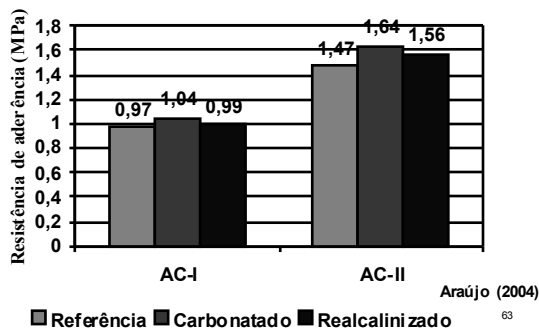
## Resistência à compressão



Araújo (2004)<sup>62</sup>



## Aderência de revestimentos de argamassa



Araújo (2004)<sup>63</sup>

■ Referência ■ Carbonatado ■ Realcalinado



## Proteção catódica

64



## Proteção catódica

- Baseia-se na polarização das armaduras para potenciais de imunidade;
  - No caso de carbonatação, polarização para a zona de passivação;
  - No caso de cloretos, polarização de -100mV;
- Não requer a retirada do concreto contaminado;

65



## Diagrama de Pourbaix

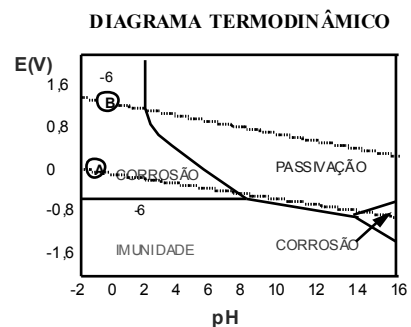


Diagrama simplificado de Pourbaix, pH em função do potencial eletroquímico do ferro, para 25° C (Page, 1988)



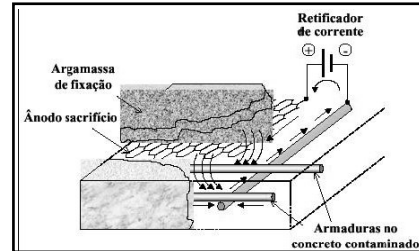
## Proteção catódica

- Deve-se garantir a boa distribuição de corrente:
  - Reconstrução das áreas deterioradas;
  - Distância entre eletrodos de 2 a 5 cm;
- Pode ser realizada por 2 métodos:
  - Corrente impressa;
  - Ânodos de sacrifício;

67



## Proteção catódica



(TULA & HELENE, 2001)

68



## Proteção catódica



(GONÇALVES et al., 2003)

69



## Proteção catódica

### Por corrente impressa:

- Utiliza fonte retificadora externa;
- Utiliza-se normalmente materiais mais nobres (titânio, por ex.)
  - Consumo mais lento;
  - Produtos de corrosão menos expansíveis;
- A tensão aplicada na fonte depende da resistividade e espessura média do concreto;
- Corrente impressa de 3 a 20 mA/cm<sup>2</sup>;

70



## Proteção catódica

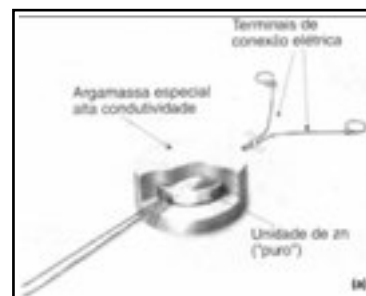
### Por ânodo de sacrifício:

- Acoplamento de menos nobre às armaduras;
  - Zinco;
  - Alumínio;
- Formas de uso:
  - Micro-ânodos → Usos como proteção adicional em reparos localizados;
  - Macro-ânodos → Usos como proteção em elementos estruturais com vida útil residual curta;

71

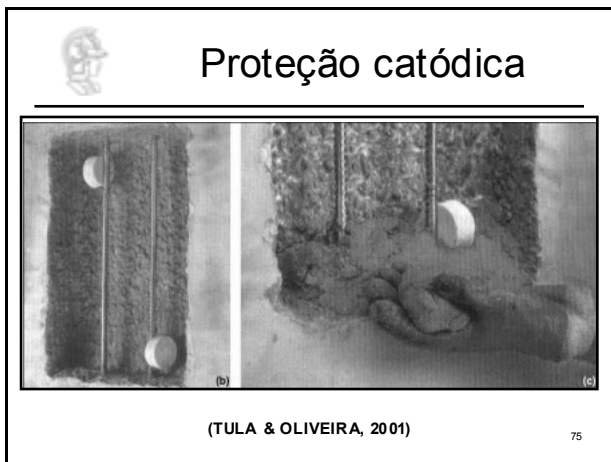
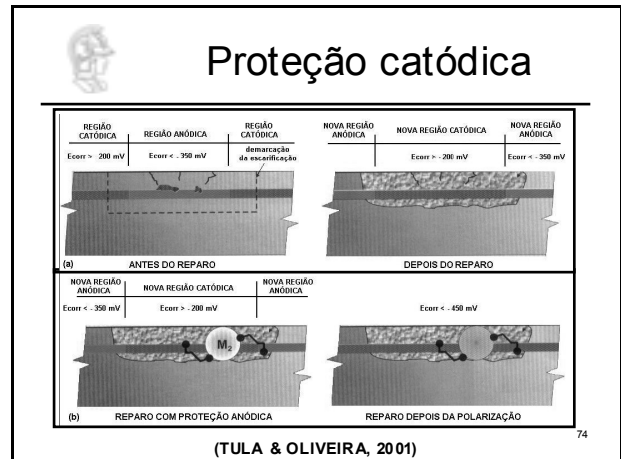
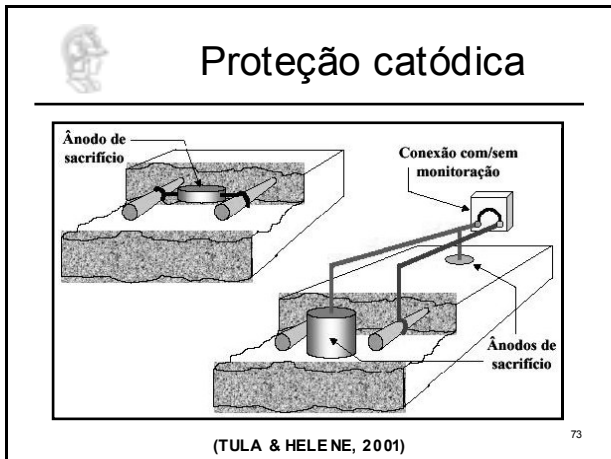


## Proteção catódica



(TULA & OLIVEIRA, 2001)

72



## Proteção catódica

Vantagens e desvantagens dos métodos de proteção catódica (TULA & HELENE, 2001).

ÂNODO DE SACRIFÍCIO	
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de instalação</li> <li>• Baixo custo de manutenção</li> <li>• Não requer fonte externa</li> <li>• Ajustável à técnica da estrutura</li> <li>• Sistema relativamente simples e viável</li> <li>• Possibilidade de controle imediato de funcionamento</li> <li>• Pode ser prevista adaptabilidade para técnicas de corrente impressa</li> <li>• Sistema auto-regulável</li> <li>• Compatibilidade com armaduras galvanizadas ou tratadas com primer rico em zinco</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitada capacidade de corrente</li> <li>• Limitada capacidade de polarização</li> <li>• Área de atuação limitada</li> </ul>
CORRENTE IMPRESSA	
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não há limitação de tensão ou intensidade de corrente</li> <li>• Ajustável em uma ampla faixa</li> <li>• Ânodos de grande vida útil</li> <li>• Possibilidade de controle imediato de funcionamento</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo de instalação</li> <li>• Alto custo de manutenção</li> <li>• Requer fonte externa de corrente direta</li> <li>• Possibilidade de desprendimento de hidrogênio junto à armadura – necessidade de controle de tensão</li> <li>• Sistema relativamente complexo</li> </ul>

76

