

1º Simpósio Internacional RILEM/IBRACON

PROTECÇÃO CATÓDICA E EXTRACÇÃO ELECTROQUÍMICA DE CLORETOS

Fundamentos e Casos Práticos

Zita Lourenço

ZetaCorr Lda

Portugal



As armaduras inseridas em concreto de boa qualidade estão normalmente protegidas contra a corrosão.



CORROSÃO DO BETÃO ARMADO

As armaduras inseridas em betão de boa qualidade estão normalmente protegidas contra a corrosão. Esta protecção é de dois tipos:

- 1) Física – o betão funciona como uma barreira de difusão entre as armaduras e o ambiente externo, limitando o acesso aos agentes agressores.
- 2) Química - a solução existente nos poros da pasta de cimento, e que é altamente alcalina, com pH da ordem de 12.5, induz a passivação das armaduras.

Este filme é estável a $\text{pH} > 9.5$ – sem cloretos

As duas maiores causas de destruição do filme de óxido são a redução do pH resultante da carbonatação e a presença de cloretos no betão junto às armaduras.

Principais Causas da Corrosão são:

- Dióxido de Carbono (CO_2) Carbonatação - corrosão
generalizada →
- Contaminação do betão por cloretos Corrosão induzida por
cloretos – corrosão por picadas (pitting) →


CORROSÃO

Os produtos da corrosão (ferrugem) que ocupam um volume que é normalmente de 2-8 vezes superior ao do aço, depositam-se na interface aço/betão, enchendo os poros e as micro fissuras, e à medida que se acumulam a pressão que exercem no betão aumenta e pode dar origem a fissuração, delaminação e fracturação do betão.



INTRODUÇÃO – Técnicas de Reabilitação

Estruturas contaminadas por cloretos

- ❑ **Reparação convencional**
- ❑ **Encamisamento**
- ❑ **Revestimentos**
- ❑ **Protecção catódica**
- ❑ **Extracção Electroquímica de Cloretos/Dessalinização**
- ❑ **Inibidores de Corrosão**
- ❑ **Outras**

Prevenção Catódica- Protecção catódica aplicada a novas estruturas

ÍNDICE

Protecção Catódica de Estruturas de Concreto Armado

Introdução

Princípio de funcionamento

Tipos de ânodos para sistemas por corrente imposta

Sensores de monitorização

Fontes de alimentação -Sistema de controlo e monitorização

Critérios de protecção

Projecto- Factores a Considerar

Prevenção catódica

Extracção Electroquímica de Cloretos

Princípio de funcionamento

Materiais e Equipamento

Projecto – Instalação

Casos Práticos

Aplicação de Protecção Catódica-Laje - Central Bombagem

Aplicação de Protecção Catódica-Mesquita

Aplicação de Extracção electroquímica de cloretos – Laje –Escola

Aplicação de Prevenção Catódica- Porto de Lisboa

Considerações Finais

PROTECÇÃO CATÓDICA- Introdução

- ❑ Primeiras aplicações datam da década de 70 nos EUA (tabuleiros de pontes).
- ❑ Começou por ser como que uma extensão da CP convencional.
- ❑ Evolui-se no tipo de ânodos, sensores mais estáveis, sistemas de alimentação e controle.
- ❑ Aplicada a inúmeros e variadas tipos de estruturas: pontes, cais, edifícios, monumentos, túneis, condutas de águas, chaminés, etc.
- ❑ Estruturas novas e existentes.
- ❑ Estruturas com aço normal e pré-esforçado (protendido).
- ❑ Técnica bem estabelecida na prática

Monumentos - Edifícios



Pontes e Estruturas Portuárias



Estruturas Industriais



Exemplo simples de protecção catódica

ÂNODO DE ZINCO



Protecção Catódica-Princípio de funcionamento

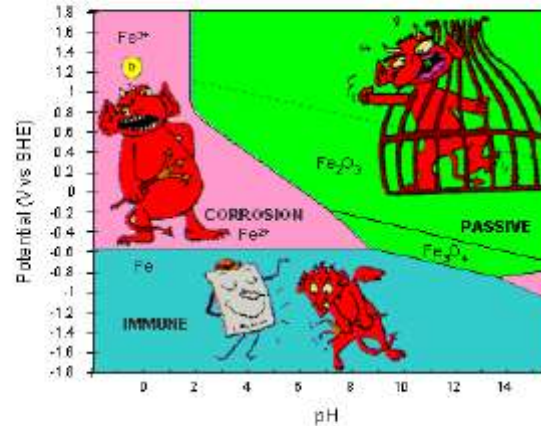
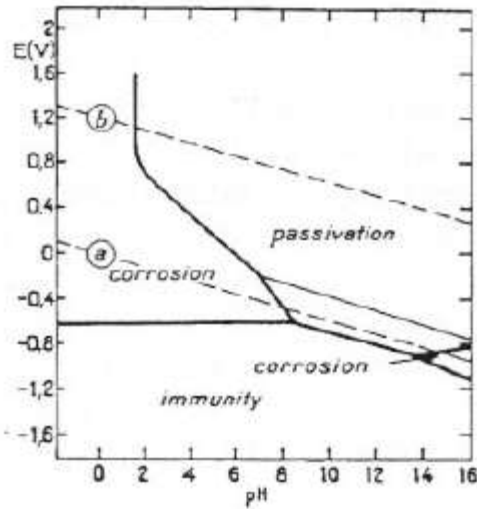
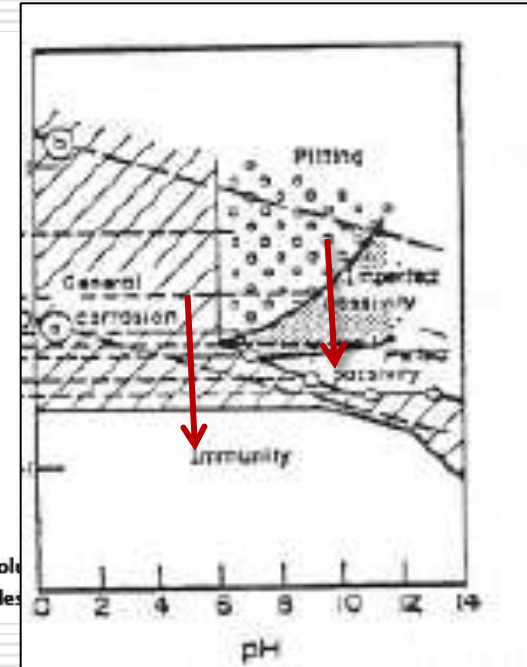


Figure 1 Interpretation of the stability of iron, its oxides and its sol. The presence of chloride has no effect on the stability of the iron oxides.



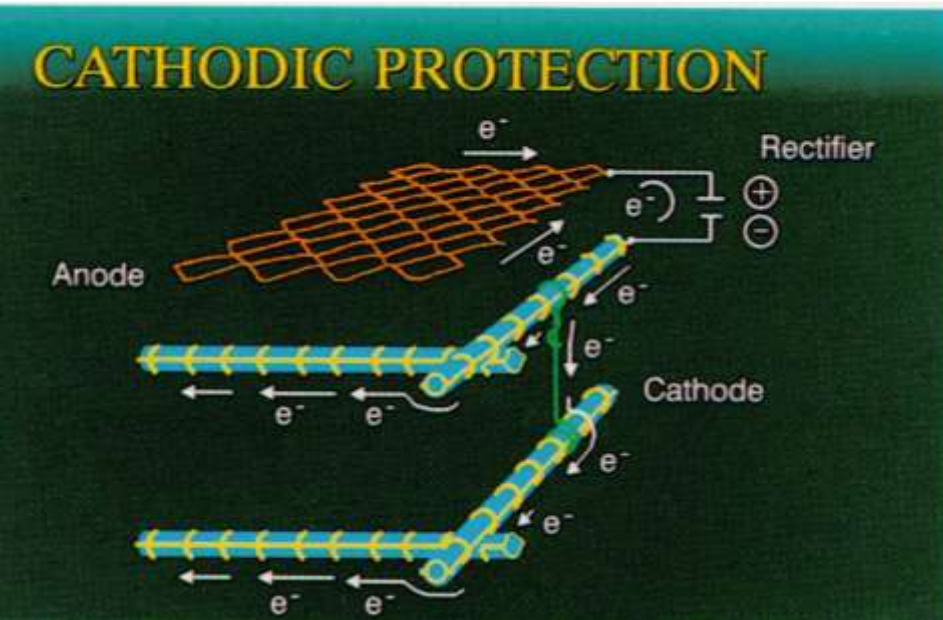
- Potencial-pH para o Fe-H₂O a 25 ° C.

Potencial-pH para o Fe-H₂O, 0,01M Cl⁻ a 25 ° C.

Protecção Catódica-Princípio de funcionamento

Através da aplicação de uma corrente eléctrica contínua de um ânodo exterior para as armaduras através do betão. A corrente contínua pode ser obtida :

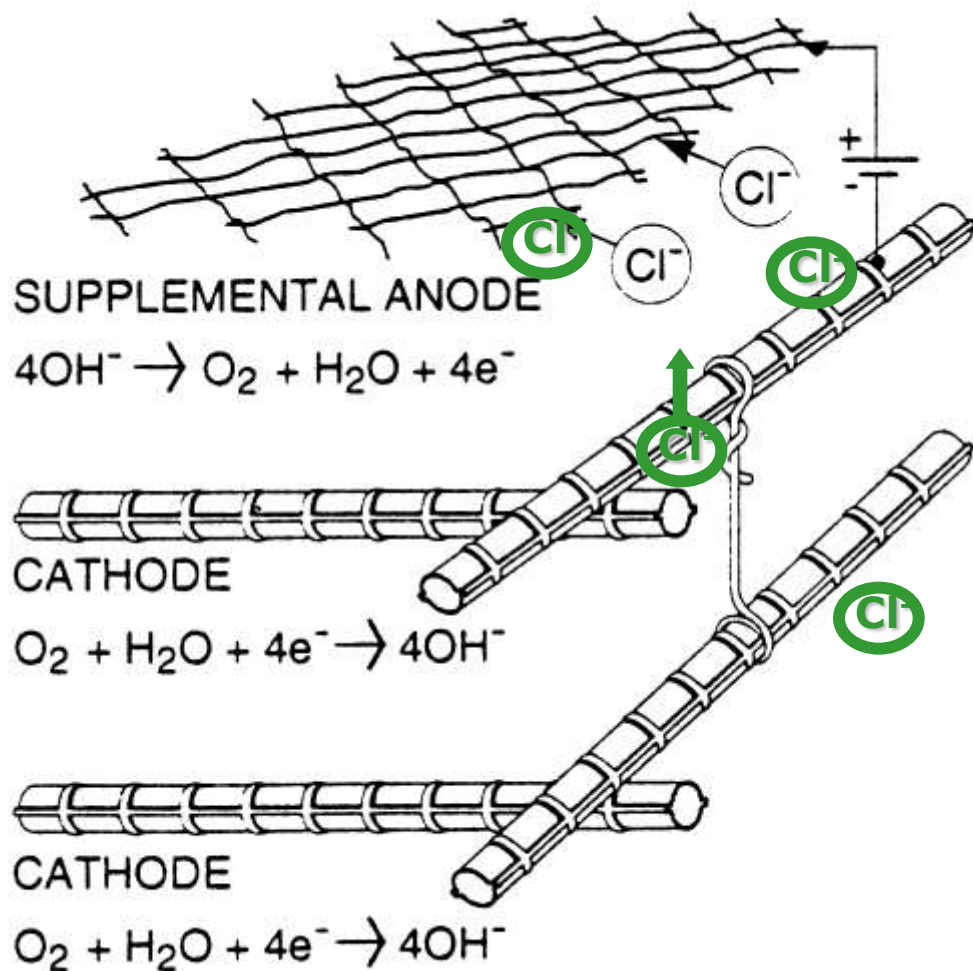
- ❑ ligando o aço a um ânodo de sacrifício, que se dissipa gradualmente – **protecção catódica por ânodos de sacrifício**
- ❑ usando um ânodo inerte e uma fonte externa de alimentação de corrente contínua - **corrente imposta ou impressa.**



COMPONENTES (CI):

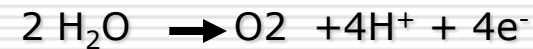
- ❑ **Ânodo**
- ❑ **Cátodo (as armaduras)**
- ❑ **Sensores de monitorização/ Eléctrodos de referência**
- ❑ **Fonte de alimentação de corrente contínua**

Protecção Catódica-Princípio de funcionamento



Cl⁻

Anódicas:



Efeitos da Protecção catódica:

- ❑ Cloretos migram para o ânodo
- ❑ Produção de OH⁻

↓
REPASSIVAÇÃO

Protecção Catódica-Normas

- EN 12696, Cathodic Protection of Steel in Concrete”, 2000.
- Australian Standards-AS 2832.5-2002 “Cathodic Protection of Metals- Steel in Concrete Structures”, (2002).
- NACE-RP0290-2000, “Impressed Current Cathodic Protection of Reinforced Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”, Nace, Houston (2000).

Protecção Catódica

2-20mA\ m² de superfície de aço a proteger para estruturas aéreas dependendo da actividade de corrosão das armaduras.

-0,2-5mA/ m² para estruturas submersas.

Prevenção catódica

0.2-2 mA\m²

Protecção Catódica-Ânodos

Estruturas ou partes de estruturas:

- ❑ **Enterradas, submersas ou contendo electrólitos**
Tanques de água, condutas de água, pilares/ fundações de pontes e edifícios, etc.
- ❑ **Aéreas**
- ❑ **Ânodos galvânicos ou corrente imposta**

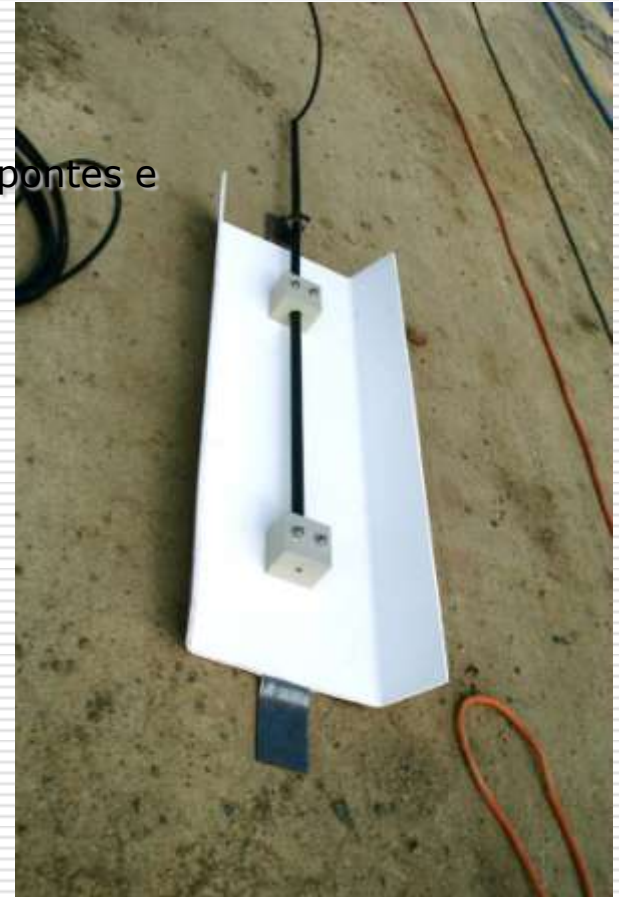
Estruturas submersas, enterradas ou contendo electrólitos.

- ❑ Os ânodos são normalmente instalados no solo ou na água. São geralmente em forma de varão ou fio.

Materiais mais utilizados (CI):

- ❑ Ti (MMO)
- ❑ Ti platinado
- ❑ Fe-Si

Ânodo galvânicos – Zn ou Al



Protecção Catódica-Ânodos - Corrente Imposta

□ Estruturas ou partes aéreas:

Ânodos mais comuns:

- Malha de Titânio Activado (MMO)
- Fitas de malha de Titânio
- Ânodos internos
- Revestimentos condutores (pinturas condutoras, argamassas condutoras com fibras)

Protecção Catódica-Ânodos-Corrente Imposta -Malha

Malha de Titânio revestida com uma mistura de óxidos de metais nobres (MMO).

- Malha para densidade de corrente - 15mA/m², 25mA/m², 35mA/m²)
- Tempo de vida - ~40 anos
- Max densidade de corrente anódica-110mA/m².

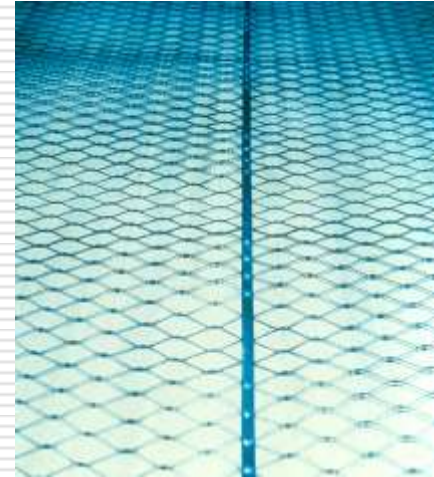
INSTALAÇÃO

1. **Reparação e reposição do betão nas zonas danificadas**
2. **Preparação da superfície para uma adequada adesão do recobrimento ao substrato.**
3. **Fixação da malha com fixadores de plástico**
4. **Aplicação da camada de recobrimento (20-30mm)**

- Durabilidade
- Aumenta a carga estática na estrutura
- Problemas de delaminação



Protecção Catódica-Ânodos-Corrente Imposta -Malha



Protecção Catódica-Ânodos-Corrente Imposta -Fita

Malha de Titânio revestida com uma mistura de óxidos de metais nobres (MMO).
Dependendo das dimensões da fita – 3-6mA/m linear.
Tempo de vida - ~40 anos

Fitas com 10-20mm de largura, dependendo da densidade de corrente .

Dependendo da condição da estrutura as fitas podem ser instaladas :

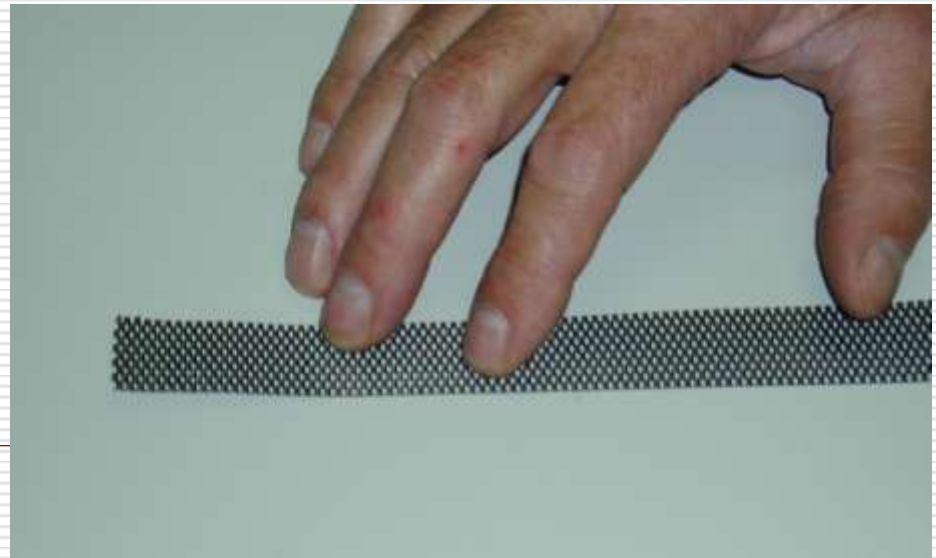
- em roços (paralelos ou perpendiculares)
- entre camadas de betão/argamassa.

Instalação:

- **Reparação e reposição do betão nas zonas danificadas**
- **Realização de roços**
- **Colocação de argamassa e fita**

V/D

- durabilidade
- não aumenta a carga estática
- Sem problemas de delaminação



Protecção Catódica-Ânodos-Corrente Imposta – Fita

- **Abertura de roços**



- **Colocação da fita e enchimento com argamassa**



Fitas de malha

Distribuidor da corrente

Protecção Catódica-Ânodos-Corrente Imposta -Fita

Aplicação da fita entre camadas de argamassa



Protecção Catódica- Tipo de Ânodos -Corrente Imposta – Ânodos Internos

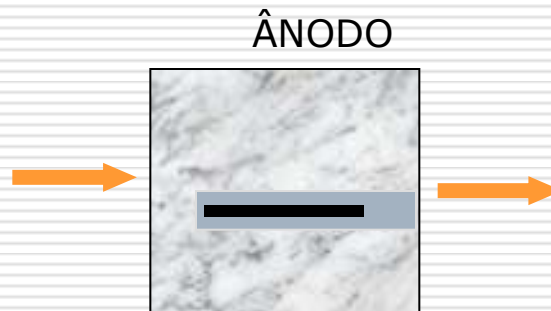
- São geralmente de Ti revestido com MMO ou Pt ou de cerâmicas condutoras
- Podem ser em forma: tubular, em fita de malha, varão
- Inseridos em furos realizado no elemento a proteger.
- Embebidos num meio condutor, como pasta ou gel de grafite ou argamassas de baixa resistividade
- Furos são de diâmetro e comprimento variável dependendo do tipo de ânodo
- Adequados para vigas, colunas etc.,



Protecção Catódica- Tipo de Ânodos -Corrente Imposta – Ânodos Internos

Instalação:

- Reparação e reposição do betão nas zonas danificadas
- Realização dos furos
- Preenchimento do furo com argamassas condutoras ou gel
- Inserção do ânodo.
- Interligação entre ânodos, através de fio/fita de Ti



Protecção Catódica- Tipo de Ânodos: Selecção

Os factores mais importantes a considerar quando da selecção do ânodo mais apropriado para um determinado tipo de estrutura ou elemento são:

- exposição ambiental
- a facilidade de instalação
- densidade de corrente
- o tempo de vida
- os efeitos da instalação do ânodo na estrutura
- o custo de instalação e tempo
- manutenção
- estética.

Combinações de diferentes ânodos podem também ser utilizadas na mesma estrutura ou elemento de modo a obter-se a solução mais económica e eficaz.

PREVENÇÃO CATÓDICA

No caso da prevenção catódica, é essencial que o ânodo apresente um tempo de vida elevado e que seja fácil de instalar durante a construção da estrutura. São normalmente utilizados os ânodos à base de Ti/MMO, em forma de malha ou fita, fixos às armaduras através de espaçadores apropriados, e antes da betonagem.

Protecção Catódica- Sensores de monitorização

A verificação da eficácia dos sistemas de protecção catódica é feita através da medição dos potenciais do aço na interface com o betão. Para tal é necessário a instalação de um sistema de monitorização, constituído por sensores e instrumentos de medida.

Os sensores de monitorização para estruturas de betão atmosféricas deverão ser embebidos no betão em pontos representativos das diferentes condições de corrosão.

Eléctrodos de Referência

Utilizam-se para determinação do potencial absoluto e despolarização:

- ❑ Prata/Cloreto de Prata ((Ag/AgCl /0,5 KCl-gel)
- ❑ Manganésio/ dióxido de Manganésio (Mn/MnO₂/0,5 NaOH)

Pseudo – Eléctrodos ou sondas de despolarização

Utilizam-se para determinação de despolarização

- ❑ Metal/Metal Oxide-MMO- geralmente de Ti
- ❑ Grafite (muito pouco utilizados)

Estes eléctrodos são dependentes da concentração de. O₂ (humidade), pH.

- ❑ Para partes submersas utilizam-se os eléctrodos de Zinco instalados na água
- ❑ Partes enterradas - eléctrodos Cobre/Sulfato de Cobre (Cu/CUSO₄) instalados no solo.

Protecção Catódica- Sensores de monitorização

Ag/AgCl



Sonda de despolarização -Ti/MMO



Eléctrodos :

- Robustos
- Estáveis
- Tempo de vida 20-30 anos.

Protecção Catódica-Fontes de alimentação e sistemas de controlo e monitorização

A corrente contínua pode ser fornecida :

- Bateria
- Solar
- Transformador /rectificador, que transforma a corrente alterna 230 V AC em corrente contínua de baixa intensidade – 2, ..,10 A / 6, ...24V cc.

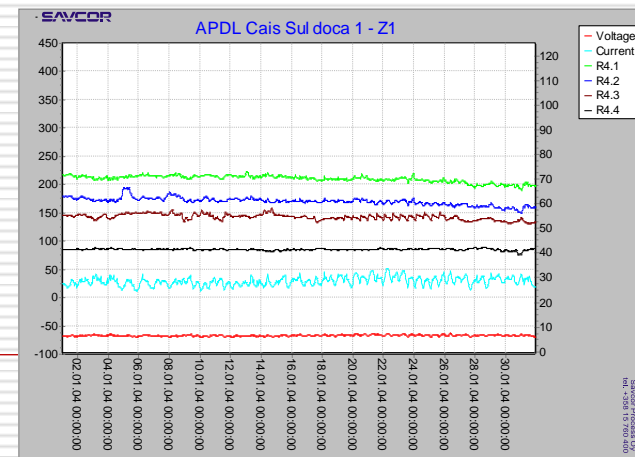
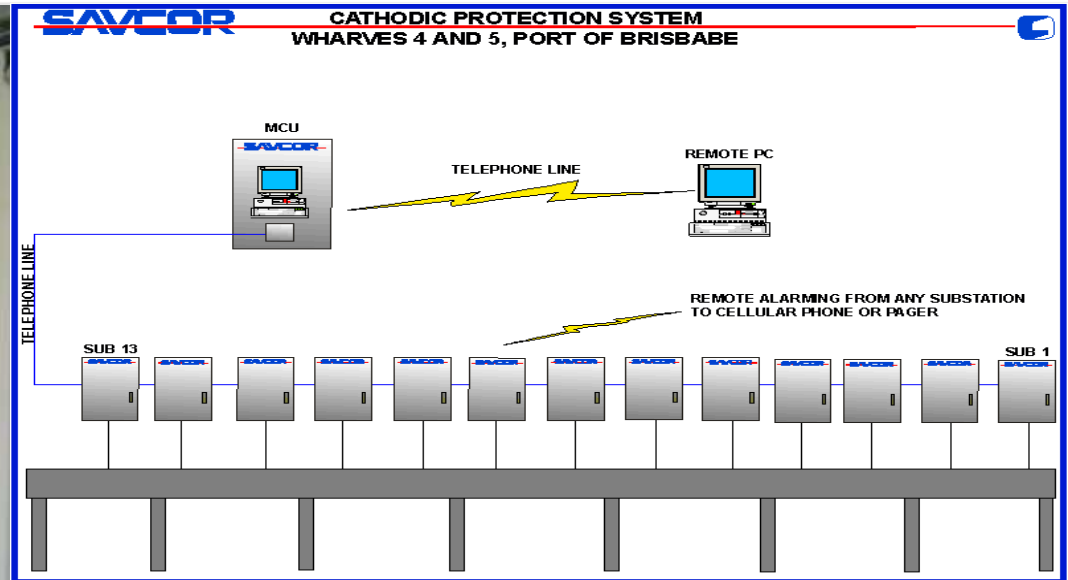
- **voltagem constante** - tensão de saída constante, corrente variável
- **corrente constante**– corrente de saída fixa e constante, tensão variável conforme variações na resistividade do betão
- **potenciostático** – potencial constante, variando a corrente e a tensão de saída

- **controlo e monitorização manual** - no local
- **controlo manual e monitorização remota** – sistema de aquisição de dados e transferência á distância
- **controlo e monitorização automática e remota**

Protecção Catódica-Fontes de alimentação e sistemas de controlo e monitorização

- Controlo e monitorização automática

- Controlo Manual



Protecção Catódica-Critérios

❑ **Critério do potencial absoluto -720 mV Ag/AgCl –**

o valor do potencial Instante OFF deverá ser mais negativo que -720 mV Ag/AgCl. Este potencial deverá ser medido entre 0,1 e 1 s após o corte da corrente contínua. Este critério utiliza-se geralmente para estruturas, ou partes das estruturas, submersas ou enterradas.

❑ **Critério de 100 mV de decrescimento do potencial –**

Este valor é determinado pela diferença entre o valor Instante OFF e o potencial medido após um período de tempo de corte da corrente contínua, período de despolarização. O período de despolarização varia com as condições de exposição de cada estrutura, teor de humidade e com a qualidade do betão. A norma Australiana permite um período de despolarização até 72 h.

- ❑ O potencial Instante OFF não deverá ser mais negativos que:
 - 900 mV Ag/AgCl para aço sob tensão
 - 1100 mV Ag/AgCl para aço normal.

O critério mais utilizado, em protecção e prevenção catódica, para as partes atmosféricas, é o da obtenção de no mínimo 100 mV de despolarização/decrescimento

Protecção Catódica- Projecto - Factores a considerar

- Resistividade do betão;
- Espessura da camada de recobrimento
- Actividade de corrosão;
- Teor de cloretos;
- Exposição ambiental; i.e., atmosférica, maré, salpicos,
- Enterrada, submersa.
- Continuidade eléctrica das armaduras
- Densidade das armaduras.
- Tipo de armadura, normais ou pré esforço

É A PROTECÇÃO CATÓDICA A TÉCNICA APROPRIADA?

Protecção Catódica- Projecto - Factores a considerar

- ❑ Tipo de ânodo ou ânodos
- ❑ Numero de zonas, considerando: geometria do elemento, exposição ambiental, actividade de corrosão, variações na resistividade do betão, etc.
- ❑ Densidade da corrente
- ❑ Numero de ligações anódicas e catódicas, considerando: numero de zonas, quedas de tensão, etc.
- ❑ Numero e tipo de eléctrodos de referência, considerando: exposição, tempo devida, etc.
- ❑ Tipo de sistema de controlo, localização, etc.
- ❑ Localização de todos os componentes
- ❑ Monitorização
- ❑ Plano de qualidade
- ❑ Manutenção

Protecção Catódica-Instalação

Etapas de Instalação:

- ❑ Reparação para as técnicas electroquímicas:
Remover e repor betão nas zonas danificadas
Não é necessário remover betão contaminado
- ❑ Realização dos ensaios necessários
- ❑ Instalação piloto?
- ❑ Realização da ligações às armaduras – catódicas
- ❑ Instalação dos eléctrodos de referências e cabos
- ❑ Instalação do sistema anódico e respectivas ligações.
- ❑ Aplicação de recobrimento, se necessário
- ❑ Instalação das caixas de junção, T/R, Caixas de junção
- ❑ Arranque e Monitorização



Dessalinização - Princípio de funcionamento

Técnicas para estruturas contaminadas por cloretos

Protecção catódica:

Tratamento permanente

Objectivo: eliminar ou diminuir a velocidade de corrosão.

Extracção electroquímica de cloretos

Tratamento temporário

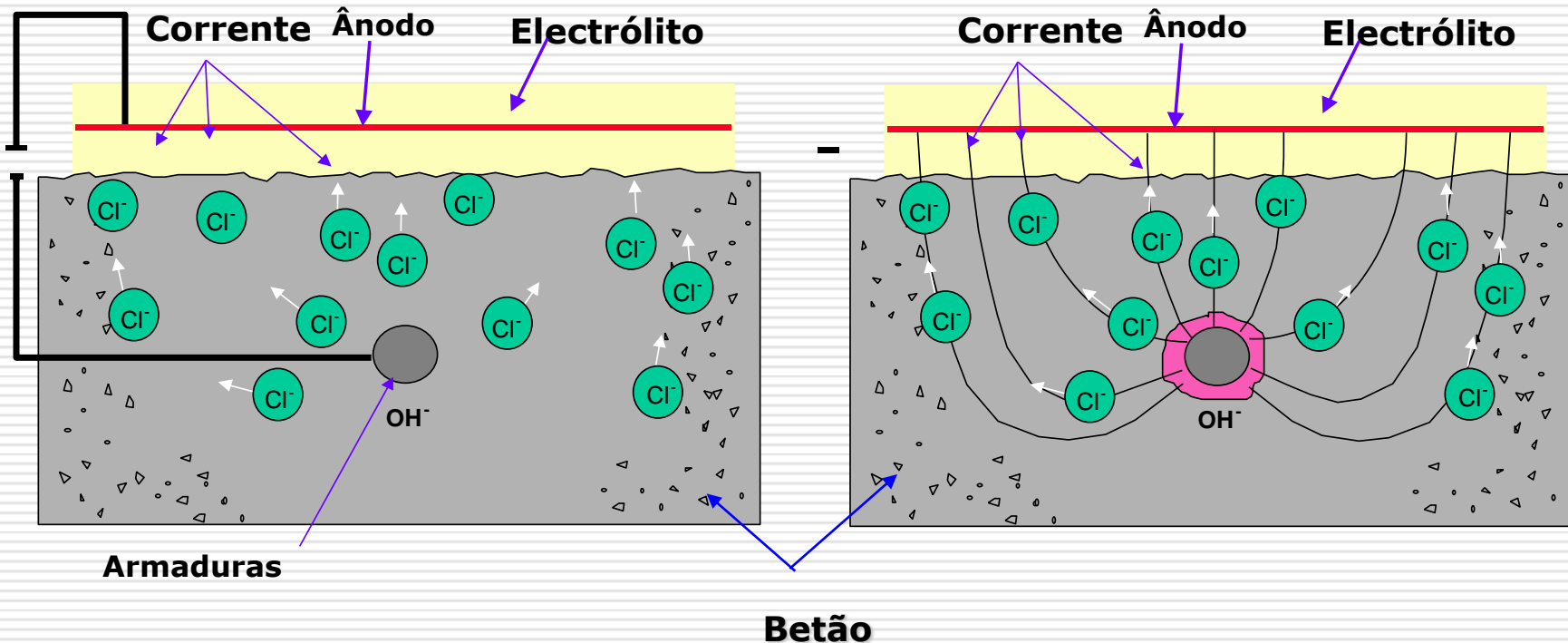
Objectivo: diminuir o teor de cloretos junto às armaduras

Dessalinização - Princípio de funcionamento

Electrólise – Devido à passagem de corrente ocorrem reacções químicas junto ao ânodo e cátodo: Produção de OH^- na interface armadura (cátodo) /betão

Migração iónica

- iões com carga negativa afastam-se das armaduras (negativo) e movem-se para junto do ânodo (positivo).
- Os cloretos afastam-se das armaduras e são removidos para o ânodo.



Dessalinização - Princípio de funcionamento

Densidade de Corrente

Dessalinização: 0,5-4 A /m²

Tempo de tratamento 4-8 semanas

Critério de avaliação

Pelo menos um dos seguintes critérios deve ser obtido:

- Mínimo de 600-1,500 A.h/m² armadura
- Cl⁻/OH⁻ menor que 0,6
- Total Cl⁻ menor que 0,4% massa de cimento na proximidade das armaduras, uma distância de 25mm ou equivalente a um diâmetro da armadura.

Dessalinização - Materiais e Equipamento

Ânodo

-Malha fixa temporariamente à superfície do betão. Pode ser: Ti activado com MMO ou aço. A malha de Ti é a mais utilizada em dessalinização, devido a um maior tempo de tratamento.

A malha de aço consome-se e causa manchas de ferrugem no betão. Utiliza-se normalmente em tratamento menos prologado e em que a estética não seja problema.



Malha de aço



Malha de Titânio

Dessalinização - Materiais e Equipamento

Solução Electrolítica

-Função: condutora iónica

-Electrólito: água, hidróxido de cálcio saturado , 0,2 M borato de lítio.

Suporte do electrólito

Fibra de celulose projectada sobre a malha, camada de 3-5 cm.

Manta de feltro

Tanques com malha anódica pré inserida

Ligações catódicas - Ligações anódicas

Transformador /rectificador

transforma a corrente alterna 230 V AC em corrente contínua de baixa intensidade

modo: corrente constante, com limite de tensão 40-50V.



Dessalinização - Project/Instalação

1- Factores a considerar:

- Resistividade do betão
- Espessura da camada de recobrimento;
- Actividade de corrosão
- Teor de cloretos
- Exposição ambiental
- Continuidade eléctrica das armaduras
- Densidade das armaduras
- Tipo de armadura, normais ou pre -esforço (protendidas)**

Dessalinização - Projecto/Instalação

2- Projecto

- ❑ Tipo de ânodo/malha
- ❑ Selecção do tipo de suporte electrólito mais adequado
- ❑ Numero de zonas anódicas, considerando: geometria do elemento, exposição ambiental, variações na resistividade do betão, na densidade de corrente, etc.
- ❑ Corrente a ser fornecida a cada zona
- ❑ Numero de ligações anódicas e catódicas, considerando: numero de zonas
- ❑ Tensão /corrente de cada zona
- ❑ Monitorização/Ensaaios
- ❑ Plano de qualidade

Dessalinização - Projecto/Instalação

3-Trabalhos Preparatórios

- ❑ Remoção de revestimentos superficiais
- ❑ Continuidade eléctrica das armaduras
- ❑ Suficiente recobrimento das armaduras (>10mm)
- ❑ Isolamento de peças metálicas (pregos, arames, conectores de cofragem)
- ❑ Reparação de fissuras,
- ❑ Reparação de áreas delaminadas / com armaduras expostas.

Dessalinização - Projecto/Instalação

4- Instalação

- ❑ Realização das ligações catódicas
- ❑ Fixação das régua de madeira
- ❑ Fixação da malha de ânodo e realização das ligações anódicas
- ❑ Aplicação do suporte do electrólito (fibra de celulose, feltro, etc.) e electrólito.
- ❑ Realização dos testes necessários para verificação da instalação: curto circuitos, continuidade eléctrica, etc.
- ❑ Ligação do sistema
- ❑ Monitorização/manutenção diária: leituras de corrente e voltagem de cada zona ou subzonas, inspecção para verificação da integridade de todo o material, evitar a secagem do suporte do electrólito, etc.

5- Remoção e Aplicação de Revestimento

- ❑ Remoção do ânodo, ligações, etc.
- ❑ Limpeza da superfície
- ❑ Possível aplicação de revestimento compatível e apropriado
- ❑ Monitorização por medição de potencial, com eléctrodos ou outros métodos, etc.

Dessalinização-Efeitos secundários

A aplicação de corrente em pode introduzir a possibilidade de efeitos negativos:

- ❑ **Fragilização por hidrogénio em caso de pré-esforço**
A aplicação de corrente, pode causar a libertação de hidrogénio ao nível das armaduras, se o potencial for muito negativo. O hidrogénio libertado pode ser absorvido pelo metal, que no caso de pré - esforço pode causar fracturação por fragilização. Não existem na literatura registos da ocorrência de fragilização de aço sob tensão por aplicação de corrente. Em presença de pre - esforço é necessário a realização de um teste piloto para garantir a adequada aplicabilidade da técnica.
- ❑ **O aumento da alcalinidade (principalmente de Na+, K+) junto às armaduras pode exacerbar reacções alcalis - silício, em betão com determinados agregados reactivos, principalmente no caso da realcalinização. Nestes casos pode utilizar-se um electrólito que minimize o efeito, contudo é necessário realizar um teste piloto para garantir a adequada aplicabilidade da técnica.**

Estaleiro - Central de bombagem – Aplicação de Protecção catódica Laje de Topo

Fase 1- Avaliação da condição da estrutura antes da reparação- corrosão devido à contaminação dos cloretos introduzidos pela parte superior da laje



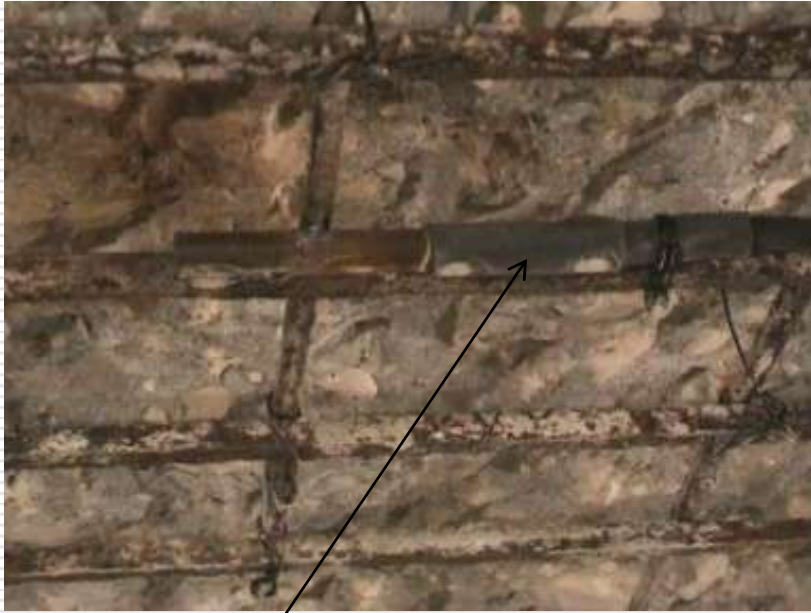
-Armaduras expostas, delaminação do betão de grandes proporções , constituindo risco para a segurança da estrutura, funcionários e equipamento presente na divisão.

Estaleiro - Central de bombagem – Aplicação de Protecção catódica Laje de Topo

Fase 2- Remoção do betão deteriorado, limpeza das armaduras



Fase 3- Instalação dos componentes da protecção catódica



Ligação às armaduras



Instalação do eléctrodo de referência

Fase 4- Projecção, por via seca, da primeira camada de recobrimento



Fase 5- Instalação do ânodo e ligações anódicas



Mesquita- Aplicação de protecção catódica



Mesquita- Aplicação de protecção catódica

- Demolir e reconstruiu com armaduras de aço Inox
- Aplicação de protecção catódica para protecção da fundação



Mesquita- Aplicação de protecção catódica



Ânodos instalados na água



Mesquita-Aplicação de protecção catódica

Corrosão dos pilares



Reparação

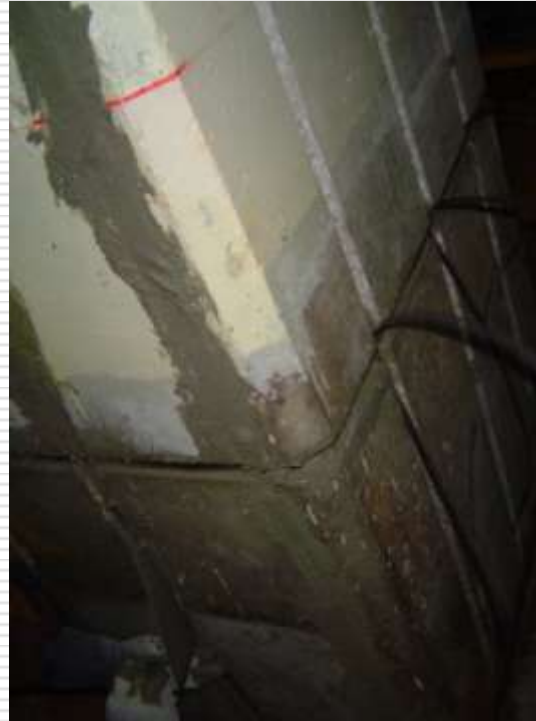


Aplicação de fitas de Ti/MMO em roço



Mesquita-Aplicação de protecção catódica

Aplicação de protecção catódica nos pilares da fundação



Extracção de Cloretos-Escola Secundária



Laje fungiforme nervurada com zona maciça junto ao pilar





Instalação da malha de aço (ânodo) e suporte - feltro



Instalação da malha entre duas camadas de feltro

Sistema de rega para manter a humidade



Ligações às armaduras e ao ânodo



Fontes de alimentação decorrente continua





Escoriações de água com produtos de corrosão da malha de aço



Realização de carotes durante o tratamento para a determinação do teor de cloretos

Novo Cais de Cruzeiros Doca do Tabaco – Lisboa

Aplicação de Prevenção Catódica

Aplicação de protecção catódica durante a fase de construção



1 Simple





NP 296













Considerações Finais

Quando se planeia a metodologia de reabilitação de uma estrutura é necessário ter em consideração:

- ❑ As causas e a extensão da deterioração nos diferentes elementos
- ❑ O ambiente de exposição
- ❑ Factores económicos
- ❑ Funcionamento da estrutura
- ❑ Tempo de vida útil esperado, etc.

Assim, antes de se seleccionar a técnica mais apropriada é necessário a realização de um estudo que permita fazer um levantamento das patologias, identificar as causas e extensão da deterioração.

Considerações Finais

Vantagens da utilização das técnicas electroquímicas:

- ❑ Maior eficiência na prevenção à corrosão
- ❑ Maior tempo de vida útil a esperar da estrutura
- ❑ Custos mais baixos, principalmente a longo prazo
- ❑ Menor enfraquecimento estrutural
- ❑ Menor quantidade de betão removida
 - ❑ Economia de tempo
 - ❑ Menos ruído, poeira e impactos ambientais
 - ❑ Redução das necessidades de escoramento da estrutura
 - ❑ Menor probabilidade de indução de micro-fissuras
 - ❑ Menor interferência com o uso da estrutura



MUITO OBRIGADA

Questões

