


UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
 Escola Politécnica
 DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais
 PPEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

ENG M39 - Durabilidade e Degradação das Estruturas de Concreto

UNIDADE II - Ataque por sulfatos, RAA, Projeto de Durabilidade, Métodos de Proteção, Armaduras Resistentes, Potencial de Corrosão; Resistividade Elétrica; Patologia e Reabilitação de Estruturas; Uso de Inibidores; Proteção Catódica; Dessalinização; Realcalinização.


Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro
 verasribeiro@hotmail.com








1


Ataque por Sulfatos

Ataque por sulfato

Perda de Resistência



Ambiente rico em SO_4^{2-}

Expansão

Formação de Trincas

Desintegração

Íons Sulfato
 Segunda maior causa da degradação de estruturas de concreto armado.

2

2


Ataque por Sulfatos

- **Casos de Ocorrência**

Em ambiente industrial, é comum o ataque simultâneo dos ácidos e sulfatos, em que ocorre o carreamento das soluções agressivas, lavando a superfície do piso de concreto




3

3


Ataque por Sulfatos

- **Casos de Ocorrência**



4

4


Ataque por Sulfatos

- **Casos de Ocorrência**



5

5


Ataque por Sulfatos

- **Casos de Ocorrência**



6

6



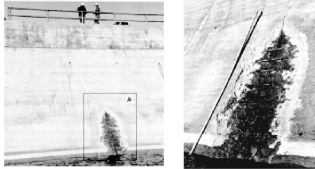
Ataque por Sulfatos

• Casos de Ocorrência

Barragem

Estruturas de concreto da barragem de Fort Peack, em Montana - EUA, após 20 anos de uso.

Análises mineralógicas revelaram que grandes quantidades de gipsita haviam se formado à custa do C-S-H e hidróxido de cálcio.



7

7

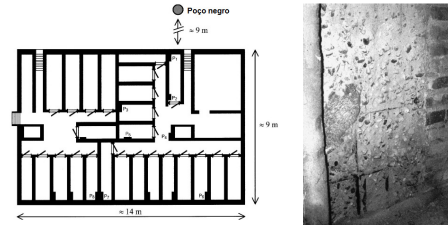


Ataque por Sulfatos

• Casos de Ocorrência

Fundação de Edifício

Fundação de um edifício de concreto na cidade de Torino - Itália, houve ataque por sulfato, induzido por ácido sulfúrico proveniente do metabolismo de microrganismos presentes no esgoto.



8

8

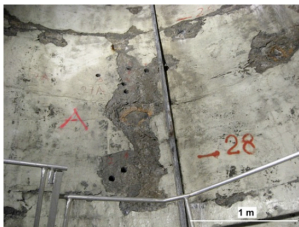


Ataque por Sulfatos

• Casos de Ocorrência

Duto de Concreto em Contato com o Solo

A distribuição dos danos mostrou que a água subterrânea penetrou no concreto e atingiu seu interior apenas nas áreas onde o material era de baixa qualidade ou de menor espessura.



9

9

Fontes Externas (Etringita secundária)

Fontes Internas (Etringita tardia)

10



Ataque por Sulfatos

• Fontes:

- Sulfato nas águas

Ação mecânica de microfissuração e reação química com os componentes do concreto, resultando em produtos expansivos que causam a fissuração.

- Sulfato nos solos

São considerados suspeitos os solos de coloração cinza a negra, especialmente quando apresentarem manchas de ferrugem vermelho-castanho.

- Sulfato nos agregados

Os sulfetos de ferro são frequentemente encontrados em agregados naturais, como por exemplo, pirita (FeS_2), marcasita (FeS_2) e pirrotita (FeS).

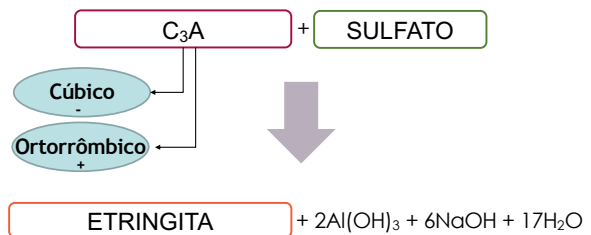
- Sulfato nos esgotos

11

11



Ataque por Sulfatos



12

12



Ataque por Sulfatos

• Formas e Categorias

- Forma clássica de ataque por sulfatos, associada à formação de etringita e formação de gipsita;
- Efeito físico, associado à cristalização dos sais de sulfato;
- Ataque interno, associado à formação de etringita tardia;
- Formação de taumasita.

13

13



Ataque por Sulfatos

• Etapas

- Difusão dos íons agressivos para o interior da matriz cimentícia, que é função da porosidade e permeabilidade;
- Reações químicas entre o íon sulfato e certos constituintes hidratados do cimento (portlandita, monossulfoaluminato e outros aluminatos hidratados) formando espécies químicas que resultam em expansão (etringita e gipsita);
- Fissuração da matriz, algumas vezes associada à reação química de descalcificação do C-S-H, resultando em perda de resistência e desintegração

14

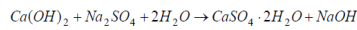
14



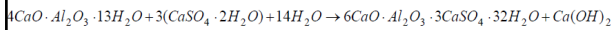
Sulfato de Sódio

• Causa duas reações principais:

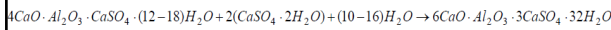
- Reação do sulfato de sódio e do hidróxido de cálcio, que formam a gipsita;
- Reação da gipsita formada com os aluminatos de cálcio, formando etringita.



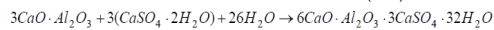
aluminatos de cálcio hidratado



sulfoaluminatos de cálcio hidratado



aluminato remanescente do cimento anidro (C3A)



15

15



Sulfato de Sódio

• Ocorre em dois estágios:

ETAPA 1

- A taxa de expansão é bastante baixa e linear, sendo chamado de período de indução;
- Produtos expansivos formados pelo ataque por sulfato de sódio preenchem os vazios da pasta de cimento hidratada, não conferindo tensões internas nas matrizes cimentícias.



16

16



Sulfato de Sódio

• Ocorre em dois estágios:

ETAPA 2

- A taxa de expansão aumenta repentinamente, permanecendo constante até o colapso da estrutura de concreto;
- Aumento súbito da expansão devido ao aumento da quantidade de gipsita e etringita formadas. Isso provoca um aumento da força expansiva e uma redução da seção resistente.



17

17



Sulfato de Sódio

• Modelo alternativo:



18

18

Sulfato de Magnésio

- Ataque por sulfato de magnésio:

Ambientes agressivos com alta concentração de $MgSO_4$, reagem quimicamente.

$$SO_4^{2-} + Mg^{2+} + Ca(OH)_2 = \text{Brucita Gipsita Etringita}$$

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O + Mg(OH)_2$$

19

Sulfato de Magnésio

- Ataque por sulfato de magnésio:

- Decomposição do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) para o M-S-H (silicato de magnésio hidratado), sendo este último, produto de baixa resistência mecânica;
- Além disso, a brucita e os silicatos hidratados, oriundos da descalcificação do C-S-H, formam o M-S-H.

$$C_3S_2H_x + 3MgSO_4 + (x + 21)H_2O \rightarrow 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 3Mg(OH)_2 + 3(Si_2O_3 \cdot yH_2O) + (12 + x + y)H_2O$$

$$4Mg(OH)_2 + Si_2O_3 \cdot yH_2O \rightarrow M_4SH_{8,5} + (4,5 -)H_2O$$

20

Sulfato de Magnésio

- Etapas:

- Sulfato difunde-se para o interior a matriz;
- Camada de Brucita (Sulfato de magnésio + Portlandita);
- Brucita consome Portlandita; C-S-H libera Portlandita aumentando o pH novamente (descalcificação do C-S-H);
- Depois de formada a camada de brucita, a solução penetra na matriz;
- Forma-se Etringita e Gipsita (sob a camada de brucita) causando expansão e tensão interna;
- Degradação do C-S-H e formação do M-S-H.

21

Sulfato de Magnésio

- Ataque por sulfato de magnésio:

Fissuras

- Etringita
- Gipsita

22

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado:

Os sulfetos formam uma importante classe de minerais que incluem a maioria dos minérios metálicos, como: galena, esfarelita, calcopirita, estanita, pirrotita, covelita, estilbita, **pirita**, molibdenita e a bornita

23

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado:

Cristais de pirita

A pirita ou o dissulfeto de ferro, é o sulfeto de ferro mais comum na natureza e pode ser formada em altas e baixas temperaturas

24

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Oxidação da Pirita

Deterioração do Concreto

$SO_4^{2-} + Ca(OH)_2 = \text{Gipsita Etringita}$

$Fe^{2+}, Fe^{3+} \rightarrow \text{Tensão interna}$

25

25

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Oxidação da Pirita

- Oxidação do Sulfeto de ferro, liberando Fe^{2+} , Fe^{3+} e SO_4^{2-}
- Aumento de Volume
- Formação da etringita e gipsita
- Fissuração no concreto
- Propagação das fissuras até a degradação completa

26

26

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Oxidação da Pirita

Oxidação

Gipsita

Fissuras

27

27

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Com reduzir?

Quantidade de C_3A

Consumo de $Ca(OH)_2$

Refinamento dos poros

28

28

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Com reduzir?

As adições minerais, independentemente do tipo, exercem efeito físico sobre a cinética da hidratação do cimento, pelos efeitos de diluição e de nucleação heterogênea

Os materiais pozolânicos, além do efeito físico, exercem efeito químico.

29

29

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Métodos de Avaliação

Princípio de aceleração	Procedimento	Indicador
Aumento da superfície de ataque	Os CPs de argamassa são depositados em solução agressiva	Resistência à tração na flexão; Variação Vol.
Cristalização de sais forçada	Os CPs são submergidos gradualmente na solução agressiva, até saturação	Resistência à tração na flexão
Reação do SO_2 na hidratação do cimento anidro	O cimento é misturado com areia e água saturada de cal, e depois é filtrado e medido o teor de SO_2 do filtrado	SO_2 não combinado

30

30

Ataque por Sulfatos

- Sulfatos no Agregado
- Métodos de Avaliação


+


Alterações na portlandita, pelo fato de reagir com sulfato de cálcio e resultar na formação da gipsita e da etringita.

Nas análises termogravimétricas é possível quantificar a quantidade de fases formadas durante o processo de deterioração.

31

31

Reação Álcalis-agregado

- Fenômeno Mundial
- Identificada pela 1ª vez nos E.U.A. em 1920-40



32

32

Reação Álcalis-agregado

- Fenômeno Mundial








33

33

Reação Álcalis-agregado












34

34

Reação Álcalis-agregado




GINÁSIO POLIESPORTIVO DE CUIABÁ - MATO GROSSO-BRASIL

35

35

Reação Álcalis-agregado







36

36

Reação Álcalis-agregado

Ponte da Foz do Dão, Portugal

37

Reação Álcalis-agregado

Barragem da Aguiieira, Portugal

38

Reação Álcalis-agregado

Barragem da Aguiieira, Portugal

39

A Sílica (SiO₂)

- **Formas Cristalinas.**
 - Natural: β-quartzo, β1, β2, tridimita, crystalita; coesita; stishovita; moganita, keatita;
 - Sintética: Keatita, sílica W, porosils.
- **“Formas” Amorfas**
 - Natural: Opala, sílica biogênica, terras diatomáceas, fibras de sílica, sílica vítrea;
 - Sintética: Sílica fundida, microsílica, pirogênica ou sílica evaporada, sílica precipitada, sílica coloidal, sílica gel.

40

Reação Álcalis-agregado

- **RAA**
- Ocorrem entre os constituintes reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial do concreto.

↓

Consequências nefastas para o concreto

↓

Originam produtos expansivos

↓

Provocam fissuração: map cracking

41

Reação Álcalis-agregado

- A origem
Alterabilidade de determinados minerais dos agregados em ambiente muito alcalino
- Tipos de RAA

Reação Álcalis-Silica (RAS)	Reação Álcalis-Carbonato (RAC)
-----------------------------	--------------------------------
- As causas
As zonas mais sensíveis das estruturas são as zonas em contacto com água, expostas às intempéries ou com deficiente drenagem ou não estanques

42



Reação Álcalis-agregado

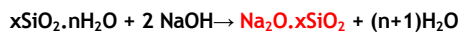
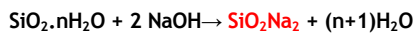
• RAA

- Se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter um efeito altamente prejudicial para o concreto

Sílica reativa;

Reação com caráter fortemente expansivo;

Facilita a ocorrência da carbonatação e da corrosão.



43

43



Reação Álcalis-agregado

• Tipos

- Reação álcalis-silica (RAS, mais comum)

- Reação álcalis sílica + silicato

- Sílica reativa - estrutura mais ou menos desordenada, com maior instabilidade (tais como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, certos tipos de vidros naturais vulcânicos e artificiais);

- Reação entre íons alcalinos (Na^+ , K^+) e hidroxila (OH^-);

- Produto: gel de álcali-silicato;

- RAS é, geralmente, sinônimo de RAA.

44

44



Reação Álcalis-agregado

• Tipos

- Reação álcalis-carbonato (RAC)

- Agregados rochosos carbonáticos ou calcário-dolomíticos;

- Decomposição do carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomita) por ação da solução intersticial alcalina;

- Não há formação do gel expansivo, mas, há cristalização de compostos como brucitas, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano

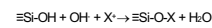
45

45

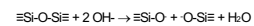


Reação Álcalis-agregado

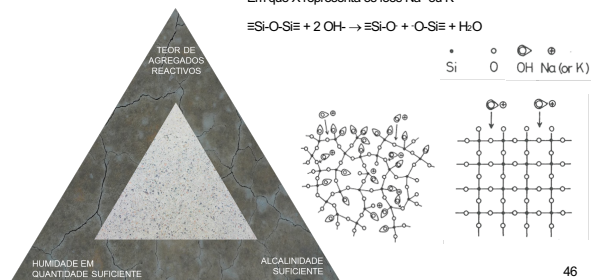
Parâmetros que afetam a velocidade de degradação do concreto por RAA



Em que X representa os íons Na^+ ou K^+



• Si • O • OH • Na (or K)



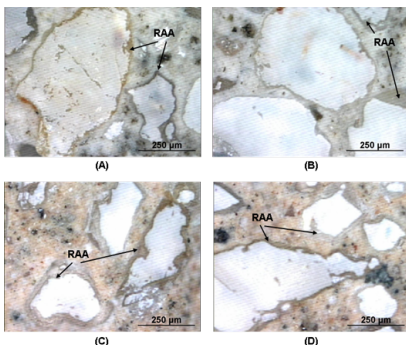
46

46



Reação Álcalis-agregado

• RAA



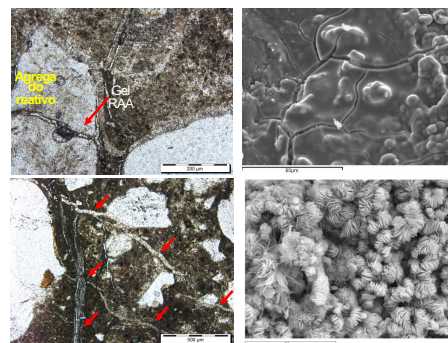
47

47



Reação Álcalis-agregado

Efeitos microscópicos no concreto



> Expansão do gel
> Fissuração do agregado e da pasta

48

48

Reação Álcalis-agregado

Efeitos microscópicos no concreto



- Expansão do gel
- Fissuração do agregado e da pasta

49

49

Reação Álcalis-agregado

Efeitos macroscópicos no concreto

➢ Expansão da estrutura e degradação



50

50

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

1. Classificar as Estruturas (classes A, B ou C)
2. Determinar o grau de reatividade do agregado (R0 a R3)
3. Determinar o grau de risco da reatividade do agregado e as dimensões e condições de exposição
4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MPO a MP4)

51

51

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

1. Classificar as Estruturas (classes A, B, C ou D)

Classificação da Estrutura	Consequências da RAA	Exemplos
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança	Estruturas temporárias, elementos não expostos à umidade, elementos não estruturais no interior de edifícios, canteiro de obras
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer degradação generalizada	Calçadas, calhas, telhas, muros, etc.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias, tubulões, barreiras de segurança, estradas de baixo tráfego, dormentes, etc.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração	Grandes pontes, estádios, hidrelétricas, obras de arte, barragens, nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água e esgoto, túneis e estruturas de difícil acesso

52

52

Reação Álcalis-agregado

- Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

2. Determinar o grau de reatividade do agregado (R0 a R3)

Reatividade Potencial do Agregado	Expansão das barras de argamassa, 30 dias (%)	Expansão dos prismas de concreto, 365 dias (%)
Potencialmente inócuo, R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo, R1	Entre 0,19% e 0,40%	Entre 0,04% e 0,12%
Potencialmente reativo, R2	Entre 0,41% e 0,60%	Entre 0,13% e 0,24%
Potencialmente reativo, R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

53

53

Reação Álcalis-agregado

- Métodos de caracterização da reatividade dos agregados



Análise petrográfica

Ensaio acelerado de barra de argamassa (14d a 80°C)

Ensaio de prisma de concreto (3/5 meses a 60°C; 12/24 meses a 38°C)

Ensaio em condições de exposição natural

54

54

Reação Álcalis-agregado

- Métodos de caracterização da reatividade dos agregados



Análise petrográfica

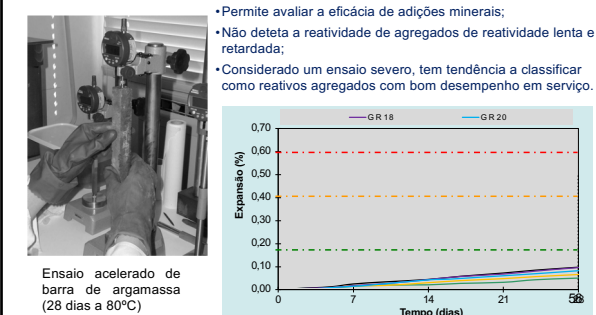
- Rápido;
- A confiabilidade depende da experiência do petrógrafo;
- Dificuldade na identificação de alguns minerais reativos;
- Recomendação da realização de ensaios complementares.

55

Reação Álcalis-agregado

- Métodos de caracterização da reatividade dos agregados

- Ensaio rápido (30 dias);
- Permite avaliar a eficácia de adições minerais;
- Não deteta a reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada;
- Considerado um ensaio severo, tem tendência a classificar como reativos agregados com bom desempenho em serviço.



Ensaio acelerado de barra de argamassa (28 dias a 80°C)

56

Reação Álcalis-agregado

- RAA

- Determinação da Reatividade dos agregados

NBR 15577-4 ("Agregados - Reatividade de álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado")


- Determinação da eficiência das adições ativas em mitigar a RAA

NBR 15577-5 ("Agregados - Reação álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado")



57

Reação Álcalis-agregado

- Método Acelerado das Barras de Argamassa - NBR 15577-4:2018

Moldagem dos corpos de prova de argamassa;
Desmolde após 24h;
Manutenção por 24h em água a $80 \pm 2^\circ\text{C}$;
Manutenção em solução de NaOH (1M) a $80 \pm 2^\circ\text{C}$ e realizam-se medidas do comprimento a cada 2 dias (28 d);

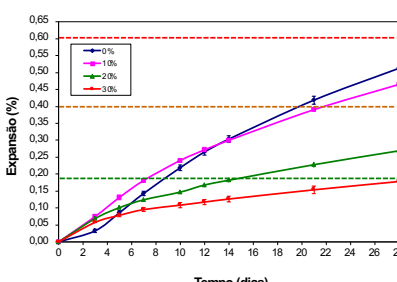
Expansão superior a 0,19%: potencialmente Reativo (R1 a R3)



58

Reação Álcalis-agregado

- RAA
- NBR 15577:2018 - Exemplo



59

Reação Álcalis-agregado

- Método do Prisma de Concreto - NBR 15577-6:2018

Moldagem dos prismas de concreto (285 x 75 x 75 mm³);
Utilização de cimento padrão e hidróxido de sódio na água de amassamento;
Desmolde após 24h;
Manutenção em estufa a $38 \pm 2^\circ\text{C}$ por 12 meses;
Para avaliação de mitigação: 24 meses

Se a expansão final for superior a 0,04%, o agregado é considerado potencialmente reativo (R1 a R3).

60



Reação Álcalis-agregado

• Método Acelerado do Prisma de Concreto

- NBR 15577-7:2018

Moldagem dos prismas de concreto (285 x 75 x 75 mm³);

Utilização de cimento padrão e hidróxido de sódio na água de amassamento;

Desmolde após 24h;

Manutenção em cura térmica a 60 ± 2°C por 20 semanas (4,5 meses)

Se a expansão final for superior a 0,03%, o agregado é considerado potencialmente reativo.

61



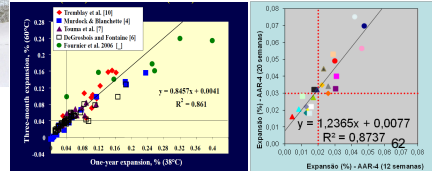
Reação Álcalis-agregado

• Métodos de caracterização da reatividade dos agregados

- O ensaio a 38° C (RILEM AAR-3, ASTM C 1293)
 - Considerado de referência para o estudo de agregados e composições de concreto;
 - Não detecta a reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada e tem o inconveniente da duração.
- O ensaio a 60° C (RILEM AAR-4, NF P 18-454)
 - Tem a vantagem da duração ser menor;
 - Limites de reatividade ainda em avaliação;
 - Melhor desempenho na avaliação da reatividade de agregados de reatividade lenta e retardada.



Ensaio de prisma de concreto
3/5 meses @ 60°C
12/24 meses @ 38°C



62



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

3. Determinar o grau de risco da reatividade do agregado e as dimensões e condições de exposição

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de Reatividade do Agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco (UR < 60%)	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Elemento Maciço (menor dimensão > 1m em ambiente seco)	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito Alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço (água do mar, solos contaminados, lençol freático contendo álcalis, etc.)	Desprezível	Alto	Muito Alto	Muito Alto

63



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MP0 a MP4)

Risco de Ocorrência	Classe da Estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP0	MP0	MP0	MP0
Mínimo	MP0	MP0	MP1	MP2
Moderado	MP0	MP1	MP2	MP3
Alto	MP0	MP3	MP4	MP4
Muito Alto	MP0	MP4	MP4	MP4

64

64



Reação Álcalis-agregado

• Avaliação do risco de ocorrência e medidas preventivas

4. Estabelecer a intensidade da ação preventiva (MP0 a MP4)

Intensidade da Medida Preventiva	Opção 1	Opção 2	Opção 3
MP0	Nenhuma ação é necessária		
MP1	Limitar o teor de álcalis a valores inferiores a 2,4 kg/m ³ de Na ₂ O _{eq} .	Utilizar cimentos dos tipos CPII-E, CPII-Z, CPIII ou CPIV	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP2
MP2	Usar o cimento CP III com no mínimo 60% de escória de alto forno	Usar o cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP3
MP3	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (aosl.)	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (2 anos)	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva MP4
MP4	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (aosl.)	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação (2 anos)	Trocar o agregado

65

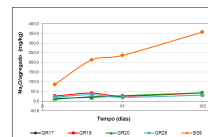


Patologias - RAA

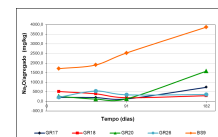
Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de álcalis do concreto

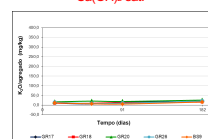
- Limitar o teor de álcalis do concreto (cimento, adições, agregados ??);



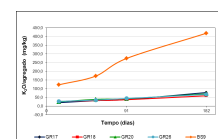
Ca(OH)₂ sat.



KOH 1M + Ca(OH)₂ sat.



Ca(OH)₂ sat.



NaOH 1M + Ca(OH)₂ sat.

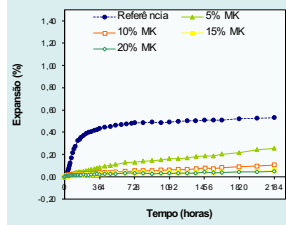
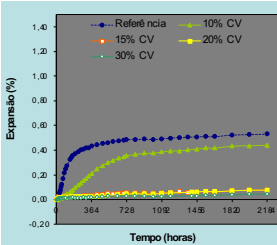
66



Patologias - RAA

Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de álcalis do concreto
 - Utilização de adições pozolânicas (cinzas volantes, metacaulim, sílica fumo, escórias de alto-forno, ...).



67



Patologias - RAA

Métodos de prevenção da RAA

- Controlar o teor de humidade
 - Considerado na fase de projeto, recorrendo a revestimentos adequados

Adequado?



68



Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

- Demolição
- Vias paliativas
 - reforço mecânico
 - corte



69



Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação

- Vias preventivas
 - impermeabilização
 - saís de lítio



70



Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação



71

71



Patologias - RAA

Estruturas com RAA – Mitigação/Reparação



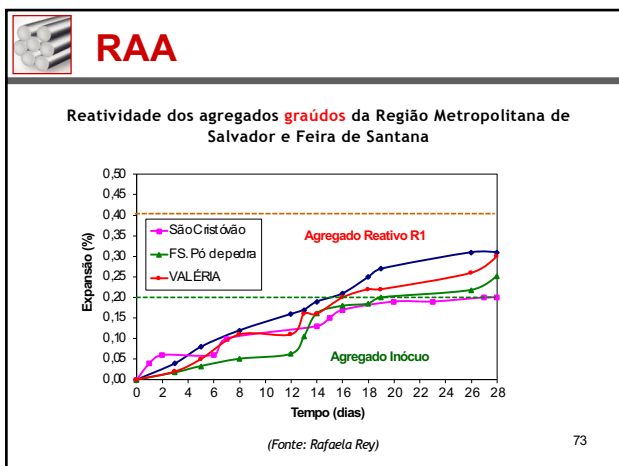
2004



2013

72

72



73

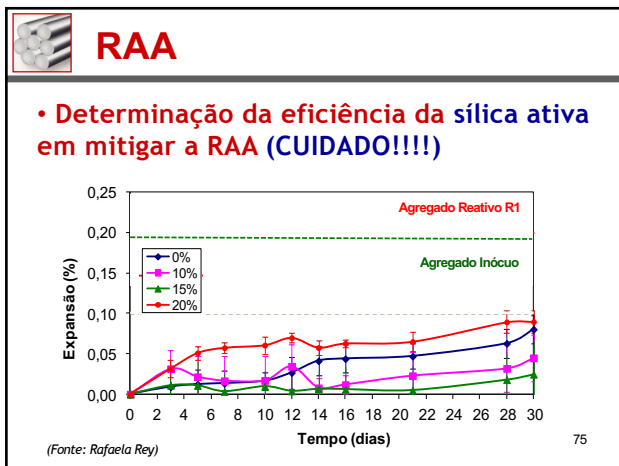
RAA

- **Prevenção da RAA:**
 - Avaliação da reatividade dos agregados
 - Utilização de **ADIÇÕES ATIVAS** para mitigar a reação

Mecanismo de minimização da RAA - **ADIÇÕES ATIVAS**

- Diluição dos álcalis
- Redução do pH
- Redução da permeabilidade
- Retenção dos álcalis

74

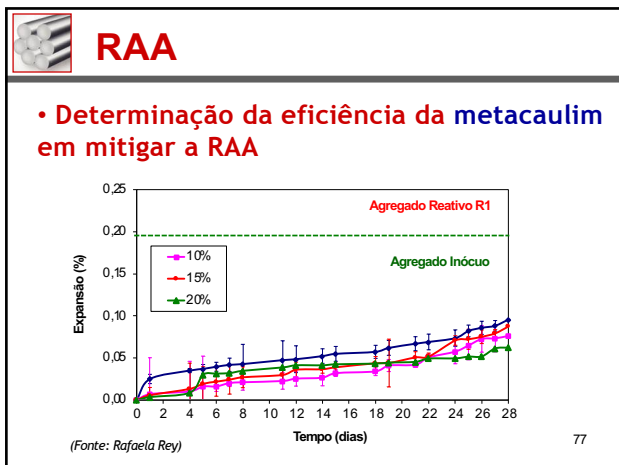


75

RAA

- A análise de desempenho das argamassas ratificou que a utilização de **silica ativa melhora as propriedades** das matrizes cimentícias, resultando em argamassas mais resistentes à compressão e à tração na flexão e com menor permeabilidade;
- A **silica ativa, mostrou capacidade em mitigar as expansões** ocasionadas pela reação álcalis-agregado quando aplicada nos teores de **10% e 15%**;
- Quando **utilizada em excesso pode ocorrer uma "saturação"** da sílica ativa na solução intersticial dos poros da matriz cimentícia, assim, a parcela que não reagirá com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em excesso, ficará disponível para reagir com os álcalis que não foram incorporados na estrutura do C-S-H;

76



77

RAA

Anais do 11º Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas
Junho de 2015

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS NA RAA EM ARGAMASSAS

R. OLIVEIRA REY
Graduada em Engenharia Civil
Universidade Federal da Bahia
Bahia, Brasil
rafaelrey2@gmail.com


D. VERAS RIBEIRO
Professor Adjunto II
Universidade Federal da Bahia
Bahia, Brasil
verasribeiro@hotmail.com

RESUMO

A reação álcalis-agregado (RAA) é uma manifestação patológica associada a reações químicas e está ligada diretamente à seleção dos materiais, que podem comprometer a durabilidade das estruturas. Analisou-se o efeito da sílica ativa e resíduo de corte de moinho e grânulo (RCMG) na capacidade de mitigar ou acelerar as reações provenientes da RAA. Foram produzidos corpos de prova em que a sílica ativa substituiu o cimento em teores de 10%, 15% e 20% e, em outros corpos de prova, o RCMG, substituiu o agregado miúdo em teores de 10% e 20%, sendo estes comparados a amostras de referência, sem adições. Os resultados confirmam que a adição mineral com características pozolônicas possui capacidade de mitigar a RAA, porém, se utilizada em teores muito elevados pode contribuir para o desenvolvimento da reação. Os resultados referentes ao RCMG indicam que este resíduo é potencialmente inócuo, principalmente devido a alta cristalinidade do material.

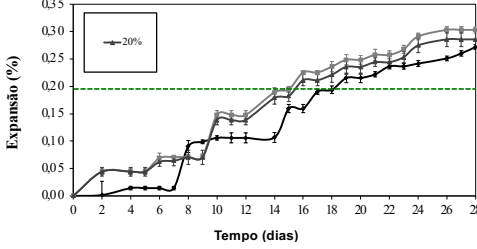
Palavras-chave: RAA, materiais, adições minerais, mitigação.

78



RAA

• **Determinação da eficiência da cinza de eucalipto em mitigar a RAA**



(Fonte: Rafaela Rey, Luciano Ferreira, Débora França)

79



RAA

FRANCA, D. F. S.; REY, R. O.; FERREIRA, L. R. C.; RIBEIRO, D. V. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 153-166, jul./set. 2016. ISSN 1478-8621 Associação Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1595/1478-8621/20160300096>

Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland

Evaluation of mortar rheology, AAR and properties, in fresh state, using eucalyptus ash as partial replacement to Portland cement


**Débora Flávia Soto França
Rafaela Oliveira Rey
Luciano Renato Conceição Ferreira
Daniel Veras Ribeiro**

Resumo
D e acordo com o Balanço Energético Nacional (ano-base 2013), o consumo nacional de lenha foi de 79,29 milhões de toneladas. Estimase uma produção de cinza em volume de 2% durante esse processo, o que ocasiona problemas de armazenamento e de descarte. Sendo assim, a potencial transformação desses resíduos em matéria-prima para elementos construtivos apresenta-se como uma oportunidade para a preservação do meio ambiente e para a redução do custo de materiais da construção civil. O presente trabalho objetiva, portanto, avaliar a viabilidade desse reaproveitamento por meio da análise das propriedades das argamassas no estado fresco, incluindo a reologia, além da reatividade-potencial (RAA), utilizando cinza proveniente da queima de cavacos de eucalipto com teores de 10%, 20% e 30% de substituição, em massa, ao cimento Portland. Através dos ensaios realizados verificou-se que a utilização da cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento não altera significativamente as propriedades de argamassas no estado fresco e não apresenta reatividade significativa, apresentando-se como uma alternativa de uso tecnicamente viável.

Palavras-chaves: Cinza de eucalipto; Argamassa; Reologia; RAA; Propriedades.

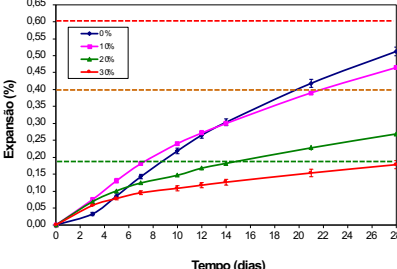
Débora Flávia Soto França
Universidade Federal de Bahia
Salvador - BA - Brasil

80



Reação Álcalis-agregado

• **Determinação da eficiência da lama vermelha em mitigar a RAA**



81



Reação Álcalis-agregado

Cerâmica 58 (2012) 90-98

90

Estudo das reações alcalis-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento

Volume 5, Number 4 (August, 2012) p. 451-467 • ISSN 1983-4195

REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS
IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL

Effect of red mud addition on the corrosion parameters of reinforced concrete evaluated by electrochemical methods

Efeito da adição de concreto eletroquímico

Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete^{1,2}

D.V. Ribeiro^{1*}, J.A. Labrincha², M.R. Morelli¹

¹ Government of Alagoas, Institute of Technology, Federal University of Alagoas, Rua Azeiteiro Nova, 07, Fátima, 57072-900, Salvador, BA, Brazil
² Concrete and Glass Engineering Dept., University of Aveiro, 4810-032, Campus Universitario de Santiago, 4810-032, Aveiro, Portugal
³ Department of Electrical Engineering, Federal Institute of Education, Bahia, Ilheus, Brazil, CEP: 45600-000, Bahia, Brazil

Abstract

82



Projeto de Durabilidade desde a concepção

83



Projeto de Durabilidade

• **Níveis de Abordagem para a Concepção de Estruturas de Concreto Duráveis**

- Nível 1** → **Abordagem prescritiva:** C_{adm} min, a/ag_{adm}, cobrim_{min}, f_{ck} min, tipo de cimento, etc.
Adequado para VUP < 50 anos
- Nível 2** → **Abordagem mista:** utiliza os indicadores de durabilidade (K_{água}, K_{gás}, D_{Cl-}, p_{eletr}, etc.).
Adequado para VUP entre 50 e 100 anos
- Nível 3** → **Abordagem de desempenho:** emprega modelos preditivos de vida útil (carbonatação, cloretos). Modelos mais simples (Leis de Fick) determinísticos. **VUP > 100 anos**
- Nível 4** → **Abordagem de desempenho:** emprega modelos preditivos de vida útil mais sofisticados. Modelos probabilísticos ou semi-probabilísticos. **VUP >> 100 anos**

84



Projeto de Durabilidade

• Níveis de Abordagem para a Concepção de Estruturas de Concreto Duráveis

Exemplo de VUP que podem ser especificadas.

Tipo de estrutura	fib Model Code for Concrete Structures 2010	fib CEB-FIP Bulletin 34 Model Code for Service Life Design (2006)
Estruturas de carácter temporário	Entre 1 e 5 anos	10 anos
Elementos substituíveis de estruturas (por exemplo, pórticos e aparelhos de apoio)	25 anos	Entre 10 e 25 anos
Estruturas agrícolas ou similares	-----	Entre 15 e 30 anos
Edifícios e outras estruturas comuns de importância média	50 anos	50 anos
Estruturas muito importantes, como estruturas monumentais, pontes ou outras estruturas especiais	100 anos ou mais	100 anos

85



Projeto de Durabilidade

• Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte Vasco da Gama



"Uma das 1^{as} obras em que a durabilidade foi considerada com base em uma abordagem de desempenho"

- Atmosfera marinha
- **Desempenho:** risco de corrosão iniciada por cloretos

- ✓ Ponte sobre o **Rio Tejo** – Lisboa/Portugal
- ✓ 5ª maior ponte do mundo (17185 m)
- ✓ **Construção:** 1998

Cascudo, 2015

86



Projeto de Durabilidade

• Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Viaduto Millau



"Condições de exposição menos severas do que a Ponte sobre o Tejo, porém mais diversas"

- **Desempenho:** estacas deveriam resistir ao congelamento (concreto $f_{ck} = 60$ MPa, sem sílica ativa e sem incorporador de ar);
- Vida útil: 120 anos .

- ✓ Viaduto **Millau** – França
- ✓ 343 m de altura (mais alta ponte rodoviária do mundo)
- ✓ **Construção:** 2004

Cascudo, 2015

87



Projeto de Durabilidade

• Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte Rion-Antirion

- "Obra em CAD para uma vida útil de 120 anos"



Cascudo, 2015

- ✓ Ponte **Rion-Antirion** – Grécia)
- ✓ **Construção:** 2004
- **Modelagem da penetração de Cl⁻:**
- **Desempenho:** em 120 anos, % Cl⁻ < 0,4% em rel. massa de cimento;
- **Concreto C45/65, cimento com 62% de escória, relação a/c < 0,4 e cobertura min de 70 mm.**

Definição do concreto:
• Carga passante (ASTM C 1202)
• Coef. difusão de Cl⁻

88



Projeto de Durabilidade

• Exemplos de Abordagem de Desempenho em Grandes Obras de Concreto

Ponte da Confederação

"Obra em CAD para uma vida útil de 100 anos"



- Atmosfera marinha
- **Desempenho:** quanto à corrosão iniciada por cloretos e quanto à abrasão pela ação de gelo na base dos pilares
- Modelagem da evolução dos perfis de cloretos x tempo

- ✓ Ponte da **Confederação** – Ilha do Príncipe Eduardo/Canadá)
- ✓ 8ª maior ponte do mundo (12900 m)
- ✓ **Construção:** 1997

Cascudo, 2015

89



Etapas Básicas

- **Pré-projeto (concepção);**
- **Projeto Estrutural;**
- **Materiais Utilizados;**
- **Métodos de Proteção;**
- **Monitoramento Contínuo.**

90

90



Etapas Básicas

- Pré-projeto (concepção);
- Projeto Estrutural;
- Materiais Utilizados;
- Métodos de Proteção;
- Monitoramento Contínuo.

91

91



Pré-projeto

• Aspectos Normativos

- NBR 6118 (ABNT, 2014) - define requisitos mínimos de qualidade (construção e em serviço) quanto a:

Capacidade resistente;
Desempenho em serviço e;
Durabilidade.

- **Necessário verificar as condições impostas ao projeto**

92

92



Pré-projeto

• Aspectos que influenciam na durabilidade

- Características do meio ambiente

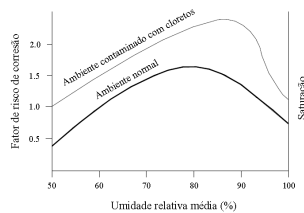
Névoa Salina (spray marinho)

Direção do vento;

Umidade;

Temperatura;

Poluição atmosférica.



93

93



Pré-projeto

• Aspectos Normativos (NBR 6118 : 2014)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
		Marinha ^a	
III	Forte	Industrial ^{a, b}	Grande
		Industrial ^{a, c}	
IV	Muito forte	Respingos de maré	Elevado

a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

6.4.3 O responsável pelo projeto estrutural, de posse de dados relativos ao ambiente em que será construída a estrutura, pode considerar classificação mais agressiva que a estabelecida na Tabela 6.1.

94



Pré-projeto

• Aspectos Normativos

- Qualidade do Concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

95

95



Pré-projeto

• Aspectos Normativos

- Cobrimento Nominal ($\Delta c = 10\text{mm}$)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV c
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30	40	50	
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos anfílicos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal $\geq 15\text{ mm}$.

c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaléticas de efluentes e outras obras em ambientes químicos e intencionalmente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d No recolo dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45\text{ mm}$.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

96

96



Pré-projeto

• Metodologia Aplicada

- Método da vela úmida (NBR 6211:2001)

Consiste em um cilindro envolvido com gaze cirúrgica e fixado a um frasco coletor.



109

109

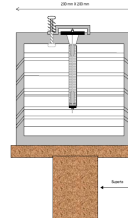


Pré-projeto

• Metodologia Aplicada

- Método da vela de dióxido de chumbo (NBR 6921:2002);

Consiste em um cilindro envolvido com camadas de gaze cirúrgica, recoberta com uma pasta de PbO₂.



110

110



Pré-projeto

- Classificação (NBR 14643:2001).

- Classificação ambiental em função de contaminação por cloretos (Cl⁻), segundo a NBR 14643:2001.

Taxa de deposição de Cl ⁻ , mg/(m ² .d)	Categoria	Classificação
B ≤ 13	B0	Insignificante
3 < B ≤ 60	B1	Mediano
0 < B ≤ 300	B2	Agressivo
300 < B ≤ 1500	B3	Muito Agressivo

- Classificação ambiental em função de contaminação por sulfatos (SO₄²⁻), segundo a NBR 14643:2001.

Taxa de deposição de SO ₄ ²⁻ , mg/(m ² .d)	Categoria	Classificação
Ad ≤ 10	A0	Insignificante
10 < Ad ≤ 35	A1	Mediano
35 < Ad ≤ 80	A2	Agressivo
80 < Ad ≤ 200	A3	Muito Agressivo

111

111

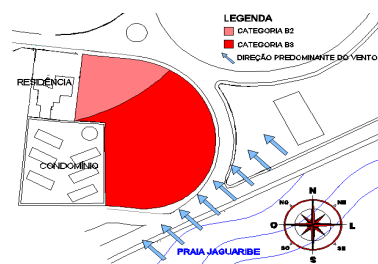


Pré-projeto

• Metodologia Aplicada

- Resultados

Estação Inverno - Íons Cloreto



112

112



Pré-projeto

• Metodologia Aplicada

- Resultados

Estação Primavera - Íons Cloreto



113

113



Pré-projeto

• Metodologia Aplicada

- Resultados

Estação Inverno - Íons Sulfato



114

114

Pré-projeto

- Metodologia Aplicada
- Resultados

Estação Primavera - Íons Sulfato

115

Pré-projeto – Vida Útil

(Fonte: Anexo C, Tabela C.5, pág 54 da NBR 15575-1)

Sistema	VUP anos		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30

* Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.

116

115

116

Pré-projeto – Vida Útil

- Norma inglesa

BS 7543 (2015) - Guide to Durability of Buildings and Buildings Elements, Products and Components

Tipo de Estrutura	Vida Útil Nominal
Temporárias	≥ 10 anos
Substituíveis	≥ 10 anos
Edifícios Industriais e reformas	≥ 30 anos
Edifícios Novos e reformas de prédios públicos	≥ 60 anos
Obras de Arte e Edifícios Públicos Novos	≥ 120 anos

117

Pré-projeto – Vida Útil

- Norma Europeia

EM 2016-1 (2007) - Concreto: Especificação, desempenho, produção e conformidade

Tipo de Estrutura	Vida Útil Nominal
Temporárias	≥ 10 anos
Partes Substituíveis (ex. apoios)	10 a 25 anos
Estruturas para Agricultura e semelhantes	15 a 30 anos
Edifícios e outras estruturas comuns	≥ 50 anos
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de grande porte	≥ 100 anos

118

117

118

Pré-projeto – Vida Útil

Proposta de tabela de dimensionamento estrutural à durabilidade para uma VUP de 50, 63 e 75 anos.

VIDA ÚTIL CAA	50 Anos				63 Anos				75 Anos			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
ELEMENTO	Cobrimento (mm) / Classe concreto				Cobrimento (mm) / Classe concreto				Cobrimento (mm) / Classe concreto			
	Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)				Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)				Relação ac / Consumo cimento (kg/m³)			
Laje	20/C20	25/C25	35/C30	45/C40	25/C25	35/C35	45/C40	55/C50	30/C30	40/C40	50/C40	65/C50
	0,65/260	0,6/280	0,55/320	0,45/360	0,6/280	0,5/300	0,45/340	0,40/360	0,60/280	0,50/340	0,40/360	0,40/380
Viga/pilar	25/C20	30/C25	40/C30	50/C40	30/C25	40/C35	50/C40	60/C50	35/C30	45/C40	55/C40	70/C50
	0,65/260	0,6/280	0,55/320	0,45/360	0,6/280	0,5/300	0,45/340	0,40/360	0,60/280	0,50/340	0,40/360	0,35/380
Elementos em contato com solo	30/C20	30/C25	40/C30	50/C40	30/C25	40/C35	50/C40	60/C50	40/C30	45/C40	55/C40	70/C50
	0,65/260	0,6/280	0,55/320	0,45/360	0,6/280	0,5/300	0,45/340	0,35/360	0,60/280	0,45/340	0,40/360	0,35/380

BOLINA E TUTIKIAN, 2014

119

Pré-projeto

- Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- NBR 6118 (ABNT, 2014) - define requisitos mínimos de qualidade (construção e em serviço) quanto a:

- Capacidade resistente;
- Desempenho em serviço e;
- Durabilidade.

- **Necessário verificar as condições impostas ao projeto**

120

119

120



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Life 365



Life-365 Service Life Prediction Model™
for reinforced concrete exposed to chlorides

Version 2.2

121

121



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Life 365

- Software gratuito orientado pela ASTM C 1556-11a;
- Banco de dados americano (condições ambientais);
- Baseia-se no mecanismo de corrosão em dois períodos: iniciação e propagação;
- Estima a concentração máxima de cloretos na superfície;
- O usuário precisa inserir sua própria estimativa do tempo, em anos, para que essa concentração seja atingida;



Version 2.2

122



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Life 365

- Estima o coeficiente de difusão aparente para o concreto, com base na 2ª Lei de Fick;
- Permite que o usuário insira dados de concentração de cloretos, retirados de amostras;
- Estima o custo do ciclo de vida de estruturas localizadas em regiões expostas a cloretos;
- Dosagem de concretos alternativos, considerando a difusão por cloretos, segundo a ASTM C 1556-11a



Version 2.2

123



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Life 365

- Prevê o tempo de início (t_i) e propagação (t_p) da corrosão, além do tempo para a primeira reparação ($t_r = t_i + t_p$);
- É possível inserir dados de outras regiões, fazendo as devidas adequações aos parâmetros utilizados pelo programa;
- É possível inserir resultados obtidos (profundidade e concentração de cloretos na superfície) em ensaios laboratoriais.



Version 2.2

124



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Life 365

- O processo de estimativa de vida útil e ciclo de vida é dividido em 5 etapas:
- Definir as condições do projeto, misturas dos concreto e parâmetros de estudo econômico;
- Definir as condições ambientais às quais a estrutura estará exposta;
- Especificar os traços de concreto e compilar os custos para cada alternativa;
- Cálculo da vida útil e dos custos do ciclo de vida.

125



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Duracon



Version 1.3 - Freeware Mode (#1) - Serial # 1107.1232.090.111
Registered to Odd E. Ven Gjev (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Norway)
Copyright © 2009 DURACON - All Rights Reserved

126

126



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Duracon

- Software gratuito adaptado para o código europeu fib Model Code;
- Avalia a durabilidade, baseada na análise probabilística integral da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos;
- Verifica se a vida útil será inferior à de um determinado valor especificado em projeto;
- As simulações são feitas por meio do método de Monte Carlo, conforme a 2ª lei de difusão de Fick;

127

127



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Duracon

- Os resultados encontrados limitam-se às informações lançadas apenas no software;
- É considerado como término da vida útil de projeto o instante em que, probabilisticamente, 10% da armadura sujeita à ação de cloretos fica despassivada;
- É necessário fornecer diversos parâmetros de entrada.



128

128



Pré-projeto

• Softwares com Bases Determinísticas e Probabilísticas

- Duracon (Parâmetros de entrada)

- Vida útil de projeto;
- Concentração de cloretos na superfície (Cs);
- Tempo de atuação dos cloretos;
- Temperatura;
- Coeficiente de difusão de cloretos;
- Idade do concreto quando testado;
- Teor crítico de cloretos (C_{cr});
- Cobrimento do concreto.

129

129



Etapas Básicas

- Pré-projeto (concepção);
- Projeto Estrutural;
- Materiais Utilizados;
- Métodos de Proteção;
- Monitoramento Contínuo.

130

130



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Drenagem
- Formas Arquitetônicas e Estruturais
- Qualidade do Concreto
- Detalhamento das armaduras
- Controle da fissuração
- Inspeção e manutenção preventiva

131

131



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Drenagem

- Acúmulo de água (chuva ou limpeza)
- Juntas seladas
- Uso de pingadeiras



- Formas Arquitetônicas e Estruturais

- Evitar disposições inadequadas
- Facilitar acesso para inspeção e manutenção

132

132



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Regra dos 4 C's

- 1- Composição do concreto (a/c)
- 2- Compactação do concreto (vibração e adensamento)
- 3- Cura efetiva
- 4- Cobrimento das armaduras

133

133



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Características + Espessura + Qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento, em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40
Consumo de cimento por m³ de concreto (kg/m³)	CA E CP	≥260	≥280	≥320	≥360

Não é permitido o uso de aditivos contendo cloretos para estruturas de concreto armado ou concreto protendido

134

134



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Condições Especiais de Exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de fck (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água.	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou agentes químicos de degelo.	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes.	0,40	45

135

135



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Exposição a a soluções contendo sulfatos (NBR 12655)

Condições de Exposições em função da agressividade	Sulfato Solúvel em água (SO ₄) presente no solo (%m)	Sulfato Solúvel em água (SO ₄) presente na água (ppm)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de fck (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0 – 0,10	0 – 150	---	---
Moderada	0,1 – 0,2	150 - 1500	0,50	35
Severa	> 0,2	> 1500	0,45	40

136

136



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Cobrimento Mínimo (C_{min}): menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento considerado e que se constitui num critério de aceitação (ΔC ≈ 10mm).

Cobrimento Nominal (C_{min} + ΔC):

$$C_{nom} \geq \phi \text{ barra};$$

$$C_{nom} \geq \phi \text{ feixe} = \phi_n = \phi \sqrt{n};$$

$$C_{nom} \geq 0,5 \phi \text{ bainha.}$$

Agregado:

$$d_{m\acute{a}x} \leq 1,2 C_{nom}$$

137

137



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Qualidade do Concreto

Cobrimento Nominal (C_{min} + ΔC):

Tipo de Estrutura	Elemento Estrutural	Classe de agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
Concreto Armado	Laje	20 mm	25 mm	35 mm	45 mm
	Viga/Pilar	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm
Concreto Protendido	Todos	30 mm	35 mm	45 mm	55 mm

Pré-moldados: NBR 9062

138

138



Durabilidade

• Critérios de projeto

- Detalhamento das armaduras

Barras devem ser dispostas de forma a facilitar o lançamento e adensamento do concreto

- Controle da fissuração

- Medidas especiais

Uso de revestimentos hidrofugantes e pinturas impermeabilizantes, revestimentos de argamassas, de cerâmicas ou outros, galvanização ou proteção catódica da armadura, etc.

- Inspeção e manutenção preventiva

139

139



Etapas Básicas

• Pré-projeto (concepção);

• Projeto Estrutural;

• Materiais Utilizados;

• Métodos de Proteção;

• Monitoramento Contínuo.

140

140



Seleção dos Materiais

• Avaliação Acelerada

- NBR 8094/83 (“Material metálico revestido e não revestido - corrosão por exposição à nevoa salina”)

- ASTM B117-97 (“Standard Practice for Operating Salt Spray Apparatus”)

Concentração fixa de NaCl (5%), a uma pressão (1kgf/cm²) e temperatura (35°C).

1200 horas de ensaio

141

141



Seleção dos Materiais

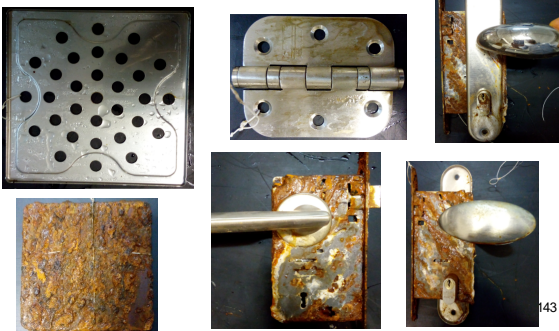


142



Seleção dos Materiais

• Avaliação Acelerada



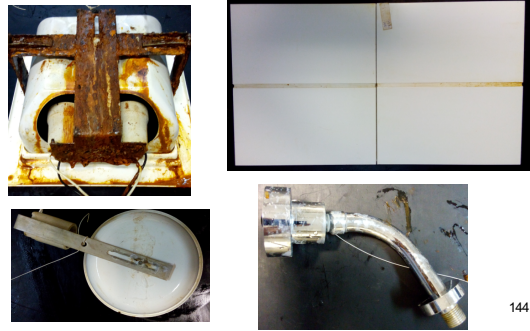
143

143



Seleção dos Materiais

• Avaliação Acelerada



144

144

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**

145

145

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**

146

146

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**

147

147

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**

	1ª semana	2ª semana	3ª semana	4ª semana	5ª semana	6ª semana	7ª semana	8ª semana	
Lata 1	Nenhum prejuízo na funcionalidade da laminares. Corrosão na parte interna das bases e em suas parafusos fixações. Existente produção de corrosão na superfície, verificado em sua parte metálica das mesmas lâminas. Folga de 0,20 mm entre as peças internamente e externamente.	Nenhum prejuízo na funcionalidade da laminares. Corrosão na parte interna das bases e em suas parafusos fixações. Folga de 0,20 mm entre as peças de suporte da laminares devido a presença da produção de corrosão. Folga de 0,20 mm entre as peças de suporte da laminares devido a presença da produção de corrosão.	De início não houve nenhuma alteração. Corrosão aparente leve corrosão.	Nenhuma modificação.	Observações anteriores na manutenção.	Observações anteriores na manutenção.	Nenhuma modificação.	Nenhuma modificação.	Nenhuma modificação.
Lata 2	Nenhum prejuízo na funcionalidade da laminares. Parafusos das fixações internas apresentam corrosão e a dificuldade para desparafusar. Social apresenta produção de corrosão em sua área interna e em suas parafusos fixações.	Um dia parafusos das fixações internas quebra com um leve toque.	De início não houve nenhuma alteração. Corrosão leve corrosão.	O último parafusos das fixações internas quebra com um leve toque.	Corrosão observado no arnho de uma das lâminas.	Nenhuma modificação.	Nenhuma modificação.	Nenhuma modificação.	Nenhuma modificação.

148

148

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**
- Potencial de Corrosão**

Potencial de corrosão (mV)*	Probabilidade de ocorrência de corrosão (aço, ECS)		
	< 10%	Incerteza	> 90%
>-124	- 124 a - 274	< - 274	

149

149

Seleção dos Materiais

- Avaliação Acelerada**
- Perda de massa (%) e Taxa de corrosão**

ASTM G-1/03 ("Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens")

150

150



Seleção dos Materiais

- **Avaliação Acelerada**

- **Perda de massa (%) e Taxa de corrosão**

ASTM G-1/03 (“Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens”)

Amostra	Perda de massa (%)
L3	9,35
L5A1	< 1,00
L5A2	< 1,00
LA6	< 1,00
L7A1	< 1,00
L7A2	< 1,00
L8A1	5,47
L8A2	6,88
L9A1	4,19
L9A2	7,37

$$PM (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i}$$

151

151



Seleção dos Materiais

- **Avaliação Acelerada**

- **Perda de massa (%) e Taxa de corrosão (µm/ano)**

ASTM G-1/03 (“Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens”)

$$TC = \frac{K.W}{A.T.D}$$

Sendo:

K = constante

(para TC(µm/ano), K=8,76.10⁷;

para TC(g/m².ano), K = 8,76.10⁷.D);

W = perda de massa (g);

A = área de exposição (cm²);

T = tempo de exposição (h);

D = densidade

(para o aço CA-50, D = 7,85 g/cm³).

152

152



Trabalho 2

- **Valor: 2,0 pontos**

- **3 Equipes:**

- 1) **Proteção Galvânica e Proteção Catódica**

- 2) **Aditivos Inibidores de Corrosão e Pinturas Impermeabilizantes/Hidrofugantes**

- 3) **Realcalinização e Dessalinização**

Parte escrita: 1,0 ponto

Apresentação Oral: 1,0 ponto



153

153



Etapas Básicas

- **Pré-projeto (concepção);**

- **Projeto Estrutural;**

- **Materiais Utilizados;**

- **Métodos de Proteção;**

- **Monitoramento Contínuo.**

154

154



Proteção Superficial

- **Impermeabilizantes Poliméricos**

- **Tintas, vernizes e silicões hidrofugantes.**

- **Componentes de Revestimento**

- **Argamassa e cerâmicas de revestimento.**

- **Proteção Superficial da Armadura**

- **Eletrodeposição;**

- **Galvanização.**

155

155

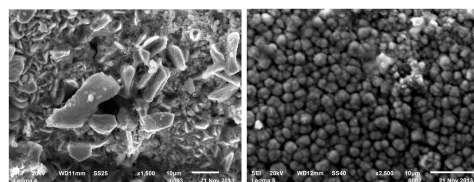


Proteção Superficial

- **Proteção Superficial da Armadura**

- **Eletrodeposição;**

- **Galvanização.**



Revestimento de Zinco

Revestimento de Zinco-Níquel

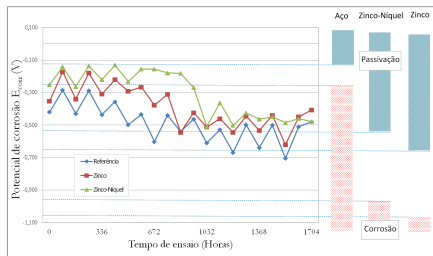
156

156



Proteção Superficial

- **Proteção Superficial da Armadura**
- **Eletrodeposição;**
- **Galvanização.**



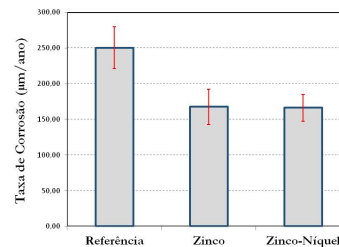
157

157



Proteção Superficial

- **Proteção Superficial da Armadura**
- **Eletrodeposição;**
- **Galvanização.**



158

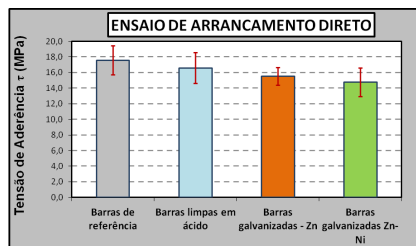
158



Proteção Superficial

- **Proteção Superficial da Armadura**
- **Eletrodeposição;**
- **Galvanização.**

Aderência Aço-Concreto



159

159



Proteção Superficial



Effects of the zinc and zinc-nickel alloys electroplating on the corrosibility of reinforced concrete rebars

Efeito da eletrodeposição de zinco e da liga zinco-níquel na corrosibilidade das armaduras de concreto armado



F. A. CESARI*
fcesari@ufpr.br
V. L. B. ALMEIDA*
valmeida@ufpr.br
C. A. C. ROCHA*
carocha@ufpr.br
M. D. JESUS*
mdjesus@ufpr.br
D. V. BRIBIDO*
vbribido@ufpr.br

Abstract

This paper shows the analysis performed on the corrosion parameters of three groups of reinforcing steel bars, two of these coated by electroplating with zinc (Zn) and zinc-nickel (Zn-Ni) and one of them without any coating. It was used reinforced concrete specimens, which were grouped and then subjected to two different corrosion assessment methods: 30% wetting/drying cycles and salt spray exposure. Corrosion products were measured to qualitative monitoring of the process and, after the end of the tests, corrosion rate was calculated by measuring the mass loss. In quantitative analysis, it was expected that the zinc-nickel alloy would perform better than average bars regarding the corrosion resistance in chloride ions containing environments. It was also observed that the zinc/Ni solution wetting cycles seemed to be more severe than salt spray exposure with respect to the assessment of corrosion process.

Keywords: electroplating, zinc, reinforced concrete, corrosion.

Resumo

Este trabalho analisa os parâmetros de corrosão das barras de aço revestidas com Zinco (Zn) e com a liga Zinco-Níquel (Zn-Ni), por eletrodeposição, comparando-as com as tradicionais não revestidas, sem revestimento. Para isso, utilizaram-se amostras de concreto armado, que foram agrupadas e então submetidas a dois diferentes métodos de avaliação de corrosão: ciclos de umidade/30% de sal e exposição a neblina salina. Os produtos de corrosão foram medidos para monitoramento qualitativo do processo e, ao final dos testes, a taxa de corrosão foi calculada a partir da medição da perda de massa. Na análise quantitativa, esperava-se que a liga zinco-níquel apresentasse melhor desempenho em relação às barras convencionais quanto à resistência à corrosão em ambientes contendo íons cloreto. Também foi observado que os ciclos de umidade com solução Zn/Ni pareceram ser mais severos do que a exposição a neblina salina com respeito à avaliação do processo de corrosão.

160

160



Proteção Superficial

- **Armaduras Galvanizadas**
- **Revestimento de Zinco**
Espessura 70 µm (500 g/m²)
Aplicado por imersão a Quente
- **Proteção Galvânica Localizada**
- **Compostos Formados**
ZnO (menos expansivo)
Zn(OH)₂ e Zn₅(OH)₈Cl₂.H₂O (mais expansivo)



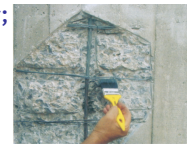
161

161



Proteção Superficial

- **Armaduras Revestidas com Époxi**
- **Técnica muito utilizada no exterior;**
- **Problemas de Durabilidade;**
- **Produção;**
Termofusão de époxi em pó
- **Necessita cuidados especiais no transporte, corte, dobra e estocagem;**
- **Uso de primers epoxídicos.**
Cuidados com a espessura e continuidade da camada



162

162



Impermeabilizantes Poliméricos

• Formadores de Películas

- Película contínua, semiflexível e de baixa permeabilidade.

Látex PVA, látex acrílico (estirenado), poliuretano, resina epóxi e borracha clorada.

• Hidrofugantes de Poro Aberto

- Penetram nos poros capilares e alteram o ângulo de contato, tornando o concreto hidro-repelente.

Reduz a capilaridade mas permitem a passagem de vapor d'água e gases.

163

163



Impermeabilizantes Poliméricos

Sistema de Proteção	Proteção			Aplicação			Durabilidade		
	Resist. Penetr. ao Vapor	Permeabilidade ao Vapor	Resist. à Penetr. de Cl.	Substrato Úmido	Facilidade de Aplicação	Resistência a Alcalis	Raios U.V.	Vida útil da Resina	Facilidade de Repintura
Acrílica	A	M	M	A	A	M	M	M	A
Poliuretano	A	B	A	B	B	A	M	A	B
Epóxi	A	B	A	B	B	A	B	A	B
Borracha clorada	A	B	A	M	A	A	B	M	A
Silicones	B	A	A	M	A	A	A	A	A

Alta Média Baixa

164

164



Métodos de Ação Direta

• Proteção Eletroquímica (Catódica)

- Forçada, por corrente impressa
- Espontânea, por ânodos de sacrifício

• Armaduras Autoprotégidas

- Armaduras Galvanizadas
- Armaduras Revestidas com Epóxi

• Armaduras Resistentes à Corrosão

- Armaduras de Plásticos Reforçados com Fibras
- Aço Inox

165

165



Proteção (Prevenção) Catódica

• Galvânica

- Instalação de Anodos de Sacrifício (Zn).

Pastilhas
Películas



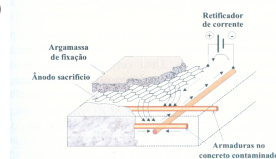
166



Proteção Catódica

• Por corrente impressa (ou imposta)

- Polarização forçada por uma fonte externa de corrente
- Dispositivo metálico (barra, chapa, tela) → ânodo
- Armadura (catodo)



- Metais mais utilizados: mais nobres (Ti, Cu, Ni, grafite) consumo lento e produto de corrosão pouco expansivo¹⁶⁷

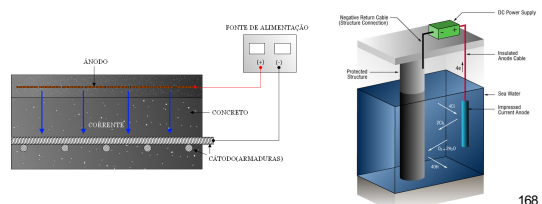
167



Proteção Catódica

Componentes de sistema por corrente imposta:

- cátodo (estrutura a proteger)
- ânodo
- eletrólito (concreto, água do mar, solo, etc.)
- fonte de alimentação
- sensores de monitorização/eletrodos de referência



168

168



Proteção Catódica

- Estruturas ou partes aéreas.
- Malha de Titânio Activado (Ti/MMO);
- Fitas de malha de Titânio;
- Ânodos internos;
- Revestimentos condutores (pinturas condutoras, argamassas condutoras com fibras)

169

169



Proteção Catódica

- Estruturas ou partes aéreas.
- Malha de Titânio Activado (Ti/MMO);



A - Fixação da malha com fixadores de plástico à superfície do concreto
B - Aplicação por projeção a seco da camada de revestimento

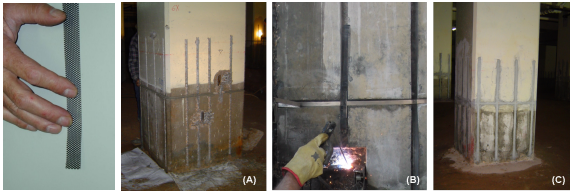
170

170



Proteção Catódica

- Estruturas ou partes aéreas.
- Fitas de malha de Titânio;



A- Abertura de roços no concreto;
B- Instalação das fitas nos roços
C- Aplicação de argamassa para enchimento dos roços

171

171



Proteção Catódica

- Estruturas ou partes aéreas.
- Fitas de malha de Titânio;



172

172



Proteção Catódica

- Estruturas ou partes aéreas.
- 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
- Apropriados para vigas, colunas etc.,



173

173



Proteção Catódica

- Sensores de Monitorização



- A verificação da eficácia dos sistemas de proteção 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.


174

174

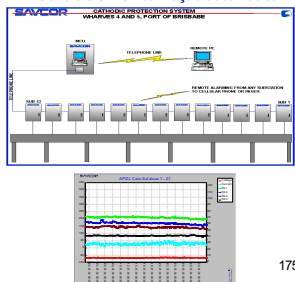
Proteção Catódica

- Fontes de alimentação e sistemas de controle e monitoramento

Controle Manual



Controle e monitorização automática



175

175

Proteção 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 decréscimo 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 umidade e com a qualidade do concreto. 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.

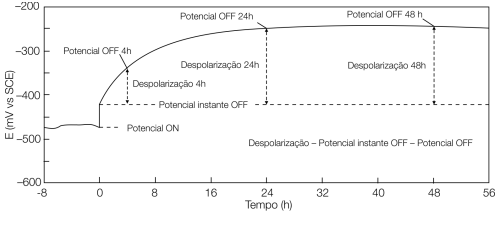
O mais utilizado, em proteção e prevenção catódica, para as partes atmosféricas, é critério o da obtenção de no mínimo 100 mV de despolarização/ decréscimo

176

176

Proteção Catódica

- Critérios



177

177

Armaduras Resistentes

- Armaduras Poliméricas Reforçadas com Fibras
 - Objetivo;**
Aumento da durabilidade de estruturas sujeitas à corrosão e a campos eletromagnéticos.
 - Tempo de Vida Útil elevado;**
100 - 120 anos
 - Elevada Tecnologia;**



178

178

Armaduras Resistentes

- Armaduras Poliméricas Reforçadas com Fibras (PRF)
 - Composição**
Resina, fibra(s), aditivos, pigmentos, etc.
Núcleo de fibras (minerais ou sintéticas) estiradas de elevada resistência e impregnadas por uma matriz polimérica (resina), possuindo propriedades anisotrópicas
 - Fibras curtas distribuídas de forma aleatória.**
Fibras de vidro, cerâmicas, carbono e aramida

179

179

Armaduras Resistentes

- Tipos de Matriz:
 - Agglomerante das fibras
 - Resinas
 - Epóxi
 - Poliéster não Saturado
 - Vinil éster
 - Outras
- Tipos de Fibras:
 - Fibras
 - Carbono
 - Carbono Pitch
 - Carbono PAN
 - Vidro
 - Vidro - S
 - Vidro - E
 - Vidro alcali resistente
 - Sintéticas
 - Poliacrilica
 - Poliaramida (nylon, aramida)
 - Polivinilica (vinil)
 - Outras

180

180

Armaduras Resistentes

- **Processo de fabricação das barras de PRF**
 - As barras de PRF podem ser fabricadas pelo processo de pultrusão.

Fornecimento de fibra → Orientação e compressão → Imersão em tanque de resina → Aquecimento da matriz → Rolos → Corte → Estocagem

- Os filamentos de fibra são submetidos a um banho de resina, catalisador e outros aditivos. Após isto, estas são estiradas para a formação da barra.

181

Armaduras Resistentes

- **PRF**

Espiral, Lisa, Lisa e areada, Trancada e areada, Dentada, Em forma de cordoalha de 7 fios

182

Armaduras Resistentes

- **Propriedades mecânicas (PRF)**

σ (MPa) vs ε (%)

CFRP, AFRP, GFRP, Aço de protensão, Aço de armadura passiva

183

Armaduras Resistentes

- **Armaduras PRF**

- **Vantagens**

As barras de PRF têm se mostrado uma alternativa viável para armar estruturas em condições críticas de exposição.

- **Preocupações**

Aderência armadura PRF/concreto;
Ambiente Alcalino do Concreto.

184

Armaduras Resistentes

- **Armaduras de Aço Inox**

- Elevada resistência à corrosão; Presença de Cr e Ni
- Tipos de Aço Inox;
 - Martensíticos
 - Ferríticos
 - Austeníticos
 - Duplex
- Custo Elevado (7 a 10 vezes maior).

185

185

Armaduras Resistentes

- **Armaduras de Aço Inox**

- Utilização viável em ambientes extremamente agressivos.

Investimento (R\$)

Armadura Aço Inox, Armadura Convencional

Custo de Instalação, Custo do material

- Armaduras convencionais com revestimento em aço inox

186

186



Etapas Básicas

- Pré-projeto (concepção);
- Projeto Estrutural;
- Materiais Utilizados;
- Métodos de Proteção;
- Monitoramento Contínuo.

187

187

- Potencial de Corrosão;
- Ruídos Eletroquímicos;
- Resistividade Elétrica;
- Resistência à Polarização Linear;
- TDR;
- Impulso Galvanostático;
- Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE);
- outras...

188

188

Potencial de Corrosão

189

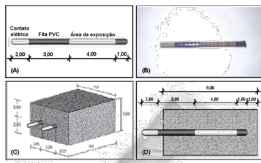
189

- Vantagens:
 - Fornece informações a respeito de mudanças no processo eletroquímico;
 - Teste rápido.
- Desvantagem:
 - Não oferece informações quantitativas (taxas).

Tipo de eletrodo	Probabilidade de ocorrer a corrosão		
	< 10%	10% - 90%	> 90%
ENH *	> 0,118 V	0,118 V a -0,032 V	< -0,032 V
Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺ (ASTM C 876)	> -0,200 V	-0,200 V a -0,350 V	< -0,350 V
Hg, Hg ₂ Cl ₂ /KCl (sol. saturada)**	> -0,124 V	-0,124 V a -0,274 V	< -0,274 V
Ag, AgCl/KCl (1M)	> -0,104 V	-0,104 V a -0,254 V	< -0,254 V ¹⁹⁰

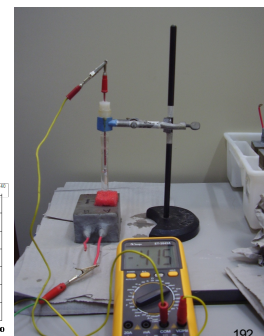
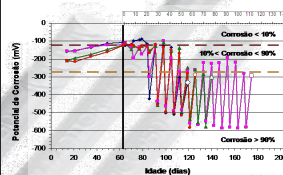
190

- Medidas em laboratório:

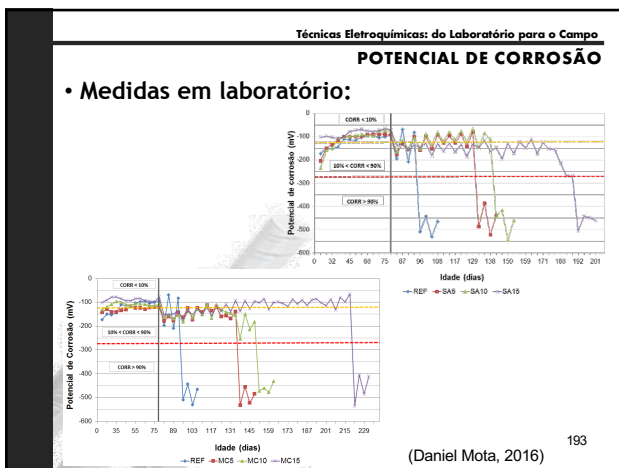


191

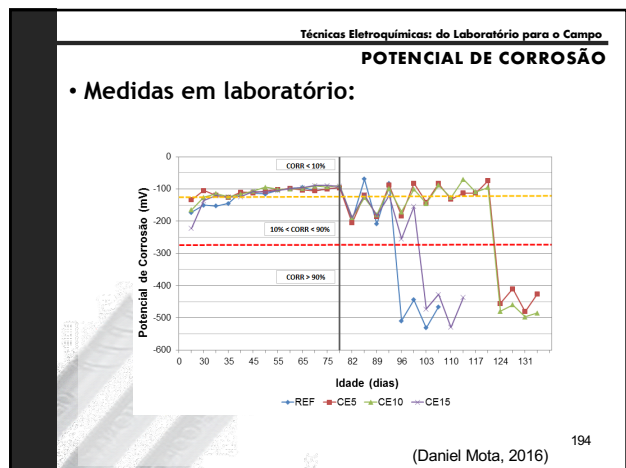
- Medidas em laboratório:



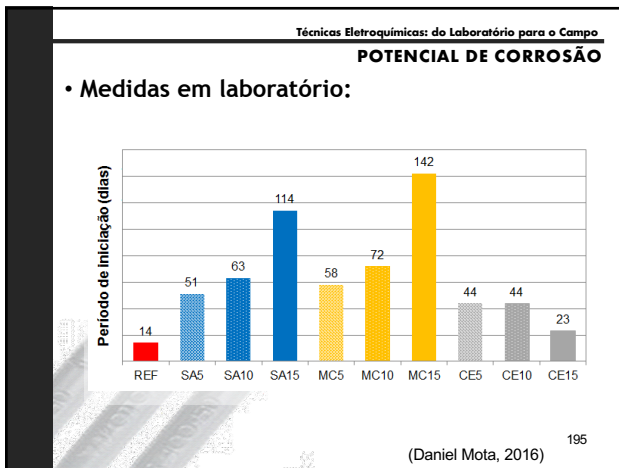
192



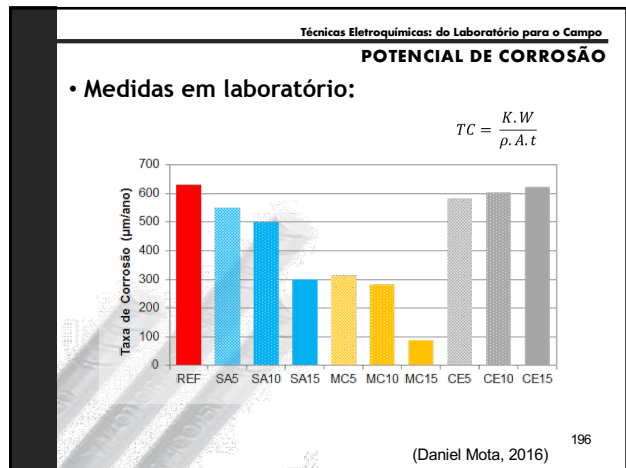
193



194



195



196

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

POTENCIAL DE CORROSÃO

• Medidas em campo:

- Sonda meia-célula Padrão, para medições localizadas;
- Eletrodo de um disco, para varredura rápida de áreas extensas;
- Eletrodo de quatro discos (maior velocidade de medição em áreas extensas).

197

197

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

POTENCIAL DE CORROSÃO

• Medidas em campo:

- ASTM C 876 - 91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

198

198

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
POTENCIAL DE CORROSÃO

- **Medidas em campo:**
 - ASTM C 876 - 91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

O espaçamento entre medidas deve ser definido a partir das dimensões da peça sob análise;

Não é recomendado a tomada de medidas em pontos muito próximos;

Para tabuleiro de pontes o espaçamento de 1,2m é satisfatório;

O espaçamento deve ser ajustado para se obter medidas com diferença máxima de 150 mV e mínima de 100 mV.

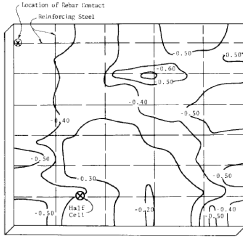
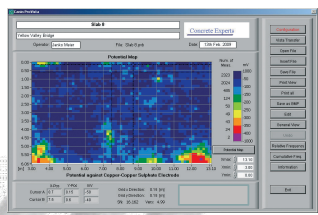


FIG. 3 Equipotential Contour Map 199

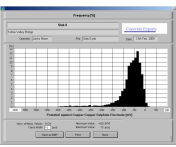
199

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
POTENCIAL DE CORROSÃO

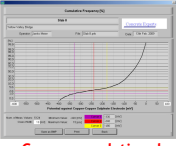
- **Medidas em campo:**
 - **Interpretação**



Mapa de Potencial



Curva de Frequência



Curva cumulativa de frequência

200

200

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Resistividade Elétrica

201

201

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

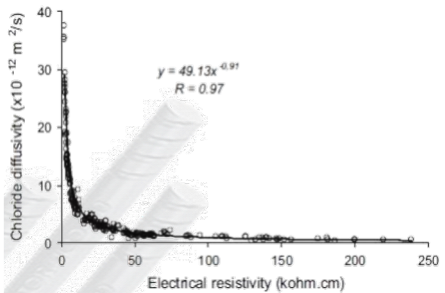
- **Princípio:**
 - Associada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material;
 - A corrente elétrica no concreto movimentar-se através de um processo eletrolítico, ou seja, quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade do concreto.

0,6% de cloretos são suficientes para reduzir a resistividade da argamassa em cerca de 15 vezes

202

202

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA



203

203

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

- **Referências:**
 - Concreto úmido: Semicondutor ($\rho = 10 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$);
 - Concreto Seco: Isolante elétrico ($\rho = 10^8 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$)

Resistividade (k $\Omega \cdot \text{cm}$)			Risco de Corrosão**
AASHTO *	CEB-192	COST 509	
> 254	> 20	> 100	Desprezível
37 a 254	10 a 20	50 a 100	Baixo
21 a 37	---	10 a 50	Moderado
12 a 21	5 a 10	< 10	Alto
< 12	< 5	---	Muito Alto

* 38mm ** Penetração de Cloretos

204

204

• Referências:

- Concreto úmido: Semicondutor ($\rho = 10 \text{ K}\Omega.\text{cm}$);
- Concreto Seco: Isolante elétrico ($\rho = 10^8 \text{ K}\Omega.\text{cm}$)

Resistividade ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)			Risco de Corrosão
AASHTO *	CEB-192	COST 509	
> 254	> 20	> 100	Desprezível
37 a 254	10 a 20	50 a 100	Baixo
21 a 37	---	10 a 50	Moderado
12 a 21	5 a 10	< 10	Alto
< 12	< 5	---	Muito Alto

* 38mm

205

205

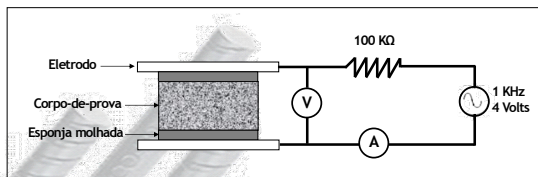
• Resistividade x Grau de Exposição

Tipo de Ataque	Carbonatação		Ação de Cloretos		
	Estrutura interna ou protegida da chuva	Estrutura externa não-saturada	Estrutura exposta à atmosfera	Estrutura Submersa	Estrutura na região de maré
Classes					
Resistividade de mínima requerida ($\text{K}\Omega.\text{cm}$)	1	5	10	15	20

206

206

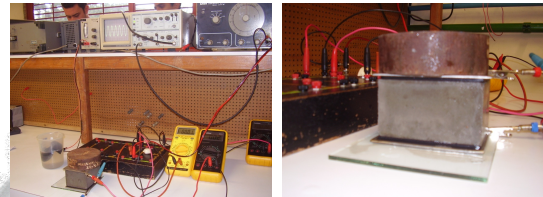
• Técnicas de Laboratório



207

207

• Técnicas de Laboratório

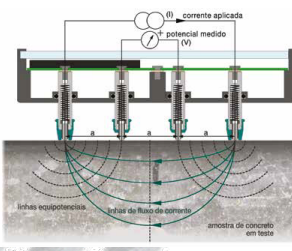


208

208

• Técnicas de Laboratório:

- Sondas Wenner



Resistividade $\rho = 2\pi aV/I$ [$\text{k}\Omega\text{cm}$]

• É aplicada uma corrente entre as duas sondas nas extremidades e a diferença de potencial é medida entre as duas sondas internas.

• A corrente é carregada por íons no líquido do poro da estrutura.

• A resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas.

209

209

• Técnicas de Laboratório:

- Sondas Wenner




Resistividade $\rho = 2\pi aV/I$ [$\text{k}\Omega\text{cm}$]

210

210

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

- Técnicas de Laboratório:
 - Sondas Wenner



(Kessler et al 2005)

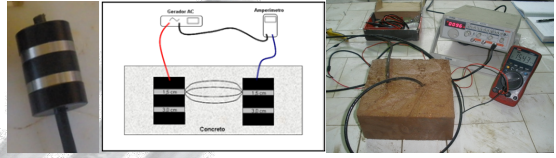
Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Penetrabilidade a Cloretos	Carga passante (C) ASTM C1202
< 10	Forte	> 4,000
10 a 15	Moderada	2,000 a 4,000
15 a 25	Fraca	1,000 a 2,000
25 a 200	Muito Fraca	100 a 1,000
> 200	Desprezível	< 100

211

211

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

- Técnicas de Laboratório:
 - Eletrodos Embutidos
 - 2 alturas de medida
 - Reduz efeito "parede"



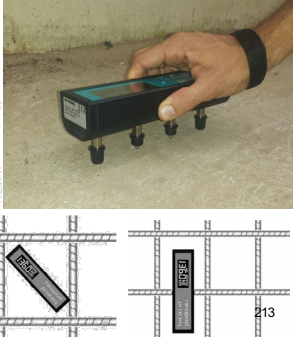
$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \Rightarrow \rho = \frac{2\pi \cdot V \cdot L}{I}$$

212

212

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

- Técnicas de Campo:
 - Influências:
 - Armaduras
 - Tamanho do agregado a > DM
 - Temperatura (20°C)
 - ↑1°C → ↓3-5%
 - Teor de Umidade
 - Carbonatação
 - Carbonatação → ↑ ρ

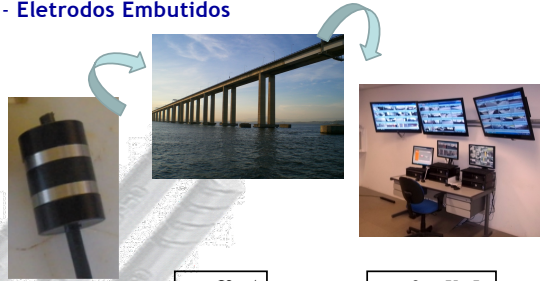


213

213

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
RESISTIVIDADE ELÉTRICA

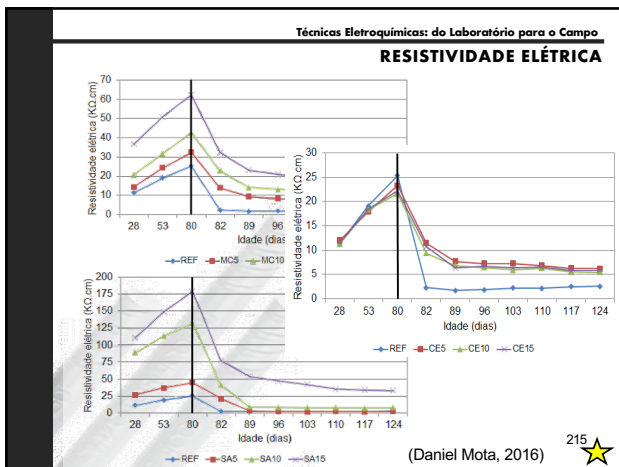
- Técnicas de Campo:
 - Eletrodos Embutidos



$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \Rightarrow \rho = \frac{2\pi \cdot V \cdot L}{I}$$

214

214



215

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Espectroscopia de Impedância

216

216



Corrosão

• Espectroscopia de Impedância

- Cinética do processo (velocidade de corrosão);
- Técnica precisa e reprodutiva, apropriada para ambientes de alta resistividade como é o caso do concreto;
- Mecanismo de controle eletroquímico, indicando se o processo corrosivo se dá por ativação, concentração ou difusão;
- Caracteriza o estado da armadura e a morfologia da corrosão;
- Técnica não-destrutiva e não-perturbativa;
- Permite o acompanhamento da evolução do estado passivo ou ativo ao longo do tempo.

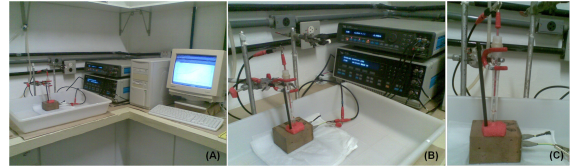
217



Corrosão

• Espectroscopia de Impedância

- Medidas



218



Corrosão (EIE)

• Princípio

- “A impedância de um circuito elétrico representa o nível de dificuldade pelo qual um sinal elétrico (potencial ou corrente), enviado a este circuito, encontra ao percorrê-lo.” (MONTE MOR, 2003)

- EIE = Combinação de elementos passivos de um circuito elétrico (resistência, capacitância e indutância).

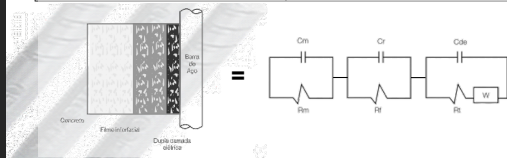
219

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

• Processos Físicos x Elementos de Circuito:

Processo físico	Elemento de circuito
Transferência de carga	Resistores R_c e R_p
Dupla camada elétrica	Capacitor, C_d
Camadas superficiais dielétricas (revestimentos orgânicos e óxidos)	Capacitor, C
Adsorção	Pseudocapacitor, C_w e resistor, R
Transporte de massa	Pseudocapacitor, C_w e pseudoresistor, R_w

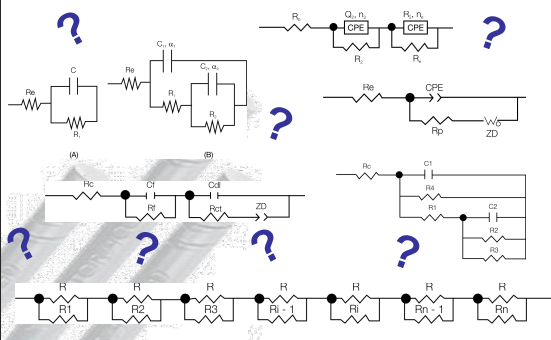


220

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

• Modelos Sugeridos para o C.A.:

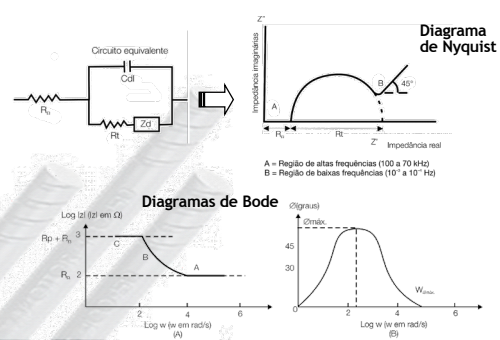


221

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

• Análise dos Resultados:



222

Técnicas Electroquímicas: do Laboratório para o Campo
Espectroscopia de Impedância Electroquímica (EIE)

• **Análise dos Resultados:**

CHRISTENSEN et al. (2004)

223

Corrosão

• **Espectroscopia de Impedância**
 - **Análise dos Resultados**

Diagrama de Nyquist **Circuito Equivalente**

Diagramas de Bode

224

Corrosão

• **Espectroscopia de Impedância**
 - **Análise dos Resultados**

CHRISTENSEN et al. (2004)

225

Corrosão

• **Espectroscopia de Impedância**

(A) 1 mês (B) 2 meses (C) 3 meses (D) 5 meses (E) 11 meses

226

Corrosão

• **Espectroscopia de Impedância**

(E) 7 meses (F) 9 meses (G) 11 meses (H) 13 meses


227

Corrosão

• **Espectroscopia de Impedância**

(A) (B) (C) (D)

228



Corrosão

- **Espectroscopia de Impedância**
- **Baixas frequências:** (10^{-3} - 10 Hz), corresponde à resistência do eletrodo (R_e), logo, está associada ao fenômeno de corrosão. A capacitância característica desta faixa está compreendida entre 10^{-6} e 10^{-3} F/cm².
- **Médias frequências:** (10^2 - 10^6 Hz), corresponde à resistência do concreto (R_2), estando associada às características da matriz que envolve e protege a armadura. A capacitância característica desta faixa está compreendida entre 10^{-9} e 10^{-6} F/cm².
- **Altas frequências:** Superior à faixa dos MHz (> 10^6 Hz), está associada à resistência "offset" (R_0), de pequena relevância e valores desprezíveis no presente estudo.

229



Corrosão

Construction and Building Materials 111 (2016) 96–104

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach

D.V. Ribeiro^{a,*}, J.C.C. Abrantes^b

^a Federal University of Bahia, Minerals Science and Technology Department, Pólo de Recursos Humanos, 40110-030 Salvador/BA, Brazil
^b IGEOTEC, EST. C. Pólo de Recursos Humanos, Avenida de Atlântico, 4800-348 Viana do Castelo, Portugal

HIGHLIGHTS


- A new approach to analyze the EIS results to reinforced concrete is proposed.
- An extensive literature review to facilitate the understanding is presented.
- Traditional ways to analyze the EIS are presented.
- A theory, based on characteristic angular relaxation frequency (ω) is presented.
- The theory presented is applied to reinforced concrete EIS results.
- Results show the technical viability to use the procedures presented.

ARTICLE INFO **ABSTRACT**

Article history:
 Received 9 October 2015;
 Received in revised form 13 December 2015;
 Accepted 17 February 2016

Electrochemical techniques, including electrochemical impedance spectroscopy (EIS), are among the most common techniques used for the evaluation and study of corrosion in reinforced concrete. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is a powerful technique for characterizing a wide variety of electrochemical systems and for determining the contribution of electrode or electrolytic processes in these systems. The analysis of EIS results from samples of concrete is highly complex due to overlapping and close proximity of different electrochemical processes, such as oxygen reduction, hydrogen evolution, and

230




Corrosão

- **Espectroscopia de Impedância**

Transferência de Tecnologia

?




231



Identificação da Patologia e Reabilitação de Estruturas




232



Patologias

- “*Estudo das doenças, seus sintomas e natureza das modificações que elas provocam no organismo*”
- **Patologia:** f(desempenho da edificação)
- Tempo e Condições de Exposição.
- **Causas**
- Projeto: 34 - 49%
- Materiais: 22 - 29%
- Execução: 14 - 25%
- Uso: 9 - 12%
- Outros: 5 - 8%




Vida Útil

Desempenho

Durabilidade

PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

233



Materiais

Material	O que deve ser observado
Cimento Portland	Aspectos Físicos (compressão, finura, pega, expansibilidade, calor de hidratação, etc.) Aspectos Químicos (Adições, PF, C ₃ A, álcalis, etc.)
Agregados	Aspectos Físicos (granulometria, formato dos grãos, material pulverulento, etc) Aspectos Químicos (análise petrográfica, reatividade potencial)
Água	Cloretos, sulfatos, álcalis, pH
Aditivos	Contaminação com cloretos
Armadura	Escoamento, LRT, dobramento, etc.

234



Patologias - Materiais

• Exemplos

- RAA : fundação de edifício fissurada.



235

235



Execução (produção)

- Mistura
- Transporte
- Lançamento
- Adensamento
- Cura

236

236



Patologias - Execução

• Exemplos

- Deficiências no lançamento, adensamento e fissura hidráulica



237

237



Patologias – Uso e Manutenção

• Exemplos

- Sobrecargas em pavimentos;
- Desgaste do componente elástico das juntas estruturais;
- Impermeabilização deficiente;
- Danos acidentais.

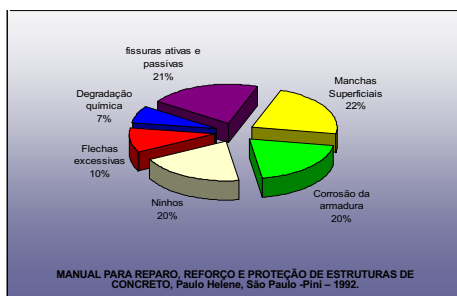
238

238



Patologias

• Ocorrência



239

239



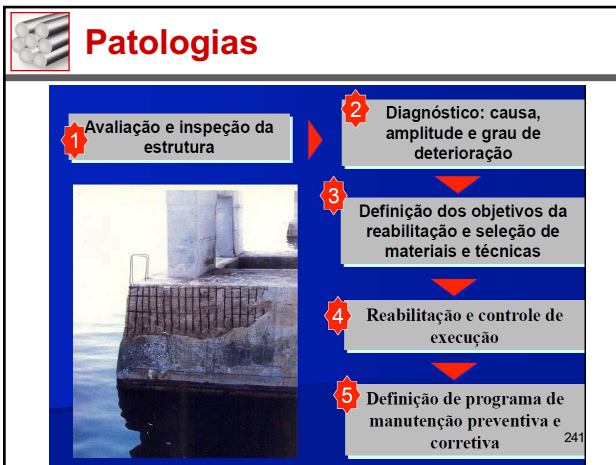
Patologias

• Diagnóstico

- Análise da Estrutura;
- Anamnese do Problema;
- Definição de Ações para Investigação;
- Diagnóstico de Causas Prováveis;
- Intervenção.

240

240



241

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

MÉTODO / NORMA	CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VELOCIDADE DE OBTENÇÃO DO RESULTADO	DANO À ESTRUTURA	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	APLICAÇÃO
EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS DE CONCRETO (NBR 7680/83)	ENSAIO DESTRUTIVO	MODERADO	MODERADA	LOCALIZADO E IMPORTANTE	IN LOCO	RESIST. CARACT. ESTIMADA À COMPRESSÃO; MÓDULO DE ELONG. LONGITUDINAL E TRANSVERSAL; DIAGRAMA TENSÃO DE FORMAÇÃO; RESISTÊNCIA À TRACÇÃO; COEFICIENTE DE POISSON
EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS DE ARMADURA	ENSAIO DESTRUTIVO	MODERADO	MODERADA	LOCALIZADO E IMPORTANTE	IN LOCO	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO; TENSÃO DE ESCRAMENTO; ALCANTARADO E DOBRAMENTO
ESLEROMETRIA (NBR 7584/95)	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	UNIFORMIDADE; ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA PELA DUREZA SUPERFICIAL
ULTRA-SOM (NBR 8802/94)	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	UNIFORMIDADE; HOMOGENEIDADE; MÓDULO DE DEFORMAÇÃO; ENCRUAMENTO; DEFETOS NÃO VISÍVEIS; ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA
PROVA DE CARGA (NBR 967/86)	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO	ALTO	MODERADA	NENHUM	IN LOCO	DEFORMAÇÕES
PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO Métodos CPC3 - BILEM	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	BAIXO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	CAUSA E RISCO DE CORROSÃO
DETECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO POSICIONAMENTO DA ARMADURA E AVALIAÇÃO DO COBRIMENTO	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO	BAIXO	RÁPIDA	NENHUM	IN LOCO	

242

242

ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

MÉTODO / NORMA	CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VELOCIDADE DE OBTENÇÃO DO RESULTADO	DANO À ESTRUTURA	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	APLICAÇÃO
CONTEÚDO E PROFUNDIDADE DE ALCANTARADO DE CLORETO	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	BAIXO	MODERADA	PEQUENO	LABORATÓRIO	CAUSA E RISCO DE CORROSÃO
POTENCIAL DE CORROSÃO (ASTM C876)	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	RISCO DE CORROSÃO
RESISTIVIDADE	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	VELOCIDADE DE CORROSÃO DEFORMAÇÕES
RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO/ALTO	RÁPIDA	PEQUENO	IN LOCO	
IMPEDÂNCIA	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	ALTO	LENTA	PEQUENO	LABORATÓRIO	
INTENSIDADE GALVÂNICA	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO/ALTO	RÁPIDA	PEQUENO	LABORATÓRIO	
RÚDIO ELETROQUÍMICO (NBR 9798/97)	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO/ALTO	LENTA	PEQUENO	LABORATÓRIO	CAUSA E RISCO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO E CORROSÃO
ABSORÇÃO (NBR 9798/97)	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO	LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO	
PERMEABILIDADE À ÁGUA E GASES	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	MODERADO	LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO	
TEOR DE UMIDADE	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	BAIXO	MODERADA/LENTA	PEQUENO	IN LOCO	
CONTEÚDO DE SULFATOS	ENSAIO SEMI-DESTRUTIVO	BAIXO/MODERADO	MODERADA/LENTA	MODERADO/PEQUENO	LABORATÓRIO	
RADIOGRÁFICOS	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO	ALTO	LENTA	NENHUM	LABORATÓRIO	

243

243

Reabilitação de Estruturas

244

244

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
TÉCNICAS DISPONÍVEIS

- Reparo Localizado;
- Aplicação de Inibidores
- Proteção Catódica;
- Dessalinização;
- Realcalinização.

245

245

Reabilitação de Estruturas

Reparos Localizados (mais comuns)

246

246

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Quando devem ser utilizados

- **Segregação ou exsudação do Concreto**
Falhas na dosagem, mistura, transporte, lançamento, adensamento, desmoldagem ou cura → alta porosidade do concreto, fissuração e ninhos de concretagem.
- **Fissuras devido a sobrecargas**
- **Corrosão da armadura devido à carbonatação ou presença de cloretos**
Pequena espessura de cobrimento, fissuras, alta a/agl, ambiente de elevada agressividade, contaminação dos componentes do concreto.

247

247

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Quando devem ser utilizados

- Danos ao concreto devido à ataque químico;
- Danos aos concreto devido à ações físicas (gelo-degelo), abrasão, erosão, cavitação;
- Como parte dos trabalhos preliminares às técnicas eletroquímicas de reparo (potencial, resistividade, circuito aberto, etc.)

248

248

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Sistema Geral

- Escoramento da estrutura, se necessário;
- Limpeza da superfície do concreto;
- Marcação das áreas a serem escarificadas;
- Remoção do concreto deteriorado e contaminado;
- Avaliação das condições das armaduras, se o ataque chegou até a armadura;
- Limpeza do concreto e da armadura;
- Colocação de armadura adicional, se necessário;

249

249

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Sistema Geral

- Aplicação de “primer” sobre a armadura;
- Aplicação de ponte de aderência entre o concreto antigo e o novo material de reparo;
- Aplicação do material de reparo da seção da estrutura (concreto, argamassa, grout, concreto ou argamassa projetados, argamassa tixotrópica);
- Cura do material de reparo de base cimentícias;
- Aplicação da proteção superficial.

250

250

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Identificação de áreas contaminadas

- Análise visual;
- Carbonatação: Fenolftaleína ou Timolftaleína;
- Cloretos livres: Aspersão de solução de nitrato de prata ($AgNO_3$);

- Cloretos totais (ASTM C 1152);
- Monitoramento eletroquímico.

251

251

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Análise Visual

- Análise visual;

252

252

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Identificação de áreas contaminadas

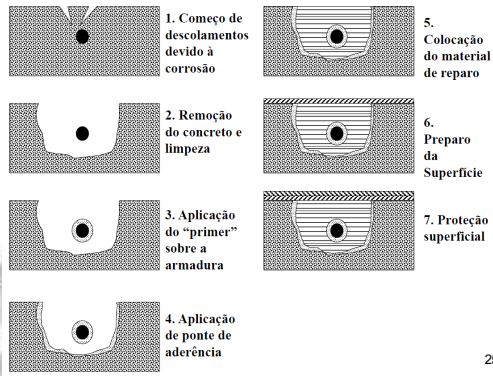
- Escarificação;



253

253

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados



1. Começo de descolamentos devido à corrosão
2. Remoção do concreto e limpeza
3. Aplicação do "primer" sobre a armadura
4. Aplicação de ponte de aderência
5. Colocação do material de reparo
6. Preparo da Superfície
7. Proteção superficial

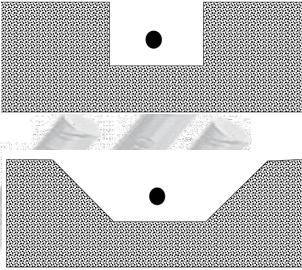
254

254

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Detalhes de Execução

- Alargamento da área a ser recuperada;



(A) ângulo reto ao lançar argamassa ou concreto

(B) ângulo inclinado quando pulverizar argamassa ou concreto

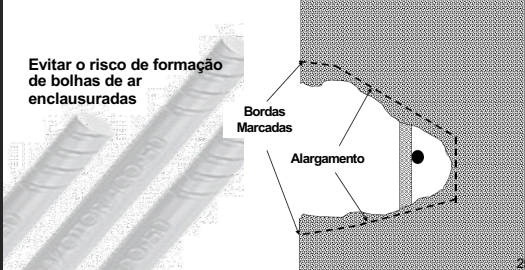
255

255

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Detalhes de Execução

- Alargamento da área a ser recuperada;



Evitar o risco de formação de bolhas de ar enclausuradas

Bordas Marcadas

Alargamento

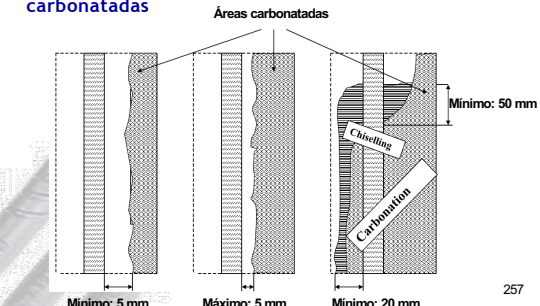
256

256

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Detalhes de Execução

- Critérios para remoção do concreto em áreas carbonatadas



Áreas carbonatadas

Chiselling

Carbonation

Mínimo: 5 mm

Máximo: 5 mm

Mínimo: 20 mm

Mínimo: 50 mm

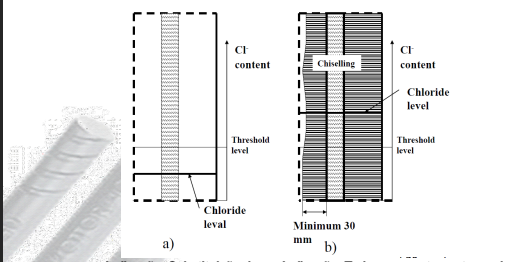
257

257

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• Detalhes de Execução

- Critérios para remoção do concreto contaminado por cloretos, em nível constante.



Cl- content

Threshold level

Chloride level

Chiselling

Cl- content

Chloride level

Threshold level

Minimum 30 mm

a)

b)

Indicação: Substituição do Cobrimento

Indicação: Todo o concreto em torno da armadura deve ser removido

258

258

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• **Detalhes de Execução**

- Critérios para remoção do concreto contaminado por cloretos, com perfil de cloretos variável.

(A) Baixo risco

a) Chloride profile

b) Chloride profile

c) Chloride profile

Chiselling

Minimum 30 mm

Threshold level

Threshold level

Threshold level

(B e C) Indicação: Todo o concreto em torno da armadura com teor de Cloretos acima do tolerável deve ser removido. Sugere-se a remoção eletroquímica de cloretos no concreto adjacente.

259

259

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

Reparo

Nova corrosão

260

260

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• **Limpeza das armaduras**

- Tem como objetivo remover todos os produtos de corrosão, agentes despassivadores e restos de materiais aderidos à sua superfície.
- Tipos de Limpeza:

Escova de Aço Manual

Hidrojateamento de água (pressão acima de 6000 si)

Jateamento seco de Areia + jateamento de água fria sob pressão (1600 psi)

Jateamento seco de Areia + jateamento de água morna sob pressão (1600 psi)

261

261

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• **Limpeza das armaduras**

- Escova de Aço Manual

262

262

Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• **Limpeza das armaduras**

- Jateamento de Areia

Importância de deixar de 2 a 3cm na parte posterior das armaduras.

263

263

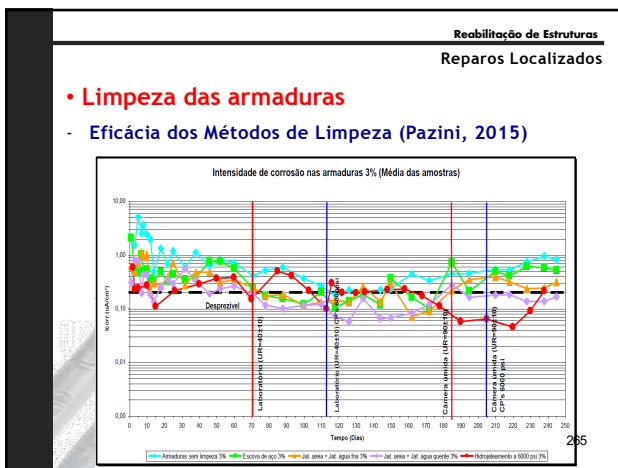
Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados

• **Limpeza das armaduras**

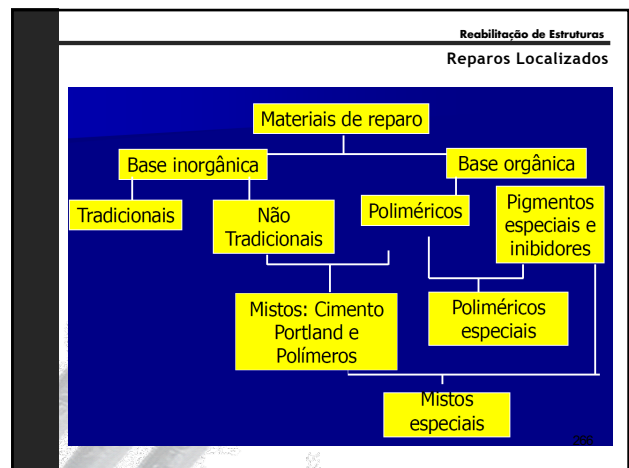
- Jateamento de Areia

264

264



265



266



267

- Reabilitação de Estruturas
Reparos Localizados
- **Materiais de Reparo**
- Hidrofugantes que agem nos poros do concreto (silano, siloxano, silicone ou uma combinação de silano/siloxano);
 - Pinturas formadoras de filme (acrílica, epoxídica ou sistema duplo de epóxi + poliuretano);
 - Sistemas bloqueadores de poros (silicato, fluor-silicato);
 - Argamassas modificadas com polímeros.
- 268

268

Reabilitação de Estruturas

Aplicação de Inibidores

269

269

- Reabilitação de Estruturas
Aplicação de Inibidores
- Podem estar presentes na argamassa de reparo e nos revestimentos para a armadura
 - Atuação:
 - Antes do início do processo de corrosão, através da inibição dos íons agressivos;
 - Após o início da corrosão, devido à formação de sub-produtos inibidores, a partir da reação com o próprio produto da corrosão.
- 270

270

Reabilitação de Estruturas
Aplicação de Inibidores

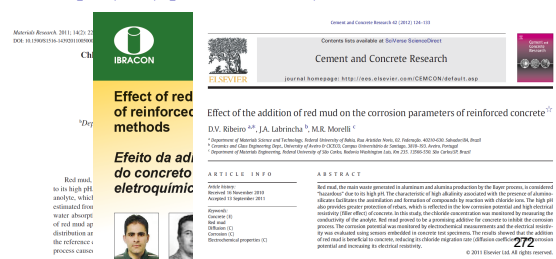
- **Tipos:**
 - Aqueles que atuam na reação Catódica;
 - Aqueles que atuam na reação Anódica;
 - Mistos
- **Como são usados:**
 - Na prevenção da corrosão, misturados na água de amassamento (nitrito de cálcio $[Ca(NO_2)_2]$, nitrito de sódio $[Na(NO_2)_2]$, amino álcool);
 - Na prevenção ou reparo, aplicados sobre a superfície do concreto (MFP: Mono-fluor fosfato de sódio $[Na_2PO_3F]$, amino álcool)

271

271

Reabilitação de Estruturas
Aplicação de Inibidores

- **Como funcionam**
 - Na prevenção da corrosão, misturados na água de amassamento (nitrito de cálcio $[Ca(NO_2)_2]$, nitrito de sódio $[Na(NO_2)_2]$, amino álcool);



272

272

Reabilitação de Estruturas
Aplicação de Inibidores

- **Como funcionam**
 - Na prevenção ou reparo, aplicados sobre a superfície do concreto.

Os inibidores são transportados desde a superfície do concreto até a superfície da armadura;

Penetra como um líquido, por absorção capilar e por meio da porosidade, fissuras, etc.

273

273

Reabilitação de Estruturas
Aplicação de Inibidores

- **Como funcionam**
 - Na prevenção ou reparo, aplicados sobre a superfície do concreto.




274

274

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Proteção (ou Prevenção) Catódica

275

275

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
INTRODUÇÃO

- **Técnicas Eletroquímicas:**
 - Monitoramento e Previsão da Corrosão
 - Reabilitação de Estruturas





276

276

- Década de 1970: EUA (pontes)
 - 1989: Utilizada pela primeira vez, na Itália, para prevenção da corrosão em pontes.
 - Objetivo:
 - Controlar o processo existente de corrosão das armaduras e restabelecer, com o tempo, a passividade.
- ou
- Impedir o início da corrosão, estabilizando o filme passivo.

277

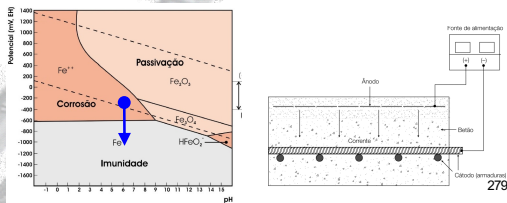
277



278

278

- Princípio:
 - Aplicação permanente de corrente elétrica, de baixa intensidade, entre as armaduras do concreto e um ânodo externo.
 - Redução do potencial do aço para a zona de passivação perfeita, no Diagrama de Pourbaix.



279

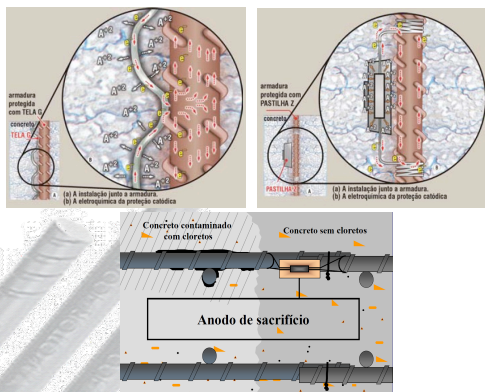
279

- Obtenção da corrente contínua:
 - Ligação do aço a um ânodo de sacrifício, que se dissipa gradualmente - **proteção catódica por ânodos de sacrifício/galvânicos**;
 - Usando um ânodo inerte e uma fonte externa de alimentação de corrente contínua - **corrente imposta ou impressa**.



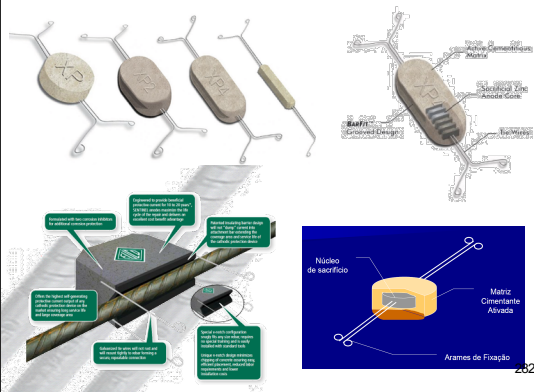
280

280



281

281



282

282

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

Chloride Contaminated Concrete

Potential Difference Between Upper Steel In Chloride Contaminated Concrete and Lower Steel Results in Accelerated Corrosion

Corrosion Activity is Reduced In Rebar

Anode Galvanically Protects Surrounding Rebar

Active Cementitious Matrix

Connection Wire

Sacrificial Zinc Anode Core

283

283

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

284

284

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

285

285

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

- Por corrente imposta (ou impressa):
- Componentes de sistema por corrente imposta:
 - Cátodo (estrutura a proteger)
 - Ânodo
 - Eletrólito (concreto, água do mar, solo, etc.)
 - Fonte de alimentação
 - Sensores de monitorização/eletrodos de referência

286

286

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

- Normas:
- ISO EN 12696, Cathodic Protection of Steel in Concrete”, 2011.
- Australian Standard - 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).

287

287

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção 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 continua. Este critério utiliza-se geralmente para estruturas, ou partes das estruturas, submersas ou enterradas.

- Critério de decrescimento do potencial de 100 mV

Este valor é determinado pela diferença entre o valor Instante OFF e o potencial medido após um período de tempo de corte da corrente continua (período de despolarização). Mínimo: $\Delta V = 100\text{mV}$.

O período de despolarização: f (condições de exposição, teor de umidade e qualidade do concreto). Norma Australiana: até 72 h.

O potencial Instante OFF não deverá ser mais negativos que:

- 900 mV Ag/AgCl para aço protendido.
- 1100 mV Ag/AgCl para aço normal.

288

288

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• Critérios:

- Critério de decrescimento do potencial de 100 mV

O potencial Instante OFF não deverá ser mais negativos que:

- 900 mV Ag/AgCl para aço protendido.
- 1100 mV Ag/AgCl para aço normal.

289

289

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• Dimensionamento e Instalação:

- Densidade de corrente (i): 0,2 a 2 mA/m² do metal
5 - 20 mA/m² para polarização em zonas de maré
- Escolha do ânodo com elevada vida útil f(i)
Mais usuais: à base de Titânio (malha ou fita)

- Dimensão, localização e método de instalação (ânodos)

290

290

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

PREVENÇÃO CATÓDICA É SEMPRE MELHOR !!!

- Custos mais baixos de implantação;
- Mais fácil polarizar o aço no estado passivo do que no estado ativo;

1) Menor densidade de corrente necessária para obter a mesma polarização
2) Distribuição mais profunda da corrente

maior polarização em pontos mais afastados do ânodo

↓

Projetos mais simples e menor quantidade de ânodos

291

291

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• Dimensionamento e Instalação:

- Divisão do sistema em zonas anódicas independentes
Diferentes necessidades de corrente
Variações na resistividade do concreto e/ou no ambiente de exposição
- Seleção do tipo de sistema de alimentação, controle e monitorização
Complexidade da Estrutura e do sistema
Relação custo/benefício

292

292

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• Dimensionamento e Instalação:

- Avaliação da continuidade elétrica
Antes da concretagem
Durante a concretagem

Assegurar que não há curto-circuito ânodo/armadura

293

293

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• Recuperação:

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 concreto de grandes proporções, constituindo risco para a segurança da estrutura, funcionários e equipamentos.


294

294

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **Recuperação:**

Fase 2 - Reparação antes da aplicação de proteção catódica
Remoção do concreto deteriorado, Limpeza das armaduras




295

295

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **Recuperação:**

Fase 3 - Instalação dos componentes da proteção catódica
Remoção do concreto deteriorado, Limpeza das armaduras



Ligação às armaduras Instalação do eletrodo de referência


296

296

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **Recuperação:**

Fase 4 - Projecção da primeira camada de recobrimento



297

297

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **Recuperação:**

Fase 5 - Instalação do ânodo e ligações anódicas



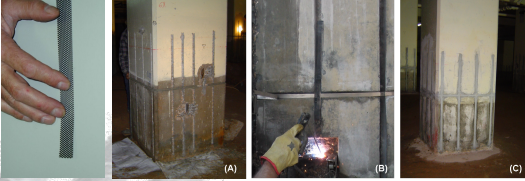
298

298

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **Recuperação:**

Fase 5 - Instalação do ânodo e ligações anódicas



A- Abertura de roços no concreto;
B- Instalação das fitas nos roços
C- Aplicação de argamassa para enchimento dos roços

299

299

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo
Proteção Catódica

• **CUIDADO!**

- Sempre verificar a conectividade e se há curto-circuitos no sistema
- Interface aço/concreto

Redução do O e produção de hidroxilas
 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ → repassivação (OK!!!)

Potencial muito reduzido:
 $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$ → **FRAGILIZAÇÃO POR H!**

↓

Desprezível para Aços normais, mas, pode ser preocupante em aços sob tensão

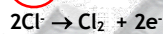
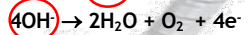
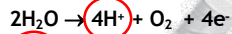
300

300

• CUIDADO!

- Interface aço/concreto

Densidade de Corrente muito elevada



Acidificação



Destruição da pasta de cimento !!!!

301

301

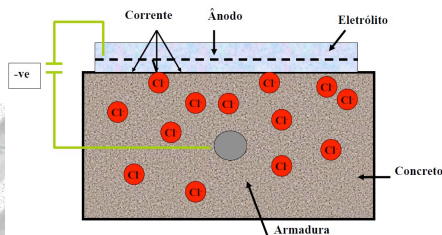
Dessalinização (Extração de Cloretos)

302

302

• Princípio

- Remoção dos íons cloreto do concreto sob a influência de uma corrente eletroquímica temporária, repassivando as barras de aço.

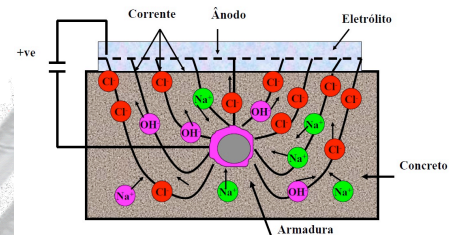


303

303

• Princípio

- Remoção dos íons cloreto do concreto sob a influência de uma corrente eletroquímica temporária, repassivando as barras de aço.



304

304

• Componentes

- Eletrolito

Água Tratada

- Reservatório

Fibra de Celulose

Pano de Feltro

Tanques de Aço Inoxidável

- Eletrodo Externo

Aço Comum

Aço Inoxidável

Titânio



305

305

• Preparação da Estrutura

- Remover pintura ou revestimento

- Reparar fissuras

- Reparar áreas com cobrimento danificados ou destacado

- Limpar as armaduras e reparar com uma argamassa a base de cimento



- Distribuição da Corrente
- Fuga de Corrente
- Intensidade de Corrente
- Densidade de Corrente

306

Reabilitação de Estruturas
Dessalinização

- **Tempo de Aplicação (0,5 - 2,0 A/m²)**
- 4 a 12 semanas (com períodos de repouso)
- **Conclusão dos Serviços**
- Remover ânodo
- Limpar superfície do concreto
- Realizar uma pintura de proteção
- **Avaliação da Técnica**
- Determinação do teor de cloretos

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

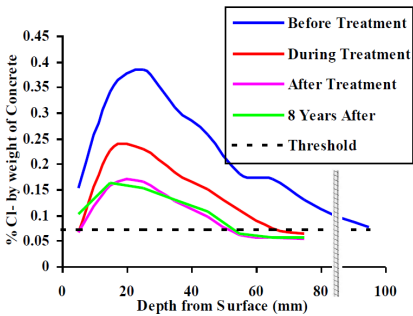


307

307

Reabilitação de Estruturas
Dessalinização

- **Avaliação da Técnica**



308

308

Reabilitação de Estruturas
Dessalinização

- **Avaliação da Técnica**

(mV vs Cu-CuSO ₄)	North Face (Untreated)			West Face (ECE Treated)		
	<200	200 to 350	>350	<200	200 to 350	>350
Pre-Treatment	0%	85%	15%	0	96	4
1 Yr. After	41	59	0	98	2	0
2 Yr. After	41	59	0	100	0	0
3 Yr. After	26	74	0	96	4	0
4 Yr. After	26	70	4	98	2	0
5 Yr. After	19	74	7	96	4	0
6 Yr. After	26	59	15	96	4	0
7 Yr. After	30	63	7	96	4	0
8 Yr. After	11	78	11	96	4	0
15 Yr. After	xx	xx	xx	100	0	0

309

309

Reabilitação de Estruturas
Dessalinização

- **Manutenção**
- Refazer a pintura de proteção

Possíveis Efeitos Colaterais

Perda de Aderência Aço/concreto

RAA

310

310

Técnicas Eletroquímicas: do Laboratório para o Campo

Realcalinização

311

311

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

- **Vantagens**
- Técnica não destrutiva;
- Curta duração;
- Causa pouca poluição, pó e barulho;
- Não necessita de monitoramento permanente
- **Desvantagens**
- Custo inicial elevado;
- Quantidade de conexões;
- São antecedidos de reparos tradicionais;

312

312

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

• Princípio

- O potencial hidrogeniônico (pH) refere-se à quantidade de cátions hidrônio (H^+ ou H_3O^+) e hidróxido (OH^-).

Meio ácido ($pH < 7$): $[hidróxidos] < [hidrônios]$;

Meio neutro ($pH = 7$): $[hidróxidos] = [hidrônios]$;

Meio básico/alcalino ($pH > 7$): $[hidróxidos] > [hidrônios]$.

313

313

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

• Mecanismo

314

314

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

• Mecanismo

315

315

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

• Mecanismo

316

316

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

• Tempo de Aplicação ($0,8 \text{ a } 2A/m^2$) < 1 semana

• Avaliação dos resultados

- Verificação da profundidade carbonatada.

• Durabilidade

- Compatibilizar o sistema de pintura com a superfície do concreto realcalinizado (resistência aos substratos alcalinos, devido à ocorrência de saponificação - hidrólise alcalina)

317

317

Reabilitação de Estruturas
Realcalinização

O principal objetivo da educação é criar pessoas capazes de fazer coisas novas e não simplesmente repetir o que outras gerações fizeram.

(Jean Piaget)

LEDMa
Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais

318

318



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Escola Politécnica
DCTM - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais
MEAU - Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana

ENG M39 - Durabilidade e Degradação das Estruturas de Concreto

UNIDADE II - Ataque por sulfatos, RAA, Projeto de Durabilidade, Métodos de Proteção, Armaduras Resistentes, Potencial de Corrosão; Resistividade Elétrica; Patologia e Reabilitação de Estruturas; Uso de Inibidores; Proteção Catódica; Dessalinização; Realcalinização.

Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro
verasribeiro@hotmail.com



319