

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

EDIRLEY PERES MACHADO

USO DE ARMADURAS PROTEGIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO EM AMBIENTES AGRESSIVOS

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA 2017

EDIRLEY PERES MACHADO

USO DE ARMADURAS PROTEGIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO EM AMBIENTES AGRESSIVOS

Monografia para obtenção do título
de Especialista no Curso de Pós-
Graduação em Patologia das
Construções, Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. MSc. Amacin Rodrigues Moreira

CURITIBA 2017

EDIRLEY PERES MACHADO

**USO DE ARMADURAS PROTEGIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO EM AMBIENTES AGRESSIVOS**

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Patologia das Construções, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Banca:

Prof. MSc. Amacin Rodrigues Moreira (Orientador)
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba

Prof. MSc.. Massayuki Mário Hara
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba

Prof. MSc Jose Manoel Caron
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba

Curitiba

2017

“O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

RESUMO

Desde a introdução do concreto armado como sistema construtivo, este tem sido um grande aliado do desenvolvimento da indústria da construção civil ao redor do mundo. No início acreditava-se ser um material de durabilidade infinita. Com o passar dos anos começou-se a observar que a estrutura de concreto reagia as variações das condições do meio ambiente. O crescimento do centros urbanos trouxe o aumento na produção de CO₂, que poluiu a atmosfera, causando nas estruturas de concreto o efeito da carbonatação. O desenvolvimento industrial criou a necessidade de um melhor aparelhamento da infra estrutura, principalmente portuária. Estas estruturas de modo geral estão sujeitas ao pior tipo de elemento agressivo ao concreto que são os cloretos. A redução da vida útil das estruturas em função do ataque destes agentes agressivos tem sido objeto de vários estudos durante as últimas décadas. A conseqüência do ataque destes agentes agressivos, na funcionalidade da estrutura de concreto armado, é a corrosão das armaduras. Responsável pela perda de cifras bilionárias o combate aos efeitos da corrosão tem sido um grande desafio para a engenharia. Este trabalho estudou o processo de galvanização por imersão a quente para a proteção de vergalhões em estruturas de concreto. O objetivo principal foi reforçar a viabilidade deste sistema, que já é amplamente utilizado em estruturas metálicas, porém pouco difundindo em estruturas de concreto, principalmente no Brasil.

Palavras chave: corrosão, galvanização por imersão a quente, concreto armado, durabilidade

ABSTRACT

Reinforced concrete has been a great ally of the development of the construction industry all around the world, ever since its introduction to the system. At first it was believed to be a material with infinity durability, however, as years passed it was observed that the concrete structure reacted to environment conditions. The growth of urban centers resulted in an increase of CO₂ in the atmosphere, leading to carbonated effects in concrete structures. Industrial development has also created the need for a better infrastructure, mainly for ports. Since these structures are exposed to the ocean, they are subjected to the worst kind of aggressive element to the concrete, the chlorides. The shortage of these structures life time due to those attacks have been the subjects of many studies throughout the last decades. The consequences of the attack of these aggressive agents, in the functionality of the concrete structure, is the corrosion of the reinforcement. Responsible for the loss of billions dollar, understanding and fighting against the effects of corrosion has been a great challenge for engineering. This work studied the process of hot dip galvanization for the protection of rebar in concrete structures. The main goal was to reinforce the feasibility of this system, which is already widely used for metallic structures, but little implemented in concrete structures, especially in Brazil.

Keywords: corrosion, hot dip galvanizing, reinforced concrete, durability

SUMÁRIO

CONTEÚDO

1	Introdução	10
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivo	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivo específico	11
2	Revisão Bibliográfica	12
2.1	Durabilidade das estruturas de concreto armado.....	12
2.2	O concreto armado.....	16
2.3	Patologias no concreto armado.....	17
2.3.1	Relativos ao concreto	17
2.3.2	A Fissuração	20
2.3.3	A Porosidade.....	22
2.4	O concreto armado e o meio agressivo.....	23
2.4.1	Penetração de Cloreto.....	26
2.4.2	Influência do tipo de cimento na penetração de cloretos.....	27
2.4.3	A passividade das armaduras	29
2.4.4	Cobrimento das armaduras	30
2.4.5	Estudo de caso.....	30
3	O tratamento das armaduras	34
3.1	O processo de corrosão do aço no concreto armado.....	34
3.2	O tratamento do aço pelo processo de galvanização a fogo.....	36
3.2.1	O processo de galvanização a fogo	37
3.3	O aço galvanizado e o concreto	39
3.4	A passivação do aço galvanizado	40
3.5	Influencia do tipo de cimento.....	41
3.6	Fissuração do revestimento galvanizado	41
3.7	A carbonatação	43
3.8	O aço galvanizado na presença de cloretos.....	43
4	O Custo na construção	46
5	O uso das armaduras galvanizadas a fogo em estruturas de concreto	48
6	Considerações Finais	49

TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA) conforme NBR 6118:2014...	12
Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e a qualidade do concreto conforme NBR 6118:2014.....	13
Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o revestimento para $\Delta c=10\text{mm}$ conforme NBR 6118:2014.....	14
Tabela 4 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental conforme NBR 6118:2014	21
Tabela 5 - Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto conforme NBR 12655:2015.....	24
Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto conforme NBR12655:2015.....	25
Tabela 7 - Requisitos para concreto, em condições especiais de exposição conforme NBR 12655:2015.....	25
Tabela 8 - Correspondência entre cimentos produzidos pela norma europeia e brasileira.....	27
Tabela 9 - Teor de cloreto, características e condições de exposição da estrutura, fundações.....	32
Tabela 10 -- Locais de ensaio, teor de cloreto e características de exposição nas vigas longitudinais.	32
Tabela 11 - Diâmetro interno de curvatura - ganchos, estribos e dobras. Fonte Fusco, 1995.....	42
Tabela 12 - Taxas de corrosão de zinco em diferentes regiões do Brasil, Pannoni, 2015	45
Tabela 13 - Análise dos custos de uma construção	47

FIGURAS

Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho - C.E.B. Boletim nº 183 - (1989)	15
Figura 2 - Processo adiantado de Lixiviação e eflorescências entre pilares e laje em fundo de reservatório de água.....	17
Figura 3 - Ataque por sulfatos em uma tubulação de esgoto.	18
Figura 4 - Reação álcali agregado em fundação de um edificio de múltiplos andares.	18
Figura 5 - Aspecto visual de tela de aço carbono (não revestida), com indícios de corrosão, embutida em concreto com ar incorporado. Ensaio com fenolftaleína Área mais clara mostra a região carbonatada.	19
Figura 6 - Pilar sob a ponte do Rio Calhau - São Luiz MA. Desplacamento do concreto em conseqüência a corrosão das armaduras que sofreram o ataque de íons cloreto.....	20
Figura 7 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com relação água/aglomerante de 0,45.	27
Figura 8 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com relação água/aglomerante de 0,38.	28
Figura 9 - Representação de uma pilha de corrosão em um mesmo metal	34
Figura 10 - Representação esquemática do processo de carbonatação (C.E.B.).....	35
Figura 11 - Formação do pite de corrosão pela ação de cloretos (TREADAWAY, 1988)	36
Figura 12 - Fluxograma do processo de galvanização a fogo	37
Figura 13 - Seção de um revestimento galvanizado típico.....	38
Figura 14 - Lei de Sitter	46

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a durabilidade das estruturas, ou seja, sua vida útil é tema recente na Engenharia Civil. Segundo Paulo Helene (2015), pode-se dizer que essa consciência foi introduzida na Europa e Estados Unidos na década de 1990. No Brasil as normas NBR6118:2003 e, mais recentemente a NBR 15575:2013 colocam a durabilidade como um critério a ser considerado em projeto.

Souza e Ripper (1998) enfatizam que deve-se entender que a concepção de uma construção durável implica na adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção.

Quando se fala em estrutura de concreto armado tem-se que levar em consideração o desempenho de dois elementos; o concreto e a armadura de aço. Quando pensa-se no preparo do concreto a primeira medida de controle é o fator água cimento que irá ditar a sua qualidade e garantir sua resistência e para a armadura de aço o que se tem em mente é a proteção contra a corrosão.

Sabe-se que o concreto tem propriedades capazes de proteger a armadura contra as frentes de corrosão mas, segundo Odd E. Gjorv (2015), em muitos países foram realizadas extensas pesquisas experimentais de campo em um grande número de estruturas e concreto. Na maioria dos casos, foi principalmente a corrosão das armaduras que criou os problemas mais graves de durabilidade e desempenho.

Então pode-se considerar que existem casos em que somente as propriedades do concreto não são suficientes para garantir a passividade das armaduras. Assim, neste trabalho será apresentada uma alternativa de tratamento prévio das armaduras dando as estruturas uma maior garantia de desempenho e durabilidade.

1.1 Justificativa

Paulo Helene (2015) coloca como uma das maiores dificuldades atuais na Engenharia de Estruturas conseguir, com certa confiança, introduzir a durabilidade no projeto estrutural. Falta de um banco de dados seguro, faltam ensaios coerentes,

sejam acelerados ou de longa exposição, falta informação consistente de campo, obtida de obras existentes, faltam exemplos didáticos.

A professora Joseanne Maria Rosarola Dotto, do Departamento de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSMRS) em 2012 alertava que os gastos governamentais com recuperação de estruturas chegava a casa dos R\$ 800 milhões por ano.

Tem-se então um cenário que deve ser tratado com mais critério pelos projetistas, executores e financiadores das estruturas.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva, através de uma revisão bibliográfica, apresentar uma alternativa consagrada de proteção contra corrosão de armaduras em estruturas de concreto.

1.2.2 Objetivo específico

Apresentar através de exemplos apresentados em literatura específica a experiência da aplicação de armaduras previamente protegidas pelo processo de galvanização por imersão a quente

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Durabilidade das estruturas de concreto armado

As normas e regulamentos estabelecem os critérios que permitem aos responsáveis individualizar, convenientemente, modelos duráveis as suas construções, a partir da definição de classes de exposição das estruturas e de seus componentes em função da deterioração e combinando casos, classes de exposição indicarão níveis de risco ou parâmetros mínimos a serem observados como condição primeira para que se consiga uma construção durável (Souza e Ripper, 1998).

O concreto é um material instável ao longo do tempo, alterando sua propriedades físicas e químicas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente. Segundo Silva (1995), dependendo das condições climáticas e ambientais, o concreto estará submetido aos efeitos de um conjunto de agente agressivos e diferentes fatores destrutivos. Esses agentes ou fatores podem atuar isoladamente ou conjuntamente, e são de natureza mecânica (impacto), física (lixiviação), química e biológica, associando-se a cada um deles efeitos característicos (Souza e Ripper, 1998)

Tem-se então uma primeira premissa a se considerar quando é projetada uma estrutura em concreto; a agressividade do ambiente

Como diretriz para projetos de estruturas a NBR 6118:2014 classifica a agressividade ambiental conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA) conforme 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 Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Indústrial	Grande
IV	Muito Forte	Indústrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: Norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento

Petrucci (1987) alerta que a qualidade dos materiais e componentes também devem ser levados em consideração para um bom desempenho do concreto quando deve-se ter em conta a relação entre cimento e agregado, a divisão do agregado em miúdo e graúdo e, muito principalmente, a relação entre a água empregada e os materiais secos, ou, como é mais usual, relação água/cimento. Considerando a importância do fator água/cimento, Silva (1996) alerta para fato de, normalmente, utilizar-se uma quantidade de água superior à que se precisa para hidratar o cimento e essa água ao evaporar deixa vazios e, ainda, o volume final da reação entre cimento e água é menor que o inicial, além do ar que inevitavelmente incorpora-se à massa, durante a mistura. O concreto não é um sólido perfeito, mas sim poroso, pois externamente tem aparência de sólido, mas possui internamente uma fina rede de poros contendo água e ar. Souza e Ripper (1998) resumem a importância do fator água cimento na durabilidade das estruturas de concreto considerando que este fator irá reger as características como densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica. Tem-se agora a segunda premissa a ser considerada não só no projeto como também no preparo do concreto: a água

Dada a importância do fator água cimento a NBR 6118:2014 estabelece requisitos mínimos que apresentamos na tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e a qualidade do concreto conforme NBR 6118:2014

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		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 de concreto armado
^c CP corresponde a componentes e elementos de concreto protendido

Fonte: Norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento

Outro fator importante na durabilidade das estruturas em concreto armado é a preservação das armaduras que compõe este sistema. A alta alcalinidade da solução dos poros do concreto, $pH \geq 12,5$, a qual circunda o aço, resulta na formação, sobre a superfície deste, de uma película ou capa passivadora (SILVA,

1996). A corrosão das armaduras dentro do concreto somente pode ocorrer se for destruída a película passivadora (Fusco, 1995).

Já que o concreto tem a capacidade de proteger as armaduras, tem-se que levar em conta a necessidade de que este aço esteja suficientemente envolvido pelo concreto. Para garantir esta proteção recomenda-se uma camada mínima de recobrimento sobre as armaduras.

A NBR 6118:2014 recomenda alguns requisitos mínimos quanto ao recobrimento as armaduras que esta apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento para $\Delta c=10\text{mm}$ conforme NBR 6118:2014

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

Fonte: Norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento

Assim, as normas e regulamentos dão condições aos projetistas e executores parâmetros para definir modelos duráveis para as construções, bem como, combinar estes elementos de acordo com o ambiente e tipo de utilização estabelecendo critérios básicos para a vida útil e durabilidade da estrutura.

Souza e Ripper (1998) resumem na seguinte forma:

a) Em função da deterioração:

- corrosão das armaduras, sob efeito da carbonatação e/ou dos cloretos, por tipo de ambiente;
- ação do frio e/ou do calor, também por tipo de ambiente;
- agressividade ambiental

b) Em função da combinação dos casos:

- dosagem mínima de cimento;
- fator água/cimento máximo;
- cobrimento mínimo das barras e armaduras;

- método de cura

Pretende-se, então que, a partir deste limites ou com a mínima observância a eles, o desempenho das estruturas, de uma maneira geral, e atendidas as questões dimensionais, seja no seu todo satisfatório.

Já em 1989 o Guia Prático de Estruturas de Concreto Duráveis, editado pelo C.E.B. (Comitê Europeu do Concreto) estabelecia no seu texto introdutório um quadro definidor do conjunto de inter-relações entre os diversos fatores que influem na durabilidade e no resultante desempenho de uma estrutura. A figura 1 resume estes parâmetros. (Souza e Ripper, 1998)

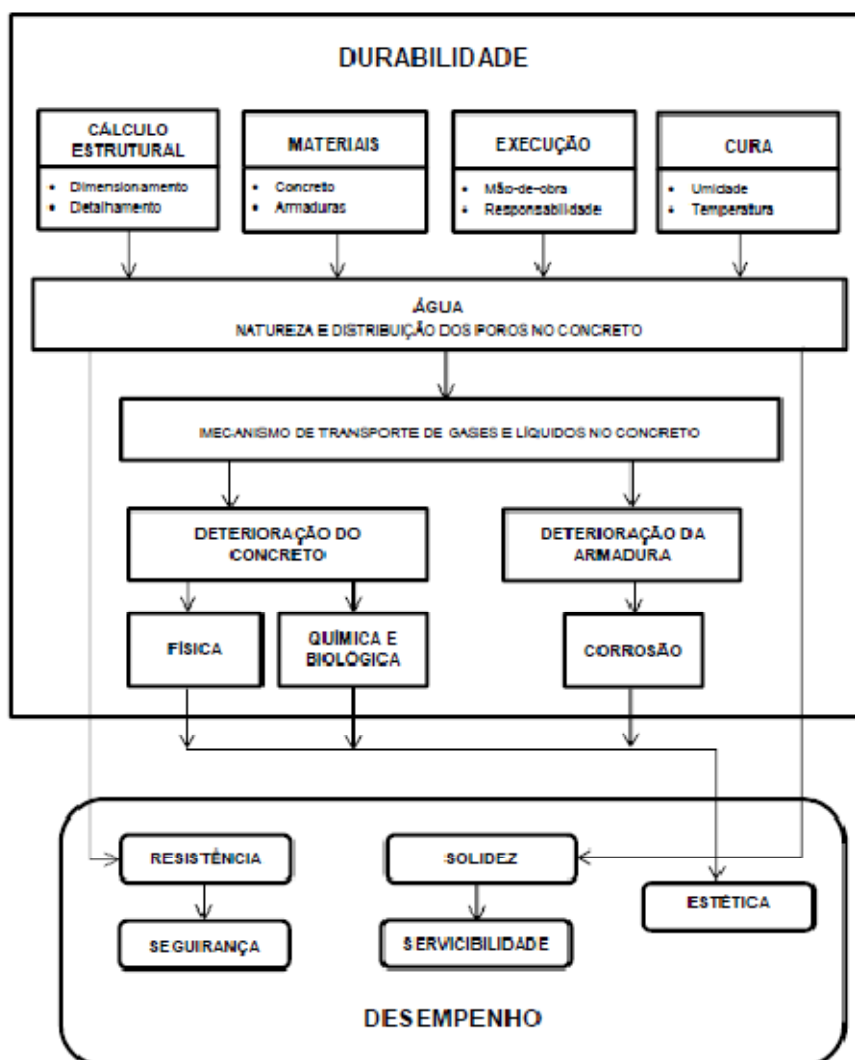


Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho - C.E.B. Boletim nº 183 - (1989)
Fonte: Souza e Ripper, 2015

2.2 O concreto armado

Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componente minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolanicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Assim define a NBR 12655:2015 o concreto de cimento Portland.

Petrucci (1987) destaca que o concreto recém misturado, deve oferecer condições tais de plasticidade nas formas, adquirindo, com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência. A pasta de cimento e água terá como função envolver os agregados, enchendo os vazios formados e comunicando ao concreto possibilidades de manuseio, quando recém misturado além de aglutinar os agregados no concreto endurecido, dando um conjunto com certa impermeabilidade, resistência aos esforços e durabilidade aos agentes agressivos. Já os agregados deverão contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste e à reação das intempéries, reduzir as variações de volume provenientes de várias causas e também reduzir o custo.

As peças de concreto estrutural submetidas as ações de intensidade crescente, quando são superados determinados níveis de sollicitação, sofrem um processo de fissuração.

Enquanto as sollicitações não ultrapassam esses limites de fissuração, o concreto mantém a sua integridade, permanecendo no estágio I. Quando se dá a fissuração, a estrutura passa para o estágio II e a sua integridade requer a presença de armaduras. As armaduras devem absorver os esforços de tração que não mais podem ser resistidos pelo concreto fissurado.

É importante salientar que, embora possa existir justificativas teóricas para a dispensa de armadura de uma peça, essa conclusão somente poderá ser aceita se houver comprovação experimental suficiente que garanta a sua validade. Esse é o caso dos blocos de base dos tubulões, que de longa data são construídos sem armadura de fundo, não existindo relato algum de ruína causada por este motivo.

Excetuando-se casos particulares, como citado, as peças estruturais de concreto exigem o emprego de armaduras capazes de absorver os esforços internos de tração que nelas aparecem na grande maioria dos casos essas armaduras são

passivas, isto é, elas recebem esforços como decorrência das deformações da estrutura sob ação das cargas externas. Elas não causam esforços por si mesmas. (Fusco, 1995).

Portanto, as estruturas de concreto devem ser assumidas como produtos extremamente complexos, que apresentam uma enorme variedade de características, das quais dependerá a sua maior ou menor adequação aos propósitos estabelecidos pelo projeto. (Souza e Ripper) 1998

2.3 Patologias no concreto armado

Dentre os mecanismos de envelhecimento e deterioração do concreto armado a NBR 6118:2014 destaca:

2.3.1 Relativos ao concreto

- A) Lixiviação: Mecanismo responsável por dissolver os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. Para prevenir sua ocorrência, recomenda-se restringir sua fissuração, de forma a minimizar a infiltração de água, e proteger as superfícies expostas com produtos específicos



Figura 2 - Processo adiantado de Lixiviação e eflorescências entre pilares e laje em fundo de reservatório de água.

Fonte: <http://rodrigocarvalho.com.br/artigos/patologias-em-concreto-armado>

- B) Expansão por sulfato: é a expansão por ação de águas ou solos que

tenham ou estejam contaminados com sulfatos dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado. A prevenção pode ser feita pelo uso de cimento resistente a sulfatos;



Figura 3 - Ataque por sulfatos em uma tubulação de esgoto.

Fonte <http://sanepar.com.br/sanepar/sanare/v16/SULFETOS.htm>

- C) Reação álcali-agregado: é a expansão por ação das reações do concreto e agregados reativos. O projetista deve identificar no projeto o tipo de elemento estrutural e sua situação quanto à presença de água, bem como deve recomendar as medidas preventivas;



Figura 4 - Reação álcali agregado em fundação de um edifício de múltiplos andares.

Fonte: [http://www.obra24horas.com.br/materias/construcao/reacoes-expansivas-atingem- Relativos a armadura](http://www.obra24horas.com.br/materias/construcao/reacoes-expansivas-atingem-Relativos a armadura)

- D) Despassivação por carbonatação: é a despassivação por carbonatação, ou

seja, por ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura. As medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável um concreto de baixa porosidade.



Figura 5 - Aspecto visual de tela de aço carbono (não revestida), com indícios de corrosão, embutida em concreto com ar incorporado. Ensaio com fenolftaleína. Área mais clara mostra a região carbonatada.

Fonte <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/212/artigo332558-2.aspx>

- E) Despassivação por ação de cloretos: consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de ion-cloro. As medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável o uso de um concreto de pequena porosidade. O uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico é também recomendável nestes casos.



*Figura 6 - Pilar sob a ponte do Rio Calhau - São Luiz MA. Deslocamento do concreto em consequência a corrosão das armaduras que sofreram o ataque de íons cloreto.
Fonte <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/212/artigo332558-2.aspx>*

Das patologias relacionadas a expansão por sulfato e reação álcali-agregado são de origem química e, em geral, atacam o concreto causando a sua desagregação que serão evitadas com a aplicação de cimentos e agregados com propriedades capazes de proteger a estrutura destas patologias. Estas medidas devem ser previstas já na concepção da estrutura, ou seja, na fase de projeto e cabendo ao engenheiro executor o cuidado em seguir estas especificações.

Lixiviação, ainda que seu resultado seja de uma reação química, a despassivação das armaduras tem sua origem em características próprias do concreto que são a fissuração e porosidade.

2.3.2 A Fissuração

O controle da fissuração é previsto na NBR6118:2014 que em seu item 13.4 diz: "A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto a tração; mesmo sob as ações de serviço (utilização), valores críticos de tensões de tração são atingidos. Visando obter bom desempenho relacionado à proteção das armaduras quanto a corrosão e a aceitabilidade dos usuários, busca-se controlar a abertura dessas fissuras".

Tabela 4 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental conforme NBR 6118:2014

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinações de ações de serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I e CAA IV	Não há	-x-
Concreto armado	CAA I	$ELS-W^a w_k \leq 0,4$ mm	Combinação freqüente
	CAA II e CAA III	$ELS-W^a w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	$ELS-W^a w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	$ELS-W^a w_k \leq 0,2$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F ^b	Combinação freqüente
		ELS-D ^c	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F ^b	Combinação rara
		ELS-D ^c	Combinação freqüente
^a ELS-W Estado limite de abertura das fissuras; ^b ELS-F Estado limite de formação das fissuras; ^c ELF-D Estado limite de descompressão			

Fonte: Norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento

Sabendo-se que a fissuração no concreto é inevitável, logicamente o projeto vai contemplar as armaduras necessárias para conter ou melhor manter o concreto em seu estado de fissuração dentro do prescrito em norma. Porém outros fatores podem levar o concreto a fissurar e estes casos vão estar diretamente ligados a falhas executivas e também de outros cuidados no projeto. Souza e Ripper (1998) relacionam alguns destes fatores como:

- Contração plástica ocasionada pela evaporação rápida da água que pode ocorrer por uma má dosagem do fator água/cimento ou falta de cura;
- Assentamento do concreto e perda de aderência das barras de armadura que ocorre sempre que este movimento natural da massa, resultante da ação da força da gravidade, é impedido pela presença de formas ou de barras da armadura, sendo tanto maior quando mais espessa for a camada de concreto.

Se o agrupamento de barras for muito grande (densidade das armaduras), as fissuras poderão interagir entre si, gerando situações mais graves, como a perda total de aderência;

- Movimentação de formas e escoramentos que pode ocasionar uma deformação acentuada da peça, alteração de sua geometria, com perda de resistência e desenvolvimento de um quadro de fissuração;
- Retração do concreto. Se o comportamento reológico não for considerado, quer em nível de projeto, quer de execução, são grandes as possibilidades de desenvolvimento de um quadro de fissuração.

2.3.3 A Porosidade

O concreto é material que por sua própria constituição é necessariamente poroso, pois não é possível preencher a totalidade dos vazios do agregado com uma pasta de cimento. Petrucci (1987) ainda destaca as várias razões para esta propriedade que são:

- É necessário utilizar uma quantidade de água superior à que se precisa para hidratar o aglomerante, e essa água, ao evaporar, deixa vazios;
- com a combinação química, diminuem os volumes absolutos de cimento e água que entram em reação;
- inevitavelmente, durante a mistura do concreto, incorpora-se ar à massa.

Souza e Ripper (1998) citam P.K. Metha (1994) que diz:"a impermeabilidade do concreto deve ser a primeira linha do sistema de defesa contra qualquer processo físico-químico de deterioração", ou seja, a durabilidade esta diretamente relacionada a impermeabilidade do concreto.

Entendem que o concreto deve ser considerado um, pseudo-sólido, de células porosas e gelatinosas e relacionam a interação entre os agentes agressivos e a estrutura porosa do concreto em função do meio de transporte como segue:

- pelo ar, o mecanismo de transporte de gases, de água e de agentes agressivos diluídos (carbonetos, cloretos e sulfato) é por difusão.
- pela água da chuva e marés, em transporte por capilaridade.

- em condições de imersão, e portanto sob pressão, dá-se o transporte por penetração direta.

Petrucci (1987) coloca a impermeabilidade do concreto como uma importante propriedade pois quando expostos ao ar sofrem os ataques de águas agressivas ou ação destruidora dos agentes atmosféricos.

Destaca, ainda que, um reduzido fator água/cimento e uma cura adequada são medidas que devem ser adotadas para reduzir a permeabilidade e porosidade do concreto garantindo assim uma maior resistência ao ataque de agentes agressivos.

2.4 O concreto armado e o meio agressivo

Petrucci (1987) destaca que um dos capítulos mais importantes da tecnologia dos concretos é o seu comportamento sob ação de agentes agressivos, quer estes exerçam uma ação física, como, por exemplo, a dissolução; quer uma ação química, reação com os compostos do cimento, com a formação de substâncias expansivas e, finalmente, uma ação mecânica como, por exemplo, a erosão.

Para Souza e Ripper (1998), o controle da permeabilidade do concreto, a manutenção da peça sob estado de tensões de serviço dentro dos limites estabelecidos regularmente, a escolha correta de bitolas das barras da armadura principal, o bom detalhamento, a cuidadosa execução das peças e a proteção adicional das superfícies do concreto por pintura surgem como fatores primordiais e de cuja observância dependerá a redução ou não da possibilidade de ocorrência de corrosão nas barras da armadura.

Fusco(1995) também coloca a permeabilidade e compacidade do concreto como uma condicionante para a proteção das armaduras observando também a adequada camada de cobrimento das armaduras. Destaca ainda que a corrosão das armaduras dentro do concreto somente pode ocorrer com a destruição da camada passivadora sendo que pode acontecer em virtude de três diferentes causas:

- pela redução do pH abaixo de 9, por efeito da carbonatação do concreto da camada de cobrimento;
- pela presença de íons de cloreto CL^- ou de outros íons como os provenientes da poluição atmosférica acima de certos valores críticos;

- pela lixiviação do concreto com a presença de fluxos de água que percolem através de sua massa.

Odd E. Gjorv (2015) coloca que embora existam diferentes processos de deterioração que podem causar problemas à durabilidade e ao desempenho de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade como as reações álcali-agregado, gelo e degelo e ataques químicos o rápido desenvolvimento da tecnologia de concreto nos últimos anos facilitou o controle desses processos. A carbonatação também não chega a ser um problema para concretos em ambientes de severa agressividade haja visto que, em geral, são aplicados concretos com alta densidade minorando esta patologia a níveis tão baixos que não chegam a ter uma representatividade prática.

Porém, o controle da penetração de cloretos e a prematura corrosão das armaduras representam, ainda um, grande desafio tanto para o projeto de durabilidade como para a operação das estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.

A NBR 12655:2015 em seu item 5.2.2.4 destaca que:"de forma a proteger as armaduras do concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos, não pode exceder os limites estabelecidos na Tabela 5, a seguir. Quando forem realizados ensaios para determinação do teor de cloretos solúveis em água, deve ser seguido o procedimento da ASTM C 1218."

Tabela 5 - Teor máximo de íons de cloreto para proteção das armaduras do concreto conforme NBR 12655:2015

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (CL⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: Norma brasileira NBR 12655:2015 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento

Ainda, a NBR12655:2015 traz as seguintes condições para o concreto armado considerando um consumo mínimo de cimento, mínimo valor de F_{ck} e valores máximos de relação água/cimento conforme as tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto conforme NBR12655:2015

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	Concreto Armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	Concreto Armado	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (conforme NBR 8953)	Concreto Armado	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	Concreto Armado	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m^3	Concreto Armado e Concreto Protendido	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Fonte: Norma brasileira NBR 12655:2015 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento

Tabela 7 - Requisitos para concreto, em condições especiais de exposição conforme NBR 12655:2015

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

Fonte: Norma brasileira NBR 12655:2015 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento

2.4.1 Penetração de Cloreto

Várias são as causas para a deterioração das estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. Porém o controle a penetração de cloretos tem sido o grande desafio de projetistas e executores ainda que se tenha uma estrutura produzida seguindo-se todos os rigores e recomendações das normas aplicáveis.

Para estruturas de concreto em ambientes com alto teor de cloretos, a penetração dos cloretos pode ocorrer de maneiras diferentes. No concreto sem fissuras, a penetração ocorre principalmente por absorção capilar e difusão. Quando um concreto relativamente seco é exposto à água salgada, pode absorvê-la rapidamente. Os processos de molhagem, que ocorrem em virtude de movimentos de maré, chuva e secagem favorecem o acúmulo de sal no interior do concreto, elevando a concentração de sal (Helene, 2013).

Após estudar o comportamento de diversas estruturas ao longo da costa norueguesa, Odd E. Gjorv (2015) demonstra que é apenas uma questão de tempo antes que quantidades prejudiciais de cloreto cheguem às armaduras, mesmo em estruturas onde os cobrimentos de armadura e qualidade do concreto foram considerados adequados e de alta qualidade. O alto grau de saturação entre 80% e 90% na camada exterior para cobrimentos de 40mm a 50mm de concreto observado em algumas pontes ao longo da costa norueguesa, o que confere um alto teor de umidade na camada de cobertura, levam este autor a concluir ser a difusão iônica o mecanismo de transporte mais comum para penetração de cloretos.

Odd E. Gjorv (2015) cita, ainda, que apesar de extensas pesquisas de ordem prática e teórica a respeito da penetração de cloretos em estruturas de concreto esta ainda é uma questão muito complexa e difícil. Mesmo quando se aplica a segunda lei de difusão de Fick¹ para calcular as taxas de penetração do cloreto no concreto, deve-se notar que esse cálculo é baseado em certas premissas e numa simplificação muito grosseira do real mecanismo de transporte.

¹ A difusão está associada ao transporte de massa que ocorre em um sistema quando nele existe um gradiente de concentração química. No interior de sólidos, a difusão ocorre por movimentação atômica (metais), de cátions e ânions (cerâmicas) e de macro moléculas (polímeros). Considera as variáveis de tempo, profundidade (recobrimento armaduras), concentração de cloreto na superfície do concreto, o coeficiente de difusão do cloreto no concreto e mais uma função matemática (função de erro ou curva de Gauss).

2.4.2 Influência do tipo de cimento na penetração de cloretos

As figuras 7 e 8 mostram a resistência à penetração de cloretos em quatro tipos diferentes de cimento comercial produzidos em conformidade com as normas européias.

Tabela 8 - Correspondência entre cimentos produzidos pela norma européia e brasileira

Tipo	Similar no Brasil
CEM II/B-S 42,5 R NA com 34% de escória (GGBS1)	CP II E 40
CEM III/B 42,5 LH HS GGBS2 com 70% de escória (GGBS2)	CP III 40
CEM I 52,5 LA cimento Portland puro alto desempenho (HPC)	CP V
PFA	CP II Z 40

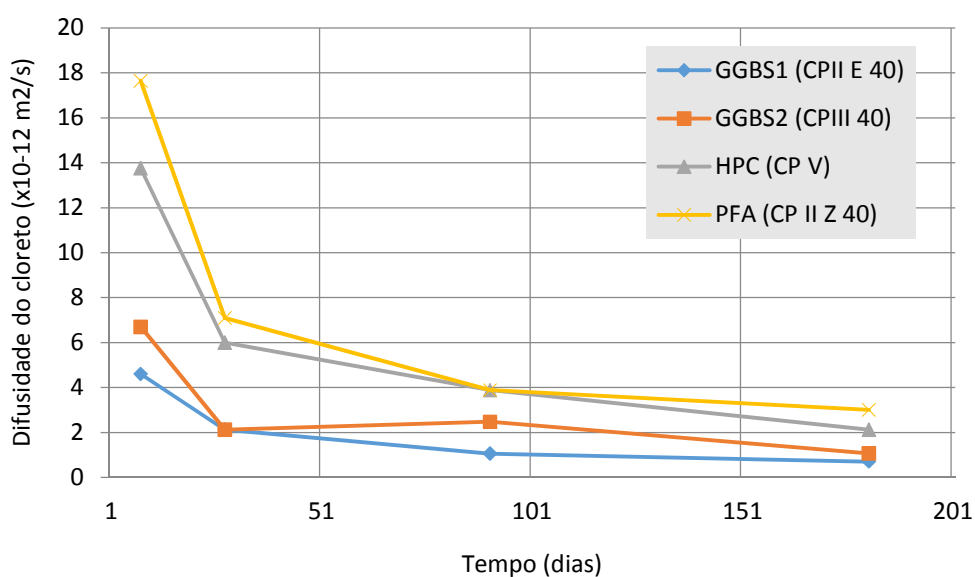


Figura 7 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com relação água/aglomerante de 0,45.

Fonte adaptado de Arskog (2007)

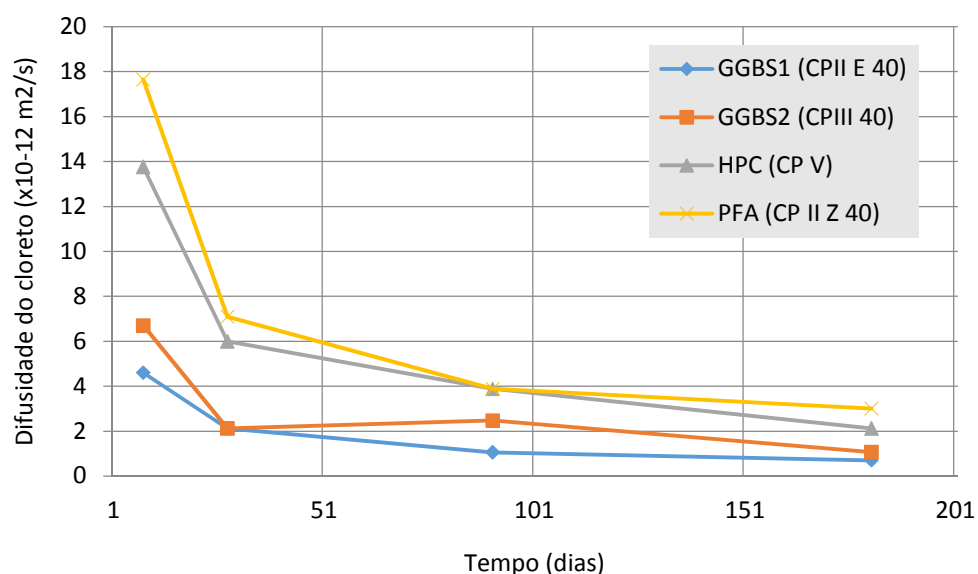


Figura 8 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com relação água/aglomerante de 0,38.
 Fonte adaptado de Arskog et al. (2007)

O que pode-se observar em ambos os casos é que o cimento com escória apresenta um melhor desempenho a penetração de cloretos do que os cimentos com cinzas volantes e do cimento Portland puro. Mesmo quando reduzido o fator água/cimento, melhorando as condições de compactação e permeabilidade do concreto os cimentos com escória ainda tiveram um desempenho muito superior aos demais.

Todos os ensaios foram realizados em concreto curado na água a 20 °C por períodos de até 180 dias.

Embora a relação água/aglomerante também reflita a porosidade e, portanto, a resistência à penetração do cloreto, uma longa experiência demonstra que a seleção de um sistema apropriado de aglomerante pode ser mais importante para conseguir uma alta resistência à penetração do cloreto do que somente selecionar uma baixa relação água/aglomerante (Thomas; Bremner; Scott, 2011).

A NBR12655:2015 traz o seguinte instrução informada em sua tabela 4 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos: "Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos". Este tipo de cimento deve obedecer a NBR 5737:1992.

2.4.3 A passividade das armaduras

É estabelecido que a água quimicamente neutra é a que tem a mesma quantidade de íons (H^+)= 10^{-7} na equação abaixo, virá que o pH de uma solução aquosa neutra é 7.(Souza e Ripper, 1998)

$$pH=-\log(H^+)$$

Assim para um pH menor que 7 tem-se uma solução acida, para um pH igual a 7 uma solução neutra e para um pH maior que 7 uma solução alcalina.

A solução de poro do concreto baseado em cimentos Portland normalmente atinge um nível de alcalinidade acima do pH 13. Na presença de oxigênio, essa solução alcalina forma um fino filme óxido na superfície do aço, que protege as armaduras com grande eficiência contra corrosão. (Shalon; Raphael, 1959). Essa película impede a dissolução de íons de Fe^{++} , tornando-se assim impossível a corrosão das armaduras, mesmo que haja umidade e oxigênio no meio ambiente (Fusco, 1995). Assim que o pH desce para cerca de 9,0 o filme óxido protetor é completamente dissolvido despassivando as armaduras e abrindo a frente de corrosão.

Para concreto baseado em cimentos Portland, a alta alcalinidade deve-se às pequenas quantidades de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) prontamente solúveis. A pasta de cimento também contém uma grande proporção de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que amortece o sistema de tal forma que o pH nunca cai abaixo de 12,5. Para cimentos de escória granulada de alto forno e cimentos Portland compostos com adições pozolânicas, como cinzas volantes ou sílica ativa condensada, uma porção importante de $Ca(OH)_2$, reage e forma novo silicato de cálcio (CSH), reduzindo assim, proporcionalmente a "reserva alcalina". (Odd E Gjørsv 2015).

O patamar limite de concentração de cloretos necessário para despassivar as armaduras já foi objeto de diversas pesquisas e varias técnicas diferentes foram utilizadas obtendo resultados entre 0,02% a 3,04% da massa de cimento. Potencial do aço, pH da solução no poro e condições locais influenciam o patamar limite de concentração de cloretos.

Odd E Gjorv (2015) coloca que não é possível afirmar um único valor para o patamar limite no caso de corrosão de armaduras. No entanto, basta uma quantidade muito pequena de cloretos para romper a passividade e, assim que ela é rompida a corrosão começa. A taxa de corrosão é então controlada por outros fatores como a resistividade elétrica do concreto e a disponibilidade de oxigênio.

2.4.4 Cobrimento das armaduras

De modo geral a proteção das armaduras depende tanto da qualidade do concreto, isto é, de sua compacidade e de sua impermeabilidade, quanto de uma camada de cobrimento com espessura adequada (Fusco, 1995).

Para classe ambiental IV, a NBR6118:2015 recomenda um recobrimento mínimo entre 45 e 55 mm em função do elemento estrutural e tipo estrutura.

De modo geral, admite-se que a espessura da camada de cobrimento não deva superar 60 mm. Quando isto ocorrer, deverão ser tomadas medidas especiais de precaução como, por exemplo, o emprego de armaduras de pele cujos cobrimentos respeitem o máximo acima especificado (Fusco, 1995).

Embora o cobrimento especificado sirva principalmente para proteger o aço estrutural, ele muitas vezes também é aplicado a armaduras adicionais de aço que mantêm a posição do aço estrutural durante a concretagem (estribos, ganchos, caranguejos, treliças, etc). No entanto, como os cloretos penetrantes não distinguem entre aço estrutural e as armações adicionais, o cobrimento nominal deve ser preferivelmente especificado para todo o aço embutido, inclusive para os estribos, para evitar qualquer fissura do cobrimento devido a corrosão prematura. Fissuras no cobrimento causadas por corrosão dos estribos podem representar o mesmo tipo de fraqueza que qualquer outra fissura. Portanto, em vez de usar aço nos *inserts* e peças auxiliares, é preferível adotar sistemas baseados em materiais não corrosíveis (Odd E Gjorv 2015).

2.4.5 Estudo de caso

Trabalho referente a durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho apresentado durante a INTERCORR 2010, Fortaleza CE, maio de 2010.

O objeto de estudo foram dois píeres um edificado no início dos anos de 1960 (Pier de atracação 1), e ampliado nos início dos anos de 1970 (Pier de atracação 2),

denominado de *Pier Velho* e outro edificado no ano de 2005, denominado de *Pier Novo*. A extensão aproximada dos dois piers é de 3 km. O estudo descreve as estruturas como segue: "A estrutura principal dos píeres é composta basicamente por vigas longitudinais (longarinas) apoiadas em cavaletes (conjunto de viga transversal com um número variável de estacas engastadas) que se repetem ao longo de sua extensão. As vigas longitudinais são de concreto armado pré-moldado, sendo que, as vigas do Pier de Atracção 2 são protendidas. As estacas são de concreto armado, sendo que nos Píeres de Atracção 1 e 2 e ao final da Ponte de Acesso e da Pier Novo estas são encamisadas com chapas de aço e protegidas catodicamente por corrente impressa. As vigas transversais (transversinas) são de concreto armado, sendo que, na Ponte de Acesso e no Pier Novo são compostas de uma peça pré-moldada na parte inferior, entretanto, as suas aberturas para o engaste das estacas são preenchidas com concreto moldado no local, assim como é a sua parte superior e as lajes existentes em duas das três vigas longitudinais principais.

O Pier Novo não sofreu nenhuma intervenção desde a sua construção, enquanto, em 1993, o Pier Velho teve a sua primeira grande manutenção de recuperação, sendo a maioria das estacas da Ponte de Acesso encamisada por apresentarem anomalias relacionadas à corrosão. A mesma intervenção foi feita nos demais elementos desta estrutura e na do Pier de Atracção 1 em 1998. Com base nestes dados e considerando que a fissuração de corrosão no concreto de cobertura ocorre, geralmente, após 10 anos do seu início, a despassivação da armadura no Pier Velho ocorreu, provavelmente, antes de 1985. Nesta hipótese, a vida útil de projeto da estrutura foi esgotada em torno 20 anos da sua construção."

Na tabela 9 são apresentados os resultados obtidos, em alguns pontos da estrutura, para o teor de cloreto.

Tabela 9 - Teor de cloreto, características e condições de exposição da estrutura, fundações.

PIER VELHO			PIER NOVO	
Estaca pré-moldada, consumo de cimento 400 kg/m ³ , cobrimento das armaduras 40mm, concreto com resistência de 30MPa, fator a/c e uso de aditivos não informados			Estaca pré-moldada e protendida, consumo de cimento 469 kg/m ³ , cobrimento das armaduras 55mm e concreto com resistência de 50MPa, fator a/c 0,45 e 41 kg/m ³ de metacaulim (silicato de alumínio)	
Profundidade (mm)	Respingos e névoa salina	Respingos e marolas	Respingos e névoa salina	Respingos e marolas
0-5	1,27	2,86	0,17	0,95
5-10	1,23	2,75	0,04	0,24
10-15	1,05	2,03	0,04	0,08
15-25	0,79	1,29	0,04	0,06
25-35	0,40	0,90	0,04	0,05
35-45	0,32	0,53	0,04	0,06

Fonte: Artigo Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho INTERCORR 2010

Tabela 10 -- Locais de ensaio, teor de cloreto e características de exposição nas vigas longitudinais.

PIER VELHO				PIER NOVO		
Viga longitudinal pré-moldada, consumo de cimento 350 kg/m ³ , cobrimento das armaduras 40mm e concreto com resistência de 20MPa fator a/c e uso de aditivos não informados				Viga longitudinal pré-moldada, consumo de cimento 469 kg/m ³ , cobrimento das armaduras 55mm e concreto com resistência de 50MPa, fator a/c 0,45 e 41 kg/m ³ de metacaulim (silicato de alumínio)		
Profundidade (mm)	Intempéries	Água de condensação	Água de escorrimento	Intempéries	Água de condensação	Água de escorrimento
0-5	0,17	0,19	0,72	0,03	0,12	0,13
5-10	0,12	0,17	0,47	0,04	0,10	0,06
10-15	0,13	0,13	0,43	0,05	0,07	0,06
15-25	0,13	0,14	0,52	0,05	0,06	0,06
25-35	0,09	0,07	0,53	0,03	0,07	0,07
35-45	0,07	0,05	0,48	0,05	0,07	0,06

Fonte: Artigo Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho INTERCORR 2010

Os processos de molhagem, que ocorrem em virtude de movimentos de maré e chuva, e secagem favorecem o acúmulo de sal no interior do concreto, elevando a concentração de sal (Helene, 2013). Como pode-se observar nos resultados apresentados nas tabelas 9 e 10 o maiores índices de teores de cloreto foram

anotados nas regiões sujeitas a respingos de maré, no caso das vigas, e água de escorrimento, para as estacas, o que corrobora com a literatura até aqui pesquisada. Porém, em quase sua totalidade, os resultados mostram valores acima dos previstos nas normas como um índice aceitável para o teor de cloreto. Mesmo para a estrutura do píer novo onde foram adotados os critérios normativos atuais bem como a adição de compostos, na mistura água/aglomerante, capazes de melhorar a permeabilidade do concreto os índices de cloreto estão além dos esperados. Outro fator que deve ser notado é a vida útil das estruturas estarem muita aquém do que hoje é considerado aceitável, estruturas de concreto de acordo com a norma de desempenho, devem ter uma vida útil, ou seja, tempo sem a necessidade de intervenção, de no mínimo 40 anos. Já para estruturas especiais, como é o caso, 100 anos é um prazo aceitável para os dias de hoje. O aumento do cobrimento da capa de concreto, aditivos inibidores, redução do fator água/aglomerante e aumento do consumo de concreto são medidas que retardam a penetração de cloretos mas fica claro que é apenas uma questão de tempo até que quantidades prejudiciais de cheguem até as armaduras.

3 O TRATAMENTO DAS ARMADURAS

Uso de cimentos adequados, concretos bem dosados e controlados e um cuidado na execução e cura do concreto são precauções e cuidados que melhoram o desempenho do concreto porém não deve-se esquecer que o concreto sempre terá com um percentual, ainda que aceitável, de porosidade e fissuração razões pelas quais, como já discutido anteriormente, para ambientes de severa agressividade, será apenas uma questão de tempo até que os agentes agressivos provoquem a desp passivação iniciem o processo de corrosão do aço.

3.1 O processo de corrosão do aço no concreto armado

O processo de corrosão no aço é eletroquímico, ou seja, dá-se pela geração de um potencial elétrico, na presença de um eletrólito - no caso, a solução aquosa do concreto - em contato com um condutor metálico, a própria barra de aço. A passagem de ferro à superfície aquosa, transformando os cátions ferro (Fe^{2+}), com o conseqüente abandono da barra de aço à carga negativa, instalam a diferença de potencial. (Souza e Ripper, 1998)

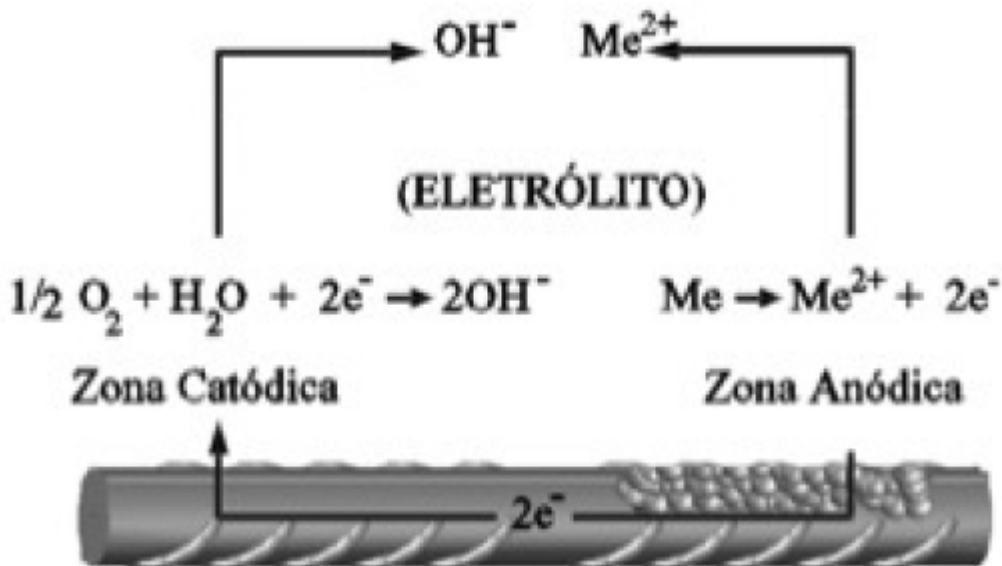


Figura 9 - Representação de uma pilha de corrosão em um mesmo metal

Fonte: Boletim técnico nº 6/2013 Corrosão das armaduras de concreto da ALCONPAT

A corrosão pode ser classificada em generalizada e localizada. Na corrosão generalizada, o desgaste do material pode ocorrer de forma mais ou menos uniforme, contudo se processa em extensas áreas do metal. Na corrosão localizada,

o desgaste se processa em uma superfície limitada e, usualmente, tende a se aprofundar de modo mais rápido do que em um processo de corrosão generalizada. Essas expressões da corrosão podem sofrer algumas variações morfológicas quando analisadas em maior profundidade, podendo assumir, dentre outras formas, aparência superficial uniforme ou irregular, com a formação de pites ou com a formação de fissuras. (FELIU, 1984).

A corrosão generalizada ocorre em função da redução do pH do concreto para valores inferiores a 9, pela ação dissolvente do (CO₂) existente no ar atmosférico transportado através dos poros e fissuras do concreto, ou seja, a carbonatação. (Souza e Ripper, 1998).

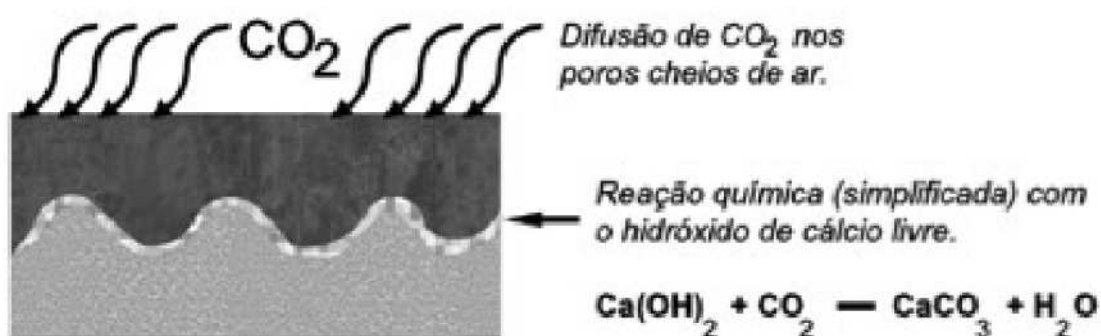


Figura 10 - Representação esquemática do processo de carbonatação (C.E.B.)

Fonte: Boletim técnico nº 6/2013 Corrosão das armaduras de concreto da ALCONPAT

A corrosão localizada é caracterizada pela ação dos íons de cloreto, sempre que haja umidade e presença de oxigênio. Os íons cloreto (Cl⁻) penetram nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, provocam desestabilizações pontuais nessa película. Várias teorias tentam representar esse fenômeno. No entanto, a maioria delas converge em relação ao fato de que a ruptura da película passivadora é algo dinâmico, com eventos repetidos de despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva da armadura, bem como que este efeito ocorre de forma localizada. Essa é uma característica que faz com que a corrosão desencadeada por cloretos seja tipicamente por pites (corrosão localizada), diferindo do que ocorre devido à carbonatação (corrosão generalizada). Uma vez iniciado o processo corrosivo, os cloretos que se combinam inicialmente com os íons Fe⁺⁺, formando FeCl₂, são reciclados através da hidrólise desses produtos, liberando os Cl⁻ para

novas reações, mas também liberando íons H^+ . A liberação de H^+ faz com que a área anódica tenha a sua acidez aumentada e o potencial dessa área se torne mais negativo. Por outro lado, a formação de OH^- em função das reações catódicas, eleva o pH dessas áreas. Assim, a corrosão por pites é auto-sustentada, diminuindo o pH nas áreas de corrosão das armaduras do concreto anódicas e aumentando o pH nas áreas catódicas adjacentes, reduzindo as chances de futuro ataque nessas áreas catódicas. Com a continuidade do processo, mais íons Cl^- penetram no concreto, unindo-se àqueles reciclados para participarem de novas reações. (Enio J. Pazini Figueiredo e Gibson Rocha Meira, 2013).

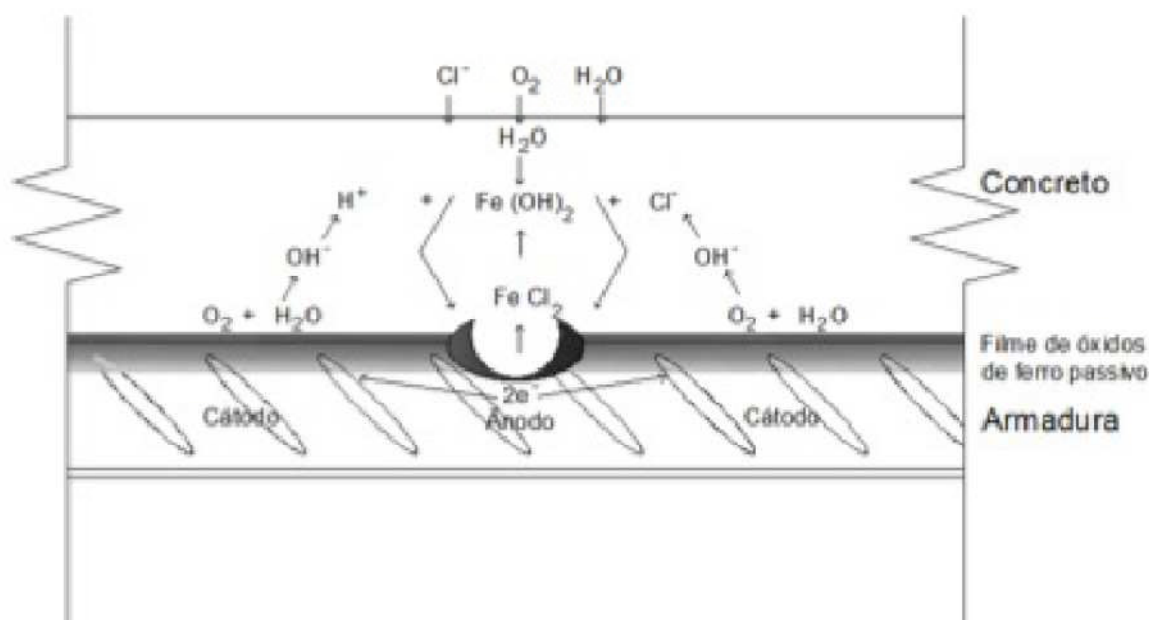


Figura 11 - Formação do pite de corrosão pela ação de cloretos (TREADAWAY, 1988)

Fonte: Boletim técnico nº 6/2013 Corrosão das armaduras de concreto da ALCONPAT

3.2 O tratamento do aço pelo processo de galvanização a fogo

Uma das medidas sugeridas, pela NBR 6118:2014, quando as estruturas são submetidas a condições adversas dentre outras é a galvanização da armadura. Em 2016, foi publicada pela ABNT a NBR 16300 - Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio.

Em 1741, o químico francês Melouin descobriu que o zinco era capaz de proteger o aço da corrosão. O método foi apresentado em uma reunião na Academia Real Francesa. Após a introdução da decapagem sulfúrica a 9% e a fluxagem com

cloreto de amônio como etapas anteriores e fundamentais ao processo, introduzidas por Sorel em 1837, é que o processo começou a se tornar viável tecnicamente. Já em 1850, a indústria de galvanização inglesa consumia 10.000t/ano de zinco na proteção do aço. Este processo é basicamente o mesmo utilizado até os dias de hoje.

3.2.1 O processo de galvanização a fogo

Galvanização por imersão a quente (por vezes chamada de galvanização a fogo) é um processo de aplicação de revestimentos de zinco a componentes de aço ou ferro fundido através da imersão do componente em um banho de zinco fundido.

No fluxograma abaixo são apresentadas as etapas do processo de galvanização.



Figura 12 - Fluxograma do processo de galvanização a fogo

Fonte: Adaptado do Guia de galvanização por imersão a quente do Instituto de Metais não ferrosos - ICZ.

Como o Zinco fundido encontra-se à uma temperatura em torno de 450°C, formam-se camadas inter-metálicas de Zinco, Zinco-Ferro no substrato aço. Desta maneira, o zinco penetra na rede cristalina do aço, formando uma única estrutura,

garantindo, assim, uma proteção contra a corrosão superior à uma barreira convencional.

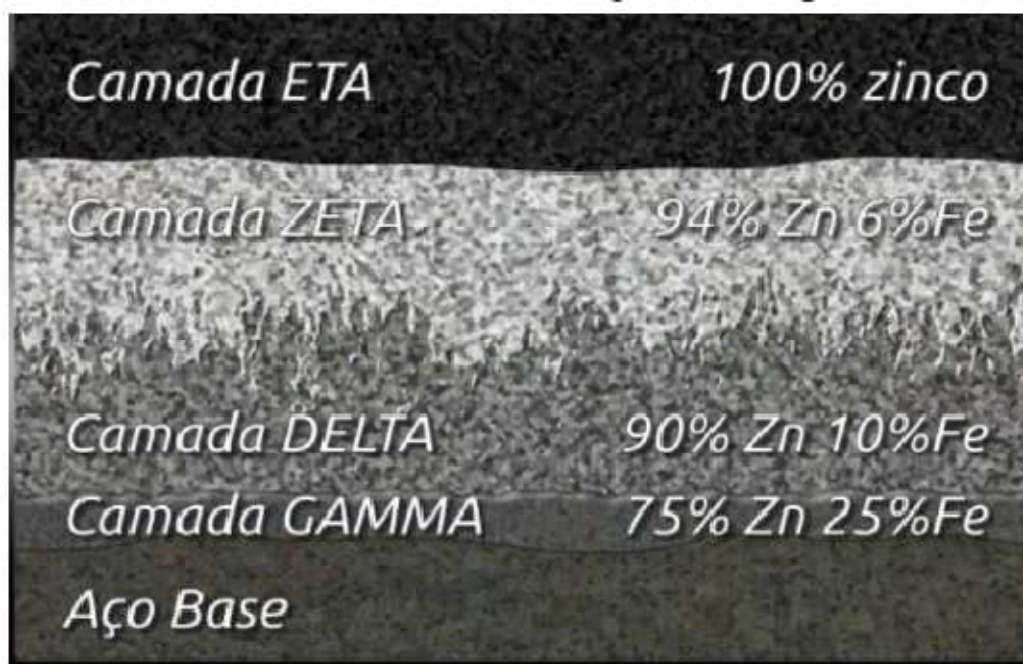


Figura 13 - Seção de um revestimento galvanizado típico.

Fonte: Manual para especificação da galvanização por imersão a quente

Segundo Pannoni, 2017, são varias as vantagens para este processo, sendo que destacam-se as mais relevantes para o caso de estruturas em concreto:

- Custo inicial competitivo. A galvanização a fogo, de modo geral, possui custos muito competitivos quando comparados a outras formas de proteção especificadas na proteção do aço;
- Vida longa. A expectativa de vida de revestimentos galvanizados aplicados sobre componentes estruturais excede facilmente os 40 anos em ambientes rurais e urbanos em ambientes agressivos, industriais ou marinhos, a vida do revestimento fica situada, de modo geral, entre 20 a 30 anos.
- Aderência. O revestimento obtido através da galvanização por imersão a quente esta ligado metalurgicamente ao substrato de aço;
- Contaminação ambiental. O revestimento não e tóxico é não contem substâncias voláteis;
- Proteção uniforme. Todas as superfícies de um componente galvanizado a fogo são protegidas tanto internamente quanto externamente, incluindo

rebaixos, cantos-vivos e áreas inacessíveis a aplicação de outros métodos de revestimento;

- Proteção de sacrifício em áreas danificadas. O revestimento de sacrifício fornece proteção catódica as pequenas áreas de aço expostas a atmosfera, como poros e riscos. Diferentemente dos revestimentos orgânicos, pequenas áreas danificadas não necessitam de retoques; a corrosão sob o revestimento não é possível quando se utilizam revestimentos de sacrifício.

Pannoni, 2017 também aponta algumas desvantagens das quais destacam-se as seguintes:

- A galvanização por imersão a quente não pode ser feita no canteiro de obras. O processo só pode ser feito em uma unidade industrial, a galvanizadora;
- As dimensões dos componentes ou estrutura a galvanizar são limitadas pelas dimensões da cuba de zinco líquido;
- A soldagem de componentes de aço galvanizados por imersão a quente pode demandar procedimentos diferentes daqueles demandados pelos aços não revestidos. A soldagem de componentes galvanizados resultará na perda, em algum nível, de parte da camada de revestimento. A camada é volatilizada durante o processo. Torna-se necessário, assim, o condicionamento do revestimento ao longo do cordão de solda e áreas adjacentes, através da metalização, da utilização de tintas ricas em zinco ou outro método.

3.3 O aço galvanizado e o concreto

Quando o aço galvanizado entra em contato com o concreto fresco ocorre a formação do hidroxizincato de cálcio (CaHZn) que irá passivar o zinco de superfície. Esta reação não dura mais do que uma hora e cessa assim que se inicia o endurecimento do concreto. O hidroxizincato de cálcio é um produto fibroso, apresenta uma elevada adesão química ao concreto. Resulta desta reação a liberação de hidrogênio. Neste processo, em torno de $10\mu\text{m}$ da camada de zinco pura (ETA) é dissolvida. Análises de barras retiradas de estruturas após longos períodos não indicaram mudanças significativas no recobrimento da camada de proteção das armaduras.

Segundo SR Yeomans, 2015 a liberação de hidrogênio pode afetar a aderência entre o concreto e o aço galvanizado. Porém extensas pesquisas tem

demonstrado que não há diferença na aderência do aço sem revestimento e o aço galvanizado com o concreto. O aspecto chave desta pesquisa demonstrou que a evolução do hidrogênio ocorre onde o ferro e o zinco estão em contato e não na superfície pura de zinco. Assim, a evolução do hidrogênio não será significativa se a camada externa for de puro zinco, situação normalmente encontrada em aços tratados pelo processo de imersão a quente. A produção de hidrogênio pode ser eficazmente eliminada com o tratamento do aço recém galvanizado com uma variedade de produtos sendo o mais comum o cromato.

O efeito do cromato na passivação de barras galvanizadas tem sido amplamente pesquisado. Os resultados destas pesquisas variam muito mostrando um benefício significativo, outros nenhum benefício ou mesmo uma redução em comparação com os as barras não tratadas. Uma possível explicação para essa variação é que o zinco tem um ligeiro atraso no efeito do endurecimento do concreto e muitas vezes estes testes são realizados em uma idade muito precoce (diga-se de sete dias de cura) quando, ainda, pode não ter se desenvolvido a sua plena aderência gerando resultados enganosos. O bom desempenho da barras não tratadas com cromato é atribuída a uma contínua formação de hidroxizincato de cálcio que cresce perpendicularmente a superfície galvanizada e funciona como uma camada protetora no concreto circundante. Estudos de longo prazo, cerca de 10 anos, demonstraram que mesmo na presença de cloretos não houve perda de aderência entre as a armaduras não tratadas com cromato e o concreto. Este trabalho indicou também que a geração de bolhas de hidrogênio (e a ausência de cromato de tratamento) não têm um efeito significativo na resistência de aderência. Conclui (SR Yeomans, 2015) que o tratamento com cromato pode melhorar mas não de forma significativa a aderência além do que a presença de pequenas quantidades de hidrogênio não tem um efeito perceptível nesta perda de aderência. Assim, o tratamento com cromato é perfeitamente dispensado. Deve-se observar que o cromato tem sido restringido por vários países na Europa e Estados Unidos por razões de saúde e ambientais.

3.4 A passivação do aço galvanizado

O zinco é um metal amorfo, ou seja, é estável em uma ampla faixa de pH, aproximadamente entre 6 e 12,5 mas, porém abaixo e acima destes valores a taxa de corrosão aumenta exponencialmente. O aço galvanizado torna-se passivado em

um valor de pH abaixo de 13.2 ± 1 . Tem-se que considerar ainda que uma vez que o filme passivo de hidroxizincato de cálcio (CaHZn) é formada, a sua estabilidade não é alterada, mesmo se o pH aumenta para um valor de 13,6. (SR Yeomans, 2015)

3.5 Influencia do tipo de cimento

O componente do cimento que mais influencia no comportamento de zinco, no meio alcalino, é o alcalóide de conteúdo (Na^+ e K^+). Estes íons alcalinos são incorporados ao cimento em proporções diferentes em função das matérias-primas e combustíveis utilizados na fabricação do cimento. Eles estão normalmente presentes na forma de sulfatos alcalinos. (SR Yeomans, 2015)

Como visto no item 4.1 o aço galvanizado torna-se passivado a um pH de 13.2 ± 1 se o pH atingir valores acima destes a camada passivadora não se desenvolve e o zinco continua a se dissolver. No entanto durante as primeiras horas após a mistura os valores são menores que 13.2 graças a presença dos íons sulfatos alcalinos na mistura. A taxa de corrosão do aço galvanizado incorporado em concretos, geralmente, cresce com o aumento da valores de pH dos cimentos, indicando um pH 12 como limite. Uma vez formada a camada passivadora de CaHZn o aumento do pH não é mais prejudicial para o aço galvanizado. Assim, a escolha do cimento adequado para aplicação em estruturas com armaduras galvanizadas é um fator a ser considerado.

3.6 Fissuração do revestimento galvanizado

Fissuração da camada de zinco na dobra ou flexão das armaduras galvanizadas a fogo é uma das principais preocupações dos engenheiros.

Como já visto no item 3.2., a estrutura de revestimento é composta por camadas de ligas zinco ferro e zinco puro. Durante a flexão, a camada exterior de zinco puro é tracionada, enquanto as camadas de ligas são comprimidas gerando, assim, fissuras no revestimento galvanizado.

Fissuras no revestimento galvanizado ocorrem perpendicularmente ao comprimento da barra. Essas fissuras podem comprometer a durabilidade das armaduras.

Descamação do revestimento pode ocorrer se a flexão é muito grave e, como regra geral, os produtos que têm uma espessura de revestimento maior que 250 microns não deve ser dobrado.(SR Yeomans, 2015).

A NBR 16300:2015 recomenda uma massa de zinco depositada por unidade de área não pode ser inferior a 84µm para barras de aço com $d > 6\text{mm}$. Camadas superiores podem ser utilizadas desde que previamente acordadas entre cliente e produtor.

SR Yeomans, 2015 faz a seguinte consideração quanto a curvatura das barras: "Embora o flexibilidade das barras galvanizadas seja ligeiramente alterada, em relação a barra não revestida, para minimizar a fissuração do revestimento galvanizado são recomendadas as seguintes curvaturas mínimas para dobramento a 90°:"

- até 16 mm de diâmetro da barra - $5\emptyset$
- maior que 16 mm de diâmetro da barra - $8\emptyset$

Fusco, 1995, apresenta algumas recomendações para curvatura de ganchos, estribos e dobras para aço não revestido, conforme tabela abaixo:

Tabela 11 - Diâmetro interno de curvatura - ganchos, estribos e dobras. Fonte Fusco, 1995

Tipo	Bitola (mm)	CA-25	CA-60	CA-50	CA-60
Estribos	$\emptyset \leq 6,3$	$3\emptyset$	$3\emptyset$	$3\emptyset$	$3\emptyset$
Ganchos estribos e dobras	$\emptyset < 20$	$3\emptyset$	$4\emptyset$	$5\emptyset$	$6\emptyset$
	$\emptyset \geq 20$	$5\emptyset$	$6\emptyset$	$8\emptyset$	-

Fonte Fusco, 1995

A tabela acima mostra que os mesmos procedimentos para aço sem tratamento podem ser especificados para o aço galvanizado sem maiores problemas.

Uma boa medida para evitar o fissuramento nas dobras é a produção das peças antes do processo de galvanização.

Na prática, portanto, é mais seguro galvanizar as barras após o dobramento e isso deve ser considerado.

Yeomans, 2015 observa que barras com dois anos de uso foram analisadas e que em 100% dos casos sinais de oxidação não foram identificados. Isto se deve, principalmente, pelo fenômeno da proteção anódica que é produzida pelo zinco.

3.7 A carbonatação

Pesquisas, junto com observações de campo, provaram que a carbonização não aumenta significativamente o índice de corrosão de barras galvanizadas dentro do concreto, e, em alguns casos, este índice foi até mesmo reduzido. A observação geral é a de que aço galvanizado não sofre corrosão dentro de concreto carbonizado. (SR Yeomans, 2015)

O pH do zinco esta na faixa de 6 a 12.5. O pH da fase líquida muda de altamente alcalino para valores muito próximos do neutro (pH 7). Ocorre que o índice de corrosão do zinco é muito baixo e, portanto, a cobertura galvanizada resiste muito bem.

3.8 O aço galvanizado na presença de cloretos

Assim como o aço não revestido, o aço galvanizado também esta sujeito ao ataque dos íons cloreto. A camada passivadora formada pelo hidroxizincato oferece uma grande proteção contra a penetração de cloretos. Rompida esta camada passivadora e quando as camadas ETA e ZETA (Fig. 11) estão sob o ataque de cloretos as camadas GAMMA e DELTA (Fig. 11) continuam intactas o que, ainda, garante uma proteção contra a corrosão. Consumida todas as camadas inicia-se a proteção anódica do zinco sobre distancias de 8mm. Os minerais encontrados nos produtos da corrosão incluem, na maior parte óxido e hidróxido de zinco. Uma característica única destes produtos é que eles são minerais quebradiços (soltos e em pó), são menos volumosos que os produtos da corrosão rica em ferro e podem migrar para fora da barra e para dentro da matriz de concreto adjacente onde eles preenchem poros e microfissuras.

SR Yeomans, 2015, observa que ao contrário do que foi observado em aços corroídos no concreto, a presença dos produtos resultantes da corrosão do zinco causa poucas rachaduras físicas no entorno da matriz de cimento, portanto mantendo a integridade da camada de concreto. Também existem evidências de que a presença destes produtos da corrosão e o preenchimento dos poros na matriz podem criar uma barreira que reduz a permeabilidade, o que aumenta tanto a adesão da matriz na barra quanto reduz o transporte de espécies agressivas como cloretos.

Esta resistência ao processo de corrosão ao aço é conhecido como a extensão da vida útil da armadura. A resistência a corrosão das armaduras galvanizadas é de 4 a 5 vezes superior ao das armaduras sem proteção.

SR Yeomans, 2015, demonstra da seguinte forma:

Para o aço preto, assume-se um limiar superior de 0,4% Cl^- por massa de cimento; e para aço galvanizado, assume-se um limiar inferior de 1,0% Cl^- baseado em experimentos conservadores e dados de campo.

Para o cálculo, assume-se uma exposição equivalente a do concreto em ambientes marítimos:

- Concentração de 0,35% de cloreto de íon na superfície do concreto;
- Recobrimento de 30 mm para as armaduras;
- Coeficiente de difusão = $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

Neste sentido, a segunda lei de Fick's prevê que a corrosão do reforço de aço preto começará em 15 anos, enquanto que para aço galvanizado, o processo de corrosão começará dentro de 44 anos. Isso indica que a vida útil de barras galvanizadas é cerca de 3 vezes maior do que a de barras de aço preto.

A taxa de corrosão do zinco (e de seus inter metálicos) é função das características da atmosfera. De modo geral, a perda metálica fica situada entre 0,5 a 3 $\mu\text{m}/\text{ano}$, o que faz com que um revestimento típico de zinco, com, no mínimo, 84 μm (mesmo considerado pela NBR 16300) de espessura, garantira proteção do aço por 40 anos ou mais. A tabela 12 abaixo, apresenta taxas de corrosão do zinco para diferentes ambientes do Brasil (Pannoni, 2015)

Tabela 12 - Taxas de corrosão de zinco em diferentes regiões do Brasil, Pannoni, 2015

Local	Taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$)		Razão aço/zinco	Tempo de exposição em anos
	Aço	Zinco		
Caratinga, MG	6,6	0,43	15,3	4
Belém, PA	17,3	1,18	14,7	2
Brasília, DF	8,7	1,12	7,8	2
Paulo Afonso, BA	17,3	1,6	10,8	1
Porto Velho, RO	4,3	2,0	2,2	2
São Paulo, SP	8,3	1,16	7,2	4
Ipatinga, MG	24,7	0,60	41,2	4
Cubatão, SP	85,2	0,94	90,6	4
Arraial do Cabo, RJ	437,7	1,74	251,6	4
Ubatuba, SP	400,3	2,08	192,5	4
Rio de Janeiro, RJ	58,5	1,21	48,3	4

Fonte: Manual de Projeto e Durabilidade - Instituto do Aço (2017)

4 O CUSTO NA CONSTRUÇÃO

Como já discutido, nos itens anteriores, a corrosão nas armaduras tem sido a mais grave e desafiadora patologia a ser controlada nas estruturas de concreto.

A qualidade do concreto e a espessura de cobrimento garantem uma boa proteção às armaduras e podem levar anos até que o processo de corrosão se instale (Odd E Gjør, 2015). Pode ser esta uma das razões pelas quais, muitas vezes, um processo adicional de proteção às armaduras seja ignorado. Agregar técnica eleva o preço inicial do empreendimento.

O fato é que patologias responsáveis pela corrosão nas armaduras não são perceptíveis e quando se manifestam, em geral, requerem uma manutenção corretiva, o que pode corresponder a 125 vezes o custo da fase de projeto isto quando já não provocaram o colapso da estrutura.

A Lei de Sitter, representada no gráfico da figura 15, demonstra isto.

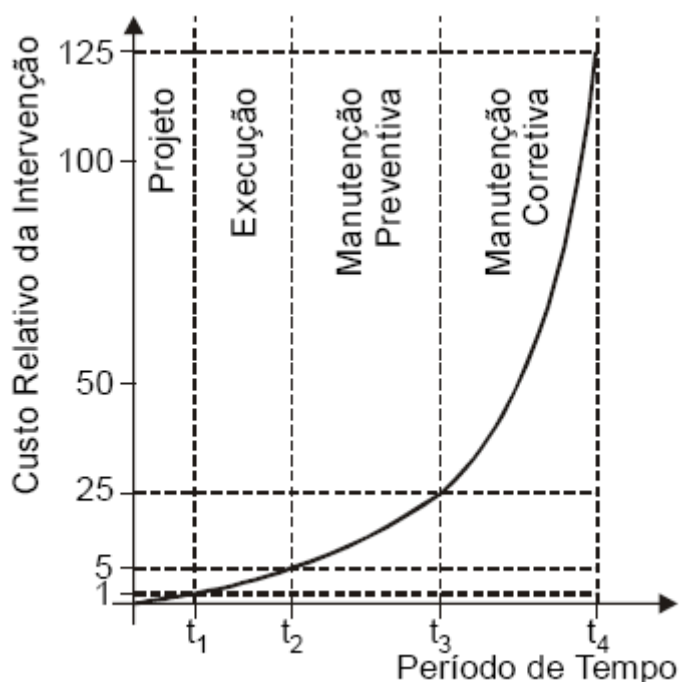


Figura 14 - Lei de Sitter

Fonte: <https://www.tecconursos.com.br/conteudo/questoes/187848>

Assim a pergunta a ser respondida pela engenharia de projeto e planejamento é muito simples: Quanto custa um sistema de proteção das armaduras pelo processo de imersão a quente?

Na tabela 13 são apresentados o consumo de aço para a execução de um de um edifício de múltiplos andares construído em concreto armado. Os dados para análise foram retirados de um projeto executado.

Tabela 13 - Análise dos custos de uma construção

	Consumo	Custo unitário	Custo Total
Área total construída	1.743,08m ²	R\$ 1.396,61/m ² (1)	R\$ 2.432.659,88
Consumo total de aço CA 50 e CA 60	13.896,40kg	R\$ 3,72/kg (2)	R\$ 51.694,61
Serviços de galvanização por imersão a quente	13.896,40kg	R\$ 2,80/kg (3)	R\$ 38.909,92
1- Valor referente ao CUB base maio/2017, fonte SINDUSCON PR 2 - Valor médio do vergalhão cortado e dobrado base abril/2017, fonte SINAPI 3 - Pesquisa de mercado base maio/2017 na região de Curitiba - PR			

Analisando os valores observamos que o peso do valor do aço em comparação ao custo global da construção é de apenas 2,12% e com revestimento galvanizado este percentual sobe para 3,72%. O custo de uma proteção adicional ao aço é perfeitamente justificável do ponto de vista financeiro além do que se considerar o exemplo do item 4.5 o tempo t3 do gráfico da figura 15 representaria a idade de 15 anos para a uma armadura sem proteção e de 44 anos para a armadura galvanizada.

Para um projeto de durabilidade variáveis como a ação ambiental, qualidade do concreto, cobrimento das armaduras e sistemas de proteção adicionais devem ser consideradas e quando compatibilizadas vão, sem dúvida, melhorar consideravelmente os percentuais da tabela 13, tornando a solução ainda mais atrativa.

A aplicação de processos mais robustos de proteção das armaduras, como a galvanização por imersão a quente, é sem dúvida um medida a ser considerada em um projeto de durabilidade.

5 O USO DAS ARMADURAS GALVANIZADAS A FOGO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

A aplicação de armaduras com tratamento galvanizado a fogo vem sendo empregada, com sucesso, em diversas estruturas ao redor do mundo desde a década de 30.

Nas Bermudas a utilização deste tipo de tratamento é regular sendo que em 1995 foi inspecionada uma estrutura, Ponte Longbird, então com 42 anos onde foram constatados teores de cloreto na ordem de 1 a 4 kg/m³ no concreto sendo que as armaduras galvanizadas a fogo ainda tinham espessura de revestimento de zinco muito além do valores previsto pela especificação. No Estados Unidos o emprego de armaduras galvanizadas em pontes tem apresentando resultados muito além dos esperados. Na Austrália destaca-se o Sydney Opera House com painéis de 35mm de espessura para proteção da cobertura em forma de vela e dois diques do edifício. Na Europa, o Teatro Nacional de Londres utilizou mais de 1000t em barras de aço galvanizadas em paredes de parapeitos expostos. Na Ásia foram utilizados 10.000m de vergalhões galvanizados no sistema de túneis profundos em redes de saneamento. No Canadá foi utilizado em piso de pontes na cidades de Ontário e Quebec. No Brasil o uso de vergalhões galvanizados também tem sido utilizados em algumas obras a primeira que tem-se noticia foi o Museu Irerê Camargo em Porto Alegre no ano de 2008. Recentemente foram utilizados vergalhões galvanizados a fogo na laje que simula uma maré no Museu de Arte do Rio de Janeiro. O Instituto Moreira Sales, em São Paulo, também esta utilizando esta técnica em um prédio que contará com 14 andares.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde que foi introduzido na construção civil o concreto armado tem sido um grande aliado no desenvolvimento dos mais variados tipos de estruturas. A utilização deste material parece não ter limites para a criatividade de engenheiros e arquitetos. Porém o que tem-se visto é uma atenção voltada, em sua grande maioria, para o elemento concreto acreditando que as características deste elemento serão suficientes para a manutenção das propriedades do aço.

Ainda que o concreto seja um produto de técnica dominada e bastante desenvolvida é um material que sempre apresentara uma característica independente do tipo de aglomerante e agregados utilizados.. Esta propriedade é a sua porosidade, o concreto sempre será permeável. Assim estará sujeito as variações da atmosfera do ambiente onde esta inserido e ao ataque dos agentes agressivos reduzindo significamente a sua capacidade de proteger o aço. É consenso na comunidade técnica que um dos grandes desafios tem sido o controle da corrosão do aço. Esforços na melhoria da qualidade e o desenvolvimento dos mais variados tipos de cimento, projetos com critérios mais rigorosos e melhorias no controle tecnológico não tem sido suficiente para minimizar está patologia que tem sido responsável pela degradação, muitas vezes, precoce das estruturas.

A introdução do conceito da durabilidade nas construção civil alguns paradigmas vem sendo quebrados. A utilização de técnicas, já consagradas, como o processo de galvanização por imersão a quente é um deles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Artigo, **Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho: estudo de caso**, Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

Artigo, **Estudo Teórico do processo corrosivo da ponte sobre o rio Calhau na Av. Litorânea em São Luís - MA**. Disponível em <http://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/5/4940-16756.html>. Acesso em 13/04/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16300:2016** Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2016

Boletim Técnico, **Corrosão nas armaduras de concreto**, Enio Pazini Figueiredo e Gibson Meira, ALCONPAT (Asociación Latino americana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción), 2013

Cimentos Itambé. Disponível em <<http://www.cimentoitambe.com.br/area-tecnica/>>. Acesso em 22/03/2017.

CUB SINDUSCON-PR, disponível em <https://sindusconpr.com.br/>, acessado em 10/06/2017

Fusco, Péricles Brasiliense, **Técnica de armar as estruturas de concreto**/Péricles Brasiliense Fusco - São Paulo: Pini, 1995

Gjorv, Odd E., **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**/Odd E. Gjorv; revisão técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene; tradução Leda Maria Marques Dias Beck. - São Paulo: Oficina de Textos, 2015

Gráfico da Lei de Sitter disponível em <https://ecivilufes.wordpress.com/tag/desempenho/>, acessado em 10/06/2017.

Helene, Paulo R. L., **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**/Paulo Helene; (consultor Mauricio Gerschenstein; coordenação Paulo Sérgio F. Oliveira, Fernando A. P. Guimarães, Sérgio Guerra) - 2º ed. - São Paulo: Pini, 1992

Obras 24 horas. Disponível em <http://www.obra24horas.com.br/materias/construcao/reacoes-expansivas-atingem-edificacoes-urbanas>

Pannoni, Fabio Domingos, **Projeto e durabilidade** - Rio de Janeiro, Instituto Aço Brasil / CBCA, 2017.

Pannoni, Fabio Domingos, **Projeto e durabilidade** - Rio de Janeiro, Instituto Aço Brasil / CBCA, 2017.

Pini Disponível em <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/212/artigo332558-2.aspx>. Acesso em 13/04/2017.

Projeto de durabilidade, manual da construção, CBCA por Fabio Domingos Pannoni, Rio de Janeiro, 2017 disponível em <http://www.cbca-iabr.org.br>

Rodrigo Carvalho Engenharia de Estruturas. Disponível em: <http://rodrigocarvalho.com.br/artigos/patologias-em-concreto-armado/>. Acesso em 12/04/2017.

SINAPI. Disponível em [,http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_655](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_655), acessado em 10/06/2017

SANEPAR: Disponível em <http://sanepar.com.br/sanepar/sanare/v16/SULFETOS.htm>. Acesso em 12/04/17.

Silva, Paulo Fernando Araújo, **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**/Paulo Fernando Araújo Silva - São Paulo: Pini, 1995

Souza, Vicente Custódio de, **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**/Vicente Custódio Moreira de Souza e Thomaz Ripper. - São Paulo, Pini 1998

Stephen R Yeomans, **Galvanized steel reinforcement in concrete**, SR Yeomans (Editor) Elsevier, 2004

Manual para especificação da galvanização por imersão a quente, Instituto de metais não ferrosos, ICZ, 2015, disponível em www.icz.org.br,

Projeto de durabilidade, manual da construção, CBCA por Fabio Domingos Pannoni, Rio de Janeiro, 2017 disponível em <http://www.cbca-iabr.org.br>

SINAPI, disponível em [,http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_655](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_655), acessado em 10/06/2017