

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Durabilidade do concreto armado em indústrias
siderúrgicas: contribuição à identificação e
mapeamento dos agentes agressivos**

Edson de Oliveira Lima

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

CO-ORIENTADOR:

Prof. Dr. Eng. Paulo Helene

Vitória
Julho de 2000

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento dos agentes agressivos

Edson de Oliveira Lima

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em __/__/00 por:

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama – Orientador, UFES

Prof. Dr. Eng. Paulo Helene – Co-orientador, USP

Prof. Dra Moema Ribas Silva - Visitante

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Ào Thiago

AGRADECIMENTOS

Posso afirmar, que um trabalho desta natureza, não o faria caso não pudesse contar com as significativas colaborações recebidas. Estas colaborações são de diversas naturezas. Tanto as de natureza prática como fornecimento de dados, orientações, sugestões e tantas outras, quanto as de natureza psicológica que nos momentos mais difíceis me refizeram a disposição para seguir em frente.

Difícil, também, seria discriminar todos os nomes sem cometer a injustiça de deixar algum fora desta relação.

Neste sentido, agradeço ao Prof. Calmon, pelo incentivo, amizade, paciência, dedicação e competência, sabendo dosar os momentos de incentivo e de cobrança durante a orientação deste trabalho. Ao Prof. Calmon cabe também um agradecimento especial, por considerá-lo o principal responsável pela existência deste mestrado.

Ao também amigo, Prof. Paulo Helene, que mesmo à distância e com todas as atribuições que lhe são devidas, não mediu esforços na co-orientação deste trabalho.

Aos professores do mestrado, em especial ao Prof. Fernando Lordello e à Prof. Moema pelas valiosas colaborações com opiniões técnicas além da ajuda na pesquisa bibliográfica.

À CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão que permitiu o acesso às suas instalações e prestou as informações que tornaram possível a realização deste trabalho; cabe, também, destacar todos os meus colegas de trabalho da CST, que não mediram esforços para fornecerem dados e informações quando solicitados.

À BIOS Editoração Eletrônica, principalmente à Beatriz, pela grande colaboração com os serviços de editoração.

Ao Prof. Chandra pela atenção ao enviar-me da Suécia um exemplar de sua publicação que foi de grande importância na elaboração deste trabalho.

Aos Prof. Fernández Cánovas e Oswaldo Cascudo pelas opiniões relativas aos mecanismos de deterioração das estruturas.

A minha família e, em especial, a meu filho Thiago.

Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento dos agentes agressivos

Lima, Edson de Oliveira ⁽¹⁾

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE FOTOGRAFIAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO	2
1.2. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA	3
1.3. OBJETIVOS E HIPÓTESES	4
1.3.1. Objetivo Geral	4
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.3.3. Hipóteses.	5
1.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA	6
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6

CAPÍTULO 2 – DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

2.1. APRESENTAÇÃO	9
2.2. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	9
2.2.1. Corrosão das Armaduras	11
2.2.1.1. Eletrólito	11
2.2.1.2. Diferença de Potencial	12

⁽¹⁾ Engenheiro Civil da CST, mestrando do PPGE/UFES, Vitória, ES, Brasil
e-mail: elima@tubarao.com.br

2.2.1.3. Oxigênio	13
2.2.1.4. Agentes Agressivos	14
2.2.1.5. Outras Considerações sobre a corrosão das Armaduras no Concreto Armado	15
2.2.2. Deterioração do Concreto	17
2.2.2.1. Fatores que Influenciam a Durabilidade do Concreto	18
2.2.2.2. Mecanismos de Deterioração do Concreto	23
2.3. CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO	35
2.3.1. Classificação dos Ambientes segundo a BSI 7543 (1992)	36
2.3.2. Classificação dos Ambientes segundo a o CEB (1992)	36
2.3.3. Classificação dos Ambientes segundo HELENE (1997a;1997b;1998)	40
2.3.4. Classificação dos Ambientes segundo ACI (1993)	41
2.3.5. Classificação dos Ambientes segundo CETESB (1988)	41
2.3.6. Classificação dos Ambientes segundo a EHE (1999)	43
2.3.7. Classificação dos Ambientes segundo ABNT/NBR6118:2000 (2000)	46
2.4. CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS QUANTO À DURABILIDADE	49
2.4.1. Classificação do Concreto segundo a EHE (1999)	51
2.4.2. Classificação do Concreto segundo a ABNT/NBR 6118:2000 (2000)	52
2.5. CONSIDERAÇÕES	53

CAPÍTULO 3 – IDENTIFICAÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGENTES AGRESSIVOS AO CONCRETO EM USINAS SIDERÚRGICAS

3.1. APRESENTAÇÃO	56
3.2. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO	56
3.2.1. Recebimento e Preparação de Matérias Primas	57
3.2.2. Sinterização	58
3.2.3. Coqueria	58
3.2.3.1. Unidades Complementares	58
3.2.4. Alto Forno	59
3.2.4.1. Unidades Auxiliares	59
3.2.5. Aciaria	59
3.2.6. Outras Unidades - Utilidades	60

3.3. AGRESSIVIDADE POTENCIAL, AO CONCRETO ARMADO, NAS DIFERENTES ETAPAS DO PROCESSO	60
3.3.1. Metodologia	62
3.3.2. Uma Visão Geral	62
3.3.3. Casos Específicos	66
3.3.3.1. Recebimento e Armazenamento de Matérias Primas	66
3.3.3.2. Sinterização	66
3.3.3.3. Coqueria	67
3.3.3.4. Alto Forno	68
3.3.3.5. Aciaria	68
3.3.4. Unidades Identificadas com Grande Potencial de Agressividade ao Concreto Armado, tendo em vista exemplos de Unidades da CST	69
3.3.4.1. Unidades de Granulação e Resfriamento de Escória de Alto Forno.	69
3.3.4.2. Muro do Pátio de Escória	71
3.3.4.3. Poço de Basculamento de Gusa	72
3.3.4.4. Unidade de Resfriamento de Placas	72
3.3.4.5. Estação de Água Desmineralizada	73
3.3.4.6. CRAAF – Centro de Recirculação de Água do Alto Forno ...	73
3.3.4.7. Tanques e Torres de Resfriamento de Concreto	73
3.3.4.8. Chaminés em Concreto Armado	73
3.3.4.9. Análise da água Circulante em Algumas Unidades da CST .	74
3.3.4.10. Dados Complementares da CST	75
3.4. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS AGENTES AGRESSIVOS AO CONCRETO ARMADO E SUA LOCALIZAÇÃO	77
3.5. CONSIDERAÇÕES	79

CAPÍTULO 4 – CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS E UNIDADES DA CST CONFORME O GRAU DE AGRESSIVIDADE AO CONCRETO ARMADO

4.1. APRESENTAÇÃO	82
4.2. EXEMPLOS DE ESTUDOS E DIAGNÓSTICOS	82
4.2.1. Ensaio Realizados	84
4.2.1.1. Inspeção Visual	84
4.2.1.2. Profundidade de Carbonatação	84

4.2.1.3.	Potenciais de Corrosão	84
4.2.1.4.	Resistividade Elétrica	85
4.2.1.5.	Teor de Cloretos	85
4.2.1.6.	Medição das Temperaturas nas Faces do Concreto	87
4.2.2.	Dados das Estruturas Ensaçadas, Resultados e Diagnósticos ...	87
4.2.2.1.	Unidade 1 – Torres de Carvão I e II da Coqueria	87
4.2.2.2.	Unidade 2 – Prédio da Administração Central	88
4.2.2.3.	Unidade 3 – Torre de Resfriamento de Água da Granulação de Escória 1	89
4.2.2.4.	Unidade 4 – Reservatórios de Água Industrial	90
4.2.2.5.	Unidade 5 – Tomadas de Água do Mar	91
4.2.2.6.	Unidade 6 – Tanques de Alcatrão	92
4.2.2.7.	Unidade 7 – Casa de Bombas de Água do Mar	93
4.2.2.8.	Unidade 8 – Decantadores de Alcatrão	93
4.2.2.9.	Unidade 9 – Muro do Pátio de Escória	94
4.2.2.10	Unidade 10 – Poço de Gusa	95
4.2.3.	Considerações sobre os ensaios realizados	95
4.3.	VIDA ÚTIL NAS DIVERSAS ÁREAS	96
4.3.1.	Obras onde Foram Efetuados Ensaios e Estudos e Diagnósticos do Estado de Deterioração do Concreto Armado .	96
4.3.2.	Obras Onde Foram Identificadas Manifestações Patológicas Significativas e que Dependem de Estudo e Diagnóstico para a Recuperação	97
4.4.	GASTOS COM RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ..	98
4.4.1.	Custos Reais de Recuperação das Obras nas quais fizeram-se Estudos e Diagnósticos	98
4.4.2.	Custos Estimados com Recuperação de Unidades Inspeccionadas	99
4.5.	CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS E UNIDADES CONFORME O GRAU DE AGRESIVIDADE AO CONCRETO ARMADO	99
4.5.1.	Classificação do Macro Clima	100
4.5.2.	Classificação de Áreas Específicas da CST segundo a Norma L1.007 da CETESB (1998), a Norma EHE (1999) e o Projeto de Norma NBR6118:2000 (2000)	102
4.5.2.1.	Granulação de Escória 1 do Alto Forno 1 da CST	103
4.5.2.2.	Tanque de Água Desmineralizada da CST	105
4.5.2.3.	Estação de Tratamento Biológico (ETB) da CST	106
4.5.2.4.	Sistema de Lavagem de Gás do Alto Forno da CST	108

4.6. CONSIDERAÇÕES	109
--------------------------	-----

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

5.1. APRESENTAÇÃO	112
5.2. RECOMENDAÇÃO PARA NOVAS CONSTRUÇÕES.....	112
5.2.1. Projeto	112
5.2.2. Construção	113
5.3. RECOMENDAÇÕES PARA INPEÇÃO E MANUTENÇÃO PERIÓDICA ..	114
5.4. CONCLUSÕES	115
5.4.1. Conclusões Baseadas nas Hipóteses	115
5.4.2. Conclusões Propriamente Ditas	116
5.5. TRANSFERÊNCIA AO MEIO	117
5.6. CONTINUIDADE DOS ESTUDOS.....	118
ANEXO 1	119
ANEXO 2	122
ANEXO 3	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AÇOMINAS	Aço Minas Gerais
ASTM	American Society for Testing & Materials
BFG	Blast Furnace Gas – Gás de Alto Forno
BSI	British Standard Institution
CDQ	Coke Dry Quenching – Apagamento a Seco de Coque
CETESB	Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental
CEB	Comite Euro-International du Béton
CIB	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CMN	Comité Mercosur de Normalizacion
COG	Coke Gas Oven – Gás de Coqueria
CRAAF	Centro de Recirculação de Água do Alto Forno
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
ETB	Estação de Tratamento Biológico
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IISI	International Iron and Steel Institute
ILAFA	Instituto Latino-Americano del Fierro Y Acero
ISO	International Organization for Standardization
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
NBR	Norma Brasileira
PCI	Powder Coal Injection – Injeção de Finos de Carvão
PPGEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essai et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UNEP	United Nations Environment Programme Industry
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas Minas Gerais S/A
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Pilha ou célula de corrosão eletroquímica no concreto	14
Figura 2.2: Modelo de vida útil proposto por TUUTTI	16
Figura 2.3: Alguns fatores que podem influenciar na durabilidade do concreto (A)	19
Figura 2.4: Alguns fatores que podem influenciar na durabilidade do concreto (B)	19
Figura 2.5: Causas físicas da deterioração do concreto	23
Figura 2.6: Deterioração do concreto por reações químicas	24
Figura 2.7: Termograma do muro do pátio de escória da CST	26
Figura 2.8: Efeito do tipo de agregado e condições de ensaio na resistência ao fogo	28
Figura 2.9: Profundidades de neutralização de corpos de prova de concreto expostos a CO_2 e CO_2/SO_2	34
Figura 3.1: Fluxo de produção da CST	57
Figura 3.2: Balanço energia/materiais para usina integrada	64
Figura 3.3: Balanço energia/materiais para sinterização	64
Figura 3.4: Balanço energia/materiais para coqueria	65
Figura 3.5: Balanço energia/materiais para alto forno	65
Figura 3.6: Balanço energia/materiais para a aciaria	66
Figura 4.1: Ilustração esquemática de área de ensaio com dimensões típicas definidas para a inspeção detalhada	84

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1: Parede do Poço de Gusa da CST durante basculamento de escória e o resultado da termografia executada no momento do basculamento e 10 minutos após	12
Fotografia 3.1: Vapor atingindo pilar de concreto	67
Fotografia 3.2: Poço de resfriamento de escória ao ar livre	69
Fotografia 3.3: Detalhes da torre de resfriamento da granulação de escória.....	71
Fotografia 3.4: Muro do Pátio de Escória e equipamento utilizado para retirada da escória resfriada atingindo o concreto por impacto.....	71
Fotografia 3.5: Pilares do resfriador de placas, parado para inspeção e recuperação	72
Fotografia 3.6: Chaminé da sinterização da CST	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1:	Mecanismos de deterioração das estruturas de concreto	10
Quadro 2.2:	Classificação dos agentes agressivos e seus efeitos sobre o concreto	24
Quadro 2.3:	Fenômenos de dissolução e lixiviação no concreto devido aos gases poluentes	33
Quadro 2.4:	Agentes que podem influenciar a vida útil dos componentes e dos materiais de construção segundo BSI 7543 (1992).	36
Quadro 3.1:	Emissões em Unidades de Processos Siderúrgicos	63
Quadro 3.2:	Composição química média das escórias de alto forno da CST	69
Quadro 3.3:	Principais efeitos dos agentes agressivos ao concreto armado identificados em usinas siderúrgicas ...	77
Quadro 4.1:	Relação de obras ensaiadas na CST e os respectivos ensaios realizados	83
Quadro 4.2:	Inspeção visual realizada na obra tomadas de água do mar	92
Quadro 5.1:	Roteiro para se obter informações para projeto, visando a durabilidade das estruturas em indústrias siderúrgicas	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de exposição do concreto relativas às condições ambientais segundo o CEB (1992)	38
Tabela 2.2: Classes de exposição da armadura relativas às condições ambientais segundo o CEB (1992)	39
Tabela 2.3: Níveis do grau de agressividade de ataque químico ao concreto por água e solos que contém agentes agressivos segundo o CEB (1992)	39
Tabela 2.4: Classificação da agressividade ambiental segundo HELENE (1997a)	40
Tabela 2.5: Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras segundo HELENE (1997a)	40
Tabela 2.6: Classificação da agressividade do ambiente sobre o concreto segundo HELENE (1997a)	40
Tabela 2.7: Efeito dos elementos mais comuns sobre o concreto segundo ACI (1993)	41
Tabela 2.8: Tipos de agressividade e valores limites para a avaliação do grau de agressividade segundo CETESB (1988)	42
Tabela 2.9: Classes especiais de exposição relativas à corrosão das armaduras segundo a EHE (1999)	44
Tabela 2.10: Classes especiais de exposição relativas a outros processos distintos da corrosão segundo a EHE (1999)	45
Tabela 2.11: Classificação da agressividade química segundo a EHE (1999)	46
Tabela 2.12: Classes de agressividade ambiental segundo NBR6118:2000 (2000)	47
Tabela 2.13: Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição segundo NBR6118:2000 (2000) ...	47
Tabela 2.14: Classificação da agressividade do ambiente visando a durabilidade do concreto segundo NBR6118:2000 (2000)	48
Tabela 2.15: Comparação entre normas de alguns parâmetros de agressividade ao concreto	50
Tabela 2.16: Cobrimentos mínimos segundo a EHE (1999)	51

Tabela 2.17: Máxima relação água/cimento e quantidade mínima de cimento segundo a EHE (1999)	52
Tabela 2.18: Resistências mínimas compatíveis com os requisitos de durabilidade segundo a EHE (1999)	52
Tabela 2.19: Correspondência entre classes de agressividade e qualidade do concreto conforme ABNT/NBR 6118:2000 (2000)	52
Tabela 2.20: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal conforme ABNT/NBR 6118:2000 (2000)..	53
Tabela 3.1: Resultados dos ensaios realizados para determinação da agressividade do meio aquoso, em contato com o concreto, em quatro unidades da CST	75
Tabela 3.2: Principais projetos ambientais já realizados na CST	77
Tabela 4.1: Limites de Normas para os teores de cloretos (cloretos totais), segundo normalizações vigentes em diversos países	86
Tabela 4.2: Ensaios realizados na obra Torres de Carvão I e II da Coqueria	88
Tabela 4.3: Ensaios realizados na obra Prédio da Administração Central....	89
Tabela 4.4: Ensaios realizados na Torre de Resfriamento de Água da Granulação de Escória 1	90
Tabela 4.5: Ensaios realizados na obra Reservatórios de Água Industrial ...	91
Tabela 4.6: Ensaios realizados na obra Tanques de Alcatrão	92
Tabela 4.7: Ensaios realizados na obra Casa de Bombas de Água do Mar..	93
Tabela 4.8: Ensaios realizados na obra Decantadores de Alcatrão	94
Tabela 4.9: Ensaios realizados na obra Muro do Pátio de Escória	94
Tabela 4.10: Ensaios realizados na obra Poço de Gusa	95
Tabela 4.11: Tempo decorrido entre o início de utilização das estruturas e a constatação da necessidade de intervenção para recuperação	97
Tabela 4.12: Tempo decorrido entre o início de utilização das estruturas e a constatação da necessidade de intervenção para recuperação através de inspeção visual	97
Tabela 4.13: Gastos com recuperação da estrutura de concreto de unidades da CST	98

Tabela 4.14: Custos estimados com recuperação das unidades inspecionadas da CST	99
Tabela 4.15: Classificação do macro ambiente da CST quanto a agressividade ao concreto armado segundo a EHE (1999).	101
Tabela 4.16: Classificação do macro ambiente da CST quanto a agressividade ao concreto armado segundo a ABNT/NBR 6118:2000 (2000).	101
Tabela 4.17: Classificação da agressividade ao concreto da água circulante na Granulação de Escória do Alto Forno 1 da CST.	104
Tabela 4.18: Classificação da agressividade ao concreto da água desmineralizada da CST.	106
Tabela 4.19: Classificação da agressividade ao concreto da água circulante no sistema de tratamento biológico da CST	107
Tabela 4.20: Classificação da agressividade ao concreto da água no Sistema de Lavagem de gás do Alto Forno 1 da CST	108

Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento dos agentes agressivos

Lima, Edson de Oliveira ⁽¹⁾

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é um tema bastante complexo que envolve variáveis como meio ambiente, projeto, materiais, processo construtivo e utilização e manutenção das edificações.

Os ambientes industriais, em geral, apresentam uma série de agentes agressivos ao concreto armado e, em indústrias siderúrgicas, especificamente, existem ambientes onde se encontram diversos agentes agressivos ao concreto armado como as altas temperaturas (até 1.500°C), vapores, águas residuais, impactos, gases, entre outros.

O desconhecimento da existência e da localização desses agentes agressivos, ou mesmo de sua influência na durabilidade do concreto armado, têm levado a se projetarem e a se construírem obras com desempenho muito abaixo do esperado em relação à vida útil. Tal fato tem resultado em elevados gastos com a recuperação das referidas obras e também com inevitáveis interferências com o processo produtivo destas indústrias.

Neste trabalho, faz-se a identificação, a localização e a caracterização de agentes agressivos ao concreto armado, em indústrias siderúrgicas, com o objetivo de fornecer subsídios a projetistas, construtores, proprietários e usuários de edificações de concreto armado.

Citam-se, também, os métodos de classificação da agressividade dos ambientes às estruturas de concreto armado e a classificação dos concretos quanto à durabilidade, na visão de normas e autores nacionais e internacionais. Descrevem-se exemplos de obras de uma indústria específica, nas quais foram realizados estudos e diagnósticos, quanto à deterioração das estruturas.

De posse dos métodos de classificação da agressividade ambiental e dos concretos, da identificação dos agentes agressivos, e dos exemplos de estudos e diagnósticos, faz-se uma comparação entre as recomendações das normas para as referidas obras e as especificações dos projetos, as quais foram seguidas para a execução destas estruturas; citam-se, também, dados sobre a vida útil e os custos de recuperação do concreto armado.

Finalmente, apresentam-se recomendações para projeto, construção, manutenção e utilização das estruturas de concreto armado, nestas indústrias, do ponto de vista da durabilidade, relacionada com a ação do meio ambiente.

⁽¹⁾ Engenheiro Civil da CST, mestrando do PPGE/UFES, Vitória, ES, Brasil
e-mail: elima@tubarao.com.br

Durability of the reinforced concrete in steel plants: contribution to identification and location of aggressive agents

Lima, Edson de Oliveira ⁽¹⁾

ABSTRACT

The durability of reinforced concrete structures is quite a complex subject involving variants such as environment, project, materials, building methods, as well as the use and maintenance of buildings.

In general, industrial environments contain a number of agents with an aggressive effect upon reinforced concrete, specially in steel plants which have environments with various aggressive agents to reinforced concrete, such as high temperatures (up to 1,500°C), steam, waste waters, impacts, gases, among others.

The lack of knowledge regarding the existence and location of such aggressive agents, or even regarding their influence upon the durability of reinforced concrete, has lead to the projection and construction of buildings with a useful life far below the expected. This fact has resulted in high expenses with the repair of the referred to buildings, as well as with inevitable interferences with the production process of such industries.

This paper will identify, locate and describe the aggressive agents to reinforced concrete and will classify concretes as to their durability in steel plants, with the purpose of supplying information to designers, constructors, owners and users of reinforced concrete buildings.

The methods for the classification of environments which are aggressive to reinforced concrete structures are also mentioned, as well as the classification of the durability of concrete as foreseen in official regulations and by Brazilian and foreign authors. Examples of civil works undertaken in a specific industry are also described, including studies and diagnosis regarding the deterioration of structures.

Having in hand the classification methods to ascertain environmental aggressiveness and its effects on concrete, the identification of the aggressive agents, as well as examples of studies and diagnosis, a comparison is made between the recommendations included in the official regulations for certain civil works and the projects' specifications followed during the building of such structures, with information given regarding useful life and the costs for the repair of the reinforced concrete of these same structures.

Finally, recommendations are given regarding projects, construction, maintenance and use of reinforced concrete structures in such industries, from the point of view of durability related to the action of the environment.

⁽¹⁾ Civil Engineer at CST, attending the M.Sc. Course as part of the Post Graduation Course in Civil Engineering at the Espírito Santo Federal University, Vitória, ES, Brazil
e-mail: elima@tubarao.com.br

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO

A questão da durabilidade das estruturas de concreto vem ganhando destaque nos últimos anos, tanto no meio científico quanto junto aos construtores e proprietários. Grande número de incidências de manifestações patológicas têm sido observado nas edificações residenciais, comerciais e industriais, trazendo riscos, desconfortos e elevados custos com a recuperação destas estruturas.

Paradoxalmente, as manifestações patológicas em estruturas de concreto deveriam tender a diminuir, haja vista o grande avanço tecnológico que vem ocorrendo em todos os campos científicos. Tome-se como exemplo a construção civil onde estão surgindo novas técnicas e ferramentas para cálculo, técnicas construtivas, novos materiais e, embora muito timidamente, a implantação de programas de capacitação de mão-de-obra e cursos de especialização para engenheiros projetistas e construtores.

Nas indústrias em geral e, especificamente, em usinas siderúrgicas, encontram-se diversos ambientes com vários agentes agressivos ao concreto armado que o agredem mecânica, física e/ou quimicamente. Podem-se destacar: impactos, altas temperaturas (até 1.500 °C), vapores, águas agressivas (ex.: desmineralizada) e outros agentes como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), gás carbônico (CO₂) e, principalmente, a ação sinérgica destes elementos.

Este trabalho, trata, exclusivamente, da questão da durabilidade das estruturas de concreto armado na indústria siderúrgica, descrevendo-se e identificando-se alguns destes agentes agressivos, sua localização dentro da planta e seus efeitos deletérios sobre as estruturas de concreto armado, baseando-se em indústrias siderúrgicas integradas a coque, ou seja, englobam o processo de fabricação de sinter¹, coque², gusa³ e aço. Citar-se-ão, também, exemplos de estudos e diagnósticos de obras deterioradas, da usina da CST⁴.

Devido à grande complexidade do processo siderúrgico, este trabalho limitar-se-á ao estudo do processo siderúrgico, da etapa inicial que é o recebimento das matérias primas até a produção do aço. Não serão abordadas as etapas posteriores, de refino e acabamento.

¹ aglomerado semi-fundido a temperatura de 1350°C de minério de ferro fino e calcário a ser utilizado como matéria prima para produção de gusa.

² resíduo sólido e poroso da destilação do carvão mineral na ausência de ar (ou pequena quantidade de ar). A ser utilizado como combustível para a produção de gusa

³ produto da redução do minério de ferro em estado natural ou em forma de Sinter, seguido de fusão a temperatura de 1500°C.

⁴ CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão. Situada na cidade da Serra, região da Grande Vitória, ES.

1.2 - JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

No processo siderúrgico, que é bastante complexo, no que se refere às inúmeras etapas que o compõem, encontram-se diversos ambientes com diferentes graus de agressividade ao concreto armado. Nestes ambientes, existem agentes agressivos ao concreto, nos estados sólidos, líquidos e gasosos, onde se destacam as altas temperaturas e, principalmente, os conjuntos destes elementos que, pelo sinergismo, podem ter multiplicada a sua ação deletéria (CHANDRA, 1996).

O aço é um material versátil, no que diz respeito às características físicas e químicas, o que o faz presente nas construções civis, como estruturas metálicas e mesmo como aço para o concreto armado. É um componente indispensável, também, para a produção de automóveis, caminhões, navios, tubulações diversas, entre outros, o que mostra a grande importância da indústria do aço para a moderna economia mundial.

Em 1994, conforme a UNEP & IISI (1997), 710 milhões de toneladas de aço foram produzidas no mundo, sendo que a expectativa para o fim deste século é de 740 milhões de toneladas. Isto demonstra que a indústria siderúrgica continuará se expandindo, demandando consequentemente programas de manutenção das estruturas existentes e construção de novas unidades, que, se espera, sejam projetadas para resistir ao ambiente inerente a estas indústrias.

Nesta distribuição, coube à América Latina 6,3 % do total e a tendência de crescimento é que as regiões em desenvolvimento como sudeste da Ásia, China e América Latina aumentem seus consumos e sua produção para que possam se desenvolver.

A degradação das construções, devido a fatores ambientais, é uma realidade e acarreta problemas econômicos. O conhecimento da exposição ambiental e a relação com a degradação das estruturas é fundamental para o setor de construção, como base para um apropriado planejamento de manutenção e de vida de serviço.

As estruturas de concreto armado, em condições normais de utilização, projeto e execução, têm sua durabilidade assegurada pelas próprias características dos materiais, tanto em conjunto, quanto individualmente, como é o caso da alta alcalinidade da solução aquosa presente no interior do concreto, que protege as armaduras contra a corrosão.

O equilíbrio entre os compostos do concreto armado, o cimento, os agregados, as armaduras e eventuais aditivos, entretanto, pode ser rompido, caso as estruturas sejam expostas a determinados ambientes e agentes que podem provocar um desequilíbrio no sistema.

Na realidade, não se deve dizer que determinada estrutura de concreto foi deteriorada devido à ação do ambiente e sim, que não foi empregado o material adequado àquele ambiente - como material, neste caso, considere-se o conjunto concreto armado - devido a fatores como deficiências de projeto, deficiências de execução ou deficiências na utilização. Estas deficiências podem ser provocadas, entre outros, pelo desconhecimento do ambiente a que as estruturas estarão expostas, ou mesmo, do efeito que os elementos existentes podem provocar no concreto armado.

A norma espanhola EHE (1999) enfatiza a questão da durabilidade e define, entre os requisitos essenciais para o projeto de estruturas de concreto armado ou protendido, que as estruturas devem ser capazes de suportar, durante o período de construção e de vida útil, a agressividade do ambiente e que, antes de se iniciar o projeto, deve-se identificar o tipo de ambiente que define a agressividade a que vai estar submetido cada elemento estrutural.

A importância deste trabalho dá-se pelo fato de que, entendendo-se as etapas do processo de produção de aço, identificando-se os agentes agressivos ao concreto presentes neste ambiente e seus mecanismos de degradação das estruturas, será possível projetar, construir e também estabelecer metodologias de manutenção preventiva e orientar os usuários destas unidades à sua correta utilização (HAAGENRUD & HENRIKSEN, 1996).

1.3 – OBJETIVOS E HIPÓTESES

1.3.1 – Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar o ambiente a que estão sujeitas as estruturas de concreto armado, em uma usina siderúrgica, identificando os principais agentes agressivos presentes neste ambiente e seus efeitos nas estruturas de concreto armado, contribuindo com subsídios para as atividades de projeto, construção, manutenção e utilização destas estruturas em usinas siderúrgicas e seguindo-se, assim, a recomendação de SJÖSTRÖN⁵, que define áreas

⁵ Dr. Christer Sjöström. Division of Materials Technology, Department of Built Environment, Royal Institute of Technology. Gärlé, Sweden.

Presidente do CIB W80 - International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W 80 em 1997.

prioritárias de pesquisa sobre durabilidade das construções, e entre elas, “*a caracterização/mapeamento e classificação dos principais fatores de degradação ambiental (caracterização do macro, meso e micro climas), como radiação solar, direção dos ventos e quantidade de chuvas, poluição, umidade, temperatura, etc.*” (JOHN, 1997, p. 8).

1.3.2 – Objetivos Específicos

Este trabalho tem, como objetivos específicos:

- a) Estudar a questão da durabilidade das estruturas de concreto armado em função dos fatores que a influenciam;
- b) Identificar os principais estudos e normas existentes que classificam os ambientes em relação à agressividade às estruturas de concreto armado, bem como classificam os concretos em função destes ambientes;
- c) Identificar e localizar os principais agentes agressivos às estruturas de concreto armado em usinas siderúrgicas integradas a coque e descrever sua ação sobre estas estruturas;
- d) Citar exemplos de análise e diagnóstico de obras deterioradas na usina da CST, bem como dados sobre vida útil e custos de recuperação destas estruturas;
- e) Classificar algumas áreas e unidades das usinas siderúrgicas, quanto ao grau de agressividade ao concreto armado, à luz dos estudos dos principais pesquisadores e entidades normatizadoras;
- f) Subsidiar projetistas, construtores e proprietários, tecendo recomendações para novas construções e sistemas de manutenção para as estruturas de concreto armado situadas em usinas siderúrgicas.

1.3.3 – Hipóteses

Os objetivos citados baseiam-se nas seguintes hipóteses:

- a) A durabilidade das estruturas de concreto armado é um assunto bastante complexo, dependente de uma grande diversidade de fatores que necessitam ser melhor estudados e compreendidos;
- b) Uma eficiente classificação dos ambientes, em relação à agressividade às estruturas de concreto armado, é um forte instrumento para projetistas, na definição dos parâmetros de projeto e da vida útil das estruturas;

- c) Existem muitos agentes agressivos ao concreto armado no ambiente industrial e, especificamente, em usinas siderúrgicas, que não são conhecidos pelos projetistas e, quando o são, não se sabem ou se levam em consideração seus efeitos;
- d) Conhecendo-se os agentes agressivos, e sua localização, é possível classificar os ambientes quanto ao grau de agressividade às estruturas;
- e) As estruturas de concreto armado têm sido projetadas sem se levarem em conta, de forma eficiente, os agentes agressivos a que vão estar sujeitas durante sua vida de serviço ou mesmo, durante o período de construção. Este fato é um dos fatores que tem contribuído para a grande quantidade de insucessos constatados nas obras de concreto armado.

1.4 – LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa limita-se ao estudo dos principais agentes agressivos ao concreto armado, identificados em usinas siderúrgicas integradas à coque, considerando-se a etapa inicial do processo, que é o recebimento das matérias primas até a produção do aço e, também, à descrição de exemplos reais de obras em concreto armado da usina da CST, onde foram realizados ensaios e diagnósticos.

A identificação dos agentes agressivos ao concreto armado, limita-se aos agentes identificados através da literatura, de observações e de ensaios realizados em águas que são recirculadas em algumas unidades da CST e entram em contato direto com o concreto. Não se pretende esgotar este assunto, devido à complexidade e à variedade dos processos siderúrgicos.

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado conforme descrito abaixo:

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão dos conceitos de durabilidade das estruturas de concreto armado, focada nos mecanismos de deterioração causados por agentes identificados na pesquisa objeto deste trabalho, ou seja, o concreto armado em usinas siderúrgicas. Descrevem-se e analisam-se, também, as questões da classificação da agressividade do meio ambiente e da classificação dos concretos, quanto à durabilidade, em função do meio em que está inserido.

No capítulo 3, trata-se da questão do mapeamento e caracterização dos principais agentes agressivos ao concreto armado em usinas siderúrgicas. Neste capítulo, descreve-se a metodologia

utilizada para se chegar a uma definição da agressividade potencial, ao concreto armado, nas diferentes áreas do processo, chegando-se a uma síntese dos principais agentes agressivos identificados, às prováveis localizações e aos efeitos deletérios que causam às estruturas. Para possibilitar o entendimento da identificação e localização dos agentes agressivos ao concreto, faz-se uma breve descrição do processo siderúrgico de uma usina integrada à coque.

No capítulo 4, faz-se uma classificação de algumas áreas e unidades da CST conforme o grau de agressividade ao concreto armado. Faz-se, também, descrição de estudos e diagnósticos realizados em obras de concreto armado da CST, comparando-se as especificações determinadas para estas obras de acordo com as referidas normas em função da classificação da agressividade do ambiente, com as especificações efetivas de projeto. Citam-se, neste capítulo, exemplos de vida útil e custos estimados e reais de um conjunto de obras, da CST, onde foram identificados processos de deterioração precoce.

Finalmente, no capítulo 5, apresentam-se, as conclusões, recomendações para futuros projetos, recomendações para sistemas de manutenção das estruturas existentes e sugestões para continuidade destes estudos.

Capítulo 2

DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

2.1 - APRESENTAÇÃO

Neste capítulo, optou-se por descrever os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado, focando as condições que foram identificadas na pesquisa objeto deste trabalho, ou seja, o concreto armado em usinas siderúrgicas.

Serão descritas e analisadas, também, as questões das classificações da agressividade do meio ambiente e dos concretos quanto à durabilidade, em função do ambiente, entendendo-se que estas são ferramentas imprescindíveis para que se obtenham estruturas duráveis em ambientes agressivos ao concreto armado, como no caso de alguns ambientes verificados em usinas siderúrgicas.

A durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser considerada uma questão subjetiva, dados os diversos aspectos envolvidos. Entre eles, destacam-se a manutenção das características de projeto como resistência, aparência e funcionalidade, a definição da vida útil, a questão do estabelecimento de programas de manutenção preventiva. O ACI (1993), por exemplo, define a durabilidade do concreto de cimento Portland como sua capacidade de resistência às intempéries, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outro processo de deterioração, sendo que o concreto durável conservará sua forma, sua qualidade e sua capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente.

2.2 – MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO

Antes do estudo sobre deterioração das estruturas, é conveniente entender o seu significado, sendo que, entre os conceitos de deterioração expressos por diversos autores, pode-se optar por: “Alterações físicas ou químicas, provocando diminuição gradativa de uma ou mais propriedades de materiais, componentes e elementos das edificações, quando submetidas à ação de agentes do meio ambiente” (LICHTENSTEIN, 1985, p.ii).

O fenômeno de deterioração das estruturas de concreto é bastante complexo e deve ser analisado com uma visão do conjunto de seus componentes, no caso presente, o concreto e as armaduras.

O concreto é um material heterogêneo, formado por cimento, agregados, água e, eventualmente,

aditivos. Cada um destes componentes pode influir no comportamento do conjunto, favorável ou desfavoravelmente, como, por exemplo, nas características mais importantes do concreto: resistência mecânica, estabilidade e durabilidade (FERNANDEZ CÁNOVAS, 1988). O aço, por sua vez, do ponto de vista da durabilidade, está sujeito ao fenômeno da corrosão.

Considerando-se o conjunto concreto/armadura, deve-se observar que as agressões sofridas por um, podem favorecer a deterioração do outro. Uma fissura no concreto, por exemplo, pode permitir que agentes agressivos atinjam a armadura durante o processo de deterioração, o que poderá provocar tensões que irão afetar o concreto ou o conjunto concreto armado.

O projeto de revisão de norma ABNT/NBR 6118:2000 (2000), atualmente em fase de apresentação para discussão pública, classifica os mecanismos mais importantes de deterioração das estruturas de concreto que devem ser levados em conta quando se trata da durabilidade, conforme o quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Mecanismos de deterioração das estruturas de concreto [ABNT/NBR6118:2000 (2000)]

1	Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto
a	Lixiviação: por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas, que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento
b	Expansão por ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias, com a pasta de cimento hidratado
c	Expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos
d	Reações deletérias superficiais de certos agregados, decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica
2	Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura
a	Despassivação por carbonatação, ou seja, por ação do gás carbônico da atmosfera, que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução. A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 65%, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão
b	Despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto), ou seja, por penetração do cloreto através de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que, ao superarem, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxilas, despassivam a superfície do aço e instalam a corrosão.

Na realidade, pode-se considerar que os mecanismos de deterioração relativos à armadura, citados no quadro 2.1, são mecanismos de deterioração do concreto que têm como consequências mais importantes, a criação de condições para início do processo de deterioração das armaduras.

2.2.1 - Corrosão das Armaduras

O fenômeno da corrosão das armaduras pode ser definido como a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica (HELENE, 1986).

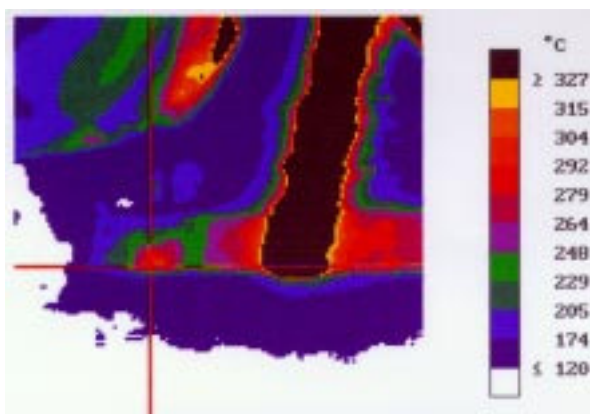
A reação química, também definida como corrosão seca, se dá por uma reação gás-metal, com a formação de uma película de óxido. É um processo lento que não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, com exceção de ataques por gases extremamente agressivos. Este fenômeno não é o que efetivamente traz problemas às obras civis, ao contrário da corrosão eletroquímica que, se dá em meio aquoso, e é o resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão que, para ocorrer, devem existir a presença de um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e, eventualmente, agentes agressivos (HELENE, 1986; CASCUDO, 1997).

A existência e a participação do eletrólito, da diferença de potencial, do oxigênio e dos agentes agressivos, no processo de corrosão das armaduras no concreto armado, pode ser ilustrada conforme a seguir:

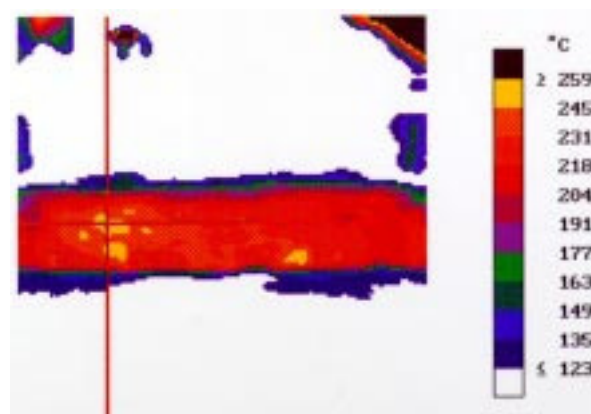
2.2.1.1 – Eletrólito

No caso do concreto armado, o eletrólito é a fase líquida contida nos poros do concreto, formada pela água e soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de Cálcio) ou outros produtos da hidratação do cimento, além de íons agressivos originários do meio externo. O eletrólito tem a função, no processo de corrosão eletroquímica, de transportar os íons necessários às reações de corrosão. Pode-se concluir, então, que não haverá corrosão em concretos secos, devido à inexistência do referido eletrólito e, também, nos concretos totalmente saturados, devido à falta de acesso de oxigênio (HELENE, 1986; HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

As paredes do Poço de Gusa da CST (fotografia 2.1), podem ilustrar a explicação acima; estas paredes, por estarem sujeitas constantemente a altas temperaturas, da ordem de 250°C , durante 15 anos, não apresentaram corrosão nas armaduras, embora o concreto tenha se deteriorado significativamente.



Termografia da parede do poço de pesagem de gusa durante o basculamento de gusa



Termografia da parede do poço de pesagem de gusa 10 minutos após o basculamento

Fotografia 2.1 - Parede do Poço de Gusa da CST, durante basculamento de gusa, e o resultado da termografia⁶, executada no momento do basculamento e 10 minutos após⁷.

2.2.1.2 – Diferença de potencial

Segundo HELENE (1986) e CASCUDO (1997), a diferença de potencial é essencial ao processo de corrosão da armadura, por ser condição para a formação da pilha eletroquímica. A diferença de potencial ocorre devido a fatores diversos, entre eles as diferenças de aeração, de umidade, de concentração salina e de tensão no aço e no concreto.

⁶ Termografia - a medição da temperatura através da Termografia tem como objetivo básico a transformação da radiação infra-vermelha, captada do objeto, em informação térmica ou, mais especificamente, em uma mapa térmico do objeto observado.

⁷ Arquivos da CST

2.2.1.3 - Oxigênio

O oxigênio é essencial para o processo de corrosão pois, conforme HELENE (1986), é necessário, para a formação de ferrugem (óxido de ferro) segundo a reação:



Na realidade, as reações são mais complexas e o produto da corrosão, denominado ferrugem, nem sempre é o $\text{Fe} (\text{OH})_2$, mas uma gama de óxidos de ferro.

CASCUDO (1997), cita as reações que se desenvolvem nas zonas anódicas (corroídas) - reações de dissolução do ferro - oxidação:



e as reações nas zonas catódicas (não corroídas) - reações de redução de oxigênio:



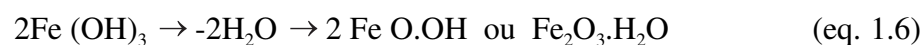
Os produtos de corrosão são vários, entre eles o hidróxido ferroso, fracamente solúvel:



o hidróxido férrico hidratado, expansivo:



e o óxido férrico hidratado, expansivo:



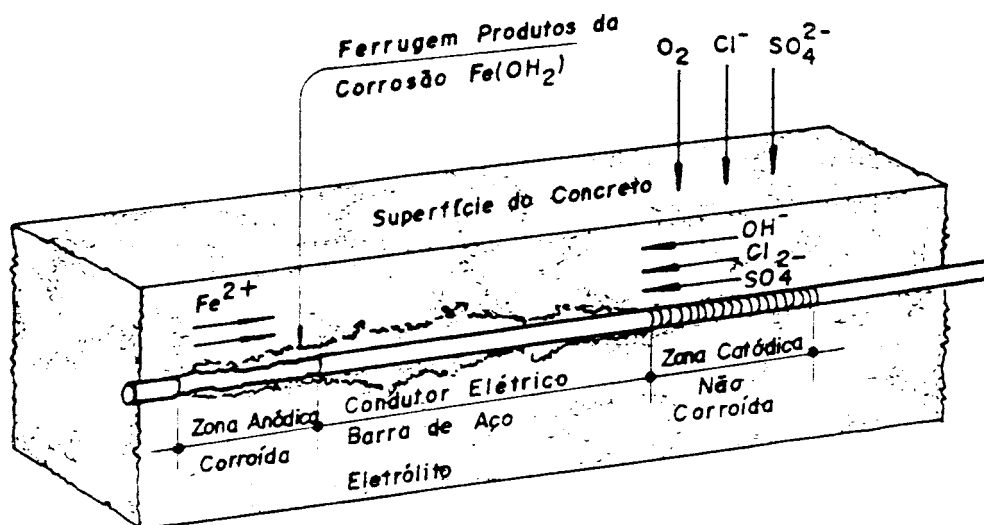
2.2.1.4 – Agentes agressivos

Alguns agentes agressivos são grandes contribuintes para o processo de corrosão, aumentando significativamente a condutividade do eletrólito.

Os agentes agressivos podem estar contidos nos aceleradores de pega, que contém cloretos, ou mesmo na água de amassamento ou, também, podem contaminar o concreto por absorção ou permeabilidade.

Segundo HELENE (1986), esses agentes podem ser: os íons sulfetos (S^{2-}), os íons cloretos (Cl^-), o dióxido de carbono (CO_2), os nitritos (NO_3^-), o gás sulfídrico (H_2S), o cátion amônio (NH_4^+), os óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3), a fuligem, etc.

A figura 2.1 representa genericamente a corrosão eletroquímica das armaduras de concreto. Esta corrosão ocorre quando a armadura está despassivada.



NOTAS:

- 1) Cl^- e SO_4^{2-} elementos agressivos eventuais
- 2) Armadura despassivada
- 3) Distância entre Ânodo e Cátodo pode variar de dimensões milimétricas a métricas

Figura 2.1 – Pilha ou célula de corrosão eletroquímica no concreto (HELENE, 1993).

2.2.1.5 – Outras considerações sobre a corrosão das armaduras no concreto armado

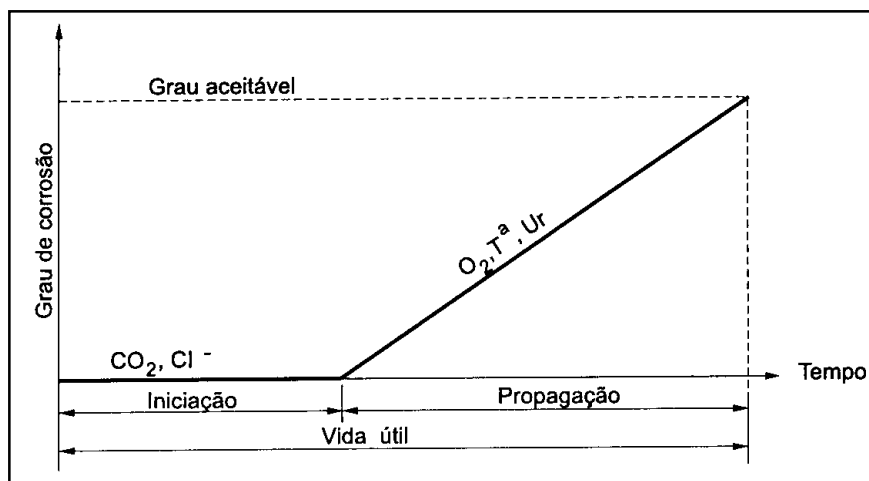
O alto pH da pasta de cimento, próxima às armaduras, geralmente as protege contra a corrosão. Conforme o ACI (1991), uma pasta de cimento não carbonatada⁸ tem um pH mínimo de 12,5 e o aço não se corroerá na ocorrência de um pH desta ordem. Entretanto, FIGUEIREDO & HELENE (1994) destacam que a presença de íons cloreto, pode estimular a corrosão das armaduras mesmo com a alta alcalinidade.

A explicação mais aceita atualmente, segundo FIGUEIREDO & HELENE (1994) é que esta alta alcalinidade favorece a formação de uma camada de óxidos microscópica passivante. Esta camada protege física e quimicamente a armadura, impedindo a penetração de oxigênio, umidade e íons agressivos e, conseqüentemente, impedindo o início do processo de corrosão.

Existem dois meios mais significativos, pelos quais as armaduras de concreto podem perder esta proteção: a carbonatação e a penetração de íons agressivos, entre os quais os cloretos são os mais importantes (DARWIN, 1985). A alcalinidade também pode ser perdida devido à penetração de substâncias ácidas no concreto.

Uma vez despassivada a armadura, a mesma fica vulnerável à corrosão. TUUTTI apud CASCUDO (1997), propõem um modelo de corrosão do aço no concreto armado. Neste modelo, representado na figura 2.2, o processo de corrosão é subdividido em duas etapas: iniciação e propagação. A iniciação corresponde ao período em que o agente atravessa o concreto de cobrimento, até alcançar a armadura e então despassivá-la. Já a propagação, corresponde ao processo de corrosão em si, que se desenvolve até alcançar um estágio inaceitável, onde se considera o fim da vida útil da estrutura.

⁸ Simplificadamente, a carbonatação pode ser definida como a reação química entre o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera e os produtos de hidratação do cimento, entre eles o Hidróxido de Cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], resultando em uma redução do pH da solução presente nos poros do concreto. Um concreto não carbonatado contém Hidróxido de Cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], o que assegura um pH mínimo de 12,6 no fluido contido nos poros (PARROT, 1986).



Notas: T^a – Temperatura Ambiente, Ur – Umidade relativa

Figura 2.2 - Modelo de vida útil proposto por TUUTTI (HELENE, 1993 e CASCUDO, 1997)

O efeito nocivo dos gases poluentes no concreto contribui, também, para a corrosão das armaduras, uma vez que reagem com os compostos não hidratados, formando sais, alguns dos quais se cristalizam. A cristalização destes sais, como carbo-aluminatos, cloro-aluminatos, etringita e monossulfato, produzem esforços internos e conduzem à formação de trincas (CHANDRA, 1996). As trincas favorecem o acesso dos agentes agressivos às armaduras.

A temperatura também tem seu papel no processo de corrosão das armaduras. Nas usinas siderúrgicas, as altas temperaturas estão presentes, podendo atingir as estruturas de concreto, com intensidades diferentes e, também, com variações lentas ou bruscas.

As altas temperaturas podem ser favoráveis em situações onde são constantes e acima de 80°C pois, segundo HELENE (1986), nesta condição, a película de eletrólito sobre a superfície dos fios e barras de aço, que é uma das condições para que aconteça a corrosão, não se deve formar.

Por outro lado, os gradientes de temperatura existentes nas estruturas, ao provocarem solicitações distintas no aço e no concreto, em regiões muito próximas, podem contribuir para a corrosão das armaduras, ao formarem uma diferença de potencial que é um dos elementos básicos para a propagação da corrosão (CASCUDO, 1997).

2.2.2 - Deterioração do Concreto

O concreto é um material largamente utilizado na construção civil, devido às suas excelentes qualidades, tais como: facilidade de moldagem, conforme as exigências arquitetônicas ou estruturais, facilidade de obtenção dos materiais e equipamentos necessários à sua fabricação e aplicação e, também, devido à sua durabilidade.

Esta qualidade, a durabilidade, nos últimos anos tem sido bastante questionada devido a grande quantidade de obras de concreto armado que tem apresentado deterioração precoce, gerando custos imprevistos com obras de recuperação e reforço.

Entretanto, o concreto, quando bem empregado, é um material durável, haja vista que, embora várias estruturas de concreto tenham se deteriorado precocemente na usina da CST, conforme serão descritos alguns casos em capítulos posteriores, muitas estruturas encontram-se em perfeito estado de conservação.

Um importante exemplo da durabilidade do concreto, quando bem empregado, é apresentado por KOVI & FITIKOS (1998). Os autores apresentam resultados de ensaios físicos, químicos e mecânicos realizados em um reservatório de água de concreto, com capacidade aproximada de 600 m³, construído há 3.000 anos na cidade de Karamiros, Grécia. Os resultados dos ensaios mostram excelentes resultados no que diz respeito a três importantes propriedades: impermeabilidade, resistência mecânica e ausência de juntas e trincas. Tais resultados, concluem os autores, devem-se à correta dosagem e à qualidade dos agregados e do aglomerante, um cimento natural constituído de terra vulcânica e cal.

Com o passar dos anos, como em todo campo da ciência e tecnologia, as estruturas de concreto tiveram um avanço tecnológico significativo, obtendo-se menores dimensões, menores prazos de execução, utilização de novos materiais e novas tecnologias construtivas (FERNÁNDEZ CÁNOVAZ, 1988).

Apesar do avanço tecnológico ter trazido grandes vantagens, viabilizando a execução de inúmeras obras, principalmente em relação aos custos e prazos, paradoxalmente nota-se a multiplica-

ção de patologias precoces, resultando em riscos de acidentes e altos custos com manutenções e reparos. Acrescente-se a este fato, o aumento da produção industrial pois, conforme CHANDRA (1996), a emissão de gases poluentes têm sido incrementada dia a dia, devido ao aumento do trânsito e da industrialização.

Atualmente, é grande a quantidade de estudos e pesquisas, já desenvolvidos e em andamento, sobre esta questão, motivando a reflexão, por parte dos profissionais de engenharia, demonstrando, principalmente, que é possível projetarem e construírem obras duráveis, sem que se percam de vista os aspectos econômicos.

O conceito de durabilidade, como se pode observar na literatura, compreende o comportamento das estruturas e as variáveis como projeto, construção, utilização, condições ambientais, desempenho esperado, vida útil e programas de manutenção e reparos (FARIAS et al, 1997; HELENE, 1997a; OLLIVIER, 1978)

2.2.2.1 – Fatores que influenciam a durabilidade do concreto

A deterioração do concreto pode ser resultado de uma variedade de processos físicos, mecânicos e químicos, assim como ataque por ácidos, sulfatos ou álcalis e reações álcali-agregados (PAPADAKIS, et al, 1991).

Segundo REINHARDT & STUTTGART, (1996), a durabilidade do concreto é função de suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no endurecido e, conseqüentemente, mistura e seleção adequadas dos materiais, adequada supervisão durante o lançamento e cura do concreto são muito importantes, para se produzirem concretos duráveis.

RODWAY (1985) apresenta uma visão geral sobre a durabilidade do concreto, descrevendo cinco fatores que a influenciam: os materiais constituintes, o processo construtivo, as propriedades físicas do concreto e o tipo de carregamento e a natureza do ambiente a que é exposto (figuras 2.3 e 2.4).

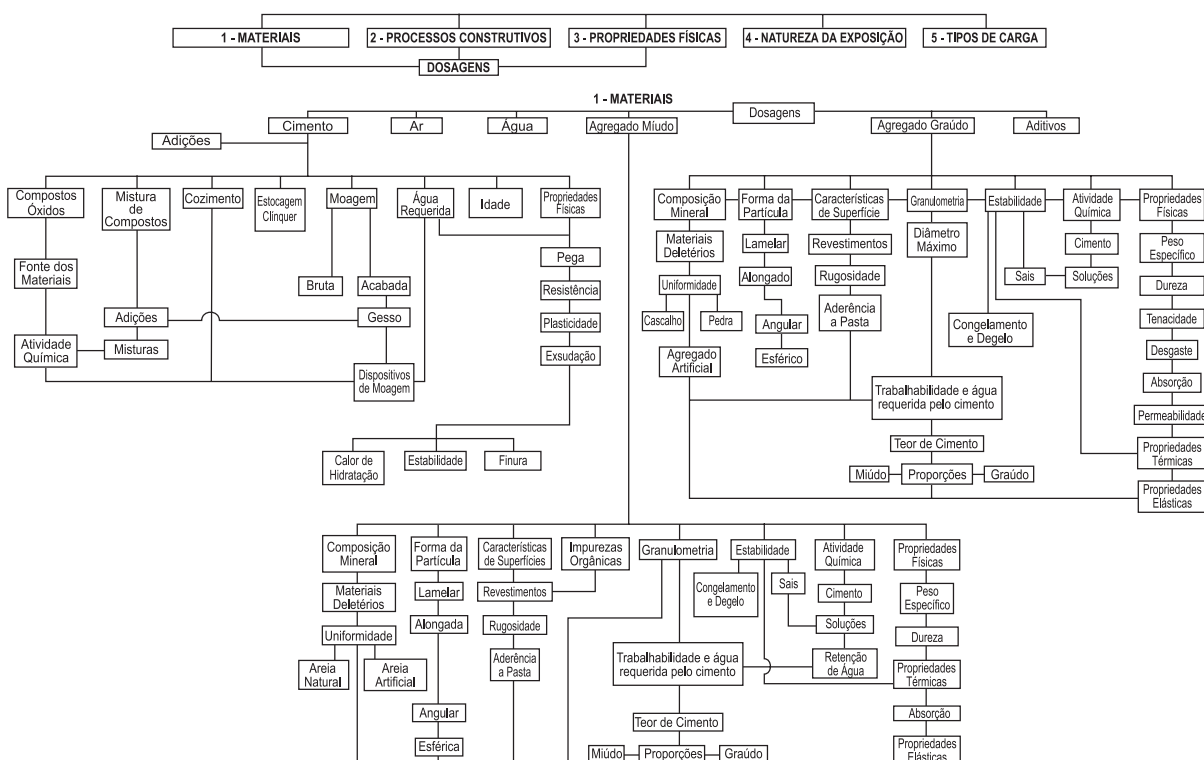


Figura 2.3 – Alguns fatores que podem influenciar na durabilidade do concreto (A) (RODWAY, 1985)

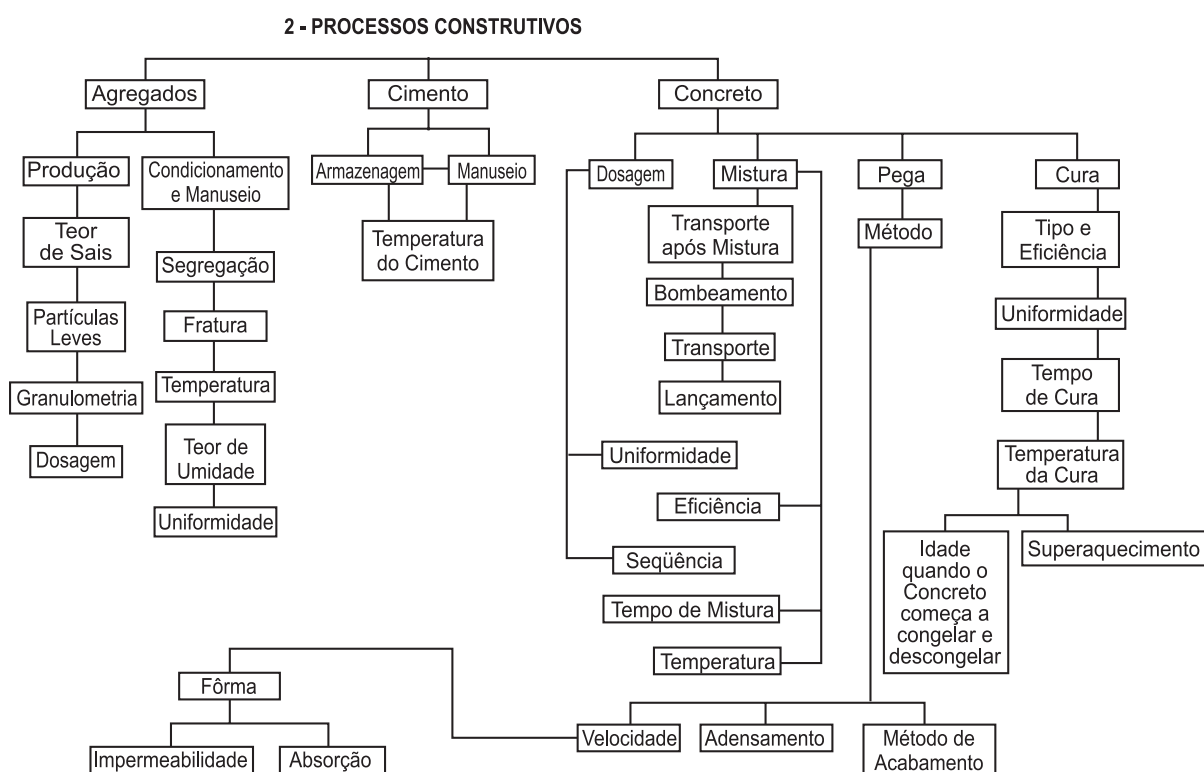
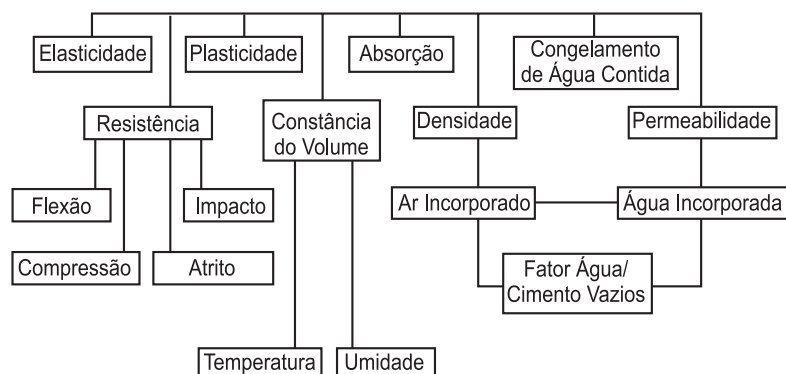


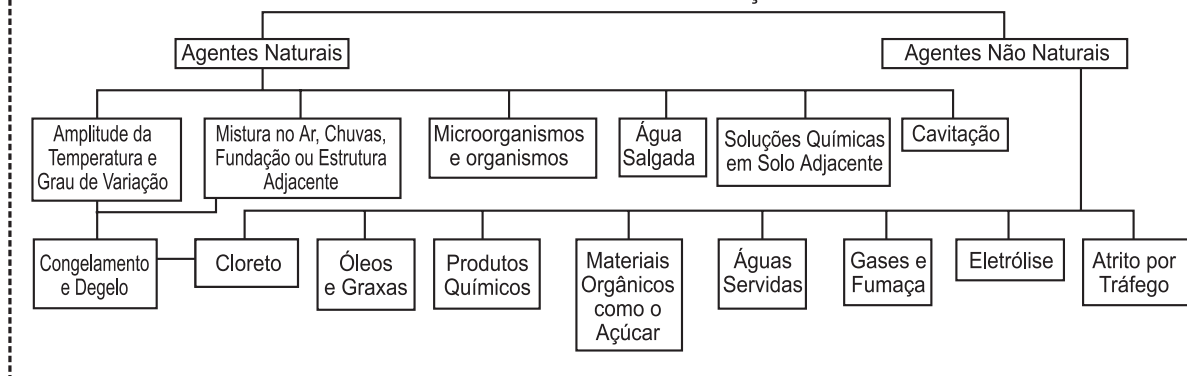
Figura 2.4 – Alguns fatores que podem influenciar na durabilidade do concreto (B) (RODWAY, 1985)

3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO ENDURECIDO

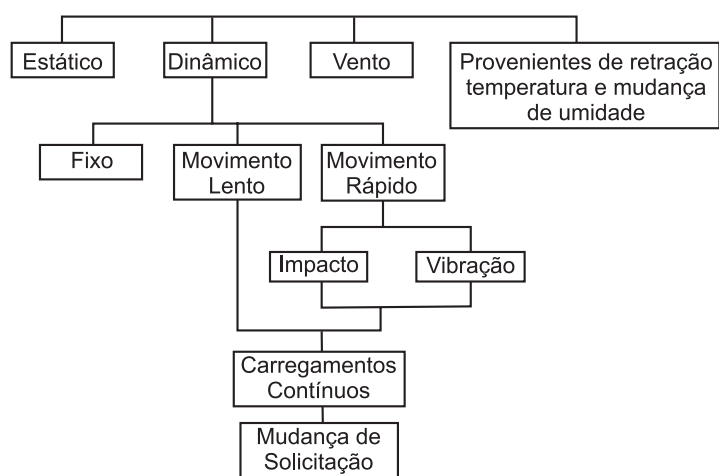


4 - NATUREZA DA EXPOSIÇÃO

(1)



5 - TIPOS DE CARREGAMENTOS



Nota: (1) Este item reflete o principal motivo desta pesquisa.

Figura 2.4 – Alguns fatores que podem influenciar na durabilidade do concreto (B) (RODWAY, 1985) (Continuação)

Descrevem-se, abaixo, alguns aspectos dos materiais constituintes do concreto, do processo construtivo, das propriedades físicas. A natureza do ambiente a que o concreto é exposto e alguns tipos de carregamentos a que estão sujeitas as estruturas de concreto na indústria siderúrgica serão mais detalhados adiante.

Os materiais constituintes do concreto

Conforme citado, o concreto é um material heterogêneo, formado pela mistura de água, cimento, agregados e, eventualmente, aditivos e que cada um destes componentes é responsável pelas características do material como um todo, entre elas a durabilidade FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988) .

Os materiais constituintes do concreto influenciam a durabilidade pela qualidade, pelas dimensões e pela natureza. Uma água contaminada por cloretos, por exemplo, pode antecipar o processo de deterioração da armadura.

O cimento, por sua diversidade de apresentação, pode influenciar a durabilidade, em função de sua correta escolha, para a aplicação a que se destina. Por exemplo, o cimento tipo CP III, denominado também de cimento de alto forno, devido aos teores de adição de escória de alto forno, e o CP IV, cimento com adição de material pozolânico, são mais recomendados para resistir à agressividade ambiental do ponto de vista da lixiviação e do ponto de vista de resistência à penetração de cloretos, enquanto que o cimentos tipo CP I, cimento Portland comum e CP V, cimento de alta resistência inicial, são preferíveis para resistir ao fenômeno da carbonatação [ABNT/NBR 6118:2000 (2000)].

Os agregados ocupam, geralmente, pelo menos três quartas partes do volume do concreto, sendo, portanto, de grande importância na influência da resistência mecânica e na durabilidade do concreto. Por exemplo, concretos com agregados de forma arredondada, tendem a ter menos vazios que os concretos com agregados de forma angulosa, (NEVILLE, 1997). CINCOTTO (1992) também afirma que o volume dos agregados graúdo e miúdo constitui, em média, 70% do volume total do concreto, desempenhando papel importante na durabilidade.

Quanto às dimensões dos agregados, entre outros, vale citar que os finos, parte constituinte dos agregados, podem ser um problema de grande importância, dependendo de seu proporcionamento. Segundo FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988), as frações de tamanho inferior a 0,15 mm, devi-

do à sua grande superfície específica, requerem maior quantidade de água diminuindo a água necessária ao cimento para a sua completa hidratação, conseqüentemente enfraquecendo o concreto. Além deste efeito, por exigirem mais água para a mesma consistência, a relação água/cimento é aumentada gerando concretos com maior retração e maior porosidade, portanto com menor resistência aos ambientes agressivos.

O agregado, por influir na trabalhabilidade do concreto fresco, no consumo de cimento, na resistência e no módulo de deformação, pode influir também na durabilidade do concreto. Quanto à natureza, pode-se dizer que o agregado deve ser quimicamente estável. VALENTA apud CINCOTTO (1972) cita que o agregado, para ser considerado quimicamente estável, não deve conter pirita (FeS_2), sílica livre, ou calcário.

O processo construtivo

Quanto ao processo construtivo, é fundamental que se sigam, rigorosamente, as recomendações do projeto e que se estabeleça e se cumpra rigoroso controle de qualidade, evitando-se, principalmente, falhas no transporte e adensamento do concreto, deficiências no cobrimento da armadura e cura inadequada ou insuficiente. A moldagem, o adensamento, a cura e a desmoldagem têm efeito muito importante nas propriedades de difusividade, permeabilidade e absorção capilar de água e gases [ABNT/NBR 6118:2000 (2000)].

As propriedades físicas e mecânicas do concreto

Obviamente, além da qualidade dos materiais, é de fundamental importância a correta dosagem, mistura e aplicação destes materiais, para se alcançar a qualidade final do concreto.

Entre os vários aspectos referentes à dosagem dos concretos pode-se citar a influência do teor de cimento no mecanismo de transporte no concreto. Segundo BUENFELD & OKUNDI (1998), a maioria dos processos de deterioração relativos às estruturas de concreto, envolve o transporte de agentes agressivos para o interior do concreto.

Além das propriedades físicas do concreto endurecido conforme citado por RODWAY (1985) nas figuras 2.3 e 2.4, para o estudo da durabilidade do concreto e dos mecanismos de deterioração, deve-se levar em consideração, também, a existência da zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta. Esta zona de transição é uma camada delgada com espessura típica de 10 a 50 μm , situada ao redor do agregado graúdo, sendo geralmen-

te mais fraca que as duas outras fases do concreto, o agregado e a pasta, exercendo uma influência sobre a resistência maior que o esperado pela sua espessura (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A pasta é um pó cinza, produzido pela moagem do clínquer e que tem como composição química⁹ principalmente a alita (C_3S), belita (C_2S) o aluminato tri-cálcico (C_3A) e tetracalcioalumino-ferrita (C_4AF) (CINCOTTO, 1972; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

2.2.2.2 - Mecanismos de Deterioração do Concreto

Várias são as formas de deterioração do concreto. Os agentes agressivos atuam, cada qual à sua maneira, sejam mecânicos, físicos, químicos ou biológicos. Os agentes biológicos não serão tratados nesta pesquisa devido a impossibilidade de se realizarem ensaios específicos.

BICZÓK (1972) cita que os processos de corrosão do concreto podem ser classificados como: corrosão física, que trata de desgastes mecânicos, erosão e corrosão química ou físico-química.

MEHTA e MONTEIRO (1994), enfatizam que “a distinção entre as causas físicas e químicas de deterioração é puramente arbitrária” ou seja, uma deterioração física como desgaste superficial, pode tornar o concreto suscetível à deterioração química, devido ao aumento da permeabilidade, e apresentam classificações das causas físicas e químicas de deterioração do concreto, conforme representado nas figuras 2.5 e 2.6.

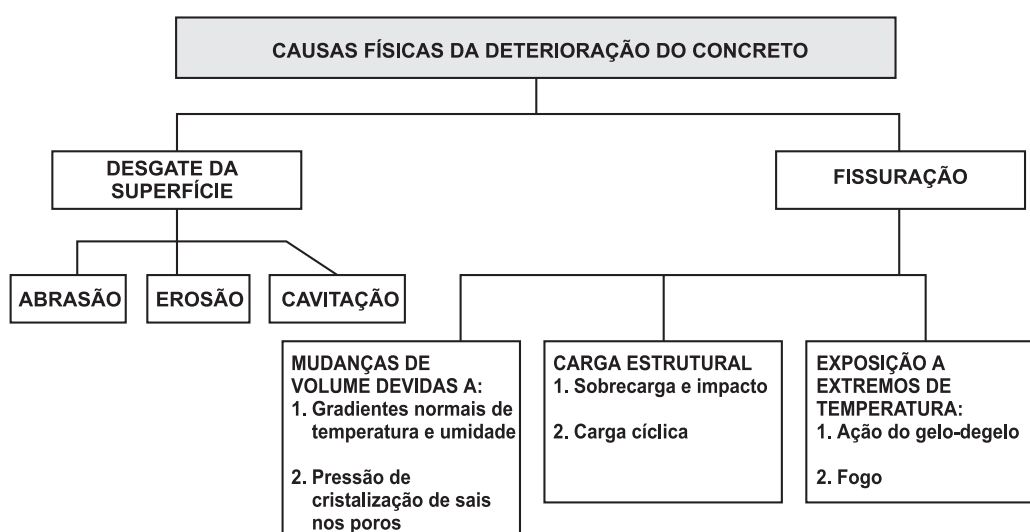


Figura 2.5 - Causas físicas da deterioração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

⁹ Abreviações empregadas em química do cimento: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F=Fe₂O₃; S = SO₃; H = H₂O

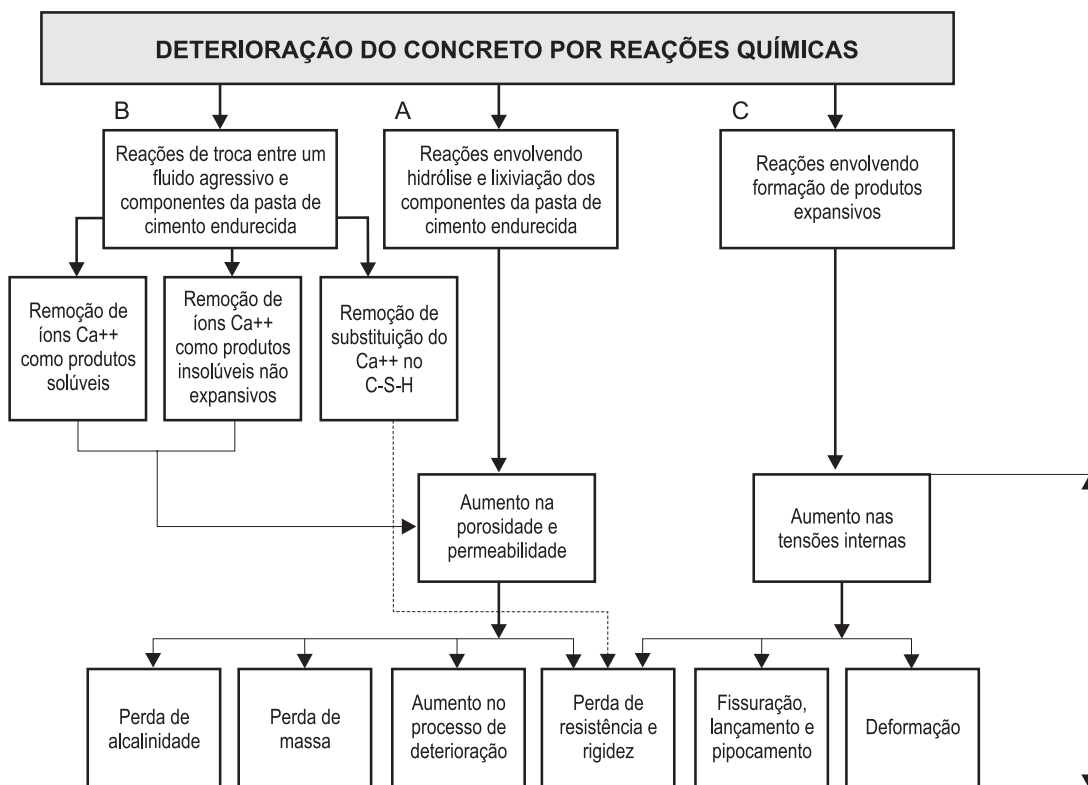


Figura 2.6 - Deterioração do concreto por reações químicas (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

CINCOTTO (1972), apresenta no quadro 2.2, uma classificação dos agentes agressivos ao concreto e seus efeitos.

Quadro 2.2 – Classificação dos agentes agressivos e seus efeitos sobre o concreto (CINCOTTO, 1992)

AGENTES AGRESSIVOS	NATUREZA ESPECÍFICA	EFEITOS SOBRE O CONCRETO
Mecânicos	carga, sobrecarga e choques impactos e fricção fluxo de água e ar	fissuras principalmente no aglomerante erosão, ruptura erosão, cavitação
Físicos	variações de temperatura, gradientes e oscilações de umidade intemperismo fogo e temperatura elevadas, corrente elétrica, radiação	fissura, esfoliação, ruptura da aderência fissuras, ruptura da aderência, esfoliação fissuras, transformações químicas, corrosão da armadura, dissolução do aglomerante
Químicos	ar e outros gases águas agressivas reagentes químicos solos e minerais do solo	dissolução do ligante, reações com H_2S , SO_2 , CO_2 e NH_3 dissolução do ligante e reações com ácido sulfúrico, sulfatos, cloretos, água carbonatada reações com ácidos e sais ácidos reações com ácidos fracos, sulfatados, zeólitos
Biológicos	vegetação microrganismos (bactérias, formas microscópicas de vida orgânica)	fissuras, umidade formação de sulfatos, enfraquecimento mecânico da textura

Deterioração mecânica

Em uma usina siderúrgica, por se manusearem cargas pesadas, acontecem muitos casos de impactos e sobrecargas eventuais não previstas, às estruturas de concreto, muitas vezes provenientes de acidentes operacionais.

Deve-se considerar, também, abrasão em pisos e pavimentos, como resultado de processo de produção ou tráfego de veículos ou mesmo por partículas levadas pelo vento (ACI, 1993).

Como consequência, surgem fissuras, lascamentos e, em alguns casos, danos irreversíveis, onde se fazem necessários reparos de grandes dimensões ou mesmo a substituição da estrutura atingida.

Deterioração Física

As partículas presentes no ambiente contribuem para a deterioração do concreto, atuando mecanicamente, por abrasão, quando são arrastadas constantemente sobre as superfícies do concreto (ex.: canais de exaustão de fumaça em concreto armado) ou, conforme a BSI (1992), atuando indiretamente para a ação química dos materiais, uma vez que, fixadas nas superfícies das estruturas, podem promover outras ações químicas da água ou das soluções.

Muitas partículas assentam-se próximo à fonte de emissão, porém, grande parte pode ser transportada pelo vento a longas distâncias, fixando-se nas superfícies das estruturas. As partículas freqüentemente contém fuligem, devido a combustão incompleta, minério de ferro, carvão mineral, assim como água e dióxido de carbono adsorvidos (ROSVALL, 1986)

Será destacado, porém, o efeito das altas temperaturas nas estruturas de concreto, pois, no caso de uma usina siderúrgica, encontram-se temperaturas nas mais variadas intensidades, podendo, em alguns casos, atingir o concreto com até 1.500° C.

Na figura 2.7, tem-se um exemplo de gradientes de temperatura obtidos através de termografia realizada no muro do pátio de escória da CST, antes e durante o basculamento da escória que, ao ser basculada no pátio, atinge diretamente o concreto armado.

Trata-se da visão frontal de um pote de aço carregado de escória de aciaria, sendo basculado em um pátio apropriado para recebimento desta escória. Este pote é transportado por composição ferroviária, que se apoia em um muro de concreto.

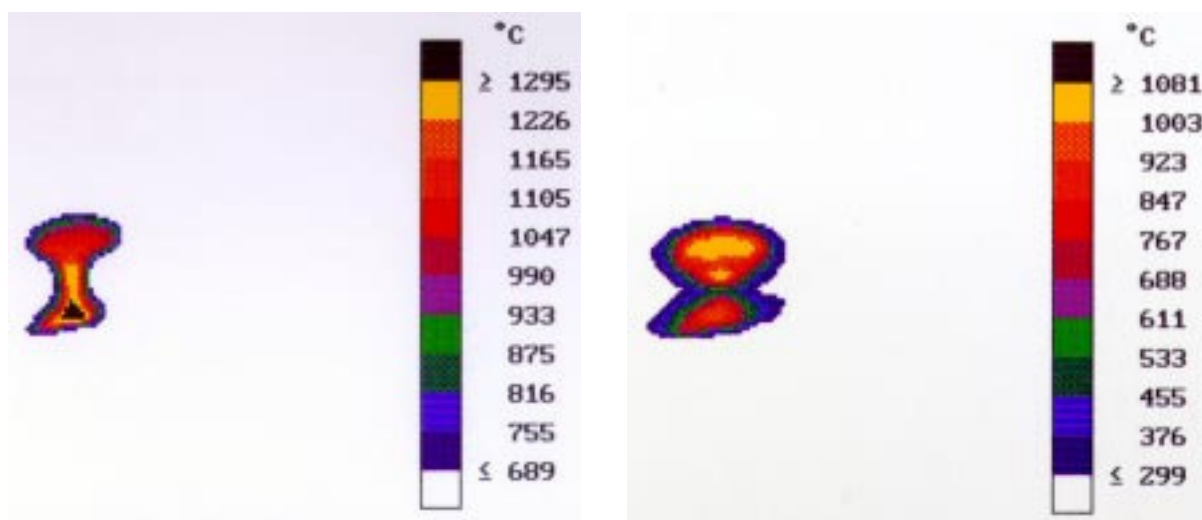


Figura 2.7 – Termograma do muro do pátio de escória da CST¹⁰

As altas temperaturas, quando citadas na literatura em geral, tratando-se de estruturas de concreto armado, situam-se em torno de 60°C, porém, em usinas siderúrgicas encontram-se temperaturas de até 1.500°C. Para este trabalho, consultou-se a literatura que trata de estruturas sujeitas a incêndios e, portanto, a temperaturas semelhantes às encontradas nas usinas siderúrgicas.

O concreto como material, assim como também as estruturas de concreto armado, são bastante suscetíveis aos danos provocados pela exposição a altas temperaturas.

Este é um assunto de difícil conclusão, pois são numerosas as variáveis envolvidas, quando se estudam os efeitos das altas temperaturas no concreto, podendo ser destacados o tempo de exposição, a temperatura, os materiais constituintes do concreto e a geometria das estruturas, entre as principais variáveis. Também podem ser citadas a carga a que estão sujeitas e a relação água/cimento, entre outros.

O tempo de exposição ao calor poderá levar uma pasta de cimento saturada a perder a água contida no concreto (água livre, água capilar e água adsorvida). Enquanto toda a água evaporável não for removida, o concreto não terá a temperatura elevada (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

¹⁰ Arquivos da CST

FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988) afirma que a água livre ou capilar, incluída no concreto, começa a evaporar-se a partir dos 100°C, o que retarda seu aquecimento e que, com o aquecimento progressivo, o concreto vai perdendo a água capilar entre os 200 e 300°C e a água de gel do cimento perde-se de 300 a 400°C, iniciando-se a diminuição sensível das resistências e o aparecimento das primeiras fissuras.

Segundo NEVILLE (1997) e FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988), aos 400°C, processa-se a decomposição de parte do hidróxido de cálcio, que se transforma em cal viva. Esta cal, pode se re-hidratar, caso após o resfriamento a água ingresse no concreto, tendo um efeito prejudicial devido expandir-se.

A perda de água, devido ao aquecimento tem também outras conseqüências, conforme a constituição do concreto e suas dimensões pois, segundo NEVILLE (1997), ensaios em concretos de alta resistência (90 MPa) permitem observar uma maior perda relativa de resistência que em concretos de resistência normal, devendo ser destacado que, o mais importante, no caso destes concretos, é o lascamento explosivo associado às altas temperaturas. Neste caso, embora o volume de água envolvido seja pequeno (baixo fator água/cimento), a permeabilidade é extremamente baixa, afirmando-se que, o risco de descamamento explosivo é tanto maior quanto menor a permeabilidade do concreto e quanto maior a velocidade de aumento da temperatura.

As dimensões da peça de concreto influenciam nos efeitos das altas temperaturas pois, em peças mais robustas, a movimentação da água é mais lenta que em peças delgadas.

Os agregados também exercem importante influência no efeito das altas temperaturas no concreto. No caso de altas temperaturas, muito comuns em usinas siderúrgicas, as propriedades térmicas dos agregados devem ser consideradas, pois, por exemplo, o quartzo sofre uma inversão térmica a 574°C com a transformação de α para β , sofrendo uma expansão brusca de 0,85% (NEVILLE 1977; MEHTA e MONTEIRO 1994).

Segundo NEVILLE (1997), a perda da resistência é bem menor quando o concreto é composto de agregados que não contém sílica, como os calcários e escória de alto forno.

Na figura 2.8, apresentam-se dados da resistência à compressão obtidos em ensaios realizados por ABRAMS apud MEHTA & MONTEIRO, (1994) em corpos de prova de concreto expostos a temperaturas de até 870°C e resistência f'_c média de 27 MPa, antes da exposição.

Nesses ensaios, pode-se observar a influência do tipo do agregado no comportamento do concreto armado, sob diferentes condições de carregamento. Notam-se a interferência dos agregados e do carregamento dos corpos de prova (0,4 da resistência original). É mostrado, também, que, independente da natureza do agregado, os concretos ensaiados apresentaram perda considerável na resistência, após se resfriarem.

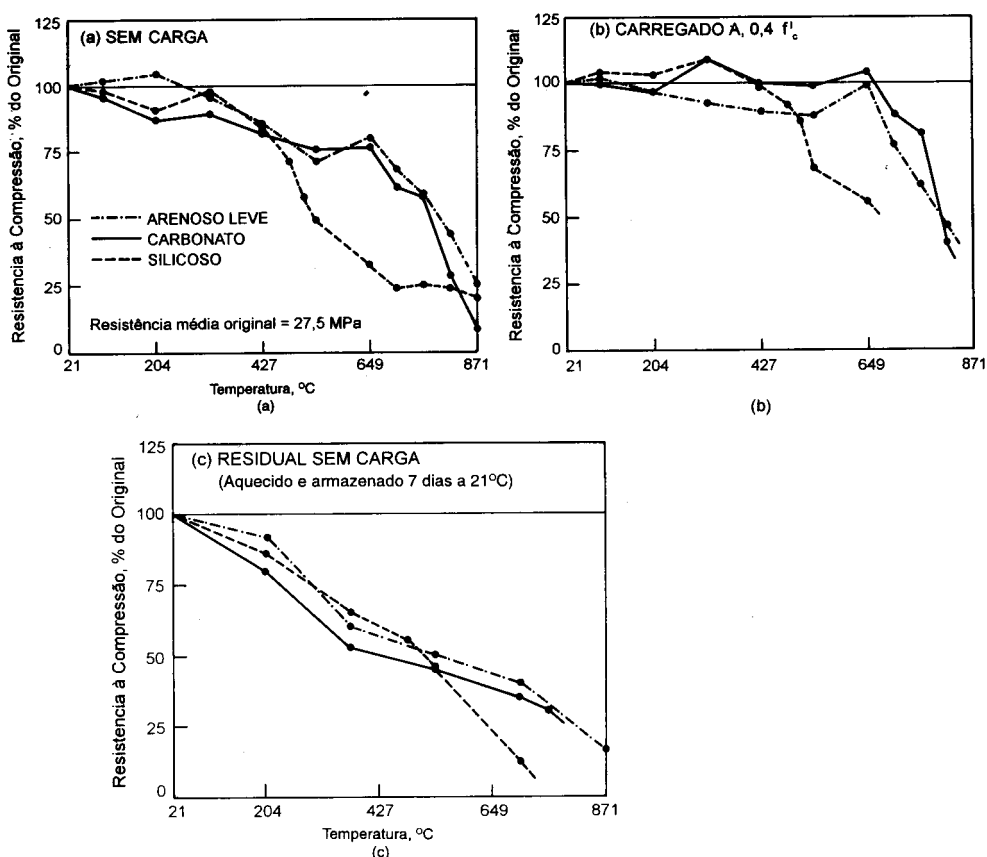


Figura 2.8 – Efeito do tipo de agregado e condições de ensaio na resistência ao fogo (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Deve-se considerar, também, a influência das altas temperaturas no aço e no conjunto concreto armado.

Segundo FERNÁNDEZ CÁNOVAZ (1988), as propriedades dos aços se alteram com o aumento da temperatura, embora os diversos tipos de aço tenham comportamentos diferentes, quando expostos ao calor.

As altas temperaturas exercem um efeito deletério sobre as estruturas, levando à perda da resistência do concreto, a tensões não previstas que podem gerar fissuras, e também contribuindo para o processo das reações químicas quando aliadas à umidade, pois favorecem e intensificam a ação dos elementos químicos eventualmente presentes no ambiente, em altas ou baixas concen-

trações, uma vez que “o aumento da temperatura atua como catalisador, ou acelerador de todo processo químico” (HELENE, 1986, p. 19).

Pelo exposto, pode-se concluir que as altas temperaturas são bastante nocivas ao concreto nas usinas siderúrgicas pois, os casos citados simulam situações transitórias, como um incêndio, enquanto que nas siderúrgicas, as condições de exposições às altas temperaturas são, em geral, constantes ou sujeitas a ciclos de aquecimento e resfriamento por longos períodos. Em geral, observa-se que estas estruturas não foram projetadas prevendo tais situações.

Deterioração química

A ação dos agentes agressivos de natureza química no concreto, tem sido bastante pesquisada conforme constatado pela grande quantidade de trabalhos publicados. Mas, devido à complexidade do assunto, nota-se, conforme CINCOTTO (1972), que algumas questões permanecem ainda sem resposta. A intensidade com que o concreto é atacado pelas substâncias agressivas é uma destas questões. Para este trabalho, que trata de patologias em estruturas de concreto em usinas siderúrgicas, ressalte-se que também não está esclarecida a concentração limite dos agentes agressivos acima da qual o seu efeito é deletério para o concreto.

A acidez é um indicador da agressividade do meio em contato com o concreto. Este indicador também pode determinar a classificação do mesmo como agressivo ao concreto pois, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), baixos valores de pH, geralmente $< 12,5$ podem, devido a redução da alcalinidade do fluído dos poros, levar a um desequilíbrio dos produtos cimentícios de hidratação.

Pode-se observar, também, que a resistência de concreto aos agentes químicos não está necessariamente ligada à sua resistência mecânica. Um concreto menos resistente mecanicamente pode ter, em sua composição, elementos mais resistentes a determinados agentes químicos (CINCOTTO, 1972). Porém, como a resistência mecânica está relacionada a fatores como baixa relação água/cimento e, conseqüentemente, menor permeabilidade, em situações semelhantes, um concreto de boa qualidade e mais resistente mecanicamente, terá mais resistência aos agentes químicos, comparado a um concreto mal adensado ou com baixas resistências mecânicas.

Na maioria dos casos, a água está presente nos processos de deterioração. MEHTA e MONTEIRO (1994) argumentam que a água é a causa de muitos tipos de processos físicos de degradação

em sólidos porosos e também, uma fonte de processos químicos de degradação como veículo para transporte de íons agressivos. No caso do concreto, a pasta é, em condições normais, alcalina e a exposição à águas ácidas é prejudicial ao material.

“A reação entre as substâncias dissolvidas na água e o concreto é iônica e ela será tanto mais intensa quanto maior a concentração de íons reagentes, independente de sua origem, se proveniente de um sal, de um ácido ou de uma base” (CINCOTTO, 1991, p.3).

A formação de vapor de água também tem efeito deletério sobre o concreto armado, uma vez que, para um dado teor de vapor de água no ar, caso haja uma diminuição brusca da temperatura, pode resultar em condensação ou pelo menos, aumentar a U.R. (umidade relativa) do ar. Neste caso, pode-se ultrapassar a umidade crítica para a qual são maiores os riscos de corrosão das armaduras. Esta umidade, crítica para o aço, situa-se entre 65 a 85% para uma temperatura de 25°C, (HELENE, 1986).

Um bom parâmetro para se analisar a agressividade do meio ambiente ao concreto, é a norma L1.007, CETESB (1988) que estabelece critérios para a caracterização das condições de exposição que influem no grau de agressividade do meio em contato com o concreto. A norma L1.007, CETESB (1988) destaca como condições agravantes do meio, a temperatura elevada, os gradientes de pressão, os ciclos de molhagem e secagem e a renovação constante do meio agressivo.

GRUBE e RECHENBERG (1989), estudaram o comportamento de vários tipos de concreto expostos a águas ácidas e mostraram que a exposição ao ácido carbônico, com efeito dissolvente da cal, leva à formação de uma camada protetora, que consiste em um gel como o dióxido de silício (SiO_2). Se esta camada for destruída mecanicamente, o concreto é deteriorado rapidamente. Caso esta camada se mantenha intacta, a perda de massa do concreto é reduzida consideravelmente.

Este fato, segundo os autores, não é considerado, pela maioria das normas, que levam em conta apenas a concentração dos agentes agressivos para determinar o grau de agressividade das águas em relação ao concreto.

Os processos de corrosão do concreto podem ser classificados de várias formas, em função dos agentes agressivos a que está exposto. Entre eles, destacam-se:

- simples lixiviação da cal livre;
- reações entre os agentes agressivos e certos produtos de hidratação do cimento portland, resultando em compostos secundários que podem ser lixiviados do concreto;
- reações entre os agentes agressivos e certos produtos de hidratação do cimento portland, formando sais expansivos como o gesso ou duplos sais expansivos como alumino-sulfatos de cálcio, cloro-aluminatos de cálcio ou carbo-aluminatos de cálcio, formando trincas ou lascamentos no concreto;
- cristalização de sais diretamente dos agentes agressivos com conseqüente expansão;
- corrosão das armaduras, como resultado da danificação da camada passivante (BICZÓK, 1972; PLUM, 1984; CHANDRA, 1996).

Os sulfatos, por exemplo, agredem o concreto através de reações químicas expansivas, sendo os sulfatos mais comuns, os de sódio (Na SO_4), magnésio (MgSO_4) e cálcio (CaSO_4) que são encontrados nas águas do mar e em muitos solos, em águas subterrâneas e em algumas águas residuais industriais (DAL MOLIN, 1988).

Os ataques por sulfatos compreendem, além da desagregação por expansão e fissuração a perda da resistência do concreto pela perda de coesão entre a pasta e as partículas de agregado. A deterioração inicia-se, geralmente, nos cantos e arestas, seguindo-se a deterioração progressiva e o lascamento do concreto, reduzindo-o a uma condição friável ou mesmo mole (NEVILLE, 1997).

GUTT et al (1989), em experiências com cubos de concreto utilizando-se de escória de alto forno como agregado graúdo, imersos durante 22 anos em soluções agressivas de sulfatos, entre outras observações, notaram que, nos concretos feitos com cimento resistente a sulfatos, a forma de deterioração foi diferente para as amostras expostas ao sulfato de magnésio e as expostas ao sulfato de sódio: no sulfato de sódio, a deterioração foi interna enquanto que em sulfato de magnésio ocorreu ataque progressivo nos vértices dos cubos.

Quanto aos ácidos, atuam deletariamente sobre os concretos, dissolvendo, tanto os compostos hidratados, quanto os não hidratados (CINCOTTO, 1972). Sendo um caso particular a se destacar, o ataque por ácido sulfúrico, que reage com o hidróxido de cálcio do cimento, para produzir sulfato de cálcio, que é depositado como gesso. O sulfato de cálcio formado pela reação inicial pode continuar reagindo com a fase do aluminato de cálcio do cimento, para formar trisulfoalu-

minato de cálcio (ettringita), o qual se expande quando cristaliza e pode levar o concreto ao lascamento ou a destruição (PLUM, 1984).

O ácido sulfídrico (H_2S) e o dióxido de enxofre (SO_2), quando presentes no ambiente, transformam-se em contato com o vapor de água e oxigênio, por oxidação, em ácido sulfúrico e os ácidos sulfídrico e sulfúrico provocam a desagregação do concreto, conforme comentado pela ABCP (1990).

Deterioração por gases – um caso particular da deterioração química.

Neste item, citar-se-ão análises da influência dos gases no concreto segundo CHANDRA (1996) e ROSVALL (1986).

ROSVALL (1986), em seu artigo, descreve, detalhadamente, a questão da deterioração das fachadas de construções e monumentos que têm sido relatadas em vários países nas últimas décadas, onde se observa um rápido aumento nestes relatos. Discorre, também, sobre os efeitos sinérgicos entre a poluição do ar e outros fatores, assim como as condições climáticas, destacando que alguns poluentes têm uma concentração natural, adicionalmente às contribuições do homem.

Entende-se que a umidade do ar, o vento, a temperatura e outros componentes naturais como o sal e a areia, interagem com os poluentes produzidos pela atividade industrial, sendo que, segundo ROSVALL (1986), os gases de maior interesse, quando se consideram pedras de construção, são os gases ácidos, como por exemplo o SO_2 , SO_3 , e NO_x .

A ação química dos gases CO_2 , SO_2 , NO_x , relaciona-se com o aglomerante a base de cal, a estrutura capilar e também com a reatividade de alguns agregados.

Em relação ao SO_2 , foi mostrado por KING & ROSVALL apud CHANDRA (1990), que este gás, na atmosfera, causa corrosão em pedras calcárias, convertendo a superfície para gesso.

O dióxido de enxofre (SO_2) e os outros gases presentes no ambiente, podem reduzir a alcalinidade das estruturas de concreto, pela reação com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, provocando a corrosão das armaduras que, por expansão, exercem pressão suficiente para o rompimento e posterior lascamento do concreto expondo-as ainda mais à ação dos agentes agressivos (HELENE, 1996).

CHANDRA (1996) descreve os mecanismos de deterioração dos gases em argamassas e concretos e enfatiza que o efeito sinérgico, ou seja, a ação conjunta de dois gases é maior do que a soma dos efeitos dos gases individualmente. Em geral, a ação dos gases é combinada com a ação do tempo (condições climáticas). Os gases poluentes, geralmente reagem sob a influência de oxigênio, luz do sol, temperatura e umidade para formar poluentes secundários.

Os poluentes atmosféricos ao se depositarem no concreto interagem com os produtos de hidratação do cimento Portland e podem formar sais expansivos como gesso, alumino-sulfatos de cálcio, cloroaluminatos de cálcio ou alumino carbonatos de cálcio, causando trincas que facilitam a penetração dos gases nas estruturas de concreto. Esta é a razão pela qual a corrosão das armaduras é maior perto das trincas que em outros locais (CHANDRA, 1996).

O mesmo autor explica os fenômenos de dissolução e lixiviação no concreto, devido aos gases poluentes, o que se busca reproduzir sinteticamente, no quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Fenômenos de dissolução e lixiviação no concreto devido aos gases poluentes (CHANDRA, 1996)

atmosfera ↓ gases poluentes ↓	
concreto	
Zona 1 carbonatada	Formação de sais como cloretos de cálcio, nitritos e nitratos (facilmente solúveis em água e, conseqüentemente, lixiviáveis) Há a cristalização de outros sais complexos como carboaluminatos e ettringita que, devido ao esforço produzido, formam trincas.
Zona 2	Os gases, então, penetram a zona carbonatada e reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na zona 2. Sais solúveis em água são produzidos e lixiviados através da zona carbonatada e em conseqüência, a concentração de hidróxido de cálcio diminui na zona 2. Mais $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é formado pela ajuda da hidratação do silicato de cálcio o qual é também, subseqüentemente removido pelo processo de lixiviação, deixando sílica gel. A zona 2 fica rica em $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mais rica em sílica e mais porosa.
Zona 3 Intermediária ao concreto	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ flui da zona 3 para a zona 2 e o processo se repete por si só e, eventualmente, a concentração total de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminui. Com menores quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminui a alcalinidade do concreto e aumenta o risco de corrosão das armaduras.

Importante observação é que a alcalinidade indicada pela fenolfetaleína no teste de profundidade de carbonatação, pode levar a um erro, uma vez que a zona neutralizada realmente representa a zona carbonatada com a área afetada pelos gases ácidos.

Em ensaios com argamassas, utilizando-se prismas de 40x40x160 mm, e a mistura destes gases, CHANDRA (1996) comprovou que, na presença de $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$, o processo de carbonatação é acelerado, em comparação com a exposição a apenas ao CO_2 . Este efeito foi confirmado, também, em ensaios com corpos de prova cúbicos de concreto, com resistência de 15 MPa, conforme pode-se observar na fig 2.9.

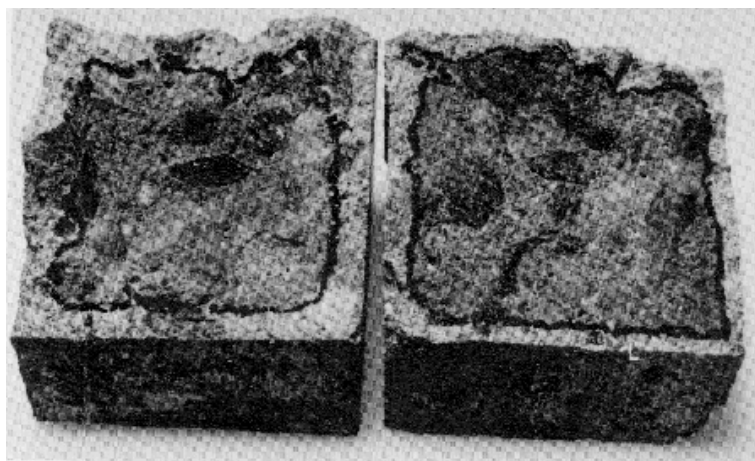


Figura 2.9 - Profundidades de neutralização de corpos de prova de concreto expostos a CO_2 e CO_2/SO_2 (CHANDRA, 1990)

Isto mostra que, na presença de SO_2 , a carbonatação é acelerada, confirmando que a reação é aumentada na presença de dois gases, ao invés de apenas um. Este efeito é descrito como efeito sinérgico.

Como outras formas de ataque ao concreto, citam-se os óxidos de nitrogênio, que reagem com a água, ou a amônia, que reage com o oxigênio, para formar ácido nitroso (HNO_2) e ácido nítrico (HNO_3). Os ácidos nitrosos, embora não muito fortes, são extremamente danosos ao concreto, pois formam sais de cálcio altamente solúveis, sob pequena exposição.

Neste item, tratou-se da questão da durabilidade das estruturas de concreto armado, descrevendo os fatores que a influenciam e os mecanismos de ação dos agentes agressivos.

Nos próximos itens, serão tratadas as questões da classificação da agressividade dos ambientes e dos concretos quanto à durabilidade.

2.3 – CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O concreto armado pode ser considerado um material durável. Acontece que a sua durabilidade depende de uma quantidade muito grande de diversos fatores, entre eles, os materiais constituintes, o processo de fabricação, a aplicação e, principalmente, sua adequada especificação para o uso a que se destina, bem como o ambiente a que será exposto.

Observa-se que o meio ambiente exerce grande influência na durabilidade do concreto armado. A evolução dos processos de cálculo, tornando as estruturas mais esbeltas, e dos processos construtivos, onde o tempo de execução é cada vez mais reduzido, aliados ao progresso, que concentra nos grandes centros urbanos e industriais uma gama de agentes agressivos, como por exemplo: gases como dióxido de carbono (CO_2), que reduzem a vida útil das estruturas, têm resultado em grandes insucessos, em relação à durabilidade das obras.

A deterioração do concreto é um fenômeno que, pode-se afirmar, não se deve a apenas uma causa. A classificação dos processos de deterioração do concreto em categorias nitidamente separadas, portanto, deve ser tratada com algum cuidado, considerando-se as interações dos vários agentes que podem estar presentes no processo. Este fato, de grande importância no estudo e determinação das causas da deterioração das estruturas, geralmente tende a ser negligenciado (METHA e MONTEIRO, 1994).

HELENE (1998), citando a literatura técnica então existente, descreve que se apresentam dois caminhos bem definidos de classificação do ambiente, em relação à agressividade às estruturas de concreto: a forma rigorosa, onde se classifica o meio em função da efetiva concentração dos agentes agressivos, e a forma indireta, onde a classificação do meio baseia-se simplesmente nas condições de exposição, admitindo que estas estejam associadas a diferentes concentrações de agentes agressivos.

Dada à importância de se projetarem e construírem obras duráveis, é necessário, não só conhecer o ambiente onde se localizarão as estruturas, mas também estabelecerem-se critérios para classificá-los, conforme o grau de agressividade, em função da natureza e quantidade dos agentes agressivos que se fazem ou se farão presentes, durante a vida de serviço das estruturas. Neste

sentido, muitos pesquisadores, centros de pesquisa e instituições normativas, no Brasil e no mundo, têm trabalhado, buscando a identificação e a classificação dos ambientes e a especificação das medidas correspondentes, para a elaboração dos projetos, como será descrito a seguir.

2.3.1 – Classificação dos ambientes segundo a BSI 7543 (1992)

A BSI 7543 (1992), destaca a necessidade dos projetistas avaliarem o ambiente que circunda as estruturas e também o ambiente imediatamente próximo às mesmas, chamado microclima. No quadro 2.4 é apresentada, na visão desta norma, uma relação de agentes que podem influenciar a vida útil dos componentes e materiais de construção.

Quadro 2.4 - Agentes que podem influenciar a vida útil dos componentes e dos materiais de construção segundo BSI 7543 (1992).

Tipos de Agentes	Agente
Agentes atmosféricos	Temperatura
	Radiação Solar/Térmica
	Água: Sólido (ex: neve, gelo) Líquido (ex: chuva, condensação) Vapor (ex: umidade elevada)
	Constituintes Normais do Ar: Oxigênio/Dióxido de Carbono
	Contaminantes do Ar: Gases (ex: óxidos de nitrogênio e enxôfre) Borrifos do mar Partículas (ex: areia, poeira)
	Gelo e Degelo
Agentes Biológicos	Fatores Biológicos: Micro organismos Insetos Outros animais Plantas
Agentes de Esforços	Fatores de Esforços: Permanentes/Intermitentes
Agentes Físicos e Químicos	Incompatibilidade Contaminação do Solo
Agentes Usuais	Uso Normal e Acidental Abusos dos Usuários

2.3.2 – Classificação dos ambientes segundo o CEB (1992)

No CEB (1992) citam-se que, para se desenvolverem os processos deletérios, tanto no concreto quanto nas armaduras, deve haver interações entre o material da estrutura e o meio ambiente.

Neste sentido, devem ser conhecidas as propriedades do meio ambiente que envolve as estruturas, no que diz respeito à sua influência na durabilidade.

O CEB (1992) destaca, ainda, que é mais fácil de se determinar a atmosfera, em que as estruturas estão envolvidas, denominada macroclima, através de métodos tradicionais. O macroclima, entretanto, influencia menos a durabilidade das estruturas do que o microclima, ou seja as condições do ambiente muito próximas às estruturas. Como exemplo, pode-se citar uma estrutura localizada em uma área industrial onde predominem gases como dióxido de enxôfre (SO_2) ou dióxido de carbono (CO_2) e, entretanto, esteja sujeita ao ataque direto de agentes agressivos como águas residuais ou agentes químicos. Estes últimos, serão os agentes que maior influência exercerão na durabilidade desta estrutura.

Conforme o CEB (1992), existem muitas formas diferentes de se dividir em categorias os ambientes, conforme o grau de agressividade às estruturas de concreto. Abaixo, descreve-se a classificação destes ambientes conforme o CEB-FIP model code (1978) apud CEB (1992).

(a) médio

- (i) interior de construções, para habitações normais ou para escritórios;
- (ii) condições onde um nível alto de umidade é atingido por apenas um curto período em um ano (por exemplo, a umidade relativa excede a 60% apenas por período menor que três meses em um ano).

(b) moderado

- (i) interiores de construções onde a umidade é alta ou há riscos de presença temporária de vapores corrosivos;
- (ii) água corrente;
- (iii) aumento de intempéries em atmosferas rurais ou urbanas, sem forte condensação ou gases agressivos;
- (iv) solos comuns.

(c) severo

- (i) líquidos contendo leves quantidades de ácidos, águas salinas ou fortemente oxigenadas;
- (ii) gases corrosivos ou solos particularmente corrosivos;
- (iii) condições atmosféricas corrosivas, industriais ou marinhas.

Estas condições servem de guia, quando se estimam os riscos para a durabilidade, associadas a uma dada estrutura em um dado ambiente, porém, uma proposta de um esquema mais prático do ponto de vista operacional é apresentada nas tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 - Classes de exposição do concreto relativas às condições ambientais segundo o CEB (1992)

Classe de exposição		Condições ambientais
1		Ambiente seco, por exemplo: - interior de construções para habitações normais ou para escritórios; - condições exteriores não expostas ao vento e às intempéries ou solos e água; - localidades com um nível alto de umidade por apenas um curto período em um ano (Exemplo: UR > 60 % durante menos de três meses em um ano)
2	a	Ambiente úmido sem congelamento ⁽¹⁾ , por exemplo: - interior de construções onde a umidade é alta; - componentes exteriores expostos ao vento e às intempéries mas não expostos ao congelamento; - componentes em solos não agressivos e/ou água não exposta ao congelamento.
	b	Ambiente úmido com congelamento ⁽¹⁾ , por exemplo: - componentes exteriores expostos ao vento e às intempéries ou solo não agressivo e/ou água e congelamento.
3		Ambiente úmido com congelamento ⁽¹⁾ , e agentes de descongelamento, por exemplo: - componentes exteriores expostos ao vento e às intempéries ou solos não agressivos e/ou água e congelamento e descongelamento químico.
4	a	Ambiente sujeito à água do mar, por exemplo: - componentes em zonas de respingos ou submersa em água do mar com uma face exposta ao ar; - componentes em ar salino saturado (direto na região costeira).
	b	Ambiente sujeito à água do mar com congelamento ⁽¹⁾ , por exemplo: - componentes em zonas de respingos ou submersa em água do mar com uma face exposta ao ar; - componentes em ar salino saturado (direto na região costeira).
As classes que se seguem, podem ocorrer isoladamente, ou em combinação com as anteriores		
5 ⁽²⁾	a	Ambientes químicos levemente agressivos (gás, líquido ou sólido).
	b	Ambientes químicos moderadamente agressivos (gás, líquido ou sólido).
	c	Ambientes químicos fortemente agressivos (gás, líquido ou sólido).

(1) Sob moderadas condições européias;

(2) Ver classificação ISO para condições ambientais quimicamente agressivas que afetam o concreto. A norma ISO está ainda por ser estabelecida. Ver também a tabela 2.3.

Tabela 2.2 - Classes de exposição da armadura relativas às condições ambientais segundo o CEB (1992).

Classe de exposição		Condições ambientais
1		Ambiente seco: localidades geralmente secas, de umidade favoravelmente constante, quando a UR excede 70% raramente, por exemplo: interiores de construções para habitações normais ou para escritórios.
2	a	Ambientes com variações ocasionais da UR, trazendo riscos de condensação apenas ocasionalmente.
	b	Ambientes com variações mais freqüentes da umidade, trazendo riscos freqüentes de condensação.
3		Ambiente úmido com congelamento ⁽¹⁾ e agentes de descongelamento, por exemplo: componentes exteriores expostos ao vento e às intempéries ou solos não agressivos e/ou água e congelamento e agentes químicos de descongelamento.
4		Ambiente sujeito à água do mar, por exemplo: - componentes em zonas de respingos ou submerso na água do mar, com uma face exposta ao ar. - componentes em ar salino saturado (direto na região costeira).

(1) Sob moderadas condições européias

O CEB (1992), p. 41 e 42, destaca, ainda, que “a quantificação do grau de agressividade do ambiente é útil, porém, pode representar uma simplificação, em casos onde ocorrem ataques combinados”, e apresenta na tabela 2.3, diferentes graus de agressividade de ataque químico ao concreto por água e solos que contém agentes agressivos.

Tabela 2.3 – Níveis do grau de agressividade de ataque químico ao concreto por água e solos que contém agentes agressivos segundo o CEB (1992).

Tipo de ataque	Classe de exposição ⁽¹⁾ 5a	Classe de exposição ⁽¹⁾ 5b	Classe de exposição ⁽¹⁾ 5c	
	Ataque fraco	Ataque moderado	Ataque forte	Ataque muito forte
Água				
- pH	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	4,5 – 4,0	< 4,0
- CO ₂ agressivo; mg CO ₂ /l	15 – 30	30 – 60	60 – 100	> 100
- Amônio: mg NH ₄ ⁺ /l	15 – 30	30 – 60	60 – 100	> 100
- Magnésio: mg Mg ²⁺ /l	100 – 300	300 – 1500	1500 – 3000	> 3000
- Sulfato: mg SO ₄ ²⁻ /l	200 – 600	600 – 3000	3000 – 6000	> 6000
Solo				
- Grau de acidez de acordo com Baumann-gully	> 20	(2)	(2)	(2)
- Sulfato: mg SO ₄ ²⁻ / kg de solo seco	2000 – 6000	6000– 12000	12000	(2)

(1) Ver tabela 2.1

(2) Condições de ataque que não são encontradas na prática.

2.3.3 – Classificação dos ambientes segundo HELENE (1997a; 1997b; 1998)

HELENE (1997a; 1997b; 1998) destaca a relação que existe entre a agressividade do ambiente e as ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto e propõe, na tabela 2.4, originada de síntese das publicações disponíveis, uma classificação de agressividade ambiental relacionada aos riscos de deterioração da estrutura. Propõe, na tabela 2.5, a classificação ambiental do ponto de vista da durabilidade das armaduras e, na tabela 2.6, a classificação segundo o ponto de vista da durabilidade do concreto.

Tabela 2.4 – Classificação da agressividade ambiental segundo HELENE (1997a).

Classe de Agressividade	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Tabela 2.5 – Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras segundo HELENE (1997a).

Classe de Agressividade	Macroclima	Microclima	Gás Carbônico CO ₂ no Ambiente	Cloretos Cl ⁻ no Ambiente
I	Atmosfera rural	UR ≤ 60 % interiores secos	≤ 0,3 %	≤ 200 mg/l
II	Urbana	UR de 60 a 95 % UR = 100 % (submersa)	≤ 0,3 %	< 500 mg/l
III	Marinha ou industrial	UR de 65 a 95 % (variável)	≥ 0,3 %	> 500 mg/l
IV	Pólos industriais	Interiores úmidos de indústrias com agentes agressivos	> 0,3 %	> 500 mg/l

Tabela 2.6 – Classificação da agressividade do ambiente sobre o concreto segundo HELENE (1997a).

Classe de Agressividade	pH	CO ₂ agressivo (mg/l)	Amônia NH ₄ ⁺ (mg/l)	Magnésio Mg ²⁺ (mg/l)	Sulfato SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sólidos dissolvidos (mg/l)
I	> 6,0	< 20	< 100	< 150	< 400	> 150
II	5,9 – 5,9	20 – 30	100 – 50	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	5,0 – 4,5	30 – 100	150 – 250	250 – 500	700 – 1500	< 50
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	> 1500	< 50

Notas: 1 No caso de solos a análise deve ser feita no estado aquoso do solo.

2 Água em movimento, temperatura acima de 30°C, ou solo agressivo muito permeável conduz a um aumento de um grau na classe de agressividade.

3 Certas combinações de ação física superficial, tais como abrasão e cavitação, aumentam a velocidade de ataque químico e podem corresponder a um aumento do grau de agressividade

2.3.4 – Classificação dos ambientes segundo ACI (1993)

O ACI (1993) expõe considerações sobre o efeito das condições atmosféricas ao concreto, destacando que, em alguns ambientes químicos, a vida útil do concreto é bem menor do que na maioria das atmosferas comuns e apresenta, na tabela 2.7 os efeitos dos mais comuns agentes químicos no concreto, ressaltando que esta tabela deveria ser considerada apenas como um guia preliminar.

Tabela 2.7 – Efeito dos elementos mais comuns sobre o concreto segundo ACI (1993)

Velocidade de ataque à temperatura ambiente	Ácidos inorgânicos	Ácidos orgânicos	Soluções alcalinas	Soluções salinas	Diversos
Rápida	Hidroclorídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Lático	–	Alumínio Cloreto	–
Moderada	Fosfórico	Tânico	Hidróxido de sódio ⁽¹⁾ > 20% ⁽²⁾	Nitrato de amônia Sulfato de amônia Sulfato de sódio Sulfato de magnésio Sulfato de cálcio	Brômio (gas) Solução de Sulfito
Lenta	Carbônico	–	Hidróxido de sódio ⁽¹⁾ 10–20% ⁽²⁾ Hipoclorito de sódio	Cloreto de amônio Cloreto de magnésio Cianeto de sódio	Cloro (gas) Água do mar Água leve
Desprezível	–	Oxálico Tartárico	Hidróxido de sódio ⁽¹⁾ < 10% ⁽²⁾ Hipoclorito de sódio Hidróxido de amônia	Cloreto de cálcio Cloreto de sódio Nitrato de zinco Cromato de sódio	Amônia (líquida)

Notas: (1) O efeito do hidróxido de potássio é similar ao do hidróxido de sódio.

(2) Evitar agregados silicosos porque são atacados por fortes soluções de hidróxido de sódio.

2.3.5 – Classificação dos ambientes segundo CETESB (1988)

A Norma L1.007 da CETESB (1988), fixa condições para classificar o grau de agressividade do meio aquoso em contato com o concreto e, estabelece, também, os critérios para caracterização das condições de exposição que influem no grau de agressividade deste meio aquoso em relação ao concreto, conforme apresentado na tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Tipos de agressividade e valores limites para a avaliação do grau de agressividade segundo CETESB (1988).

Reações Agressividade do meio aquoso	A				B				
	Fenômeno Preponderante de Lixiviação incluindo a hidrólise dos compostos de cálcio do aglomerante				Fenômeno Preponderante acompanhado de Lixiviação				
					Carbonatação		Troca Iônica		
1	2	3	4	5	6		7	8	9
Grau	Águas Puras	Águas não Salinas Ácidas		Águas Salinas			Águas Magnesianas	Águas Amoniacais	
				Ácidas	Alcalinas				
	Sólidos Dissolvidos (mg/L)	pH	CO ₂ Agressivo (mg/L)	pH	pH	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Mg ₂ ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	
								NO ₃ ⁻ <150 mg/L	NO ₃ ⁻ ≥150 mg/L
Nulo	>150	7	–	7	7	–	< 100	< 100	< 50
Fraca	150 a 50	> 6	< 20	> 6	–	–	100 a 150	100 a 150	50 a 100
Média	150 a 50	6,0 a 5,6	20 a 30	6,0 a 5,6	–	–	150 a 250	150 a 250	100 a 150
Forte	< 50	5,5 a 4,5	> 30	5,5 a 4,5	8 a 9	400	150 a 500	150 a 500	150 a 250
MuitoForte	< 50	< 4,5	–	< 4,5	> 9	> 600	> 500	> 500	> 250

Tabela 2.8 - Tipos de agressividade e valores limites para a avaliação do grau de agressividade segundo CETESB (1988) – (continuação).

Reações Agressividade do meio aquoso	C		
	Fenômeno de Expansão por formação de Gipsita e/ou Etringita acompanhada de Lixiviação		
	10	11	12
1			
Grau	Águas do Mar, Salobra, de Esgoto, ou Poluída Industrialmente		
	SO ₄ ²⁻		
	Mg ₂ ⁺ < 100 mg/L, NH ₄ ⁺ < 100 mg/L		Mg ⁺² ≥100 mg/L NH ₄ ⁺ ≥100 mg/L
	Cl ⁻ < 1000 mg/L	Cl ⁻ ≥1000 mg/L	
Nulo	< 200	< 250	< 100
Fraca	200 a 350	250 a 400	100 a 200
Média	350 a 600	400 a 700	200 a 350
Forte	600 a 1200	700 a 1500	350 a 600
MuitoForte	> 1200	> 1500	> 600

Segundo a norma CETESB (1988), esta tabela refere-se ao grau efetivo de agressividade em relação a um concreto nas seguintes condições:

- a - Concreto dosado com cimento Portland comum, consumo de cimento de 300 kg/m³ e relação água/cimento = 0,60;
- b - o concreto está enterrado em solo de areia e pedregulho, cujo coeficiente de permeabilidade é maior ou igual a 10⁻³ cm/s;

c - supõe-se o concreto com tempo de cura inferior a 28 dias e em contato com água em repouso.

O grau de agressividade determinado deve ser aumentado ou diminuído, em função das condições locais:

Condições atenuantes:

- a - a água agressiva ao concreto entra em contato com este após 28 dias de sua execução;
- b - a água agressiva ao concreto entra em contato com este algumas vezes por ano;
- c - o concreto se encontra envolvido por terreno reconhecidamente coesivo (baixa permeabilidade), etc..

Condições agravantes:

- a - a água está em movimento;
- b - o nível de água varia com frequência (molhagem e secagem);
- c - existe uma pressão hidráulica (gradiente hidráulico) unilateral;
- d - a temperatura da água é superior a 45°C;
- e - a estrutura de concreto é de seção delgada, sendo a menor dimensão de 20 cm aproximadamente, etc.

2.3.6 – Classificação dos ambientes segundo a EHE (1999)

Uma norma recente, a EHE (1999), enfatiza bem a questão da durabilidade no projeto de concreto armado, colocando como requisito essencial: “uma estrutura deve ser projetada e construída para que, com uma segurança aceitável, seja capaz de suportar todas as ações a que possa ser solicitada durante a construção e o período de vida útil previsto no projeto, assim como a agressividade do ambiente” (EHE, 1999, p. 21).

Nas tabelas 2.9, 2.10 e 2.11 apresentam-se os critérios de classificação da exposição ambiental conforme a EHE (1999).

Tabela 2.9 – Classes especiais de exposição relativas à corrosão das armaduras segundo a EHE (1999).

CLASSE GERAL DE EXPOSIÇÃO				DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
classe	subclasse	designação	tipo de processo		
Não agressiva		I	Nenhum	- Interiores de edifícios, não submetidos a condensações - Elementos de concreto em massa	- Interiores de edifícios, protegidos da intempérie
Normal	Umidade Alta	IIa	Corrosão de origem diferente dos cloretos	- Interiores submetidos a umidades relativas médias altas (>65%) ou a condensações - Exteriores em ausência de cloretos e expostos a chuva em zonas com precipitação média anual superior a 600 mm - Elementos enterrados ou submersos	- Sótãos não ventilados - Cimentados - Tabuleiros e pilares de pontes em zonas com precipitação média anual superior a 600 mm - Elementos de concreto em coberturas de edifícios
	Umidade Média	IIb	Corrosão de origem diferente dos cloretos	- Exteriores em ausência de cloretos, submetidos a ação de água de chuva, em zonas de precipitação média anual inferior a 600 mm	- Construções exteriores protegidas da chuva - Tabuleiros e pilares de pontes em zonas com precipitação média anual superior a 600 mm
Marinha	Aérea	IIIa	Corrosão por cloretos	- Elementos de estruturas marítimas, acima do nível do preamar - Elementos exteriores de estruturas situadas nas proximidades da linha costeira (a menos de 5 Km)	- Edificações nas proximidades da costa - Pontes nas proximidades da costa - Zonas aéreas de diques, cais, e outras obras de defesa litorânea - Instalações portuárias
	Submersa	IIIb	Corrosão por cloretos	- Elementos de estruturas marinhas submergidas permanentemente, abaixo do nível de baixamar	- Zonas submergidas de diques, cais e outras obras de defesa litorânea - Cimentados e zonas submergidas de pilares de pontes no mar
	Em zonas de marés	IIIc	Corrosão por cloretos	- Elementos de estruturas marítimas situadas na zona de variação de marés	- Zonas situadas ao longo de diques, cais e outras obras de defesa litorânea
Com cloretos de origem diferente do meio marítimo		IV	Corrosão por cloretos	- Instalações não impermeabilizadas em contato com água que apresente um conteúdo elevado de cloretos, não relacionados com o ambiente marinho - Superfícies expostas a sais de degelo não impermeabilizadas	- Piscinas - Pilares de pisos superiores ou passarelas em zonas de neve - Estações de tratamento de água

Tabela 2.10 - Classes especiais de exposição relativas a outros processos distintos da corrosão segundo a EHE (1999).

CLASSE GERAL DE EXPOSIÇÃO				DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
classe	subclasse	designação	tipo de processo		
Química agressiva	Débil	Qa	Ataque químico	- Elementos situados em ambientes que contém substâncias químicas capazes de provocar a alteração do concreto com velocidade lenta (Ver tabela 2.11).	- Instalações industriais, com substâncias debilmente agressivas segundo a tabela 2.11; - Construções nas proximidades de áreas industriais, com agressividade débil segundo a tabela 2.11.
	Média	Qb	Ataque químico	- Elementos em contato com água do mar; - Elementos situados em ambientes que contém substâncias químicas capazes de provocar a alteração do concreto com velocidade média (Ver tabela 2.11).	- Blocos e outros elementos para diques; - Estruturas marinhas em geral; - Instalações industriais, com substâncias de agressividade média segundo a tabela 2.11; - Construções nas proximidades de áreas industriais, com agressividade média segundo a tabela 2.11; - Instalações de transporte e tratamento de águas residuais com substâncias de agressividade média segundo a tabela 2.11.
	Forte	Qc	Ataque químico	- Elementos situados em ambientes que contém substâncias químicas capazes de provocar a alteração do concreto com velocidade rápida (Ver tabela 2.11)	- Instalações industriais, com substâncias de agressividade alta segundo a tabela 2.11; - Instalações de transporte e tratamento de águas residuais com substâncias de agressividade alta segundo a tabela 2.11.
Com geadas	Sem sais fundentes	H	Ataque gelo-degelo	- Elementos situados em contato freqüente com água, ou zonas com umidade relativa média ambiental no inverno superior a 75% e que tenham uma probabilidade anual superior a 50% de alcançar, pelo menos uma vez, temperaturas abaixo de (- 5) °C.	- Construções em zona de alta montanha; - Estações de inverno.
	Com sais fundentes	F	Ataque por sais fundentes	- Elementos destinados ao tráfego de veículos ou pessoas em zonas com mais que 5 nevadas anuais ou com valor médio da temperatura mínima nos meses de inverno inferior a 0°C.	- Tabuleiros de pontes ou passarelas em zonas de alta montanha.
Erosão		E	Abrasão cavitação	- Elementos submetidos a desgaste superficial; - Elementos de estruturas hidráulicas onde a cota piezométrica possa descer abaixo da pressão de vapor da água.	- Pilares de pontes em rios muito torrenciais; - Elementos de diques, cais e outras obras de defesa litorânea que se encontrem submetidos a fortes ondas do mar; - Pavimentos de concreto; - Tubulações de alta pressão.

Tabela 2.11 - Classificação da agressividade química segundo a EHE (1999).

Tipo de meio agressivo	Parâmetros	Tipo de exposição		
		Qa ⁽¹⁾	Qb ⁽¹⁾	Qc ⁽¹⁾
		Ataque débil	Ataque médio	Ataque forte
Água	Valor do pH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
	CO ₂ agressivo (mg CO ₂ / l)	15 - 40	40 - 100	> 100
	Íon amônio (mg NH ₄ ⁺ / l)	15 - 30	30 - 60	> 60
	Íon magnésio (mg Mg ²⁺ / l)	300 - 1.000	1.000 - 3.000	> 3.000
	Íon sulfato (mg SO ₄ ²⁻ / l)	200 - 600	600 - 3.000	> 3.000
	Resíduo seco (mg / l)	75 - 150	50 - 75	< 50
Solo	Grau de acidez BAUMANN-GULLY	> 20	(2)	(2)
	Íon Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ / Kg de solo seco)	2.000 - 3.000	3.000 - 12.000	> 12.000

Notas: (1) Ver tabela 2.10;

(2) estas condições não acontecem na prática.

2.3.7 – Classificação dos ambientes segundo ABNT/NBR6118:2000 (2000)

Encontra-se em fase de discussão pública, o texto de revisão da atual norma de Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado NBR 6118, cuja última revisão data de 1978. Nesse projeto de revisão, observa-se o destaque ao assunto durabilidade das estruturas, contrastando com a versão ainda em vigor da referida norma.

Além de estabelecer um período de vida útil¹¹ mínimo de 50 anos, este projeto de revisão da norma também estabelece critérios para classificação do ambiente, quanto à agressividade, como pode ser visto nas tabelas 2.12, 2.13.

¹¹ “Por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem exigir medidas extras de reparo” [NBR6118:2000, (2000), p. 53]

Tabela 2.12 – Classes de agressividade ambiental segundo NBR6118:2000 (2000).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Tabela 2.13 – Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição segundo NBR6118:2000 (2000).

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco ⁽¹⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁽²⁾ de molhagem e secagem	Seco ⁽³⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁽⁴⁾ de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	—	III
Industrial	II	III	II	III
Especial ⁽⁵⁾	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingos de maré	—	—	—	IV
Submersa ≥ 3m	—	—	—	I
solo	—	—	Não agressivo I	Úmido e agressivo II, III ou IV

(1) Salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de aptos. residências e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura

(2) Vestiários, banheiros, cozinhas, lavanderias industriais e garagens.

(3) Obras em regiões secas, como o nordeste do país, partes protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos.

(4) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas

(5) Macro clima especial significa ambiente com agressividade bem conhecida, que permitirá definir a classe de agressividade de III ou IV nos ambientes úmidos. Se o ambiente for seco, a classe de agressividade será sempre II nos ambientes internos e III nos externos.

Nota: quando o risco de contaminação por cloretos for alto, o trecho da estrutura deve ser enquadrado na classe IV. É o caso da zona de respingo da maré.

Conforme a ABNT/NBR 6118:2000 (2000), para caso de agressividade ao concreto onde, através de avaliações específicas, se conhecem as concentrações dos agentes agressivos, pode-se utilizar as orientações da norma L1.007 da CETESB (1988), ou pode-se adotar os valores referenciais apresentados na tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Classificação da agressividade do ambiente visando a durabilidade do concreto segundo NBR6118:2000 (2000).

Classe de agressividade	pH	CO ₂ agressivo (mg/l)	Amônia NH ₄ ⁺ (mg/l)	Magnésio Mg ²⁺ (mg/l)	Sulfato SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sólidos dissolvidos (mg/l)
I	> 6,0	< 20	< 100	< 150	< 400	> 150
II	5,9 – 5,9	20 – 30	100 – 150	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	5,0 – 4,5	30 – 100	150 – 250	250 – 500	700 – 1500	< 50
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	> 1500	< 50

Notas: 1. No caso de solos, a análise deve ser feita no estrato aquoso do solo.

2. Água em movimento, temperatura acima de 30°C, ou solo agressivo muito permeável, conduz a um aumento na classe de agressividade.

3. Ação física superficial tal como, abrasão e cavitação, aumenta a velocidade de ataque químico.

Nota-se que várias são as considerações encontradas na literatura, relativas à classificação dos ambientes a que serão expostas as estruturas de concreto.

Nas indústrias siderúrgicas, objeto deste trabalho, como citado no início do presente capítulo, existem inúmeros ambientes e microclimas, específicos a cada unidade ou sub-unidade do processo produtivo. Ressalte-se, também, que devem somar-se ao ambiente tipicamente siderúrgico, as condições climáticas regionais. A CST, por exemplo, está situada próxima à orla marítima e em região com forte umidade relativa do ar.

Certamente, algumas condições específicas do processo siderúrgico como as altas temperaturas não são citadas nos exemplos acima.

No capítulo 4, citam-se os principais agentes agressivos no processo siderúrgico identificados nesta pesquisa, e no capítulo 5, exemplos de obras da CST nas quais se observaram manifestações patológicas e se realizaram ensaios e recuperações das estruturas de concreto armado. De posse destes dados, são feitas classificações de algumas áreas e unidades da CST, quanto ao grau de agressividade às estruturas de concreto armado, seguindo-se as orientações dos pesquisadores e as normas apresentadas no presente capítulo.

2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS QUANTO À DURABILIDADE

A durabilidade do concreto depende de inúmeros fatores, entre eles o material constituinte e o meio a que está exposto.

A qualidade do material passa pelos constituintes, entre eles o cimento, com os vários tipos de composição (ex.: cimentos resistentes a sulfatos, cimentos com adições, etc.), os agregados, que influenciam a durabilidade em função de sua natureza e granulometria, a água de amassamento e, também, a qualidade da fabricação e a aplicação do concreto.

Quanto ao ambiente de exposição do concreto, existem os fatores que o afetam, sejam naturais (ex.: água, vento, sol, etc.) ou produzidos pelo homem (poluição, agentes químicos, atividades industriais, etc.). Estes fatores podem agir isoladamente, ou em conjunto.

Uma classificação dos concretos quanto à durabilidade depende, porém, da fixação de limites mínimos para os agentes agressivos, sob os quais a durabilidade é afetada e da relação entre as diversas categorias de concreto, considerando-se qualidade e características específicas.

Segundo BICZÓK (1972), a questão de qual é o limite para se definir a adequação entre as categorias agressivas e as não agressivas do ambiente, em relação às categorias do concreto, só pode ser discutida mediante o resumo de todos os dados colhidos das investigações científicas e a observação prática. Destaca, também, que as diferenças entre os limites estabelecidos pelas normas de diversos países não podem ser consideradas isoladamente e sim, com uma visão global, observando que as diferenças entre as normas tendem a diminuir com o tempo. Esta afirmação pode ser corroborada observando-se a tabela 2.15 onde se estabelece uma comparação entre alguns valores estipulados pelo (CEB, 1992), HELENE (1997a), EHE (1999) e NBR 6116:2000 (2000). Nota-se que há uma tendência de se aproximarem ou mesmo coincidirem os valores apresentados pelas referidas normas descritas no item 2.3.

Tabela 2.15 – Comparação entre normas de alguns parâmetros de agressividade ao concreto.

Classe de agressividade	pH		CO ₂ agressivo (mg/l)		Sólidos dissolvidos (mg/l)		Amônio NH ₄ ⁺ (mg/l)		Sulfato SO ₄ ²⁻ (mg/l)	
	Mais fraca	Mais forte	Mais fraca	Mais forte	Mais fraca	Mais forte	Mais fraca	Mais forte	Mais fraca	Mais forte
CEB (1992)	6,5 - 5,5	< 4,0	15 – 30	> 100	—	—	15 - 30	> 100	200-600	> 6000
HELENE (1997a)	> 6,0	< 4,5	< 20	> 100	> 150	< 50	< 100	> 250	< 400	> 1500
EHE (1999)	6,5 – 5,5	< 4,5	15 – 40	> 100	75 – 150	< 50	15– 30	> 60	200-600	> 3000
NBR6118:2000 (2000)	> 6,0	< 4,5	< 20	> 100	> 150	< 50	< 100	> 250	< 400	> 1500

MEHTA e MONTEIRO (1994), p.35, assumem que o termo durabilidade de um material “refere-se ao seu tempo de vida útil, sob condições ambientais dadas”. Como exemplo, citam o caso de exposição do concreto a águas ácidas, onde a impermeabilidade do material e a estanqueidade da estrutura são determinantes da sua durabilidade.

FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988), por sua vez, destaca as propriedades que influem na durabilidade do concreto, entre elas a compacidade, a relação água-cimento, o tipo de cimento empregado e a idade em que o concreto entra em contato com o meio agressivo.

Uma interessante observação neste sentido é feita por HELENE (1997b), sobre o que denomina de regra dos 4C, a qual, segundo o autor, determina a durabilidade da estrutura do concreto, ou seja:

Compostos ou traço do concreto;

Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;

Cura efetiva do concreto na estrutura;

Cobrimento das armaduras.

Uma vez, conhecido e classificado o ambiente em que as estruturas se localizarão, deve-se projetar visando a sua durabilidade. Neste sentido os pesquisadores e as entidades normativas fazem suas recomendações, quanto às especificações do concreto e do cobrimento das armaduras, das quais serão citadas as da EHE (1999) e da ABNT/NBR 6118:2000 (2000) por serem mais recentes.

2.4.1 – Classificação do concreto segundo a EHE (1999)

A EHE (1999) apresenta um método de classificação do concreto, visando uma durabilidade adequada das estruturas convencionais, não submetidas a situações de agressividade extraordinária e recomenda que, para outros casos, pode ser conveniente recorrer a outros métodos alternativos, baseados em critérios de comportamento.

Esta norma recomenda que se tomem, no projeto, todas as medidas necessárias para que se garanta uma adequada durabilidade das estruturas, entre elas, formas e detalhes que facilitem a drenagem das águas e também, que se adotem medidas para permitir fácil acesso e manutenção, principalmente aos elementos mais sujeitos à deterioração como juntas, apoios e drenagens.

Em relação à classificação do concreto, quanto à agressividade do ambiente, a EHE (1999) determina que se deve classificar, primeiramente, o tipo de ambiente conforme as tabelas 2.9, 2.10 e 2.11. Em seguida, determinar como parâmetros gerais, o cobrimento mínimo das armaduras conforme tabela 2.16, a relação máxima água/cimento e o consumo mínimo de cimento, conforme tabela 2.17, e as resistências mínimas do concreto conforme tabela 2.18.

Devem-se considerar, também, outros requisitos adicionais, como resistência a reações álcali-agregados, resistência à erosão e detalhes construtivos.

Tabela 2.16 - Cobrimentos mínimos segundo a EHE (1999).

Resistência característica do concreto (N/mm ²)		Cobrimento mínimo (mm) segundo a classe de exposição ⁽²⁾ ⁽³⁾									
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc
$25 \leq f_{ck} < 40$	geral	20	25	30	35	35	40	35	40	(1)	(1)
	elementos pré-fabricados e lâminas	15	20	25	30	30	35	30	35	(1)	(1)
$f_{ck} \leq 40$	geral	15	20	25	30	30	35	30	35	(1)	(1)
	elementos pré-fabricados e lâminas	15	20	25	25	25	30	25	30	(1)	(1)

Notas: (1) O projetista fixará o cobrimento ao elemento, para que garanta adequadamente, a proteção das armaduras, frente à ação agressiva ambiental;

(2) Ver tabelas 2.9 e 2.10;

(3) Para casos de classificação de exposição H, F ou E, não há recomendação especial para o cobrimento.

O cobrimento nominal das armaduras é função do tipo da peça de concreto e do nível de controle de execução, devendo ser acrescidos, aos cobrimentos mínimos os seguintes valores:

0 mm para peças pré-fabricadas com controle intenso de execução;

5 mm para peças concretadas “in loco” e com nível intenso de controle de execução;

10 mm para os casos restantes.

Tabela 2.17 - Máxima relação água/cimento e quantidade mínima de cimento segundo a EHE (1999).

Parâmetro de dosagem	Tipo de concreto	Classe de exposição ⁽¹⁾												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relação a/c	massa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	protendido	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Quantidade mínima de cimento (Kg/m ³)	massa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	protendido	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Nota: (1) Ver tabelas 2.9 e 2.10.

Tabela 2.18 - Resistências mínimas compatíveis com os requisitos de durabilidade segundo a EHE (1999).

Parâmetro de dosagem	Tipo de concreto	Classe de exposição ⁽¹⁾												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistência mínima de dosagem (N/mm ²)	massa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	protendido	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Nota: (1) Ver tabelas 2.9 e 2.10.

2.4.2 – Classificação do concreto segundo a ABNT/NBR 6118:2000 (2000)

A ABNT/NBR 6118:2000 (2000), também apresenta uma correspondência entre a classe de agressividade do ambiente e a qualidade recomendada para o concreto (tabela 2.19) e o cobrimento nominal das armaduras (tabela 2.20).

Tabela 2.19 – Correspondência entre classes de agressividade e qualidade do concreto conforme ABNT/NBR 6118:2000 (2000).

Concreto	Classe de agressividade (ver tabela 2.12)				
	Tipo	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, 1985)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Notas: (1) CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado

(2) CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Tabela 2.20 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal conforme ABNT/NBR 6118:2000 (2000).

C _{nom} mm	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 2.12)			
		I	II	III	IV ⁽³⁾
Concreto armado	Laje ⁽²⁾	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	55
Concreto protendido ⁽¹⁾	Todos	30	35	45	55

- (1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.
- (2) Para a face superior das vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos, e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas recomendações:
 $C_{nom} \geq \bar{c}_{barra}$, $C_{nom} \geq \bar{c}_{feixe} = \bar{c}_n \sqrt{n}$ e $C_{nom} \geq 0,5 \bar{c}_{bainha}$ respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm
- (3) As faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

2.5 - CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, fez-se uma revisão dos aspectos da durabilidade, das propriedades do concreto armado, dos mecanismos de deterioração e principalmente, da grande influência exercida pelo ambiente na durabilidade das estruturas.

Não se pode considerar uma tarefa fácil, a determinação real das condições ambientais e relacioná-las com a correta especificação dos materiais e a vida útil esperada para as estruturas. Estudos, neste sentido, e normas pertinentes, vêm propondo ferramentas para auxiliar nesta tarefa. Estas ferramentas são as classificações dos ambientes em categorias distintas em relação ao grau de agressividade ambiental e as especificações dos concretos e cobrimentos das armaduras adequados para estes ambientes.

Como as próprias normas salientam, as classificações dos ambientes e os valores limites dos agentes agressivos propostos são uma ferramenta, que deve ser utilizada na ausência de informações mais precisas, resultantes de ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade frente ao tipo de agressividade previsto em projeto [ABNT/NBR 6118:2000 (2000)]. De qualquer forma, é um grande avanço poder contar com estas recomendações e, ao segui-las poder esperar a vida útil especificada no projeto para as estruturas.

Nota-se, segundo BICZÓCK (1972), que alguns limites estabelecidos, nestas normas, para a classificação do ambiente quanto à agressividade, tendem a se igualar, respeitando-se as particularidades de cada região onde foram redigidas. Como exemplo, o caso de congelamento e degelo

em determinados países, ou mesmo a referência da [ABNT/NBR 6118:2000 (2000)] ao clima seco do nordeste brasileiro. A EHE (1999) ressalta que a norma trata de obras convencionais não submetidas a situações de agressividade extraordinária e, que para estes casos, deve-se recorrer a métodos alternativos de durabilidade baseados em critérios de comportamento.

Pode-se concluir, então, que é muito importante o conhecimento do ambiente e dos agentes agressivos e suas ações no concreto armado, para que se possam utilizar as normas com o máximo de eficiência.

Neste sentido, no próximo capítulo, far-se-á uma descrição dos agentes agressivos identificados no âmbito desta pesquisa, em relação ao ambiente de usinas siderúrgicas.

Capítulo 3

IDENTIFICAÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGENTES AGRESSIVOS AO CONCRETO EM USINAS SIDERÚRGICAS

3.1 – APRESENTAÇÃO

Após uma abordagem geral da durabilidade das estruturas de concreto armado e da questão da classificação dos ambientes quanto à agressividade, apresenta-se, a seguir, a identificação, o mapeamento e a caracterização de agentes agressivos ao concreto armado, em usinas siderúrgicas, que é o objetivo principal desta pesquisa.

Para facilitar o entendimento deste capítulo, faz-se necessário apresentar uma visão geral do processo de fabricação do aço.

3.2 – O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO

O processo produtivo de uma usina integrada é um dos principais processos utilizados no mundo, para a fabricação do aço. Estas usinas ocupam uma grande área, por exemplo, uma usina que produz 3 milhões de toneladas de aço por ano, pode ocupar uma área de 4 a 8 km² segundo a UNEP & IISI (1997).

O processo produtivo, que abrange a fabricação do ferro gusa e, posteriormente, a transformação do mesmo em aço, consta do recebimento e manuseio de matérias primas, fabricação do síter, do coque, do ferro gusa, transformação do gusa em aço, refino posterior e acabamento do aço.

Na figura 3.1 é apresentado o fluxo de produção da CST. Não consta, ainda, neste fluxo, o laminador de tiras a quente, que está em fase de implantação, com previsão de início de produção para o primeiro semestre do ano de 2002.

A seguir, será descrito, resumidamente, o fluxo básico da produção do aço em usinas integradas, baseado na literatura, ILAFA (1975), MORANDI (1977), ARAÚJO (1997) e em manuais e entrevistas realizadas na CST.

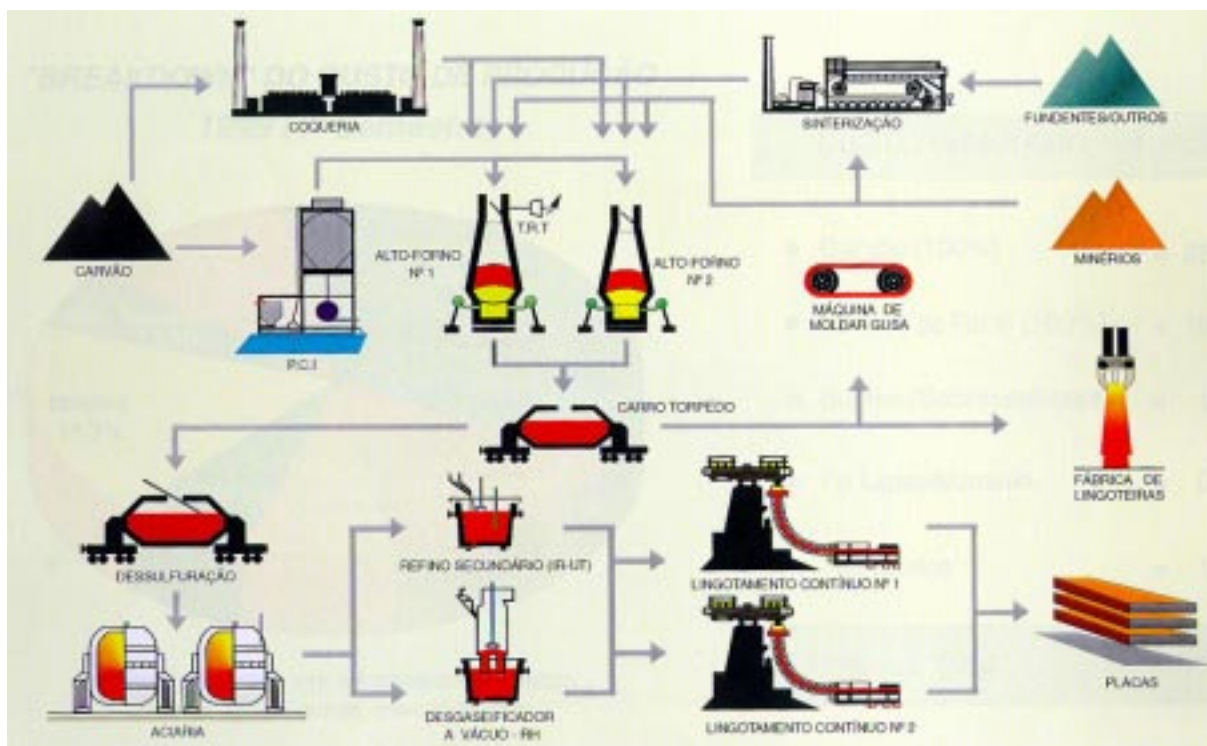


Figura 3.1 – Fluxo de produção da CST¹²

3.2.1 – Recebimento e preparação de matérias-primas

Este item deve ser dividido em duas unidades: o pátio de carvão e a área de matérias-primas.

No pátio de carvão, são armazenados os carvões minerais em pilhas, ao ar livre, para posterior envio, através de correias transportadoras, para a coquearia, onde será transformado em coque.

A área de matérias primas tem a função de receber, armazenar, também ao ar livre, e distribuir diversas matérias primas (minérios de ferro, fundentes e adições), as quais, através de correias transportadoras, alimentarão os altos-fornos, a calcinação, a aciaria e a sinterização.

Minérios de ferro são os portadores do principal elemento que é o ferro, sendo os óxidos os que representam interesse econômico para a siderurgia e os mais utilizados a hematita e a magnetita.

Os principais fundentes são o calcáreo, a cal, o dunito, o serpentinito, a dolomita e o quartzo. Podem ser divididos em: básicos (portadores de CaO e/ou MgO) e ácidos (portadores de SiO_2 e/ou Al_2O_3).

As adições principais são o Minério de Manganês e a Ilmenita.

¹² Arquivos da CST

3.2.2 - Sinterização

A Unidade de Sinterização tem por finalidade transformar o minério, já beneficiado e preparado, em um produto semi-elaborado denominado sinter, que possui as características físico-químicas definidas e apropriadas à operação de altos fornos de grande porte.

A sinterização é um processo de aglomeração a quente da mistura de finos de minérios, coque, fundentes e outras adições, onde ocorrem dois fenômenos distintos: o fenômeno físico de transferência de calor entre os materiais e o das reações químicas, cuja evolução é função da reatividade, da quantidade de combustível e da unidade e composição química da mistura. Neste processo, desenvolvem-se temperaturas superiores a 1.200°C.

3.2.3 - Coqueria

A Coqueria é uma unidade fabril que tem por finalidade transformar o carvão mineral em um novo produto, denominado coque, cuja principal função é servir de combustível para os altos fornos. Esta transformação se dá pelo aquecimento, em fornos, que em muitas indústrias permitem a recuperação de subprodutos, reunidos nas baterias de fornos de coque.

3.2.3.1 – Unidades Complementares

- **Apagamento a Úmido**

Unidade onde o coque incandescente, após a saída dos fornos, é apagado através de jatos de água.

- **Apagamento a Seco (CDQ - COKE DRY QUENCHING)**

Neste sistema, o coque é apagado com a utilização de gás, em uma câmara de resfriamento. Este processo permite a recuperação de energia, melhoria na qualidade do coque e redução da poluição ambiental.

- **Carboquímicos**

Local onde são tratados os gases da coqueria e está dividida nas seguintes unidades, que têm por função a limpeza dos gases e a destruição dos agentes poluentes:

Decantação de Alcatrão, Resfriadores Primários de Gás, Precipitadores Eletrostáticos de Alcatrão, Exaustores de Gás, Lavador de Amônia, Destilação de Amônia e Concentração de Água Amoniacal, Combustão de Amônia, Lavador de Naftaleno e Grupo Frigorífico.

3.2.4 – Alto Forno

O alto forno é um reator metalúrgico, para produção de ferro gusa, a matéria prima para fabricação do aço. Do ponto de vista do processo, é o reator que associa o óxido de ferro (minério) ao carbono (carvão), efetuando a redução do óxido de ferro, gerando o ferro gusa, que é uma liga de ferro carbono.

Sínter, minérios, pelotas e coque são carregados pelo topo do forno, enquanto o ar é insuflado por ventaneiras na parte inferior. O coque é queimado e os gases redutores são gerados em alta temperatura. Estes gases, em contato com a carga de minérios descendente, reagem, reduzindo e fundindo o minério, gerando ferro gusa e escória.

3.2.4.1 – Unidades Auxiliares

- **Poço de Resfriamento de Escória**

Unidade onde a escória de alto forno é resfriada ao ar livre gerando um material de granulometria e densidades variadas, denominado de escória bruta de alto forno.

- **Granulação de escória**

Unidade onde a escória é resfriada bruscamente transformando-se em um material granulado, com a forma de dimensões aproximadas de uma areia média, denominada escória granulada de alto forno.

- **ETA - Estação de tratamento de água do alto forno**

Conjunto de reservatórios e torres de resfriamento, onde é tratada e resfriada a água utilizada no processo.

- **Outras Unidades**

Limpeza de gases e equipamentos de descarga e pesagem de matérias primas.

3.2.5 - Aciaria

A aciaria ou refino é a unidade onde o gusa proveniente dos alto fornos, se transforma em aço. Na CST, utiliza-se o sistema LD, que é um dos processos mais modernos e largamente utilizados no mundo e consta, basicamente, em despejar o gusa líquido em um recipiente metálico (conver-

tedor), revestido de material refratário. Logo após, é injetado oxigênio e são adicionados cal e outros componentes, obtendo-se o aço e gerando-se a escória de aciaria.

3.2.6 - Outras Unidades - Utilidades

- Estação de Desmineralização de água;
- Estação de Tratamento de água industrial;
- Fábrica de Oxigênio;
- Casa de Força;
- Estações de Tratamento de Esgoto;
- Refeitórios Industriais;
- Oficinas de Manutenção;
- Unidade de Resfriamento de Placas;
- Equipamentos de Controle Ambiental;
- Calcinação.

3.3 - AGRESSIVIDADE POTENCIAL AO CONCRETO ARMADO, NAS DIFERENTES ÁREAS DO PROCESSO

O concreto armado está presente em praticamente todas as unidades das indústrias siderúrgicas e, nestas unidades, em edificações com as mais diversas finalidades.

Em usinas integradas a coque, em geral, têm-se as áreas de recebimento de matérias primas, a coqueria, a sinterização, o alto forno, a aciaria, as unidades de acabamento (produção de placas, bobinas, etc.), além das unidades administrativas.

Nestas áreas, encontram-se, ainda, estações de tratamento de efluentes hídricos, casa de força, estação de desmineralização de água, calcinação, tratamento e manuseio de escórias, tratamentos de gases de coqueria, de alto forno e de aciaria, reservatórios em concreto para água industrial e tratada, reservatórios para subprodutos, escritórios entre outros.

O processo siderúrgico constitui-se de variadas atividades que podem gerar ambientes e produtos agressivos ao concreto armado. É comum a presença de calor, onde se encontram temperaturas de até 1.500°C e produtos sólidos, líquidos e gasosos como por exemplo o CO₂ (dióxido de carbono) e NH₄⁺ (amônio) entre outros, que podem agredir o concreto isoladamente ou, o que é mais comum, atuando em conjunto.

Os ambientes e produtos, juntamente com estruturas inadequadamente projetadas, e/ou construídas, aliadas a manutenções insuficientes ou inexistentes, conduzem a inúmeras manifestações patológicas registradas nas usinas siderúrgicas. GIAMUSSO (1995) cita vários exemplos de deterioração de concreto por altas temperaturas, em diversas siderúrgicas, tais como: as paredes do fosso do convertedor, na aciaria da AÇOMINAS, MG, que se encontravam em estado de desagregação, devido às elevadas temperaturas e a choques térmicos, bem como o revestimento do talude de descarga de escória, também na AÇOMINAS, sujeito a choques térmicos e a abrasão.

Como a durabilidade das estruturas de concreto depende, entre outros fatores, de sua correta adaptação ao meio a que estarão expostas, torna-se fundamental que projetistas e construtores tenham o necessário conhecimento do ambiente e dos possíveis agentes agressivos ao concreto. Segue-se, portanto, uma visão global das emissões de resíduos e subprodutos e de agentes agressivos ao concreto, presentes no processo siderúrgico de usinas integradas a coque, atendo-se apenas à etapa de início do processo (recebimento de matérias primas) até a etapa de produção de aço (aciaria). Os valores e quantidades citados são apenas indicativos, pois o processo de produção varia, entre as diversas usinas, devido principalmente a:

- diferentes composições dos insumos;
- diferenças entre os produtos;
- diferenças tecnológicas;
- mudanças nas especificações do produto, conforme a necessidade dos clientes;
- qualidade e eficiência dos equipamentos de controle ambiental, ou mesmo o índice de reaproveitamento de resíduos implantado em cada usina.

Considere-se, também, que a produção do aço nas usinas integradas envolve uma série de processos, cada um com diferentes consumos de materiais e diferentes emissões, que são afetados pelas variações no processo, dificultando, assim, a fixação das concentrações dos agentes agressivos ao concreto.

Os dados, portanto, quando citadas quantidades, refletirão as emissões médias medidas em várias usinas siderúrgicas, conforme a bibliografia consultada, LUND (1971), ILAFA (1975), EASTERLY (1992) e UNEP & IISI (1997), além de alguns exemplos específicos da CST como é o caso de medidas efetuadas em águas utilizadas no processo e que entram em contato com o concreto. É importante destacar que, quando se fala em emissões de agentes agressivos, deve-se interpretar como *potencial de emissão*, uma vez que, as indústrias podem controlar e reduzir estas emissões através de sistemas de controle ambiental.

3.3.1 – Metodologia

A metodologia utilizada para levantamento da agressividade potencial ao concreto armado nas diferentes áreas do processo, visou identificar o potencial de emissão de agentes agressivos ao concreto e constou de:

- pesquisa bibliográfica;
- estudo de caso - exemplos de obras situadas na usina da CST;
- coleta e análise de água circulante em quatro unidades do processo da CST, que estão em contato com o concreto armado, para fins de confrontação com a norma L1.007 da CETESB (1998), a norma EHE (1999) e o trabalho publicado por HELENE (1997a).
- localização das fontes de agentes agressivos ao concreto armado em planta típica de uma usina siderúrgica integrada a coque, e fotografias de exemplos destes agentes.

3.3.2 – Uma visão geral

Numa visão geral do processo, citar-se-ão os potenciais de emissão dos agentes agressivos nas unidades principais e em algumas unidades específicas.

No quadro 3.1, apresenta-se uma breve descrição das emissões (agentes), em algumas unidades.

Quadro 3.1 - Emissões em Unidades de Processos Siderúrgicos (ILAFA, 1975).

Área	Emissões (agentes)
Recebimento, armazenamento e manipulação de matérias primas	Partículas
Sinterização e peletização	Partículas Anidrido sulfuroso Monóxido de carbono Óxidos de nitrogênio Fluoretos
Coquerias e instalações de recuperação de subprodutos	Manutenção: partículas Preparação de matéria prima: partículas Baterias: partículas, H ₂ S, CO, odores Subprodutos: emanações diversas
Alto forno	Partículas Anidrido sulfuroso Monóxido de carbono
Aciaria	Convertedores a oxigênio (LD e Kaldo): poeiras vermelhas
Indústrias complementares	Fundições de ferro e aço: partículas, CO e NO _x Refratários: partículas Preparação de cal: partículas, CO ₂ e prod. de combustão

Mais recentemente, a UNEP & IISI (1977) apresentaram relações entre insumos, emissões, subprodutos e resíduos e o produto gerado no processo produtivo, ressaltando que os valores resultam de pesquisa entre várias indústrias, não representando a melhor ou pior situação. Para os objetivos deste trabalho, porém, os dados apresentados são significativos.

A seguir, apresentam-se os dados referentes ao processo como um todo (figura 3.2), referentes à sinterização (figura 3.3), à coqueria. (figura 3.4), ao alto forno (figura 3.5) e à aciaria (figura 3.6). Os dados apresentados nestas tabelas adaptadas de UNEP & IISI, (1997) e no quadro 3.1 adaptado do ILAFA (1975), representam os insumos, as emissões, os subprodutos, os resíduos e os produtos gerados nas indústrias siderúrgicas e suas principais unidades, não detalhando sua localização. Servem, portanto, para se definir o macroclima e indicar a existência dos agentes agressivos, para que se possa investigar uma unidade específica, para onde se pretenda projetar estruturas de concreto armado, ou mesmo, investigar eventuais patologias e especificar sistemas de recuperação de estruturas.

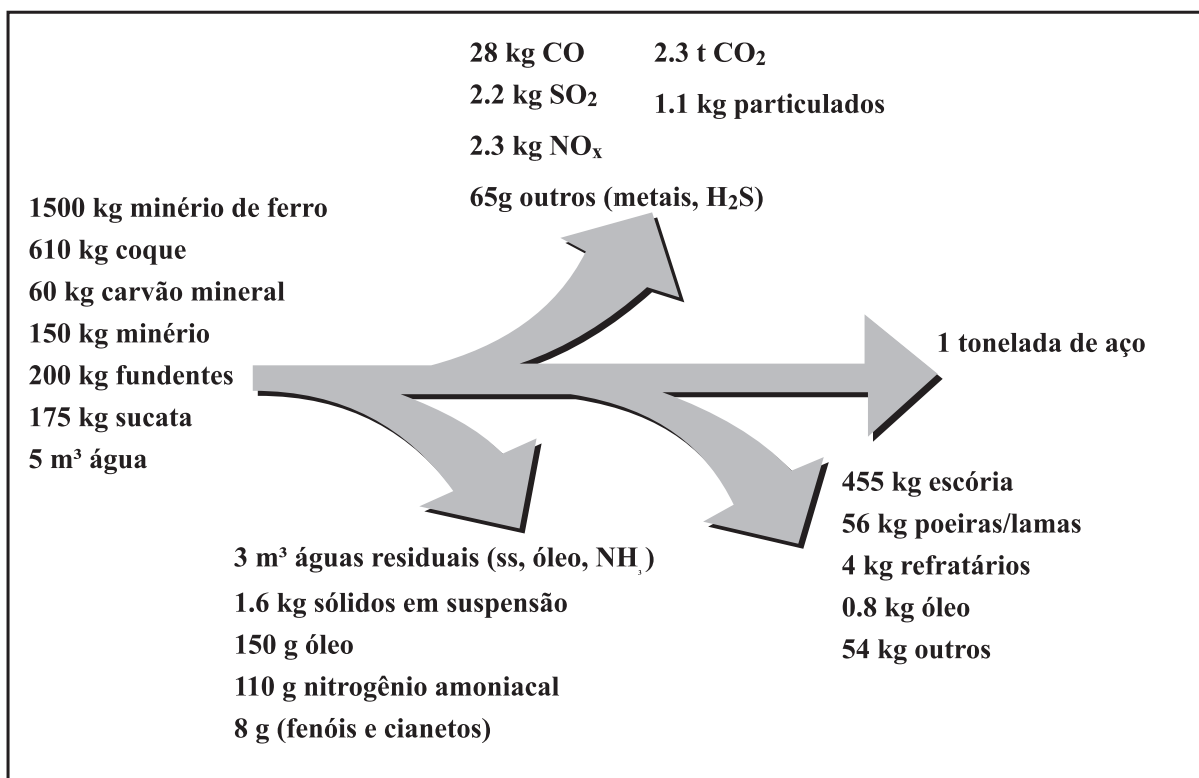


Figura 3.2 - Balanço energia/materiais para usina integrada (UNEP & IISI, 1997).

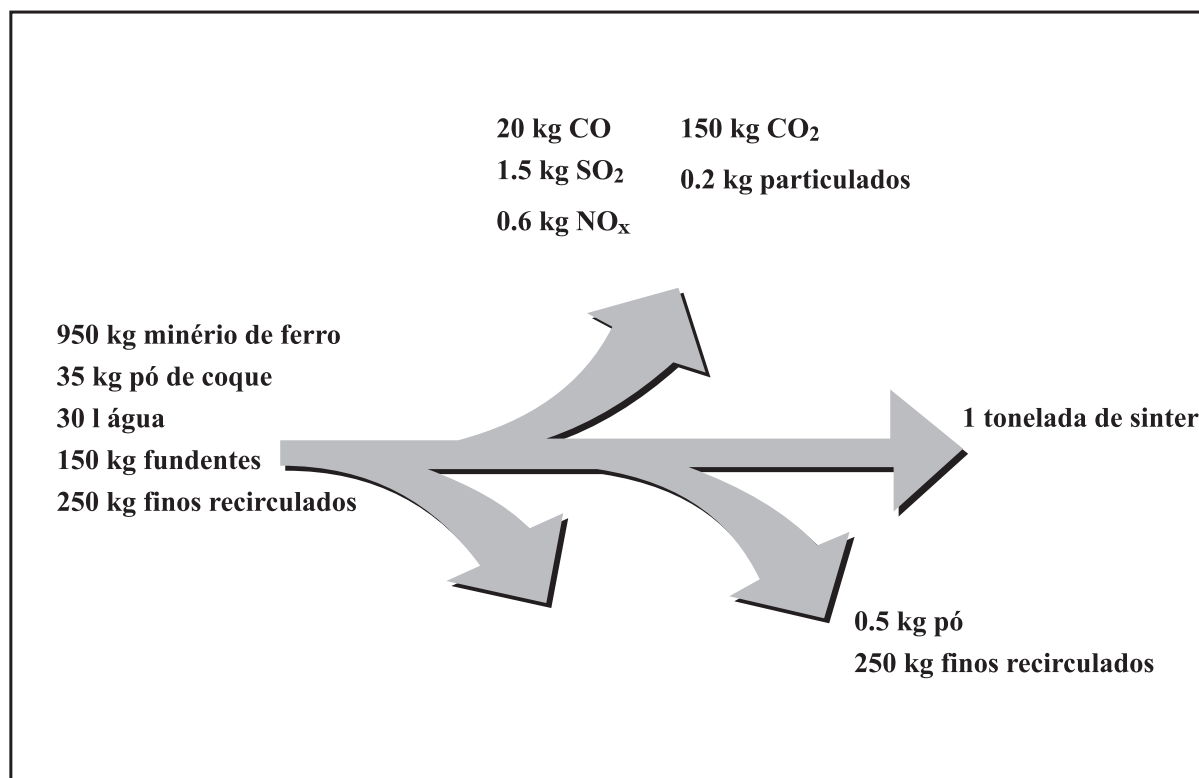


Figura 3.3 - Balanço energia/materiais para sinterização (UNEP & IISI, 1997).

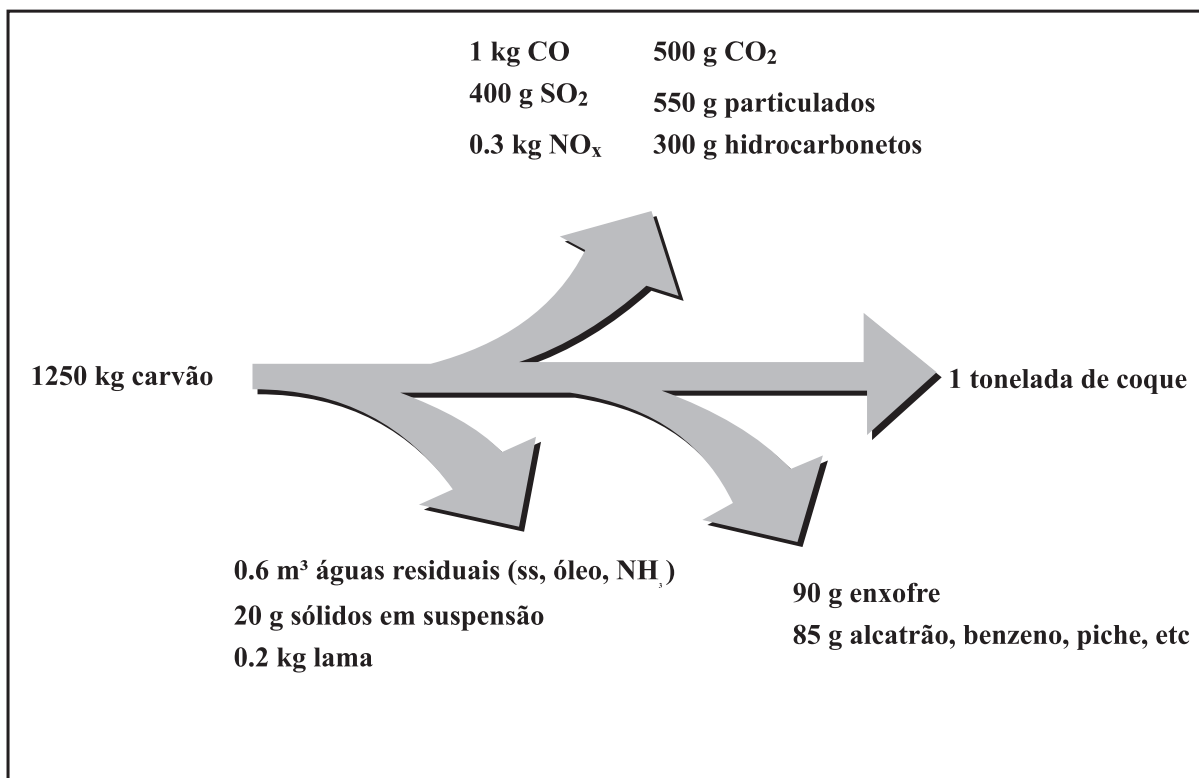


Figura 3.4 - Balanço energia/materiais para coqueria (UNEP & IISI, 1997).

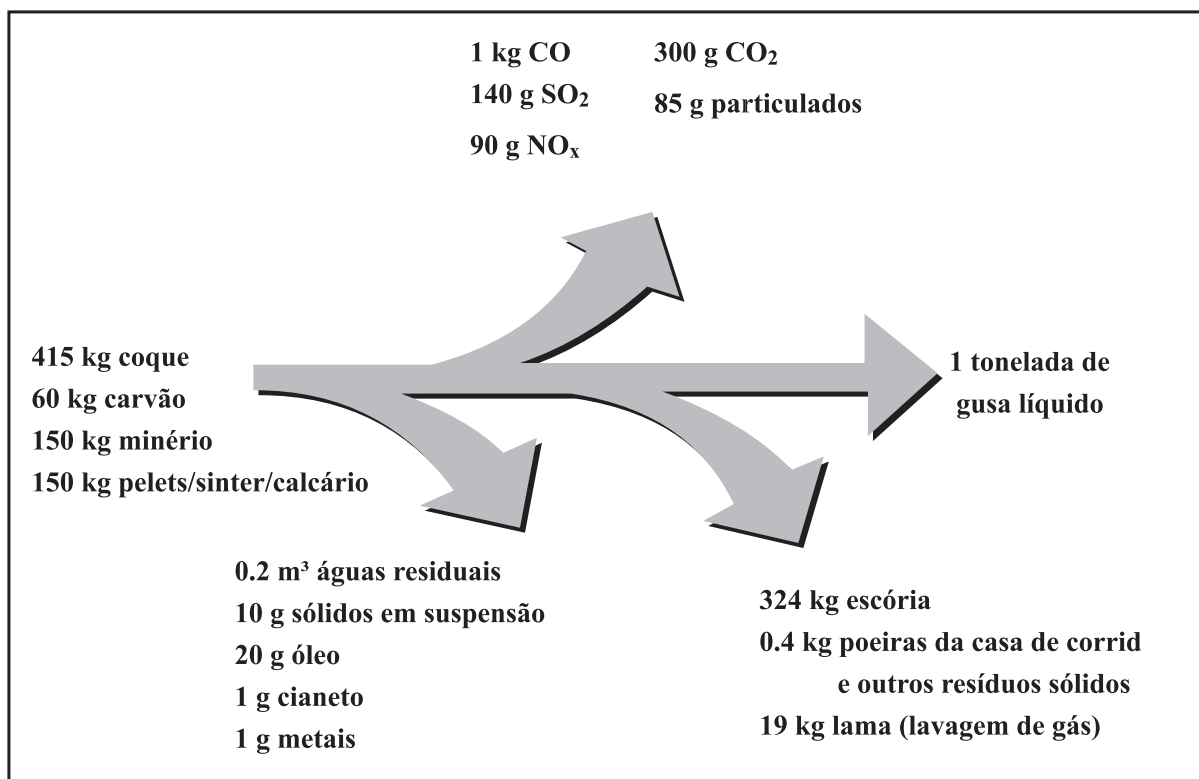


Figura 3.5 - Balanço energia/materiais para alto forno (UNEP & IISI, 1997).

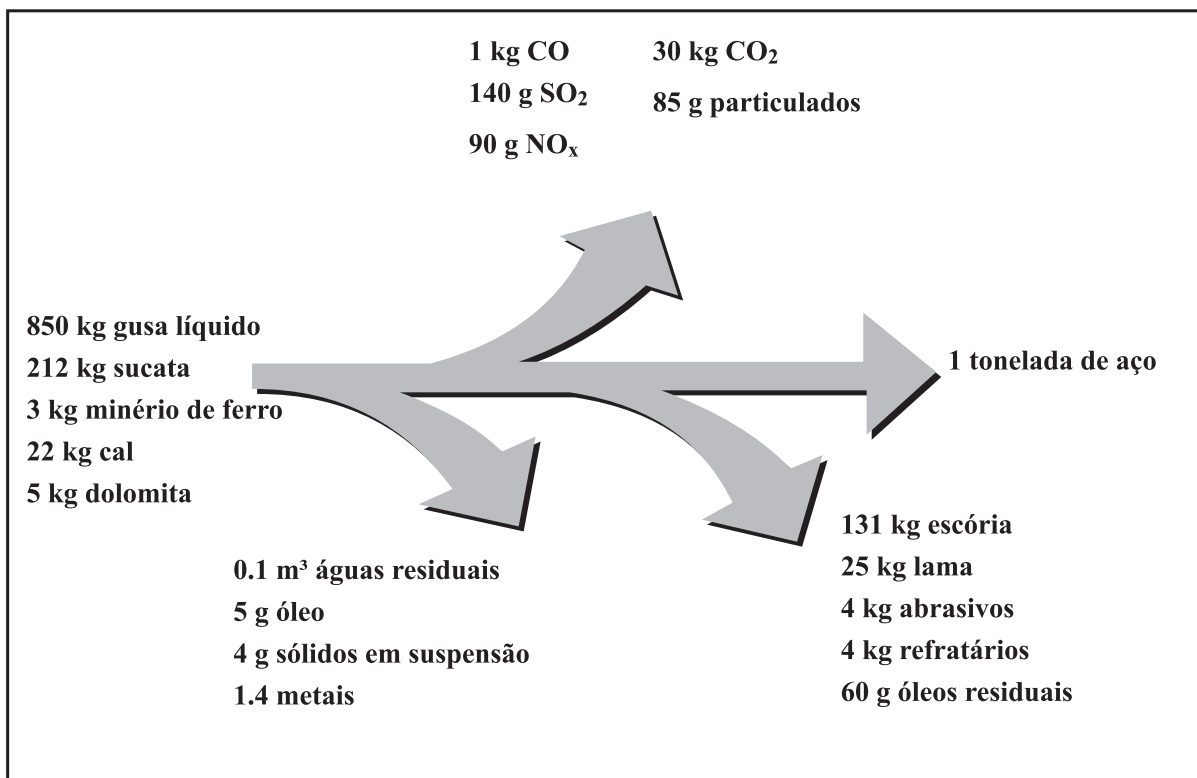


Figura 3.6 - Balanço energia/materiais para aciaria (UNEP & IISI, 1997).

3.3.3 – Casos Específicos

Neste item, serão descritos os potenciais de emissões e ocorrência de agentes agressivos, que foram identificados na literatura, nas diversas etapas do processo produtivo, em usinas integradas a coque em geral.

3.3.3.1 - *Recebimento e Armazenamento de Matérias Primas*

Material particulado

Nas áreas de recebimento e armazenamento de matérias primas são armazenados, ao ar livre, em grandes pilhas, principalmente o minério de ferro e o carvão mineral. O potencial de agressão ao concreto, nestas áreas, é, principalmente, a emissão de material particulado, que pode atingir as estruturas de concreto, dependendo da umidade do ar e da direção e intensidade dos ventos.

3.3.3.2 – *Sinterização*

Material particulado

Nesta área tem-se, como potencial, a emissão de partículas, principalmente, no manuseio e no transporte de material por correias transportadoras.

Gases

Óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3) e óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes do processo de queima da mistura de coque e antracito, utilizados como combustível na mistura de combustíveis, minérios e fundentes, para a produção do sinter. Este material é emitido pelas chaminés.

Vapores

Purgadores de linhas de vapor próximos a pilares de concreto, conforme exemplo na fotografia 3.1.



Fotografia 3.1 - Vapor atingindo pilar de concreto¹³

3.3.3.3 - Coqueria

Material particulado

Nesta unidade diversas são as fontes com potencial de emissão de material particulado. Entre elas, estão os fornos de coque, as chaminés e o apagamento a úmido do coque.

Gases

Óxidos de enxôfre (SO_2 e SO_3), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO_2), provenientes do processo de queima de COG¹⁴, que é a fonte de energia para o processo de coqueificação. Estes gases são emitidos pelas chaminés.

Gás sulfídrico (H_2S), provenientes de eventuais vazamentos nas portas dos fornos de coque e nos carros de carregamento de coque.

¹³ Arquivos da CST

¹⁴ COG – “coke oven gas” – Gás resultante do processo de redução do carvão mineral.

Área de produtos químicos

Gases

- óxidos de enxôfre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes de combustão da caldeira de amônia.

Torre de apagamento de coque a úmido

Vapores

Provenientes do resfriamento do coque incandescente (temperaturas em torno de 1.000°C), dentro de torre de concreto armado.

3.3.3.4 - Alto forno

Material particulado

Proveniente das casas de corrida¹⁵

Gases

Óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO_2) provenientes do aquecimento dos regeneradores.

3.3.3.5 - Aciaria

Material particulado

Provenientes do carregamento de gusa nos convertedores.

Gases

Óxidos de enxôfre (SO_2 e SO_3) e óxidos de nitrogênio (NO_x), provenientes do processo de transformação do gusa em aço. Este material é emitido pelas chaminés da aciaria.

¹⁵ Locais onde são vazados o gusa e a escória, na base do alto forno, sendo distribuídos para o processo

3.3.4 - Unidades identificadas com grande potencial de agressividade ao concreto armado, tendo como exemplos unidades da usina da CST.

Neste item, serão descritas algumas unidades da CST, onde identificou-se o potencial de agressividade às estruturas de concreto armado.

3.3.4.1 - Unidades de Granulação e Resfriamento de Escória de Alto Forno.

A escória de alto forno resulta da fusão do material inerte do minério (ganga), dos fundentes e das cinzas do coque que, chegando às zonas mais quentes do forno, (região das ventaneiras), sem serem reduzidos, reagem entre si e formam, principalmente, silicatos e aluminatos (ARAÚJO, 1997). No quadro 3.2, apresenta-se a composição média das escórias de alto forno da CST.

Quadro 3.2 - Composição química média das escórias de alto forno da CST¹⁶

Elemento	(%)		Elemento	(%)	
Óxido de Cálcio	CaO	42,6	Óxido de Ferro	FeO	0,31
Sílica	SiO ₂	34,8	Óxido de Manganês	MnO	0,75
Alumina	Al ₂ O ₃	12,6	Enxofre	S	0,92
Óxido de Magnésio	MgO	6,6			

Na CST, existem dois processos de resfriamento de escória. O resfriamento lento ao ar livre, onde a escória líquida é depositada em baias apropriadas e, posteriormente, resfriada, após o que, se obtém a escória bruta. conforme pode-se observar na fotografia 3.2, e o resfriamento brusco, com os jatos de água, também chamado de granulação de escória, onde a escória toma a forma de pequenos grãos.



Fotografia 3.2 - Poço de resfriamento de escória ao ar livre¹⁷

¹⁶ Arquivos da CST

¹⁷ Arquivos da CST

Os principais agentes agressivos ao concreto identificados, baseando-se em KLAG (1992) e ILAFA (1975), entrevistas com responsáveis pelo controle do processo e visitas ao local estudado, são: as altas temperaturas da escória ao sair do Alto Forno (1500 °C), os vapores gerados no resfriamento da escória, o dióxido de enxofre (SO₂), o ácido sulfídrico (H₂S) e o gás carbônico (CO₂). Podem-se observar na fotografia 3.2, os vapores atingindo o concreto e locais onde a armadura já está totalmente exposta.

Ressalte-se, também, que o processo de resfriamento da escória é realizado em ciclos. Consequentemente, as bruscas variações de temperatura e de umidade devem ser consideradas como fortes contribuintes ao processo de degradação das estruturas. No processo de resfriamento da escória, o vapor carregado de agentes agressivos atinge, diretamente, as estruturas de concreto situadas nas unidades de resfriamento e granulação, podendo, conforme a direção do vento, atingir outras estruturas na região do Alto Forno.

As altas temperaturas (da ordem de 1500 °C) atingem as estruturas de forma direta no momento da saída da escória do Alto Forno e também de forma indireta, por irradiação, durante o período em que a escória se resfria lentamente. Considerando que o processo de resfriamento da escória é cíclico, alternando-se entre duas unidades de resfriamento e de granulação de escória, as altas temperaturas e sua variação contribuem fortemente para o processo de degradação das estruturas destas unidades.

Entre os agentes agressivos mais importantes ao concreto estão: a umidade, as altas concentrações de compostos químicos e as elevadas temperaturas e, no ambiente estudado, reúnem-se todas estas condições. Deduz-se, então, que ele pode ser considerado como de alta agressividade ao concreto, principalmente porque o sinergismo entre estes agentes, multiplica sua ação deletéria, de acordo com CHANDRA (1996).

A água de resfriamento de escória, que entra em contato direto com o concreto, foi objeto de análise a parte, conforme será detalhado no item 4.2.4.7.

Na fotografia 3.3, podem-se observar os vapores atingindo o concreto e também o estado de corrosão em que se encontra a estrutura.



Fotografia 3.3 - Detalhes da torre de resfriamento da granulação de escória¹⁸

3.3.4.2 - Muro do Pátio de escória

Esta unidade, que consta de um muro de concreto armado, com comprimento de 200 m , tem a finalidade de servir de apoio ao trilho, por onde trafegam composições ferroviárias, que transportam panelas (chamadas de potes) com escória no estado líquido, para serem basculadas no referido pátio.

Este muro serve, também, de lateral da baía onde a escória é basculada e depois resfriada, com a utilização de jatos de água. Após o resfriamento da escória, a mesma é retirada com a utilização de pás carregadeiras.

Na fotografia 3.4 pode-se ter uma visão de parte do muro, do pote de escória e do equipamento que atinge o concreto com impactos.



Fotografia 3.4 - Muro do Pátio de Escória e equipamento utilizado para retirada da escória resfriada atingindo o concreto por impacto¹⁹

¹⁶ Arquivos da CST

¹⁷ Arquivos da CST

Resumindo o processo e o potencial de agressão ao concreto, tem-se: a escória líquida a altas temperaturas, é basculada na baia do pátio de escória, atingindo diretamente o muro de concreto, conforme já pôde ser visto no capítulo 2, figura 2.7. Em seguida, são lançados jatos de água sobre a escória para resfriá-la, o que produz um choque térmico no concreto, gerando vapores que o atingem diretamente. Após a escória estar resfriada, ela é retirada por pás carregadeiras que, neste processo, atingem diretamente a lateral do muro de concreto.

3.3.4.3 - Poço de basculamento de Gusa

Calor

Proveniente do basculamento do gusa líquido, durante 10 minutos, com intervalo de 15 minutos, 24 horas por dia, este calor irradia-se, atingindo as paredes de concreto com temperaturas da ordem de 300°C, conforme mostrado no capítulo 2, figura 2.1.

3.3.4.4 - Unidade de resfriamento de placas

Calor e vapor

Trata-se de estrutura em concreto armado, que suporta equipamento de resfriamento de placas de aço com jatos de água.

Esta água transforma-se em vapor e também escorre pelos pilares de sustentação da estrutura (fotografia 3.5).



Fotografia 3.5 - Pilares do resfriador de placas, parado para inspeção e recuperação²⁰

²⁰ Arquivos da CST

Nota-se, nestas fotos, o desgaste superficial do concreto e os consoles de sustentação dos equipamentos de arraste das placas, em avançado estado de deterioração.

3.3.4.5 - Estação de água desmineralizada

Eventuais vazamentos do produto

Água desmineralizada. A água desmineralizada foi objeto de análise à parte, conforme será detalhado no item 3.3.4.9.

3.3.4.6 - CRAAF - Centro de recirculação de água do alto forno

Constui-se de torres de resfriamento e tanques de decantação, onde circulam águas com diversos agentes agressivos. No item 3.3.4.9 apresentar-se-á a análise da água do sistema de lavagem de gás do alto forno 1 da CST.

3.3.4.7 - Tanques e torres de resfriamento em concreto

Contém água em movimento, em diversas temperaturas e, em algumas peças, aspergidas sobre as superfícies das estruturas do concreto.

3.3.4.8 – Chaminés em concreto armado.

Gases e calor

Muitas chaminés são construídas em concreto armado, revestidas internamente por material refratário. São chaminés de alturas diversas, podendo chegar, em alguns casos, a 160 m de altura. Os gases, ao saírem pelo topo destas chaminés, geralmente em altas temperaturas, atingem, principalmente, as faces externas do concreto, nas cotas mais elevadas das mesmas. Acontece, também, devido ao desgaste do material refratário interno, a agressão por calor, nas faces internas destas chaminés.

Alguns exemplos de chaminés em concreto armado, são as chaminés da sinterização, da coqueria e do alto forno.

Um exemplo bastante significativo é mostrado na fotografia 3.6, chaminé da sinterização, onde se pode observar o estado de deterioração da estrutura de concreto, nas camadas mais próximas do topo da estrutura.



Fotografia 3.6 - Chaminé da sinterização da CST²¹

3.3.4.9 - Análise da água circulante em algumas unidades da CST

Neste item, apresentam-se resultados de análises, efetuadas nesta pesquisa, das águas que entram em contato com o concreto armado, ao circularem nos seguintes sistemas:

- unidade de granulação de escória;
- estação de água desmineralizada TQ7;
- estação de tratamento biológico - entrada de licor amoniacal;
- saída do espessador de gás do alto forno.

Os parâmetros obtidos foram confrontados com a norma L1.007 da CETESB (1988), além de outras normas e trabalhos publicados por pesquisadores, para assim, poder ser definido o grau de agressividade destas águas, em relação ao concreto armado. Na tabela 3.1, apresentam-se os resultados das citadas análises. A classificação da agressividade ambiental, resultante dos resultados obtidos é apresentada no capítulo 4.

²¹ Arquivos da CST

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios realizados para determinação da agressividade do meio aquoso, em contato com o concreto, em quatro unidades da CST²²

		Unidade	Granulação de Escória		TQ7 - Tg água desmineralizada		ETB - Entrada Licor Amoniacal		VS 5AF - Lavagem de gás - alto forno 1	
Ensaios ¹			14/02/00	21/02/00	14/02/00	21/02/00	14/02/00	21/02/00	14/02/00	21/02/00
Ph		–	8,64	9,09	X	X	7,31	7,67	7,34	7,30
STD		mg/l	4.184	4.189	<5	12,7	5.483	6.040	1.422	1.363
Alcalinidade Total		mg/l	128	79,6	X	X	162	249	281	260
Alcalinidade Carbonato	CO ₃ ²⁻	mg/l	6,34	31,8	X	X	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Alcalinidade Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	mg/l	122	47,8	X	X	162	249	281	260
Cloretos		mg/l	789	984	X	X	3.332	5.368	560	514
Sulfato	SO ₄ ²⁻	mg/l	1.936	1.405	X	X	114	140	119	163
Silica Dissolvida	SiO ₂	mg/l	26,5	30,3	0,39	<0,02	1,76	3,01	48,10	548
Amônio	NH ₄ ⁺	mg/l	1,68	11,2	<0,05	<0,05	75,60	99,7	73,9	57,4
Cálcio	Ca ₂ ⁺	mg/l	685	690	<0,01	0,78	14,2	13,0	480	194
Magnésio	Mg ₂ ⁺	mg/l	26,5	31,0	<0,01	<0,01	1,27	2,30	36,0	31,0
Ferro	Fe ₃ ⁺	mg/l	2,4	6,52	0,05	0,06	8,92	7,73	5,68	3,78
Alumínio	Al ₃ ⁺	mg/l	8,42	10,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zinco	Zn ₂ ⁺	mg/l	1,03	1,13	0,03	<0,01	0,08	0,10	2,21	1,01
Manganês	Mn ₂ ⁺	mg/l	0,82	1,34	<0,01	<0,01	0,19	0,18	2,36	3,67
Sódio	Na ⁺	mg/l	140	114	0,37	<0,01	2130	1960	30	24,4
Potássio	K ⁺	mg/l	533	418	0,10	0,38	16,9	17,2	176	118
Dióxido de carbono livre	CO ₂	mg/l	0,4	<0,1	–	–	17,0	10,0	26,0	28,0
Nitrato	NO ₃ ²⁻	mg/l	<15	<15	–	–	<15	<15	<15	<15
Temperatura		°C	59	52	–	–	32	33	53	53

Nota:

1. Os ensaios foram realizados no laboratório de utilidades da CST conforme os parâmetros descritos no anexo 1.
2. Conforme histórico da CST, desde o início da operação da usina, em (1983) não se observaram resultados de nitrato (NO₃²⁻) maiores que 15 mg/l.
3. Embora nem todos os métodos adotados para a análise das águas sejam os indicados pela L1.007 da CETESB (1988), consideream-se válidos para o presente estudo, pois visa-se determinar o potencial de agressividade nas diferentes áreas do processo.

3.3.4.10 – Dados complementares sobre a CST

Como foram utilizados exemplos da CST neste capítulo, convém citar alguns detalhes sobre a empresa. Estes dados são importantes, pois tratam da localização, que também influi no ambiente e também tratam dos controles ambientais. Eles influem, intensivamente, nos índices de emissões de agentes agressivos ao concreto.

²² Os métodos utilizados para a análise química estão citados no anexo 1

Localização e clima

Cidade da Serra, cidade litorânea, situada no estado do Espírito Santo, na região da Grande Vitória.

A umidade relativa do ar, em Vitória, segundo HELENE (1986), atinge elevados valores, chegando a permanecer acima de 90% no ano de 1978.

A precipitação pluviométrica anual medida na estação meteorológica da CST desde o ano de 1983, quando a usina iniciou a operação, até o ano de 1999, atingiu valores acima de 1.000 mm em 7 anos e o valor máximo foi de 1.811 mm no ano de 1983 (Anexo 3).

Controle ambiental

Uma das razões de se falar em potencial de emissão de agentes agressivos, é que, com eficientes políticas de controle ambiental, as emissões são reduzidas e enquadradas nos níveis recomendados pelos organismos regulamentadores que atuam na região de cada indústria. É o caso da CST, que pratica uma adequada política de controle ambiental, onde se destacam, segundo CLEMENTE (1998):

- redução de 90% das emissões atmosféricas entre os anos de 1990 e 1994;
- prática de amplo programa de gestão ambiental que consta, entre outros, de:
 - monitoramento da qualidade do ar, contando com 3 estações internas e 10 externas;
 - monitoramento das emissões das chaminés;
 - monitoramento hídrico de efluentes, águas superficiais e subterrâneas;
 - investimentos projetados de US\$ 415,3 x 10⁶ entre os anos de 1983 e 1998.

Segundo CST (1998), importantes projetos ambientais têm sido realizados pela empresa (tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Principais projetos ambientais já realizados na CST (CST, 1998)

Título	Objetivo	Local	Ano	Invest (US\$ mil)
Sistema de vedação das portas dos fornos de coque	Minimizar os vazamentos de gases e material particulado, com índice de vedação de 90%	Coqueria	1993	20.000
Controle poluição nos pátios	Implantar sistema de aspersão nas pilhas de estocagem de matérias primas, evitando o seu arraste pela ação dos ventos	Pátio de carvão e Minérios	1992	2.450
Controle emissões em vias de tráfego	Minimizar as emissões atmosféricas geradas durante o tráfego de de veículos nas vias internas	Usina	1997	500
Controle emissões na Sinterização	Reduzir as emissões geradas na máquina de sinter através da instalação do 3º Precipitador Eletrostático e reforma nos existentes	Sinterização	1998	23.000

Conclui-se que, os investimentos em equipamentos de controle ambiental atmosférico, possibilitaram significativa redução das emissões - os atuais índices de emissão específicos (kgt aço) encontram-se nos níveis das principais siderúrgicas do mundo (CST, 1998).

3.4 - Síntese dos Principais Agentes Agressivos ao Concreto Armado e sua Caracterização.

No quadro 3.3, apresentam-se os principais agentes agressivos ao concreto armado em indústrias siderúrgicas, que foram identificados nesta pesquisa.

Apresentam-se, também, sua provável localização em uma planta típica de usina siderúrgica e os efeitos prováveis sobre o concreto armado.

Quadro 3.3 - Principais efeitos dos agentes agressivos ao concreto armado identificados em usinas siderúrgicas

Agentes	Natureza da Ação	Efeito Direto/Formação de Agentes Secundários	Efeitos Prováveis sobre o Concreto Armado	Referências Bibliográficas	Principais Locais e Fontes de Emissão
1 - Dióxido de enxofre (SO ₂)	Química	Efeito Direto:	- Aceleração do processo de carbonatação - Provoca corrosão em aço carbono (principalmente na presença de NO₂)	CHANDRA (1990); CHANDRA (1996); ROSVALL (1988); FATTUHI E HUGHES (1988); ABCP (1990); ALVES (1982).	Sinterizações, coquerias, altos fornos e aciarias <i>Específicas:</i> granulação de escória e área de produtos químicos de coquerias
		Efeito Indireto: formação de ácidos sulfuroso e sulfúrico (H ₂ SO ₃ e H ₂ SO ₄)	- Desagregação do concreto e das armaduras		

Quadro 3.3 - Principais efeitos dos agentes agressivos ao concreto armado identificados em usinas siderúrgicas (continuação)

Agentes	Natureza da Ação	Efeito Direto/Formação de Agentes Secundários	Efeitos Prováveis sobre o Concreto Armado	Referências Bibliográficas	Principais Locais e Fontes de Emissão
2 - Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	Química	Efeito Direto:	- Acentua a corrosão do aço carbono [principalmente na presença de (SO_2)]	CHANDRA (1990); CHANDRA (1996); ROSVALL (1988)	Sinterizações, coquerias, altos fornos e aciarias
		Efeito Indireto: formação de ácido nítrico (HNO_3)	- Formação de nitrato de cálcio altamente solúvel com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sob pequena exposição		
3 - Dióxido de Carbono (CO_2)	Química	Efeito Direto	- Carbonatação e conseqüente diminuição da alcalinidade do concreto, com possibilidade de corrosão das armaduras (embora, em um primeiro momento, produza carbonato de cálcio, que aumenta a resistência do concreto a alguns agentes químicos, principalmente os sulfatos)	CHANDRA (1990); HELENE (1996); CINCOTTO (1991).	Sinterizações, coquerias, altos fornos, aciarias e águas residuais
		Efeito Indireto: reação com água formando ácido carbônico (H_2CO_3)	- Desagregação do concreto		
4 - Ácido Sulfídrico (H_2S)	Química	Efeito Direto:	- Deterioração do concreto por dissolução do aglomerante	ABCP (1990); HELENE (1988); CINCOTTO (1972); VAN AARDT (1960).	Coquerias e tratamento de escórias dos altos fornos
		Efeito Indireto: reação com água formando ácido sulfúrico	- Desagregação do concreto		
5 - Águas Agressivas 5.1 Água com elevado teor de íons sulfato (SO_4^{2-}) e cloretos, temperatura $>45^\circ\text{C}$ e em movimento	Química/Física	Efeito direto:	- Expansão e lixiviação - Corrosão das armaduras	CETESB (1988); HELENE (1986).	Torres de resfriamento das granulações de escória do alto forno
5.2 Água Pura Teor de Sólidos dissolvidos $< 50 \text{ mg/l}$	Química	Efeito direto:	- Lixiviação	FERNÁNDEZ CÁNOVAS (1988).	Tanque de água desmineralizada
5.3 Água contendo Íon Amônio (NH_4^+)	Química	Efeito direto:	- Lixiviação	EHE (1999); CETESB (1988); POLDER e LARBI (1994).	Estação de tratamento biológico da coqueria; sistema de lavagem de gás do alto forno
5.4 Água com elevado teor de cloreto diferente do ambiente marinho	Química/Física	Efeito direto	- Corrosão das armaduras	EHE (1999).	Estação de tratamento biológico – coqueria

Quadro 3.3 - Principais efeitos dos agentes agressivos ao concreto armado identificados em usinas siderúrgicas (continuação)

Agentes	Natureza da Ação	Efeito Direto/Formação de Agentes Secundários	Efeitos Prováveis sobre o Concreto Armado	Referências Bibliográficas	Principais Locais e Fontes de Emissão
6 - Vapores	Química/Física	Efeito direto:	- Lixiviação do hidróxido de cálcio e conseqüente perda da alcalinidade - Corrosão das armaduras	HELENE (1986)	Resfriamento de placas; Apagamento a úmido de coque - Coqueria; Purgadores de vapor; Granulação de Escória - Unidades de tratamento e resfriamento de água
7 - Material Particulado	Mecânica/Física/Química	Efeito direto:	- Abrasão em pisos de concreto por tráfego de equipamentos e veículos; - Abrasão em superfícies de concreto por partículas levadas pelo vento;	ACI (1993); BSI (1992); ROSVALL (1988).	Processo de produção em geral e áreas de manuseio de matérias primas.
		Efeito indireto: fixação nas superfícies de concreto e contaminação por umidade e agentes agressivos	- Ação química dos agentes transportados para o interior do concreto como expansão e lixiviação		
8 - Altas Temperaturas (até 1.500 °C)	Física	Efeito direto:	- Fissuras, perda de resistência mecânica, desagregação do concreto, lascamentos - Alteração das Propriedades dos aços de construção	NEVILLE (1997); MEHTA (1994); FERNÁNDES CÁNOVAS (1988).	Poço de resfriamento de escória de alto forno (Dry Pit); Poço de basculamento de gusa; Muro do pátio de escória; Resfriador de placas; Chaminés em concreto armado (topo)
9 - Impactos	Mecânico	Efeito direto:	- Fissuras e rupturas	CINCOTTO (1972).	Limpeza do pátio de escória, com equipamentos; Eventuais acidentes operacionais.

3.5 – CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, procedeu-se à descrição e localização dos agentes agressivos ao concreto armado, presentes em indústrias siderúrgicas, identificados nesta pesquisa, com o objetivo de subsidiar projetos de estruturas de concreto armado nestas indústrias, assim como, o estabelecimento de programas de manutenção e recuperação de estruturas.

Pode-se observar que, devido à complexidade do processo siderúrgico, foram feitas análises do macro ambiente e em apenas alguns casos, do micro ambiente, onde os agentes agressivos entram em contato direto com as estruturas.

O importante é observar através deste levantamento, que existem ambientes nestas indústrias, que influenciam fortemente a durabilidade das estruturas de concreto armado, o que é possível e necessário se levar em conta, quando se forem projetar novas estruturas ou mesmo, estabelecerem programas de manutenção e recuperação das mesmas.

No próximo capítulo, serão apresentados exemplos de algumas obras da CST descrevendo-se ensaios, diagnósticos, vida útil e gastos com recuperação do concreto armado baseando-se nos dados colhidos, nesta empresa. Será feita, também, a classificação de algumas áreas e unidades da CST conforme o grau de agressividade ao concreto armado.

Capítulo 4

CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS E UNIDADES DA CST CONFORME O GRAU DE AGRESSIVIDADE AO CONCRETO ARMADO

4.1 - APRESENTAÇÃO

Neste capítulo, faz-se uma classificação de algumas áreas e unidades da CST conforme o grau de agressividade ao concreto armado, baseando-se na identificação de agentes agressivos e nas recomendações propostas pelas normas citadas no capítulo 2. Faz-se, também, descrição de estudos e diagnósticos realizados em obras de concreto armado da CST e comparam-se as especificações determinadas para estas obras, de acordo com as referidas normas, em função da classificação da agressividade do ambiente, e as especificações efetivas de projeto. Citam-se neste capítulo, exemplos de vida útil e custos estimados e reais de um conjunto de obras, da CST, onde foram identificados processos de deterioração precoce.

4.2 - EXEMPLOS DE ESTUDOS E DIAGNÓSTICOS

A seguir, apresentam-se exemplos de casos de estudos e diagnósticos realizados em obras de concreto armado da usina da CST (quadro 4.1).

Estes estudos e diagnósticos, que constam dos arquivos da CST, são descritos com a finalidade de se chegar a uma comparação entre a classificação da agressividade ambiental, as especificações adotadas nos projetos destas obras e as recomendações das normas citadas nesta pesquisa e comprovar que, pela ineficiência dos projetos, ao não se levarem em consideração os efeitos do meio ambiente, a durabilidade das estruturas de concreto é significativamente afetada, gerando altos custos com a recuperação das mesmas.

Quadro 4.1 - Relação de obras ensaiadas na CST e os respectivos ensaios realizados²³

Unidade	Ano	Ensaio Efetuado						
		Inspeção Visual	Carbonatação	Cloretos	Sulfatos	Resistividade elétrica	Potencial de Corrosão	Outros
1 Torres de carvão I e II da Coqueria	1994	X	X	X		X	X	Dados históricos
2 Prédio da Administração Central	1995	X	X	X	—	X	X	—
3 Torre de resfriamento de água da granulação de escória I	1997	X	—	X	X	—	—	—
4 Reservatórios de Água Industrial	1998	X	X	X	—	—	—	—
5 Captação de água do Mar	1998	X	X	X	—	—	—	—
6 Tanques de Alcatrão	1998	X	—	X	—	—	—	—
7 Casa de bombas de água do mar	1998	X	—	X	—	—	—	—
8 Decantadores de alcatrão	1998	X	—	X	—	—	—	—
9 Muro do pátio de escória	1998	—	—	—	—	—	—	Termografia
10 Poço de gusa	1999	—	—	—	—	—	—	Termografia

Os estudos citados nos itens 1 a 8 do quadro 4.1, foram realizados pela EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, por solicitação da CST e constam dos relatórios EPUSP (1994, 1995, 1997, 1998a e 1998b).

Para os itens 9 e 10 do mesmo quadro, foram analisadas apenas as temperaturas a que se expõem as estruturas, com a utilização do método de termografia. A análise das temperaturas, através da termografia, foi realizada pelos técnicos da CST.

Em todas as unidades examinadas foram detectadas, visualmente, irregularidades como: armaduras expostas, concreto deteriorado e regiões frágeis do concreto, mesmo quando não expostas.

²³ Arquivos da CST

4.2.1 – Ensaios Realizados

Descrição dos ensaios realizados nas obras citadas no quadro 4.1.

4.2.1.1 – Inspeção Visual

Nesta etapa, inspecionaram-se todas as faces da edificação. Além de inspeção visual, foi realizada auscultação percussiva, objetivando-se determinar regiões frágeis do concreto.

4.2.1.2 – Profundidade de Carbonatação

Ensaios realizados com aspersão de soluções indicadoras à base de fenolfetaleína (1%) e timolfetaleína (1%) que apresentam pontos de viragem aproximados de, respectivamente, pH 9,5 e 10,5. Estas soluções são aspergidas imediatamente após o lascamento de uma porção de concreto e também nos orifícios feitos no concreto para determinação do teor de cloretos.

Segundo EPUSP (1995), as medições da profundidade de carbonatação foram feitas imediatamente após o lançamento das soluções indicadoras, empregando-se paquímetro conforme método RILEM CPC-18 (1988).

4.2.1.3 – Potenciais de Corrosão

Para realização de todos os ensaios citados, foram determinadas áreas de inspeção, baseando-se em uma inspeção visual prévia. Estas áreas de inspeção constaram de uma região da superfície do concreto armado com dimensões típicas de aproximadamente 1,0 a 2,0 m² conforme a figura 4.1.

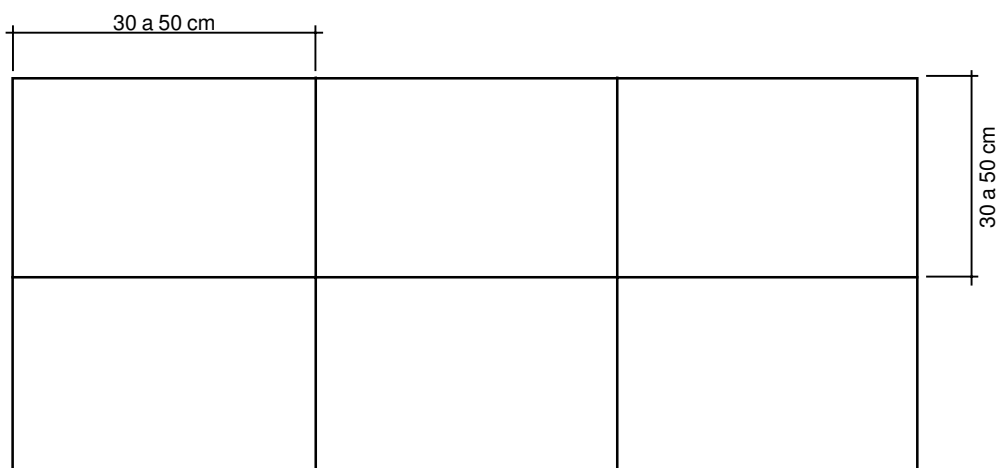


Figura 4.1 - Ilustração esquemática de área de ensaio, com dimensões típicas definidas para a inspeção detalhada (EPUSP, 1995).

O potencial de corrosão foi medido nos encontros das linhas das malhas, definidas para cada área de ensaio, onde foram feitas, no mínimo, 6 (seis) determinações em cada área, obtendo-se o mapeamento dos potenciais nas áreas de ensaio. A técnica utilizada foi a obtenção dos potenciais de corrosão das armaduras do concreto em relação a um eletrodo de referência, cobre/sulfato de cobre.

Segundo EPUSP (1995), as determinações foram feitas de acordo com a norma ASTM C 876 (1982) que indica que a probabilidade de haver corrosão ativa em função dos potenciais de corrosão (Cu/CuSO_4) é:

$\leq -350 \text{ mV}$ alta probabilidade de corrosão ativa. Mais que 90 %.
 $> -350 \text{ e } \leq -200 \text{ mV}$ incerteza quanto à corrosão ativa.
 $> -200 \text{ mV}$ baixa probabilidade quanto à corrosão ativa.

4.2.1.4 – Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica aparente superficial do concreto foi determinada pelo método Wenner, também conhecido como método dos quatro eletrodos.

Segundo EPUSP (1995), a resistividade elétrica depende do teor de água nos poros, do tamanho e da distribuição dos poros e da presença e concentração de íons no eletrólito, sendo tanto maior quanto menores forem a umidade do concreto, o tamanho dos poros e a concentração de íons e, portanto, menor a possibilidade de ocorrência de corrosão nas armaduras.

Considerou-se que valores de resistividade superiores a 5 kohms.cm conduzem a pouco risco de corrosão das armaduras.

4.2.1.5 – Teor de Cloretos

Foram retiradas amostras das áreas de ensaio utilizando-se furadeira e broca de vídea a profundidades variadas, em relação à superfície, conforme a obra analisada.

Segundo EPUSP (1995), para a determinação do teor de cloretos, utilizou-se o método de extração em ácido nítrico sob aquecimento, tendo como base a norma ASTM C 1152 (1982).

Os teores de cloreto são expressos percentualmente, em relação à massa de cimento. Na tabela 4.1 apresentam-se alguns valores de teores limites para cloretos, conforme normalização em diversos países.

Tabela 4.1 - Limites de Normas para os teores de cloretos (cloretos totais), segundo normalizações vigentes em diversos países (HELENE 1993; EPUSP, 1995).

País	Norma	Limite Máximo* de Cl para		Limite referido a
		Concreto Armado	Concreto Protendido	
BRASIL	NBR 6118 ¹	0,05%	—	Água de amassamento
	NBR 7197 ²	—	0,05%	
	NBR 9062 ³	—	0,05%	
ESPANHA	EH – 88 ⁴	0,40%	—	Cimento
	EP – 80 ⁵	—	0,10%	
ESTADOS UNIDOS	ACI 222 ⁶	≤ 0,20%	≤ 0,08%	Cimento
	ACI 201 ⁷	≤ 0,20%	≤ 0,08%	
	ACI 318 ⁸	≤ 0,30%, ambiente normal	≤0,06%	
		≤ 0,15%, ambiente cloretos		
		≤ 1,00%, ambiente seco		
(EUROPA)	CEB ⁹	≤ 0,05%	≤ 0,025%	Concreto
	CEB – FIP ¹⁰	≤ 0,40%	≤ 0,20%	Cimento
EUROPA	ENV 206 ¹¹	≤ 1,00%, concreto simples	≤ 0,20%	Cimento
		≤ 0,40%		
INGLATERRA	CP – 110 ¹²	95% ≤ 0,35%	100% ≤ 0,06%	Cimento
		100% ≤ 0,50%		
JAPÃO	JSCE SP – 2 ¹³	≤ 0,60 kg/ m³	≤ 0,30 kg/m³	Cimento

* % de íon (Cl⁻) * 1,648 = % equivalente de NaCl – Cloreto de Sódio

% de íon (Cl⁻) * 1,565 = % equivalente de CaCl₂ – Cloreto de Cálcio

Notas: Referências abaixo apud (HELENE, 1993)

(1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1978; (2) _____. 1989; (3) _____. 1988; (4) COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN, 1988; (5) _____. 1980; (6) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1991; (7) _____. 1991; (8) _____. 1992; (9) COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON, 1992; (10) _____. 1991; (11) EUROPEAN COMMITTEE for STANDARDIZATION, 1991; (12) BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1972; (13) JAPAN SOCIETY of CIVIL ENGINEERS, 1986.

Segundo EPUSP (1995), é conveniente adotar-se 0,3% de cloretos em relação à massa de cimento, como teor limite para as obras analisadas²⁴ ou, segundo EPUSP (1997), 0,05% de cloretos em relação à massa de concreto.

²⁴ Segundo HELENE (1993) não existe consenso sobre o limite mínimo de cloretos sob o qual seja possível afirmar se haverá despassivação e ataque às armaduras. Este fato depende de inúmeras variáveis, entre elas, o tipo, a finura e o consumo de cimento por m³, o estado da superfície do aço, as condições ambientais, a relação água/cimento entre outros. A interpretação do grau de contaminação do concreto por cloretos não deve ser isolada e deve ser baseada na experiência de um especialista em corrosão de armaduras.

É interessante observar, também, que os teores de cloretos, em relação à profundidade, podem indicar se a presença de cloretos se deve por incorporação ou impregnação. Quando os teores de cloretos tendem a se tornar menores em relação às camadas mais próximas da superfície, indica-se que houve impregnação. Quando tendem a se tornar maiores ou constantes, pode-se supor que os cloretos estão presentes por incorporação.

Os cloretos podem, também, estar presentes por impregnação e incorporação (EPUSP, 1995).

4.2.1.6 – Medição das Temperaturas nas Faces do Concreto.

Foram realizadas medições das temperaturas nas faces das estruturas que ficam expostas à irradiação térmica, utilizando-se da técnica de termografia.

4.2.2 - Dados das Estruturas Ensaçadas, Resultados e Diagnósticos

Todas as estruturas apresentadas iniciaram a vida de serviço no início da operação da usina da CST em 1983.

4.2.2.1- Unidade 1 - Torres de Carvão I e II da Coqueria

Descrição

Tratam-se de 2 torres de concreto armado, sem revestimento do lado externo, com as dimensões de 40 m de altura e 20 x 20 m de base, localizadas na Coqueria.

- Finalidade : armazenamento e distribuição de carvão para os fornos de coque.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 20$ MPa e cobrimento das armaduras = 2,0 cm.
- Dados adicionais: obra construída pelo processo de formas deslizantes com exceção da estrutura das escadas, onde foram utilizadas formas convencionais.

Há, também, a informação de empregados participantes da construção, de que não foi feita a cura do concreto nas paredes onde foram utilizadas as formas deslizantes.

Ensaaios e diagnóstico

Tabela 4.2 - Ensaaios realizados na obra Torres de Carvão I e II da Coqueria (EPUSP, 1994).

Inspeção visual	Nesta obra, notou-se que em geral, as regiões onde se manifestaram as corrosões nas armaduras estão relacionadas com alguma falha de execução como falta de cobrimento ou falha de adensamento no concreto.
Profundidade de carbonatação	Máxima = 10 mm nas áreas executadas com fôrmas convencionais e 3 mm nas áreas executadas com formas deslizantes
Teor de cloretos	De 6 áreas ensaiadas, 5 encontravam-se com teor de cloretos maior que 0,3% em relação ao peso do cimento na região das armaduras
Resistividade elétrica aparente superficial	Bastante elevada, com valores médios acima de 50 komhs.cm.
Potencial de corrosão	De 6 áreas ensaiadas, apenas 2 apresentaram probabilidade de corrosão ativa

Diagnóstico: embora a carbonatação seja um dos fatores contribuintes para a corrosão, o agente agressivo predominante é o íon cloreto.

4.2.2.2 - Unidade 2 - Prédio da Administração Central

Descrição

Edifício de concreto armado a vista, com quatro pavimentos e área de projeção de 1.500 m² localizado na área administrativa. Foram utilizados “brises” de concreto pré-moldado para proteção solar, fixados em toda a extensão da edificação.

- Finalidade : sede da administração central da CST.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa.
- Cobrimento das armaduras: estrutura principal = 2,0 cm, e “brises” = 1,5 cm.

Ensaaios e diagnóstico

Tabela 4.3 - Ensaaios realizados na obra Prédio da Administração Central (EPUSP, 1995).

Inspeção visual	Da inspeção visual constatou-se que, de um modo geral, as manifestações de corrosão estão relacionadas com alguma falha de execução do tipo falta de cobrimento das armaduras ou falha no adensamento do concreto
Profundidade de carbonatação	Concreto moldado “in loco” (vigas pilares e lajes) = 10 mm, concreto pré-moldado (brises) = 8 mm
Teor de cloretos	Nas 6 áreas inspecionadas, os teores de cloretos variaram de 0,02 a 0,25% em relação à massa de cimento, menor, portanto, que o percentual de 0,3% considerado como limite para risco de corrosão
Resistividade elétrica aparente superficial	Valores bastante elevados e bem maiores que 5 kohm.cm
Potencial de corrosão	Valores que apresentam baixa probabilidade de corrosão ativa

Diagnóstico: considerando-se os dados dos ensaios, concluiu-se que a corrosão das armaduras, verificada nas áreas ensaiadas, tem como principal fator contribuinte a carbonatação.

4.2.2.3 - Unidade 3 - Torre de Resfriamento de Água da Granulação de Escória 1

Descrição

Obra em concreto armado, sem revestimento, constando de torre de resfriamento e circulação de água, localizada na região do alto forno nº 1.

- Finalidade : resfriamento e recirculação da água de produção de escória granulada de Alto Forno através de resfriamento brusco.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa e cobrimento das armaduras = 2,0 cm.
- Dados adicionais: esta obra foi recuperada em 1993 utilizando-se concreto projetado, onze anos após o início da operação.

Ensaaios e diagnóstico

Tabela 4.4 - Ensaaios realizados na Torre de Resfriamento de Água da Granulação de Escória 1 (EPUSP, 1997)

Inspeção visual	Nesta obra, observou-se corrosão das armaduras, com expulsão do cobrimento de concreto generalizada, nas faces externas da estrutura. Não se observou corrosão de armadura na superfície do concreto do interior da estrutura, observando-se, apenas, desgaste superficial do concreto na forma de sulcos na vertical, com profundidade de aproximadamente 2 mm
Teor de sulfatos	Nesta unidade, em particular, foram realizados ensaios para determinação dos teores de sulfatos no concreto e na água que circula na unidade. Apesar da água conter uma elevada concentração de sulfatos, não se observou a contaminação por sulfatos nas amostras de concreto.
Teor de cloretos	Valores que variam de 0,05 a 0,36 em relação à massa de concreto até profundidades de 5,0 cm.

Diagnóstico: os altos teores de cloretos encontrados nas profundidades ensaiadas podem ser considerados como os responsáveis pelas manifestações de corrosão das armaduras observadas na estrutura de concreto analisada, pois ultrapassam o limite de 0,05% em relação à massa de concreto.

4.2.2.4 - Unidade 4 - Reservatórios de Água Industrial

Descrição

Dois reservatórios de água de concreto protendido, sem revestimento. Formato cilíndrico com as dimensões: base $\varnothing = 36,0$ m e altura = 20 m localizados na área de tratamento de água.

Capacidade de armazenamento de 18×10^6 l cada.

- Finalidade : armazenamento de água industrial.
- Dados de projeto: concreto com $f_{ck} = 25$ MPa e cobrimento das armaduras = 3,0 cm.

Ensaaios e diagnóstico

Tabela 4.5 - Ensaaios realizados na obra Reservatórios de Água Industrial (EPUSP, 1998a)

Inspeção visual	Corrosão generalizada da armadura vertical e corrosão localizada em regiões onde há falta de estanqueidade do concreto. Deficiências no cobrimento das armaduras. Vazios resultantes do processo construtivo, que não foram convenientemente fechados.
Profundidade de carbonatação	0,8 cm em regiões de baixo cobrimento das armaduras.
Teor de cloretos	Valores que variam de 0,46% a 0,51% em relação à massa de cimento, até profundidades de 2,0 cm.

Diagnóstico: o teor de cloretos acima de 0,3% sobre o peso do cimento, juntamente com a falta de estanqueidade do concreto e a carbonatação em regiões de baixo cobrimento das armaduras, foram apontadas como as principais causas de instalação do processo de corrosão das armaduras.

4.2.2.5 - Unidade 5 - Tomadas de Água do Mar

Descrição

Estruturas de concreto armado, com algumas áreas em contato direto com a água do mar como os canais de captação e as comportas, localizadas à beira mar, anexas ao canal de captação de água do mar.

- Finalidade : abrigar as instalações de captação e bombeamento de água do mar que é utilizada para resfriamento de equipamentos do processo.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} \geq 18$ MPa e cobrimento das armaduras = 4,0 cm.

Obs.: foi fixado consumo mínimo de cimento de 350 Kg/m³ e fator água cimento = 0,45.

Ensaio e diagnóstico

Quadro 4.2 – Inspeção Visual realizada na obra tomadas de água do mar (EPUSP, 1998a)

Inspeção visual	Na inspeção visual, observaram-se armaduras corroídas, apenas nas regiões de fixação de comportas de controle de entrada de água, que já estavam desativadas. O restante das instalações encontrava-se em ótimo estado de conservação, não apresentando sinais patológicos de qualquer natureza, tanto no concreto e no sistema aço/concreto, como na estrutura como um conjunto.
------------------------	--

Diagnóstico: a corrosão na região das comportas deve-se ao fato de estarem em regiões sujeitas a ciclos de molhagem e secagem e encontrarem-se cantoneiras de aço carbono fixadas externamente ao concreto e ligadas às armaduras, o que pode gerar diferença de potencial, com a consequente facilitação de instalação do processo de corrosão das armaduras.

4.2.2.6 – Unidade 6 – Tanques de Alcatrão

Descrição

- Descrição: estruturas de concreto armado, composta de vigas e pilares, localizadas na Coqueria.
- Finalidade : suporte de tanque de aço carbono, para depósito de alcatrão.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 18$ MPa e cobrimento das armaduras = 3,0 cm.

Ensaio e diagnóstico

Tabela 4.6 - Ensaio realizado na obra tanques de alcatrão (EPUSP, 1998b).

Teor de cloretos	0,12 a 0,028%, em relação à massa do concreto, em espessuras de até 7,5 cm.
-------------------------	---

Diagnóstico: o cloreto é o principal agente agressor das armaduras.

4.2.2.7 – Unidade 7 - Casa de Bombas de Água do Mar

Descrição

- Estrutura de concreto armado, composta de paredes, vigas, pilares, bases e lajes, localizadas na Coqueria.
- Finalidade : abrigar as instalações e equipamentos de bombeamento de água do mar que é utilizada para resfriamento de equipamentos do processo.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa. Cobrimento das armaduras: pilares = 3 cm e restante da estrutura = 2 cm.

Ensaio e diagnóstico

Tabela 4.7 - Ensaio realizado na obra casa de bombas de água do mar (EPUSP, 1998b)

Inspeção visual	Observaram-se diferenças entre as texturas das superfícies do concreto, devido aos processos construtivos empregados: formas deslizantes nos pilares, até 80% da altura e o restante dos pilares, vigas e lajes, formas convencionais. A corrosão das armaduras foi observada, principalmente, na região construída pelo processo de formas deslizantes.
Teor de cloretos	Percentuais em relação à massa do concreto: área de formas deslizantes: 0,030 a 0,195%. Área de formas convencionais: 0,028%. Profundidades até 7,5 cm.

Diagnóstico: para a etapa executada com formas deslizantes, os cloretos são os maiores contribuintes para a instalação da corrosão. Nas áreas, onde se empregaram formas convencionais, os teores de cloretos apresentam-se com valores que não oferecem riscos à corrosão, portanto coerentes com o bom estado da estrutura.

4.2.2.8 – Unidade 8 – Decantadores de Alcatrão

Descrição

Estruturas de concreto armado composta de vigas e pilares, localizadas na Coqueria

- Finalidade : suporte de tanque em aço carbono, para decantação de alcatrão.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa e cobertura das armaduras = 3,0 cm.

Ensaio e diagnóstico

Tabela 4.8 - Ensaio realizado na obra Decantadores de Alcatrão (EPUSP, 1998b).

Teor de cloretos	0,020 a 0,028 % em relação à massa do concreto em espessuras de até 7,5 cm
-------------------------	--

Diagnóstico: Os teores de cloretos estão abaixo dos níveis que possam apresentar riscos de corrosão das armaduras.

O relatório da EPUSP (1998b), sugere que a constante presença de água na região dos pilares e a constância de vapores na região são os fatores responsáveis pela corrosão das armaduras.

4.2.2.9 – Unidade 9 – Muro do Pátio de Escória

Descrição

Muro em concreto armado com 200 m de comprimento localizado na área da Aciaria.

- Finalidade: suportar trilho de ferrovia por onde passam as composições carregadas de escória de aciaria em estado líquido. Serve também de parede da baia onde é basculada a escória.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa e cobrimento das armaduras = 3,0 cm.

Ensaio

Tabela 4.9 - Ensaio realizado na obra muro do pátio de escória²⁵

Inspeção visual	Constatou-se elevado índice de deterioração do concreto e corrosão das armaduras.
Temperatura Superficial	Foram detectadas temperaturas de até 1.200°C provenientes do basculamento de escória, atingindo diretamente a superfície do concreto

Esta unidade fica exposta às altas temperaturas devido ao basculamento de escória conforme mostrado no Capítulo 2, figura 2.7, ao resfriamento da escória com jatos de água que atingem o concreto e também geram vapores e impactos devido a equipamentos que recolhem a escória resfriada conforme fotografia 3.4, Capítulo 3.

4.2.2.10 – Unidade 10 – Poço de Gusa

Descrição

Poço enterrado em concreto armado, localizado na Aciaria

- Finalidade : abrigar painéis que recebem 400 t de gusa líquido vindas dos altos fornos em vagões revestidos de material refratário e transladar as painéis para serem carregadas para os convertedores.
- Dados de projeto: concreto $f_{ck} = 15$ MPa e cobrimento das armaduras = 4,0 cm.

Ensaaios

Tabela 4.10 - Ensaaios realizados na obra poço de gusa²⁵

Inspeção visual	Foi vistoriada a abertura por onde é basculado o gusa líquido e constatada deterioração acentuada do concreto, porém, sem corrosão das armaduras.
Temperatura Superficial	Esta região está sujeita constantemente a altas temperaturas devido à irradiação do calor proveniente do gusa no momento do basculamento conforme pode-se observar na figura 2.1, Capítulo 2 , atingindo temperaturas da ordem de 300°C na superfície do concreto.

4.2.3 – Considerações sobre os ensaios realizados

Pode-se observar, pelos ensaios realizados, os resultados obtidos e os diagnósticos da EPUSP (1994, 1995, 1997, 1998a e 1998b), que as obras analisadas apresentaram deterioração significativa principalmente considerando-se o tempo decorrido entre o início da vida de serviço e o início do processo de deterioração (ver tabelas 4.11 e 4.12).

Nestes estudos, também fazem-se notar, a influência do ambiente, como a presença de vapores, ciclos de molhagem e secagem e altas temperaturas, e as deficiências no processo construtivo que resultaram em cobrimentos de armaduras abaixo do especificado ou mesmo inexistentes, ninhos de concretagem, juntas frias e infiltrações.

Estas deficiências do processo construtivo, devem-se em parte às deficiências do próprio projeto. Na pesquisa realizada, não se encontraram recomendações específicas nos projetos para estas

²⁵ Arquivos da CST

obras, levando-se em consideração a agressividade do ambiente e os métodos executivos utilizados. Como exemplo, citam-se as obras que foram executadas pelo processo de formas deslizantes. Não há recomendações nos projetos, que garantam a qualidade no que diz respeito às juntas de concretagem, cobrimento das armaduras e cura do concreto.

Os resultados e diagnósticos apresentados como a presença de cloretos e a profundidade de carbonatação, aliados à pequena vida de serviço das obras analisadas, explicam a forte influência da relação entre as especificações de projeto e a intensidade da agressividade ambiental. Esta relação projeto/ambiente, será analisada nos próximos itens deste capítulo.

4.3 - VIDA ÚTIL NAS DIVERSAS ÁREAS

Para o caso das estruturas analisadas na CST, devido à falta de uniformidade dos dados disponíveis, como profundidade da frente de carbonatação, profundidade da frente de cloretos, existência de fissuras e trincas ou ocorrência de lascamentos no concreto, torna-se difícil uma definição uniforme de vida útil para as várias obras analisadas.

Decidiu-se, tomar, então, para efeito de comparação entre as citadas obras, a definição do CEB/FIP Model Code 1990 apud HELENE (1997a), p. 14, onde entende-se por vida útil, “o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada, sem necessidade de intervenções não previstas”.

4.3.1 Obras onde foram efetuados ensaios e estudos e diagnósticos do estado de deterioração do concreto armado.

Seguem, na tabela 4.11, as obras analisadas e referenciadas no item 4.2, quadro 4.1, tomando como referência o ano em que foram efetuados os ensaios e diagnósticos para fins de recuperação das estruturas.

Tabela 4.11 - Tempo decorrido entre o início de utilização das estruturas e a constatação da necessidade de intervenção para recuperação²⁶

Unidade	Início de utilização	ensaios e diagnósticos	Tempo decorrido
	ano		(anos) ⁽¹⁾
1 – Torres de carvão I e II da Coqueria	1983	1994	11
2 – Prédio da administração Central	1983	1995	12
3 – Torre de resfriamento de água da granulação de escória 1	1983	1997	14
4 – Reservatórios de Água Industrial	1983	1998	15
5 – Captação de água do Mar	1983	1998	15
6 – Tanques de Alcatrão	1983	1998	15
7 – Casa de bombas de água do mar	1983	1998	15
8 – Decantadores de alcatrão	1983	1998	15
9 – Muro do pátio de escória ⁽²⁾	1983	1998	15
10 – Poço de gusa	1983	1999	16

Notas:

- (1) Como não existe um programa de inspeção periódica, muitas vezes os estudos e diagnósticos ocorreram algum tempo após se iniciar o processo de deterioração das estruturas.
- (2) Esta obra sofreu diversas intervenções antes da análise em questão, onde foram demolidas e refeitas as partes da estrutura mais expostas às altas temperaturas e aos impactos de equipamentos de limpeza. Não se tem registro de todas as intervenções, porém, pode-se afirmar, por informações de empregados da CST, que a frequência de intervenções foi em intervalos médios de 2 anos.

4.3.2 Obras onde foram identificadas manifestações patológicas significativas e que dependem de estudo e diagnóstico para a recuperação

Em muitas obras, nas mais diversas áreas da usina da CST, já foram identificadas necessidades de recuperação das estruturas de concreto armado (tabela 4.12) e, visualmente, em uma primeira inspeção, estimadas as quantidades de concreto a recuperar (áreas em m²). Também foram estimados os custos que serão descritos no item 4.4.

Tabela 4.12 - Tempo decorrido entre o início de utilização das estruturas e a constatação da necessidade de intervenção para recuperação através de inspeção visual²⁷

Unidade	Início de utilização	inspeção visual	Tempo decorrido
	ano		(anos)
11 - Trocador de Calor e Filtro de Areia da Laminação	1983	1996	13
12 - Surge Tanque da Laminação	1983	1996	13
13 - Torre de Resfriamento Parte 07, 08 e 09 do Alto Forno I	1983	1996	13
14 - Espessador I e II do Alto Forno I	1983	1996	13
15 - Separador de Pó do Alto Forno I	1983	1996	13
16 - Tanque de Emergência do Alto Forno I	1983	1996	13
17 - Torre de Resfriamento da Laminação	1983	1996	13
18 - Torre de Resfriamento da Fábrica de Oxigênio	1983	1996	13
19 - Clarificador da Laminação	1983	1996	13
20 - Reservatório Elevado de Água Potável - ETA	1983	1996	13

²⁶ Arquivos da CST

²⁷ Arquivos da CST

4.4 - GASTOS COM RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Seguem os gastos com recuperação de estruturas de concreto. No caso de obras recuperadas, os valores são reais e, nos casos das obras inspecionadas, são valores estimados baseados nos históricos.

4.4.1 Custos efetivos de recuperação das obras nas quais fizeram-se estudos e diagnósticos.

Para algumas unidades em que foram identificadas patologias significativas, contrataram-se consultorias externas à CST para estudo e diagnóstico e projeto de recuperação. Estas unidades estão relacionadas na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Gastos com recuperação da estrutura de concreto de unidades da CST²⁸

Unidade	Área total investigada m ²	Área de recuperação m ²	Área recuperada/ área investigada %	Valor gasto (US\$) ref. ano de execução	Valor gasto (R\$) Ref. dez/1999 (1 US\$= R\$ 1,8501) ⁽¹⁾
1 Torres de carvão I e II da Coqueria	7.000	1.200	24	963,000	1.782.000
2 Prédio da Administração Central	8.000	200	3	114,000	212.000
3 Torre de resfriamento de água da granulação de escória 1 ⁽²⁾	total	x	x	x	x
4 Reservatórios de Água Industrial	2.260	316	14	341,000	631.000
5 Captação de água do Mar ⁽³⁾	x	x	x	x	x
6 Tanques e Decantadores de Alcatrão	1.112	125	11	35,000	65.000
7 Casa de bombas de água do mar	1.565	191	12	31,000	58.000
8 Muro do pátio de escória	300	52	17	76,000	139.000
9 Poço de gusa	86	10	12	34,000	63.000
Totais				1,594,000	2.950.000

Notas:

- (1) Os custos reais e estimados compreendem a recuperação do concreto armado e a proteção da estrutura. Estão contemplados nos valores apresentados, conforme a CST, variáveis como diferentes técnicas e materiais utilizados, acessos devido a diferentes alturas e adaptações e paralisações devido a interferências com o processo produtivo.
- (2) Esta unidade foi parcialmente recuperada em 1973. O diagnóstico atual não recomenda mais a recuperação e sim a demolição e reconstrução da estrutura de concreto armado.
- (3) Unidade ainda em fase de estudo para contratação da recuperação do concreto armado.

²⁸ Arquivos da CST

4.4.2 - Custos estimados com recuperação de unidades inspecionadas.

Algumas obras onde foram identificadas patologias significativas nas estruturas de concreto, porém passaram por inspeção e estimativa de quantidades e custos apenas para fins de orçamento, conforme descrito na tabela 4.14 .

Tabela 4.14 -Custos estimados com recuperação das unidades inspecionadas da CST²⁹

Unidade	Área total inspecionada (m ²)	Área de recuperação estimada (m ²)	Valor estimado (US\$) ref. ano de inspeção	Valor estimado ⁽¹⁾ (R\$) Ref. dez/1999 (1 US\$=R\$ 1,8501)
11 Trocador de Calor e Filtro de Areia da Laminação	570	30	15.000	28.000
12 Surge Tanque da Laminação	308	80	25.000	46.000
13 Torre de Resfriamento Parte 07, 08 e 09 do Alto Forno I	2.100	885	312.000	577.000
14 Espessador I e II do Alto Forno I	1.450	50	49.000	91.000
15 Separador de Pó do Alto Forno I	400	80	32.000	60.000
16 Tanque de Emergência do Alto Forno I	1.930	20	28.000	52.000
17 Torre de Resfriamento da Laminação	1.850	40	32.000	60.000
18 Torre de Resfriamento da Fábrica de Oxigênio	1.500	30	25.000	46.000
19 Clarificador da Laminação	1.700	30	28.000	52.000
20 Reservatório Elevado de Água Potável - ETA	1.400	20	22.000	41.000
Totais			568,000	1.053.000

Notas

(1) Os custos reais e estimados, compreendem a recuperação do concreto armado e a proteção da estrutura. Estão contemplados nos valores apresentados, conforme a CST, variáveis como diferentes técnicas e materiais utilizados, acessos devido a diferentes alturas e adaptações e paralisações devido a interferências com o processo produtivo.

4.5 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS E UNIDADES DA CST CONFORME O GRAU DE AGRESSIVIDADE AO CONCRETO ARMADO

Segundo HELENE (1988), a literatura técnica nos apresenta caminhos bem definidos, para se classificarem os ambientes quanto à agressividade ao concreto armado. A forma rigorosa, onde se classifica o ambiente em função da concentração efetiva dos agentes agressivos, fazendo-se necessária uma análise físico-química do meio e a forma indireta, onde a classificação do ambiente quanto à agressividade, baseia-se simplesmente nas condições de exposição, admitindo que a estas concentrações estejam associadas diferentes concentrações de compostos agressivos.

²⁹ Arquivos da CST

Sendo assim, será feita uma classificação do macro ambiente da CST da forma indireta e uma classificação de forma rigorosa em quatro unidades também da CST, onde procedeu-se a análise química da água, que entra em contato com o concreto, seguindo-se os parâmetros e recomendações das normas L1.007 da CETESB (1988), EHE (1999) e o projeto de norma ABNT/NBR 6118:2000 (2000).

Para o caso em questão, das unidades da CST, devem ser considerados o ambiente marinho onde se localiza a usina, a umidade relativa do ar e a precipitação pluviométrica anual. No anexo 3, apresenta-se a precipitação pluviométrica anual, medida na estação meteorológica situada dentro da área da CST, onde se incluem os anos de 1983 (início de operação da usina) até o ano de 1999.

4.5.1 – Classificação do macro clima

Devido à grande variabilidade de ambientes do macro clima da CST e consequentemente de agentes agressivos ao concreto armado existentes, optou-se pela classificação da forma indireta baseando-se nas recomendações da EHE (1999) e o projeto de norma ABNT/NBR 6118:2000 (2000).

Com base na EHE (1999) primeiramente verifica-se em qual classe de exposição relativa à corrosão das armaduras pode-se enquadrar o ambiente geral da CST (tabela 2.9). Neste caso, a classificação que mais se adequa às condições de exposição é *classe marinha, subclasse aérea, designação IIIa, e sujeito à corrosão por cloretos, devido se enquadrar como: elementos exteriores de estruturas situadas nas proximidades da linha costeira (a menos de 5 km)*. Em seguida, verifica-se o ambiente em relação a classes de exposição relativas a outros processos distintos da corrosão (tabela 2.10). A classificação mais adequada, que se chegou na análise deste parâmetro, foi *classe de exposição química agressiva, subclasse débil* (esta definição é devido tratar-se do macro clima, podendo ser modificada quando se analisarem unidades específicas), e *designação Qa*, sujeito a ataque químico, devido se enquadrar como: elementos situados em ambientes que contém substâncias químicas capazes de provocar a alteração do concreto com velocidade lenta.

Com base na ABNT/NBR 6118:2000 (2000), primeiramente verifica-se em qual classe de agressividade ambiental em função das condições de exposição se enquadra o ambiente analisado. Neste caso, para o macro clima da CST, pode-se definir como *classe III (agressividade forte com grande risco de deterioração da estrutura) devido a tratar-se de atmosfera marinha e industrial e considerar-se que a U.R da região é geralmente > 65% (HELENE (1986) e muitos*

dos ambientes externos às estruturas estão sujeitos a ciclos de molhagem e secagem como descrito no capítulo 3.

Baseando-se nas análises acima, chega-se às recomendações de projeto para as obras a serem construídas na região analisada. Estas recomendações estão expostas nas tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15 – Classificação do macro ambiente da CST quanto a agressividade ao concreto armado segundo a EHE (1999)

Classe de exposição		Recomendações em função da classificação ^{(1) (2)}			
Relativas à corrosão das armaduras	Diferentes do processo de corrosão	Concreto			Cobrimento
		f_{ck} (MPa)	a/c máximo	Cimento Kg/m ³ mínimo	Mínimo (mm) ⁽³⁾
IIIa (marinha, sujeita à corrosão por cloretos)	Qa (Instalações industriais com substâncias fracamente agressivas)	30	0,50	325	40
Tabela 2.9	Tabela 2.10	Tabela 2.18	Tabela 2.17	Tabela 2.17	Tabela 2.16

Notas

- (1) Devido esta classificação ter-se baseado no macro clima da CST, a mesma poderá ser modificada quando se analisarem cada ambiente individualmente.
- (2) Embora a EHE (1999) especifique também os tipos de cimento para cada ambiente, este assunto não foi abordado neste trabalho.
- (3) As dimensões do cobrimento são as mínimas, devendo seguir as recomendações da tabela 2.16 para cada caso específico. Por exemplo: Para concreto moldado “in loco”, sem um controle rigoroso, devem-se acrescentar 10 mm às espessuras mínimas recomendadas.

Tabela 4.16 – Classificação do macro ambiente da CST quanto a agressividade ao concreto armado segundo a ABNT/NBR 6118:2000 (2000)

Classe de agressividade em função da exposição	Classificação	Recomendações em função da classificação ⁽¹⁾		
III (Atm marinha e industrial com ambiente úmido e ciclos de molhagem e secagem)	Agressividade forte, com grande risco de deterioração das estruturas	Concreto		Cobrimento
		f_{ck} (MPa)	a/c máximo	Nominal (mm) ⁽²⁾
		30	0,55	35 lajes 40 vigas/pilares
Tabela 2.13	Tabela 2.12	Tabela 2.19	Tabela 2.19	Tabela 2.20

Notas

- (1) Embora a ABNT/NBR 6118:2000 (2000) especifique também os tipos de cimento para cada ambiente, este assunto não foi abordado neste trabalho.
- (2) O cobrimento mínimo deve ser o cobrimento nominal das armaduras acrescido da tolerância de execução conforme o controle de qualidade da obra. Por exemplo: se não houver controle rígido na obra, deve-se acrescentar o cobrimento de 10 mm.

Já na análise do macro clima, observa-se, a falta de uniformidade nas especificações do projeto em relação aos valores da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}). Tomando-se como base a norma EHE (1999) e o projeto de norma ABNT/NBR 6118:2000 (2000) o f_{ck} mínimo deveria ser 30 MPa, enquanto que as obras citadas no capítulo 4 foram projetadas para valores de f_{ck} de 15, 18, 20 e 25 MPa. O cobrimento das armaduras (15, 20, 30 e 40 mm) também fica muito abaixo das recomendações das citadas normas em relação ao ambiente. A EHE recomenda mínimo de 40 mm e a ABNT/NBR 6118:2000 (2000) recomenda mínimo de 35 mm para lajes e 40 mm para vigas e pilares. Estes valores, dependem do tipo de controle a ser praticado na execução das obras, podendo ser aumentados em até 10 mm.

Outros parâmetros de grande importância para a durabilidade das obras como fator água/cimento, consumo mínimo de cimento e tipo de cimento, nem sequer foram mencionados nos projetos a que se teve acesso nesta pesquisa.

4.5.2 Classificação de áreas específicas da CST segundo norma L1.007 da CETESB (1988), a norma EHE (1999) e o projeto de norma ABNT/NBR 6118:2000 (2000)

Para estruturas, que venham estar em contato direto com um meio aquoso, é de grande importância a análise prévia da composição do meio para se subsidiarem os projetos e se obterem obras adequadas e duráveis (CINCOTTO, 1991). No caso de obras industriais, onde não se tem o meio aquoso antes do início de operação da unidade que está sendo projetada, pode-se sugerir que esta análise se baseie em dados de unidades produtivas similares e em estudos que envolvam os projetistas dos equipamentos, os futuros responsáveis pela operação e manutenção dos equipamentos e também os responsáveis pelo controle ambiental.

Nesta pesquisa, devido ao acesso a equipamentos em funcionamento, procedeu-se à análise química do meio aquoso que está permanentemente em contato com o concreto em quatro unidades da CST. Foram coletadas e analisadas amostras objetivando a comparação com os parâmetros definidos na norma L1.007 da CETESB (1988). Estas análises permitiram, também, classificar o ambiente à luz da EHE (1999) e da ABNT/NBR 6118:2000 (2000). Os ensaios e resultados utilizados para esta classificação são os descritos no Capítulo 3, tabela 3.1.

Foram feitas duas coletas de amostras num intervalo de 7 dias. Embora a CETESB (1988) sugira intervalo mínimo de 10 dias, o intervalo de 7 dias foi adotado devido tratarem-se de águas de

processo industrial constantemente monitorado e dominado pela CST, onde eventuais variações no processo, quando ocorrem, são corrigidas de imediato.

A norma L1.007 (1988) classifica o meio aquoso em relação ao concreto conforme os seguintes graus de agressividade: nulo, fraco, médio, forte e muito forte. Indica, também a quais mecanismos de deterioração este meio aquoso sujeita as estruturas em que está em contato. Embora não recomende os parâmetros de projeto a serem seguidos, os indicadores desta norma são bastante úteis para a especificação dos materiais a serem utilizados nas estruturas de concreto e eventuais medidas de proteção. A ABNT/NBR 6118:2000 (2000) admite que se utilizem os parâmetros da norma L1 007 da CETESB (1988) para a classificação da agressividade ambiental e, consequentemente, para as especificações de projeto.

4.5.2.1 - Granulação de Escória 1 do Alto Forno 1 da CST

A água coletada é utilizada para a granulação da escória por resfriamento brusco. A escória sai do alto forno a uma temperatura aproximada de 1.500°C. Esta água é resfriada em um equipamento constituído de tanques e torre de resfriamento de concreto armado, para, novamente, ser utilizada para o resfriamento de escória. As coletas foram efetuadas no tanque, que recebe a água após o resfriamento da escória.

Análise dos resultados

Baseando-se na norma L1.007 da CETESB (1988), chega-se as seguintes conclusões: *o meio aquoso analisado é considerado de agressividade muito forte, sujeitando o concreto armado ao risco do fenômeno de expansão, por formação de gipsita e/ou etringita, acompanhada de lixiviação, devido aos teores dos elementos químicos encontrados levarem a classificar o meio como água salobra poluída industrialmente. Pode-se classificar, também, o meio aquoso como de agressividade forte, sujeitando o concreto armado ao risco dos fenômenos de carbonatação acompanhado de lixiviação, devido ao fato do meio aquoso, conforme os resultados obtidos, ser classificado como água salina ácida.*

Quanto à EHE (1999) e à ABNT/NBR 6118:2000 (2000), pode-se chegar à classificação da agressividade consultando diretamente as tabelas 2.10 e 2.13 respectivamente.

Baseando-se nas análises acima, chega-se às recomendações de projeto para as obras a serem construídas na região analisada. Estas recomendações estão expostas na tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Classificação da agressividade ao concreto da água circulante na Granulação de Escória do Alto Forno 1 da CST

CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE						
L1.007 CETESB (1988)		EHE (1999) – Agressividade química		ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
Agressividade		IIIa + Qb [Ataque de grau médio devido sulfatos (SO ₄ ²⁻) entre 600 e 3.000 mg/l]		Classe IV: teor de sulfatos (SO ₄ ²⁻) > 1500 mg/l		
Muito forte: expansão/ lixiviação						
Forte: carbonatação/lixiviação						
Segundo NBR6118, classe IV ⁽¹⁾						
Tabela 2.7		Tabela 2.10		Tabela 2.13		
RECOMENDAÇÕES PARA O CONCRETO E COBRIMENTO DAS ARMADURAS						
EHE (1999)				ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
f _{ck} (MPa)	A/C	Cimento (kg/m ³)	Cobrimento (mm)	f _{ck} (MPa)	A/C	Cobrimento (mm)
30	0,50	350	35	40	0,45	45 (laje) 55 (viga/pilar)
Tabela 2.18	Tabela 2.17	Tabela 2.17	Tabela 2.16	Tabela 2.19	Tabela 2.19	Tabela 2.20

Notas

(1) A ABNT/NBR 6118:2000 (2000) admite que se utilize a norma L1 0007 da CETESB (1988) para casos de agressividade específica.

É condição atenuante segundo a L1.007: a água agressiva entrou em contato com o concreto após 28 dias de sua execução.

São condições agravantes segundo a L1.007: a água está em constante movimento, a sua temperatura é maior que 45°C e alguns componentes da estrutura têm dimensões menores que 20 cm.

Esta obra foi projetada para um concreto com $f_{ck} = 15$ MPa e cobrimento das armaduras = 20 mm, estando muito abaixo das recomendações das normas acima.

Mesmo considerando-se a norma brasileira em vigor NBR 6118/78 (ABNT 1978), o cobrimento das armaduras está abaixo do especificado se considerado o ambiente a que esta obra está exposta. A referida norma especifica cobrimento mínimo de 40 mm para este caso. Pode-se concluir que, a exemplo de outras obras, as características do ambiente não foram devidamente consideradas na elaboração deste projeto.

Esta obra é um exemplo significativo da necessidade de se especificar também o tipo de cimento. No caso, pelos teores de sulfatos apresentados nos resultados da análise química da água, poderia ser utilizado cimento resistente a sulfato como por exemplo o CP III-RS.

Esta obra foi parcialmente recuperada em 1973 e atualmente encontra-se com as estruturas em avançado grau de deterioração, sendo que, o diagnóstico mais recente não recomenda nova recuperação, sendo economicamente mais viável sua demolição e reconstrução.

4.5.2.2 – Tanque de Água Desmineralizada da CST

A água desmineralizada é processada na unidade Estação de Tratamento de Água Desmineralizada e é utilizada no processo produtivo, sendo armazenada em tanques de concreto armado, devidamente revestidos com material apropriado, e conduzida por tubulações metálicas para as unidades, onde será consumida.

O contato desta água com o concreto acontece através de eventuais vazamentos e, também por falhas ou desgaste dos revestimentos protetores dos tanques de concreto. As amostras analisadas foram colhidas no laboratório de utilidades, onde chega uma tubulação desta água para a análise rotineira do processo.

Análise dos resultados

Os resultados da análise química da água desmineralizada levam a concluir que *é um meio aquoso de agressividade muito forte, sujeitando o concreto armado ao risco do fenômeno de lixiviação. O parâmetro principal é o teor de sólidos dissolvidos que é < 50 mg/l*. Este parâmetro coincide com todas as três normas analisadas

Baseando-se nas análises acima, chega-se às recomendações de projeto para as estruturas que venham a entrar em contato com esta água. Estas recomendações estão expostas na tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Classificação da agressividade ao concreto da água desmineralizada da CST

CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE						
L1.007 CETESB (1988)		EHE (1999) – Agressividade química		ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
Agressividade Muito forte: lixiviação Segundo NBR6118, classe IV ⁽¹⁾		IIIa + Qc [Ataque forte devido a sólidos dissolvidos < 50 mg/l]		Classe IV: sólidos dissolvidos < 50 mg/l		
Tabela 2.8		Tabela 2.11		Tabela 2.14		
RECOMENDAÇÕES PARA O CONCRETO E COBRIMENTO DAS ARMADURAS						
EHE (1999)				ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
f _{ck} (MPa)	A/C	Cimento (kg/m³)	Cobrimento (mm)	f _{ck} (MPa)	A/C	Cobrimento (mm)
35	0,45	350	35	40	0,45	45 (laje) 55 (viga/pilar)
Tabela 2.18	Tabela 2.17	Tabela 2.17	Tabela 2.16	Tabela 2.19	Tabela 2.19	Tabela 2.20

Notas

(1) A ABNT/NBR 6118:2000 (2000) admite que se utilize da norma L1.007 da CETESB (1988) para casos de agressividade específica.

Devido ao contato desta água com o concreto ser eventual, podendo acontecer em pontos distintos ao longo de sua distribuição pelo processo produtivo, não é possível tecer comparações entre o real e o recomendado pois seria necessário analisarem-se inúmeras obras por onde passa a tubulação de distribuição deste produto.

Vale destacar a complexidade e responsabilidade do projeto de obras situadas em grandes complexos industriais. Não se pode deixar de considerar, tomando este caso como exemplo, que o sistema de distribuição da água desmineralizada passa por diversas unidades, onde se faz presente o concreto. Deve-se prever no projeto destas unidades, proteções contra eventuais vazamentos no sistema de distribuição pois, casos efetivos de vazamentos, que resultaram na deterioração de peças de concreto armado, foram verificados nesta pesquisa.

4.5.2.3 – Estação de tratamento biológico (ETB) da CST

Trata-se de sistema de tratamento do licor amoniacal que é um resíduo do processo de coqueificação da unidade coqueria e consta de tanques e canaletas de concreto armado, onde este resíduo é armazenado e tratado. As amostras para os ensaios foram colhidas na entrada do tanque, onde se inicia o processo de tratamento.

Análise dos resultados

A classificação da agressividade do meio aquoso, neste caso, é bastante divergente entre as três normas utilizadas. A EHE (1999) é mais rigorosa quanto aos teores de amônio (NH_4^+), levando a uma classificação de agressividade forte. Já a L1.007 (1999) leva em consideração, como fator agravante, o fato da água estar em movimento e a ABNT/NBR:6118:2000 (2000), considera o efeito da água em movimento e da temperatura maior que 30°C para aumentar em um nível a classe de agressividade.

Baseando-se nas análises acima, chega-se às recomendações de projeto para as obras a serem construídas na região analisada. Estas recomendações estão expostas na tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Classificação da agressividade ao concreto da água circulante no sistema de tratamento biológico da CST

CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE						
L1.007 CETESB (1988) ⁽¹⁾		EHE (1999) – Agressividade química		ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
Agressividade Nula		IIIa + Qc [Ataque forte devido teor de íon amônio (NH ₄ ⁺) > 60 mg/l]		Classe II: Classe I aumentada em um nível devido à água em movimento e temperatura > 30°C		
Tabela 2.8		Tabela 2.11		Tabela 2.14		
RECOMENDAÇÕES PARA O CONCRETO E COBRIMENTO DAS ARMADURAS						
EHE (1999)				ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
f _{ck} (MPa)	A/C	Cimento (kg/m³)	Cobrimento (mm)	f _{ck} (MPa)	A/C	Cobrimento (mm)
35	0,45	350	35	25	0,60	25 (laje) 30 (viga/pilar)
Tabela 2.18	Tabela 2.17	Tabela 2.17	Tabela 2.16	Tabela 2.19	Tabela 2.19	Tabela 2.20

Notas

- (1) É condição atenuante segundo a L1.007: a água agressiva entrou em contato com o concreto após 28 dias de sua execução.
É condição agravante segundo a L1.007: a água está em constante movimento.

Esta obra foi projetada para um concreto com $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ e cobrimento das armaduras = 30 mm, estando muito abaixo das recomendações das normas citadas, mesmo considerando-se a ABNT/NBR 6118:2000 (2000), que é a menos rigorosa para este caso. Nota-se grande divergência entre as normas para este exemplo, sendo a norma EHE (1999) a mais rigorosa.

4.5.2.4 – Sistema de Lavagem de Gás do Alto Forno 1 da CST

O gás resultado do processo do alto forno, chamado de gás de alto forno (BFG), passa por um processo de lavagem onde são retiradas as impurezas. Este processo consta de sistemas de decantação e resfriamento da água de lavagem. As amostras analisadas foram colhidas na saída do espessador de lama de onde a água é encaminhada para uma torre de resfriamento em concreto.

Análise dos resultados

A exemplo da análise do item anterior, a classificação da agressividade do meio aquoso, neste caso, também é bastante divergente entre as três normas utilizadas. A EHE (1999) é mais rigorosa quanto aos teores de amônio (NH_4^+), levando a uma classificação de agressividade forte. Já a L1.007 (1999) leva em consideração os seguintes fatores como agravantes: a água está em movimento, a temperatura é $> 45^\circ$ e existem componentes na estrutura cujas dimensões são menores que 20 cm. A ABNT/NBR:6118 2000 (2000) considera os teores de dióxido de carbono (CO_2) entre 20 e 30 mg/l, o efeito da água em movimento e a temperatura maior que 30°C para aumentar em um nível a classe de agressividade.

Baseando-se nas análises acima, chega-se às recomendações de projeto para as obras a serem construídas na região analisada. Estas recomendações estão expostas na tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Classificação da agressividade ao concreto da água no Sistema de Lavagem de gás do Alto Forno 1 da CST

CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE						
L1.007 CETESB (1988) ⁽¹⁾		EHE (1999) – Agressividade química		ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
Agressividade Nula		IIIa + Qc [Ataque forte devido teor de íon amônio (NH ₄ ⁺) > 60 mg/l]		Classe III: Classe II (dióxido de carbono (CO ₂) entre 20 e 30ml) aumentada em um nível devido à água em movimento e temperatura > 30°C		
Tabela 2.8		Tabela 2.11		Tabela 2.14		
RECOMENDAÇÕES PARA O CONCRETO E COBRIMENTO DAS ARMADURAS						
EHE (1999)				ABNT/NBR 6118:2000 (2000)		
f _{ck} (MPa)	A/C	Cimento (kg/m ³)	Cobrimento (mm)	f _{ck} (MPa)	A/C	Cobrimento (mm)
30	0,50	350	35	30	0,55	35 (laje) 40 (viga/pilar)
Tabela 2.18	Tabela 2.17	Tabela 2.17	Tabela 2.16	Tabela 2.19	Tabela 2.19	Tabela 2.20

Notas

- (1) É condição atenuante segundo a L1.007: a água agressiva entrou em contato com o concreto após 28 dias de sua execução. São condições agravantes segundo a L1.007: a água está em constante movimento, a sua temperatura é maior que 45°C e alguns componentes da estrutura têm dimensões menores que 20 cm.

Esta obra foi projetada para um concreto com $f_{ck} = 15$ MPa e cobrimento das armaduras = 30 mm, estando muito abaixo das recomendações das normas acima, principalmente, considerando os fatores agravantes como a água estar em constante movimento e apresentar-se em temperaturas superiores a 45°C e também a existência de peças com dimensões menores que 20 cm.

4.6 – CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, verificou-se que as normas atuais tendem a enfatizar a questão da durabilidade, sendo bem detalhadas e inclusive didáticas ao apresentarem esta questão. Estas normas trazem uma série de dados, que facilitam a classificação de diversos tipos de ambiente em relação à agressividade ao concreto armado e apresentam recomendações para se obterem estruturas mais duráveis.

Conforme os próprios pesquisadores e normas citados, as tabelas e seus valores apresentados devem ser utilizados como referência, não se podendo prescindir de uma análise mais aprofundada para cada caso estudado. Este fato é corroborado pelas comparações feitas entre as análises e recomendações de algumas normas, onde se constatarem diferenças significativas entre os números.

O que se conclui, entretanto, é que nas obras apresentadas, não se considerou, devidamente, a qualidade do ambiente na etapa de projeto das mesmas. Isto é comprovado pelos parâmetros utilizados para os projetos, levando-se em consideração a durabilidade das estruturas.

Segundo LIMA et al (1999), o projeto estrutural das torres de granulação de escória do alto forno da CST, por exemplo, está sub-dimensionado do ponto de vista da durabilidade tendo em vista os valores adotados para o concreto (f_{ck} 15 MPa) e para o cobrimento das armaduras (20 mm), mesmo considerando-se a versão em vigor da norma NBR 6118 (1978).

Os exemplos reais apresentados, neste capítulo, onde mostram a curta vida útil alcançada por grande número de obras e os custos envolvidos para sua recuperação, enfatizam a necessidade de se conhecer e se considerarem o ambiente e os mecanismos de ação dos agentes agressivos nas estruturas de concreto armado, principalmente o efeito sinérgico da ação conjunta dos agentes agressivos.

Finalmente, em relação aos estudos feitos nas obras deterioradas, pode-se sugerir que sejam mais detalhados. Por exemplo, que o concreto deteriorado seja analisado quimicamente para se iden-

tificarem os compostos formados após o ataque dos agentes agressivos, “pois uma vez identificado o composto, pode-se então, explicar o mecanismo de corrosão e dizer quais os componentes do cimento, passíveis de sofrerem a ação dos agentes agressivos” (CINCOTTO, 1972, p. 74).

Não foi possível recuperarem-se outros dados das obras analisadas como o fator água/cimento do traço especificado ou mesmo o tipo de cimento utilizado em cada obra.

Estes dados, segundo a CST, foram registrados durante a etapa da construção, porém, não foram localizados durante esta pesquisa.

Para o objetivo do trabalho, porém, a comparação das especificações das normas após identificados os agentes agressivos e classificados os ambientes quanto à agressividade ao concreto armado por si só, mostram, pela resistência do concreto à compressão e o cobrimento das armaduras a grande distância entre a qualidade esperada e a realizada. Isto pode ser comprovado, também, pela curta vida útil das obras apresentadas.

Estes dados são de grande importância para a questão da durabilidade das estruturas. Conforme o anteprojeto de norma MERCOSUL, CMN (2000) p.8., cabe ao profissional responsável pelo projeto estrutural, entre outros, “a especificação dos requisitos correspondentes à durabilidade da estrutura e de propriedades especiais do concreto, tais como: consumo mínimo de cimento e relação água/materiais cimentícios” e outras propriedades relativas à durabilidade da estrutura.

Capítulo 5

RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

5.1 - APRESENTAÇÃO

Neste capítulo, expõem-se as recomendações e conclusões a que se chegou, nesta pesquisa. Antes das conclusões finais, tecem-se recomendações para novas construções e manutenção das estruturas existentes em usinas siderúrgicas.

5.2 - RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS CONSTRUÇÕES

Pelo que foi exposto, podem ser feitas recomendações, que abrangem as construções nas fases de projeto, construção e utilização, através de inspeções e manutenções periódicas.

As recomendações, que se seguem, tratam, exclusivamente, da durabilidade das construções, em função do ambiente a que serão expostas em usinas siderúrgicas e dos agentes agressivos ao concreto que foram identificados.

5.2.1 - Projeto

Os cuidados, que dizem respeito à durabilidade das estruturas de concreto em usinas siderúrgicas, devem ter início na fase de projeto onde devem ser identificados os ambientes a que serão expostas e também à função que cumprirão, durante sua vida de serviço. Sugerem-se então, no quadro 5.1, as seguintes providências, adicionalmente às já praticadas e recomendadas pelas normas vigentes.

Quadro 5.1 – Roteiro para se obter informações para projeto, visando a durabilidade das estruturas em indústrias siderúrgicas

Ação	Objetivo
Consulta ao proprietário ⁽¹⁾	Obter informações sobre: • o ambiente a que serão expostas as estruturas; • o potencial de emissão de agentes agressivos ao concreto; • a existência de equipamentos de controle ambiental e os parâmetros a serem atingidos pelos mesmos ⁽²⁾ • histórico do comportamento das obras existentes quanto à durabilidade, intervenções para recuperação e eventuais estudos e diagnósticos; • existência de programas de inspeção e manutenção; • expectativa de vida útil.
Consulta às normas vigentes e trabalhos científicos ⁽³⁾	Obter informações sobre: • classificação dos ambientes, quanto à agressividade ao concreto armado; • recomendações para projeto, relacionando o ambiente e a durabilidade; • casos não contemplados nas normas.

Notas

- (1) Geralmente, tratando-se de indústrias de grande porte, como é o caso das usinas siderúrgicas integradas a coque, os proprietários são representados por equipes técnicas com a devida qualificação. Nessa equipe, além dos representantes da engenharia, deve estar representada a equipe responsável pelo controle ambiental.
- (2) No caso de indústrias siderúrgicas, por ser possível conhecer os potenciais de emissão de agentes agressivos ao concreto armado nas diversas unidades conforme demonstrado neste trabalho, deve-se conhecer os níveis de emissão esperados em função da tecnologia a ser empregada no processo produtivo e dos equipamentos de controle ambiental.
- (3) Como as normas existentes não contemplam todos os agentes agressivos ao concreto nos ambientes siderúrgicos, é fundamental que se pesquisem, na literatura especializada, estudos que enfoquem estes agentes e a sua ação sobre o concreto armado.

5.2.2 - Construção

As recomendações para o processo construtivo, em usinas siderúrgicas não diferem das recomendações correntes para obras de concreto armado.

Ressalte-se, porém, que as deficiências construtivas, encontradas nas obras inspecionadas citadas neste trabalho, têm suas conseqüências agravadas, por se tratarem de obras expostas a ambientes reconhecidamente agressivos ao concreto armado. Entre as deficiências observadas, podem-se destacar falhas no lançamento, no adensamento e na cura do concreto bem como no posicionamento das armaduras.

Recomenda-se, então, que se implantem e pratiquem controles formais, para a cura do concreto e para o posicionamento das armaduras, a exemplo do que é feito para determinação das resistências à compressão do concreto.

Para que se obtenham resultados práticos das recomendações, quanto aos controles da cura do concreto e do posicionamento das armaduras, pode-se sugerir a inclusão destes controles, como itens de planilha, quando se forem contratar os serviços de construção ou recuperação de obras de concreto armado. Normalmente, os custos relativos à cura ficam embutidos no preço de execução do concreto. Acredita-se que, com a criação de um item específico para a cura do concreto, especificando-se o tipo (úmida ou química) e o tempo de cura, a tendência será melhorar efetivamente o controle deste importante item para a qualidade e, conseqüentemente, para a durabilidade do concreto armado. O mesmo procedimento pode ser empregado para o controle do posicionamento das armaduras.

5.3 – RECOMENDAÇÕES PARA INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO PERIÓDICA

Nas indústrias em geral, devido ao objetivo principal, que é a produção, as equipes de manutenção das especialidades, que interferem diretamente com o processo produtivo, são geralmente, bem estruturadas. É o caso das manutenções mecânica, elétrica e de instrumentação.

Já a atividade de manutenção civil, pelo que se observou no estudo de caso, não é tratada com a devida importância, que se faz necessária, pelas suas próprias características (os defeitos geralmente aparecem em médio e longo prazos). Inexistem manuais de orientação, para a correta utilização das edificações e para as manutenções periódicas.

A recomendação, que se pode dar neste sentido, é que se definam, já na fase de projeto, as inspeções necessárias e sua frequência, assim como as manutenções preventivas, como por exemplo, pinturas de proteção, limpeza e desobstrução de drenagens, impermeabilizações, verificação quanto à correta utilização das estruturas, entre outros.

É importante, efetuar e manter um cadastro de todas as unidades na indústria siderúrgica, onde se fazem presentes estruturas de concreto armado e mantê-lo atualizado, com as informações sobre datas das intervenções programadas e efetuadas, eventuais intervenções não previstas no plano de manutenção, custos, técnicas e materiais utilizados para recuperações, assim como toda informação necessária para se formar um histórico, que auxiliará nas futuras manutenções e, também, em novas construções.

5.4 - CONCLUSÕES

Este item será dividido em duas partes. Primeiramente serão descritas as conclusões baseadas nas hipóteses iniciais e, por fim, as conclusões propriamente ditas.

5.4.1 – Conclusões baseadas nas hipóteses

Hipótese a: A durabilidade das estruturas de concreto armado é um assunto bastante complexo, dependente de uma grande diversidade de fatores que necessitam ser melhor estudados e compreendidos.

Foram descritos no capítulo 2, inúmeros fatores que influem a durabilidade das estruturas e um destaque especial pode ser dado à exposição baseada em RODWAY (1985), onde cita 200 fatores que podem influenciar a durabilidade do concreto, principalmente ao item natureza da exposição, que é o tema principal deste trabalho. Pode-se concluir que a natureza da exposição é um tema bastante complexo, haja vista que neste trabalho fez-se uma exposição de apenas alguns dos agentes agressivos ao concreto que foram identificados em usinas siderúrgicas.

Hipótese b: Uma eficiente classificação dos ambientes em relação à agressividade às estruturas de concreto armado é um forte instrumento para projetistas na definição dos parâmetros de projeto e da vida útil das estruturas.

Foram expostas diversas formas de se classificarem os ambientes em relação ao grau de agressividade às estruturas de concreto armado. Mostrou-se que os estudos e normas que tratam deste assunto têm evoluído e com tendência a se aproximarem no que diz respeito aos parâmetros propostos. Neste sentido, estas normas têm fornecido ferramentas que, sendo bem utilizadas, poderão contribuir significativamente para que se projetem obras que atendam aos requisitos de durabilidade.

Hipótese c: Existem muitos agentes agressivos ao concreto armado no ambiente industrial e especificamente em usinas siderúrgicas, que não são conhecidos pelos projetistas, e quando o são, não se conhece ou se levam em consideração seus efeitos;

Na identificação, mapeamento e localização de agentes agressivos ao concreto, teve-se a oportunidade de se descrever diversos agentes agressivos e seus efeitos ao concreto armado. Entre estes agentes podem-se destacar: altas temperaturas, e diversos tipos de gases como dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Hipótese d: **Conhecendo-se os agentes agressivos e sua localização é possível classificar os ambientes quanto ao grau de agressividade às estruturas;**

Foram citados vários exemplos de classificação de ambientes quanto ao grau de agressividade ao concreto armado, baseando-se no conhecimento dos agentes agressivos que foram identificados nesta pesquisa, comprovando, assim, esta hipótese.

Hipótese e: **As estruturas de concreto armado, têm sido projetadas sem levar-se em conta, de forma eficiente, os agentes agressivos a que vão estar sujeitas durante sua vida de serviço ou mesmo, durante o período de construção. Este desconhecimento é um dos fatores que tem contribuído para a grande quantidade de insucessos que têm sido constatados nas obras de concreto armado.**

Nos últimos capítulos, deste trabalho, foram citados vários exemplos comparando-se as especificações de projeto de diversas obras executadas na CST e as especificações recomendadas pelas normas baseadas na classificação dos ambientes, quanto à agressividade ao concreto armado. Podem-se destacar a obra da torre de granulação de escória do alto forno, onde foram especificados, no projeto, concreto com f_{ck} de 15 MPa e cobrimento das armaduras mínimo de 20 mm enquanto que as normas EHE (1999) e ABNT/NBR:6118 2000 (2000) recomendam, respectivamente, concreto com f_{ck} 30 e 40 MPa e cobrimento mínimo das armaduras 35 e 45 mm. Citaram-se exemplos da curta vida útil alcançada por estas obras, onde se encontram manifestações patológicas com 13 anos após o início da utilização, e dos altos custos com a recuperação das suas estruturas.

5.4.2 – Conclusões propriamente ditas

Neste trabalho, mostrou-se a questão da durabilidade do concreto armado, onde observa-se que é um material durável, porém, suscetível a inúmeras condições, que podem comprometer esta durabilidade. Entre elas, está a agressividade do ambiente e, principalmente, o seu desconhecimento por

parte dos intervenientes no projeto, na construção, na utilização e na manutenção das estruturas. Este desconhecimento do ambiente pelos projetistas foi demonstrado, na comparação da especificação das obras utilizadas, como exemplo, e na classificação e recomendações das normas existentes.

Verificou-se que em indústrias siderúrgicas, apesar da grande variabilidade entre as diversas empresas, no que diz respeito ao processo de produção, aos insumos utilizados, e principalmente aos programas de controle ambiental e sua eficiência, é possível identificarem-se inúmeros agentes agressivos ao concreto armado. Alguns destes agentes são comuns a outras indústrias e outros são mais específicos, como por exemplo as altas temperaturas.

Foi claramente demonstrado pelas obras citadas, neste trabalho, que a vida útil das mesmas foi muito curta e os gastos com recuperação muito elevados. Leve-se em consideração a recomendação da ABNT/NBR 6118:2000 (2000) quanto à vida útil mínima de 50 anos para estruturas de concreto armado. Além dos custos diretos com a recuperação das estruturas, tem-se que considerar os eventuais custos com interferências com o processo produtivo, resultante dos serviços de manutenção e recuperação das estruturas.

Quanto à normatização, deve-se destacar a EHE (1999) e o projeto de revisão da ABNT/NBR 6118:2000 (2000), que enfatizam a questão da durabilidade, de forma abrangente e didática. A versão vigente da NBR 6118 (1978) carece de uma abordagem maior sobre esta questão.

Mesmo em relação à NBR 6118 (1978), a obra da torre de resfriamento da granulação de escória 1 do alto forno 1 da CST pode ser considerada sub-dimensionada em relação à durabilidade, considerando-se o cobrimento adotado para as armaduras. Embora este exemplo não defina que a solução para que esta obra cumpra o seu papel em relação à durabilidade seja apenas aumentar o cobrimento das armaduras, mostra claramente o desconhecimento ou a desconsideração das características do ambiente quando da execução do projeto.

5.5 -TRANSFERÊNCIA AO MEIO

Objetiva-se, com este trabalho, chamar a atenção dos projetistas, dos construtores e dos proprietários, para a questão da influência das características da indústria siderúrgica na durabilidade das estruturas de concreto, as implicações econômicas diretas, no custo com as recuperações destas estruturas e as eventuais interferências com o processo produtivo.

A transferência ao meio, se dará, em forma de divulgação desta pesquisa, em congressos e seminários, o que já tem sido realizado com a apresentação de trabalhos referentes ao tema. Neste sentido, já foi apresentado e publicado trabalho no CONPAT99 - V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones e V Congreso de Control de Calidad. 1999 em Montevideo, Uruguai. Deverão, também, ser publicados mais dois trabalhos, um nas XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, “Jubileo Profesor Julio Ricaldoni”, previsto para novembro de 2000 também em Montevideo e, outro, no CONSEC’01 - Third International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, Vancouver, Canadá, previsto para junho de 2001 (este trabalho está em fase final de análise pela comissão organizadora do evento).

Dar-se-á, também, continuidade à divulgação desta pesquisa, através da elaboração de manual, direcionado a projetistas e estudantes, com a finalidade de facilitar o acesso e o uso das ferramentas disponíveis, para que se projetem estruturas, com vistas a durabilidade com relação às condições do ambiente.

5.6 - CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

Embora existam muitos estudos a serem feitos para a continuidade deste trabalho, os dados apresentados devem servir de subsídios para novos projetos, construções e programas de manutenção em estruturas de concreto armado, situadas em indústrias siderúrgicas.

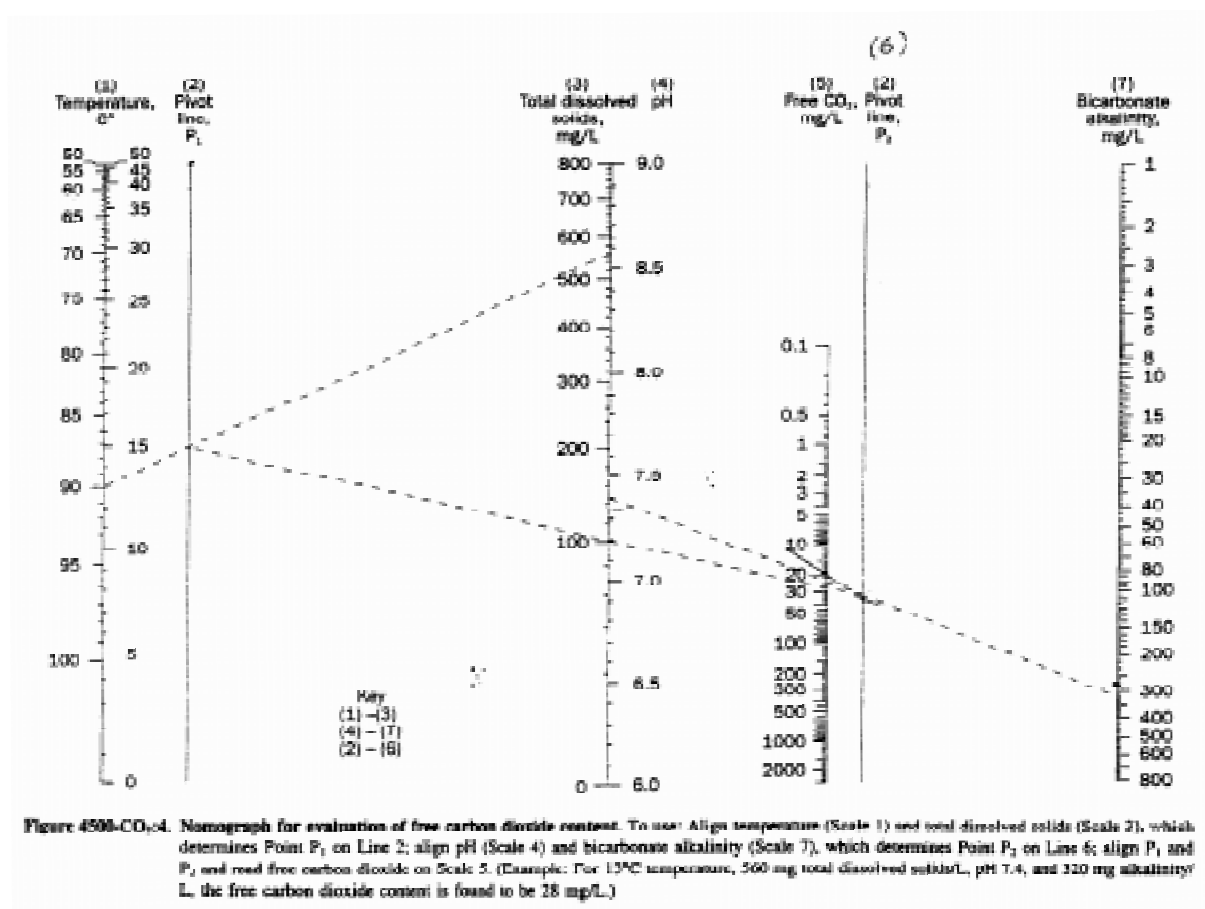
Sugerem-se, como temas para a continuidade destes estudos:

- aprofundamento dos estudos dos agentes agressivos ao concreto armado, presentes em usinas siderúrgicas e mesmo indústrias de outra natureza e os respectivos mecanismos de agressão ao concreto armado;
- desenvolvimento e aplicação de materiais resistentes aos agentes agressivos, como por exemplo as altas temperaturas e determinados agentes de natureza química;
- estabelecimento de controle sistemático e rigoroso, para obras nestas indústrias;
- desenvolvimento e implantação de programa de inspeção e manutenção preventiva;
- desenvolvimento de estudos sobre avaliação de sistemas de reparos e proteção das estruturas de concreto, adequados aos diferentes ambientes, existentes em indústrias siderúrgicas.

Anexo 2

AVALIAÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) LIVRE

Avaliação do dióxido de carbono (CO₂) livre

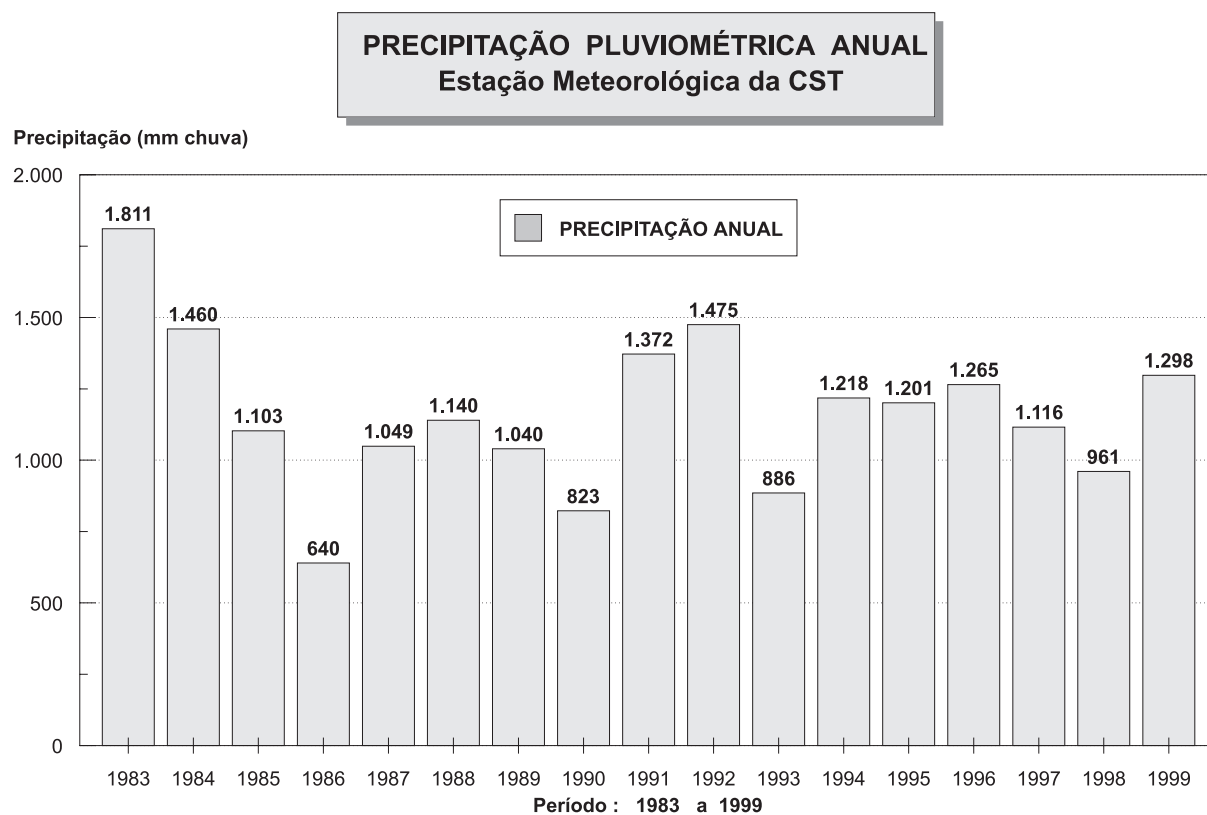


Fonte: CLESCERI (1998)

Anexo 3

**PRECIPITAÇÃO
PLUVIOMÉTRICA ANUAL -
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA CST**

Precipitação Pluviométrica Anual - Estação Meteorológica da CST³⁰



Fonte : Assessoria de Meio Ambiente

³⁰ Arquivos da CST

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. D. **Ação Corrosiva dos Ácidos Sobre o Concreto**. In: REUNIÃO COMEMORATIVA DO DÉCIMO TERCEIRO ANIVERSÁRIO, 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1982. 12 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Proposed revision of:** Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. Detroit, 1991: ACI Materials Journal, v. 88, nº 5.
- _____. **Guide to Durable Concrete:** reported by ACI committee 201. Detroit, 1992: ACI manual of concrete practice, 1993, v. 1.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C 876. In: _____. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1982.
- _____. Standard Test Method for Acide-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. ASTM C 1152. In.: _____. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1982.
- ANDRADE, J. J. O, **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado:** Análise das Manifestações Patológicas nas Estruturas do Estado de Pernambuco. 1987. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Rio Grande do Sul.
- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**, Luiz Antônio de Araújo. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997, v1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Efeitos de Várias Substâncias Sobre o Concreto**. Boletim Técnico 55, São Paulo, 1990. 20 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.
- _____. **Concreto - Classificação pela Resistência à Compressão de Concreto para fins Estruturais:** NBR 8953. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **Projeto de Estruturas de Concreto**. Projeto de revisão da NBR 6118:2000 – Texto de Discussão. Rio de Janeiro, 2000.
- BICZÓK, I. **La Corrosion del Hormigón y su Protección**. España: Ediciones Urmo, 1972. 715 p.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Guide to Durability of Buildings and Building Element**, Products and Components: BS 7543. London, BSI, mar. 1992. 43 p.

BUENFIELD, N. R. and OKUNDI, E. **Effect of cement content on transport in concrete**. Magazine of Concrete Research, London, 1998, nº 4, Dec. p. 339-351.

CASCUDO, O. **O controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**: Editora UFG, Goiânia, 1997.

CHANDRA, S. **Influence of Pollution on Mortar and Concrete**. Stockolm: Swediss Concil for Building Research, 1990.

____. **Deterioration of Mortar and Concrete By Pollutant Gases**. In: Durability of Building Materials and Components, 7, 1996, Stockholm, Sweden. **Anais...** Stockholm: Proceedings of the Seventh Internacional Conference on Durability of Building Materials and Components, 7DBMC, 1996. v. 1, p. 586.

CINCOTTO, M. A. **Algumas Considerações Sobre a Ação de Flúidos Agressivos ao Concreto**. In ... DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO, 1972, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1972. p. 45-75.

____. **Avaliação do Grau de Agressividade do Meio Aquoso em Contato com o Concreto**. In: REUNIÃO ANUAL, 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1991.

CLEMENTE, J. M. **Proteção Ambiental**, “Análise dos Aspectos Econômicos Realizados pela Companhia Siderúrgica de Tubarão”, período de 1983 a 1997. 1998. 85 p. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Curso Superior de Ciências Sociais de Vila Velha, ES.

CLESCERI, L. S. et al. **Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater**: American Public Health Association, 20th Edition, Washington, 1998.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durable Concrete Structures CEB Design Guide**: Thomas Telford. Lausane, 1992. 112 p.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **Anteprojeto de Norma MERCOSUR**, 05:08-0502, Abril/2000, ABNT, 3ª Versão (18º Texto) Homigón-Preparación, Control y Recepción.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA EM SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Determinação do Grau de Agressividade de Meio Aquoso ao Concreto**: L1.007. São Paulo, 1988.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO. **Relatório de Sustentabilidade Empresarial**. Serra, ES, 1998. 6 p.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado**: Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. 1988. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DARWIN, D. Dedate: **Crack Width, cover and corrosion**. In: FALL CONVENTION IN NEW YORK, , 1985, New York. **Anais...** New York, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, CONCRETE INTERNATIONAL, mai, 1985. p. 20-35.

DE ANGELIS, E et AL. **El control del proyeto como instrumento para la prevención de las patologías de la construcción** In: Congresso de Patologia das Construções v4: 1997, Porto Alegre. **Anais ...** /Porto Alegre: IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. 1997, v. 1, p. 309 a 316.

EASTERLY, T. W. et al . **Mettalurgigal Coke**. Air Pollution Engineering Manual: Antony Buonicore and Wayne T. Davis. New York, 1992. pg. 606 - 624.

EHE - COMISSIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **Instrucción de Hormigón Estructural**. Madrid, España, 1999.

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Ensaio de Inspeção e Diagnóstico para Projeto de Recuperação das Estruturas de Concreto Armado das Torres de Carvão I e II da Coqueria da CST**. São Paulo, 1994.

____. **Ensaio de Inspeção e Diagnóstico para Projeto de Recuperação e Proteção das Fachadas do Edifício da Administração Central da CST**. São Paulo, 1995.

____. **Relatório sobre Vistoria, Inspeção, Diagnóstico e Parecer Técnico sobre o Estado de Conservação das Estruturas de Concreto Armado das Torres de Resfriamento de Água da Granulação de Escória da CST**. São Paulo, 1997.

____a. **Relatório sobre Vistoria, Inspeção, Diagnóstico e Parecer Técnico sobre o Estado de Conservação das Estruturas de Concreto Armado dos Reservatórios de Água Industrial e Tomadas de Água do Mar da CST**. São Paulo, 1998

____b. **Relatório sobre Vistoria, Inspeção, Diagnóstico, Especificações e Estimativas de Custo, para Serviços de Recuperação das Estruturas de Concreto Armado das Unidades, “Tanque de Alcatrão”, Casa de Bombas de Água do Mar” e “Decantadores de Alcatrão”, da CST**. São Paulo, 1998.

- FATTUHI, N. I. & HUGHES, B. P. **The Performance of Cement Paste and Concrete Subjected to Sulphuric Acid Attack**. USA: Cement and Concrete Research, 1988. v. 18. pg. 545 - 553.
- FIGUEIREDO, E. P. & HELENE, P. R. L. **Assim Caminha a Corrosão**. São Paulo: PINI, Techne, nº 10, mai/jun, 1994. p. 28-33.
- FARIAS, R. F. R et al. **Inspeção em Indústria Petroquímica: Metodologia para Implantação do Plano de Manutenção e Recuperação das Estruturas de Concreto**. In: Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções 4.: 1997, Porto Alegre, RS. **Anais ...** /Porto Alegre: IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, 1997, v. 2. pg 709 a 716.
- FÉRNANDEZ CÁNOVAZ, M. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: PINI, 1988. 522 p.
- GIAMUSSO, S. E. **Cimento Aluminoso, Conversão sob Controle**. São Paulo: PINI Técnica, nº 14, 1995. p. 23 – 25.
- GRUBE, H. and RECHENBERG, W. **Durability of Concrete Structures in Acid Water. Cement and Concrete Research**. USA, 1989. Vol. 19, p. 783-792.
- GUTT, N. H and BUSSEL, A. D. **Blastfurnace Slag as Coarse Agregate for Concrete Stored in Sulphat Solutions for 22 Years**. Magazine of Concrete Research. 1989, 41, nº 146 mar, p. 33-39.
- HAAGENRUD, S. E. & HENRIKSEN, J. F. **Degradation of Built Environment** – Review of Coast Assessment Model as Dose Response Functions. In: In: Durability of Building Materials and Components 7. 1996. Stockholm, Sweden. **Anais...** Proceedings of the Seventh International Conference on Durability of Building Materials and Components, 7DBMC. 1996. v1. p 85. - 96.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo: PINI, 1986.
- _____. **Durabilidade do Concreto Versus Agressividade do Meio**. Tecnologia de Edificações: PINI, IPT, São Paulo, 1988. p. 85 – 92.
- _____. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 231 p. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- _____. **Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES 4: 1997, Porto Alegre, RS. **Anais ...** Porto Alegre: IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. 1997, v. 1. p. 1 - 30.

- _____. **b. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto.** In: Durabilidade das Construções. USINOS, São Leopoldo, RS, 1997.
- _____. **Introdução a Prevenção da Corrosão das Armaduras no Projeto das Estruturas de Concreto - Avanços e Recuos.** In: SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo, IBRACON, març. 1998.
- ILafa – INSTITUTO LATINO-AMERICANO DEL FIERRO Y ACERO, UNION DE EMPRESAS Y ENTIDADES SIDERÚRGICAS. **Contaminacion en Siderurgica:** Unesid, Madrid, España, 1975.
- JOHN, V. M. et al, **Conclusões.** IN: Durabilidade das Construções. USINOS, São Leopoldo, RS, 1977. p 5-9.
- KLAG, M. S. **Blast Furnace.** Air Pollution Engineering Manual: Antony Buonicore and Wayne T. Davis, New York, United States of América, 1992. p. 650. - 659.
- KOVI, M & FTIKOS, CH. **The Ancient Karamirian Water Storage Tank: A Proof of Concrete Technology and Durability for Three Milleniums.:** RILEM, Material and Structures/Materiaux et Constructions. France, Novembro 1998, v1, p. 623-627.
- LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das Construções: Procedimento para Formulação do Diagnóstico de Falhas e Definição de Conduta Adequada à Recuperação de Edificações,** 1985. 191p. Dissertação (mestrado em engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LIMA, E. O. et al. **Identificação de Agentes Agressivos ao Concreto no Processo Siderúrgico. Implicações no Processo Produtivo.** In: Congresso de Patologia de las Construcciones V: 1999, Montevideo. **Anais ... / Montevideo: V Congreso Iberoamericano de Patologia de las Construcciones e V Congreso de Control de Calidad.** 1999, V. 1, pg 1 a 30.
- LUND, H. F. **Industrial Pollution Control Handbook:** McGrall-Hill Book Company, USA, 1971.
- METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Estrutura Propriedades e Materiais:** PINI, São Paulo, 1994. 575 p.
- MORANDI, A. **Na Mão da História: A CST na Siderurgia Mundial:** EDUFES, Vitória, 1997.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto:** PINI, São Paulo, 1997. 522 p.
- OLIVIER, J. P. **Durability of Concrete:** Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim técnico, São Paulo, 1998. 129 p.

- PARROT, L. J. **A Review of Carbonation in:** PARROT, L. J. A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. Cement and Concrete Association and Built Research Establishment, USA, 1986. 42p.
- PLUM, D. R. **Concrete Attack in an Industrial Environment:** Journal of the Concrete Society, [S.I.], v. 18, n° 4, 1984 p. 8 – 11.
- PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G. and FARDIS, M. N. **Physical and Chemical Characteristics Affeting the Durability of Concrete.** ACI Materials Journal (American Concrete Institute), USA, Mar-Apr 1991, V. 88 i2. p. 186-196.
- POLDER, R. B and LARBI, J. A. **Investigation of Ammonium Attack of a Concrete Foundation Pile.** Concrete, London, Nov- Dec., 1994, v28 i6. P. 31-32.
- REINHARDT, H-W and STUTTGART, A. D. **Measuring the Gas Permeability of Cover Concrete Precart Plant and Technology**, Germany, Nov. 1996, VG2 ill. p. 86-93.
- REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES DÉSSAIS ET MATERIAUX. Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depht: recomendation CPC-18. **Material and Structures**, v.21, n. 126, p. 435-5, Nov. 1988.
- RODWAY, L. E. Durability of Concrete. Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol, N° 7, Summer 1985, p 43-48.
- ROSVALL, J. **Air Pollution and Conservation. In: Air Pollution an Conservation** - Safeguarding our Architectural Herutage. Swedsh Institute of Classical Studies, Rome, Italy, 1986. pg 209 - 237.
- SCHWARTZ, T. A. & GUMPERTZ, W. H. **The Well-Designed Horse Carriage, or how to design a building with materials selected for an effective service life.** In: Durability of Building Materials and Componebts 7. 1996. Stockholm, Sweden. **Anais ...** Proceedings of the Seventh Internacional Conference on Durability of Building Materials and Components, 7DBMC. Gavle, Sweden: Divison of Mateials Technology, Department of Built Environment, Royal Institute of Tecnology. v. 2. 1996. p. 1185 – 1194.
- UNEP – UNITED NATIONS UNVIRONMENT PROGRAME INDUSTRY AND ENVIRONMENT & IISI - INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. **Steel industry and the Environment , Technical and Managemnt Issues.** Technical Report n° 38. Belgium, 1997.
- VAN AARDT, J.H.P. **Deterioration of Cement Products in Agressive Média. Chemistry of Cement.** 1960, Washington. **Anais...** Proceedings of the Fourth International Symposium Washington. 1960. VII, p. 835-853.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)