

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

**ESTUDO DA DANIFICAÇÃO EM BARRAS DE AÇO UTILIZADAS NA
CONSTRUÇÃO CIVIL SUBMETIDAS À CORROSÃO ATRAVÉS DA
MECÂNICA DO DANO**

Engº. Josenaldo Bastos de Souza

Fortaleza – CE
Setembro de 2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

**ESTUDO DA DANIFICAÇÃO EM BARRAS DE AÇO UTILIZADAS NA
CONSTRUÇÃO CIVIL SUBMETIDAS À CORROSÃO ATRAVÉS DA MECÂNICA
DO DANO**

Eng^o. Josenaldo Bastos de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

ORIENTADOR: Professor DSc. Enio Pontes de Deus

Fortaleza – CE

Setembro de 2005

A Deus

Aos meus Pais, José (In memoriam) e Maria

À minha Irmã, Dionízia

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Professor e Orientador, Dr. Enio Pontes de Deus, pela amizade, incentivo, sugestões e orientação indispensáveis para desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores, Dr. Lindberg Lima Gonçalves e Dr. Francisco Alcides Germano, pela dedicação e seriedade no trabalho frente à coordenação do Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais .

Ao Professores do Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Matérias pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste curso.

Ao Prof. PhD. Ahmed Benallal, do Laboratoire de Mécanique et Technologie – LMT de Cachan / França, pelo incentivo e sugestões ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Metalurgia Física-LAMEF da UFRGS, em particular ao Prof. Afonso Reguly, pelo apoio e dedicação na realização dos ensaios mecânicos.

À Divisão de Química da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial – NUTEC por ceder equipamentos para a realização dos ensaios de corrosão acelerada, em particular a Coordenadora MSc. Ana Loísa Maia, pelo apoio na realização destes ensaios.

À Equipe do Projeto P&D UFC (LAMEFF) / COELCE: Detecção de falhas em hastes verticais através da Mecânica do Dano, da qual fiz parte, que contribuiu bastante, principalmente com relação aos os fundamentos teóricos da Mecânica do Dano.

Ao Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga – LAMEFF pelo apoio á realização desta pesquisa.

Ao MSc. Audelis Marcelo de Oliveira Jr, pelo apoio e sugestões a essa pesquisa.

Aos amigos: Eng°. Mestrando Rômulo Braga, Eng°. Mestrando Rodrigo Nogueira de Codes, Eng°. Mestrando Alexsander Prado de Araújo, Eng°. Mestrando Carlos Eduardo de Almeida, Eng°. Mestrando Marcio Costa Salvador, MSc. Gerson Melo de Almeida e demais integrantes do LAMEFF, pela amizade e auxílio nesta pesquisa.

Aos colegas de Turma: John, Jean, Rodrigo Freitas, Núbia, Carlos Eduardo, Gerardo, Paulo, Allyson, Rômulo e demais colegas de Mestrado pelo incentivo, companheirismo e amizade.

Ao Laboratório de Materiais para Construção Civil, em particular ao funcionário Amauri, pelo auxílio a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

À minha família, pelo apoio e incentivo, não só a esta pesquisa, mas a toda minha vida acadêmica.

À Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa - FUNCAP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1- INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações Gerais	01
1.2 Objetivos	04
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
2.1 Aços	07
2.1.1 Classificação dos aços.....	09
2.1.2 Barras de Aços Utilizadas em Estruturas de Concreto Armado.....	09
2.1.2.1 Características Mecânicas	10
2.2 Corrosão	13
2.2.1 Oxidação e Redução.....	16
2.2.1.1 <i>Reações de Oxi-redução ou Redox</i>	17
2.2.2 Potencial de Eletrodo	18
2.2.2.1 Potencial de eletrodo padrão	19
2.2.3 Pilha Eletroquímica ou Célula de Corrosão.....	21
2.2.4 Cinética da Corrosão	26
2.2.5 Corrosão em Armaduras de Concreto.....	29
2.3 Mecânica do Dano	34
2.3.1 Introdução	34

2.3.2	Aspectos Fenomenológicos do Dano	36
2.3.2.1	<i>Introdução</i>	36
2.3.2.2	<i>Natureza Física do Estado Sólido e do Dano</i>	38
2.3.2.3	<i>Deslizamento, Plasticidade e Deformação Irreversível</i>	39
2.3.2.4	<i>Escala Fenomenológica de Deformação e Dano</i>	40
2.3.2.5	<i>Diferentes Manifestações de Dano</i>	41
	a) Dano Frágil	41
	b) Dano Dúctil	42
	c) Dano por fluência	42
	d) Dano por Fadiga de Baixo ciclo	43
	e) Dano por Fadiga de alto ciclo	44
2.3.3	A Mecânica do Dano e a Mecânica da Fratura	45
3-	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	48
3.1	O Mecanismo da Corrosão em Armadura de Concreto	48
3.1.1	Modelo de Vida Útil de Tuutti.....	53
3.2	Fundamentos da Mecânica do Dano.....	58
3.2.1	Definição da Variável Dano	58
3.2.2	Definição de Tenção Efetiva	60
3.2.3	Definição de Deformação Efetiva	61
3.2.4	Princípios Gerais de Equivalências de Respostas Constitutivas	63
3.2.4.1	<i>Relação constitutiva envolvendo equivalência de energia</i>	64
3.2.4.2	<i>Relação constitutiva envolvendo equivalência de deformação</i>	65
3.2.5	Definição Geométrica de Tensor de Segunda Ordem	68
3.2.6	Forma Generalizada das Relações Constitutivas para Casos Multiaxiais	71

3.2.7	Tensores Isótopos e Anisotrópicos de Rigidez Secante com Dano Escalar	74
3.2.8	Variação do Módulo de Elasticidade	78
3.2.9	Critério de Ruptura	82
4-	ANÁLISE EXPERIMENTAL	85
4.1	Introdução	85
4.2	Análise Metalográfica do Aço CA-50A	87
4.3	Preparação das amostras	88
4.3.1	Confecção dos Corpos-de-prova de aço/concreto	90
4.4	Ensaio de Corrosão	94
4.4.1	Ensaio de Salt Spray	94
4.4.2	Ensaio de Corrosão Acelerado “Pilha eletroquímica”	98
4.5	Ensaio de tração	100
4.5.1	Ensaio de tração convencional	101
4.5.2	Ensaio de Tração com Carregamento e descarregamento ...	103
5-	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
5.1	Resultados dos Ensaios de Tração com carregamento - descarregamento	104
5.1.1	Resultados das Amostras Tipo 1 que Foram Submetidas ao Ensaio de Salt Spray	105
5.1.2	Resultados dos Ensaios de Tração das Amostras Tipo 2, que Foram Submetidas ao Ensaio “Pilha Eletrolítica”	110
5.2	Modelo Matemático de Dano	129
5.3	Determinação da Evolução do Dano	116
6-	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	127
6.1	Conclusões	127
6.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1 – Alvenaria de pedra armada, Pantheon em Paris	2
Figura 1.2 – Remanescente de um dos barcos de Lambot	3

CAPITULO 2

Figura 2.1 - Vergalhões CA-50A	10
Figura 2.2 - Diagrama tensão-deformação dos aços de dureza natural.....	11
Figura 2.3 - Diagrama tensão-deformação dos aços conformados a frio	11
Figura 2.4 – Esfera de GLP com capacidade de 2000 m ³	14
Figura 2.5 – Oleoduto rompido por corrosão.....	14
Figura 2.6 – Corrosão em armaduras de edifício em estado avançado	15
Figura 2.7 - Ciclo dos metais	16
Figura 2.8 - Plano de Helmholtz	19
Figura 2.9 - Eletrodo normal de hidrogênio	20
Figura 2.10 - Célula eletroquímica.....	22
Figura 2.11 - Reação área anódica	23
Figura 2.12 - Pilha de ação local	24
Figura 2.13 - Pilha de concentração iônica diferencial.....	25
Figura 2.14 - Pilha de concentração diferencial de oxigênio.....	26
Figura 2.15 - Três fases distintas que compõem o concreto	30
Figura 2. 16 - Corrosão em pilar de viaduto em estado avançado	31
Figura 2.17 - Corrosão das armaduras em lajes de concreto armado.....	31
Figura 2.18 - Corrosão em estado avançado em armaduras de colunas de edifício	32

Figura 2.19 - Mecanismo de fissuração do concreto armado	33
Figura 2.20 - Corrosão em armadura de concreto, lascamento do concreto devido á expansão do produto da corrosão nas armaduras.....	33
Figura 2.21 - Deformação plástica através do movimento de discordância por deslizamento	38
Figura 2.22 - Dano por nucleação de micro-trinca e acumulação de discordância.....	38
Figura 2.23 - Curva tensão-deformação em fratura frágil	41
Figura 2.24 - Curva tensão-deformação do aço AISI 1010.....	42
Figura 2.25 - curva de fluência do aço inoxidável A 542 a 550°C, submetido a carregamento de tração constante	43
Figura 2.26 - Curva de fadiga de baixo ciclo do aço inoxidável A 316L, submetido a carregamento cíclico de tensão e compressão	44
Figura 2.27 - Curva de fadiga de alto ciclo do aço inoxidável A 316, submetido a carregamento cíclico de tensão e compressão	45
Figura 2.28 - Ilustração esquemática da iniciação de uma trinca macroscópica.....	47

CAPITULO 3

Figura 3.1 - Célula de corrosão em concreto armado	51
Figura 3.2 - Modelo de vida útil de Tuutti	53
Figura 3.3 - Mecanismos de transporte de íons cloretos no concreto	56
Figura 3.4 - Representação esquemática do processo de difusão do CO ₂ no concreto	58
Figura 3.5 - Elemento de volume representativo.....	59
Figura 3.6 - Elemento com danificação unidimensional.....	60
Figura 3.7 - Acréscimo de comprimento devido à abertura de defeitos.....	62
Figura 3.8 - Variação da rigidez secante do meio contínuo equivalente	65
Figura 3.9 - Hipótese de deformação equivalente	66

Figura 3.10 - Dano isotrópico unidimensional e dano anisotrópico em três dimensões	68
Figura 3.11 - Principais valores do tensor dano.....	69
Figura 3.12 - Gráfico Dano x Deformação: material compósito polimérico reforçado por fibras de vidro	78
Figura 3.13 - Medida de dano dúctil em cobre 99.9% a temperatura ambiente	80
Figura 3.14 - Evolução de dano frágil em compósito carbono-carbono.....	81
Figura 3.15 - Evolução de dano frágil em concreto submetido à compressão	82

CAPITULO 4

Figura 4.1 - Corpos-de-prova de aço CA-50A.....	86
Figura 4.2 - Modelo de corpo-de-prova aço/concreto para ensaio acelerado de corrosão	86
Figura 4.3 – Microestrutura do aço CA-50A, centro da amostra	87
Figuras 4.4 – Microestrutura do aço CA-50A, próximo à extremidade da amostra	88
Figura 4.5 – Amostras de aço CA-50A.....	89
Figura 4.6(a) - Forma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova de aço/concreto	90
Figura 4.6(b) - Vista de topo da forma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova de aço/concreto.....	90
Figura 4.7 – Mistura dos agregados.....	91
Figura 4.8 - Corpo de prova aço/concreto	92
Figura 4.9(a) - Corpos-de-prova de concreto, utilizados para a determinar a resistência à compressão do concreto utilizado na confecção das amostras aço/concreto.....	93
Figura 4.9(b) - Ensaio de compressão realizado para determinar a resistência à compressão (f_{ck}) do concreto	93
Figura 4.10(a) - Câmara de ensaio de corrosão acelerado Salt Spray.....	95

Figura 4.10(b) - Amostras de aço e aço/concreto no interior da câmara de corrosão, após 5 dias de exposição.....	95
Figura 4.11 - Amostras 11 e 12, após 1848 horas de exposição na câmara de corrosão.....	97
Figura 4.12(a) - Amostras 23 e 34, após 3216 horas de exposição na câmara de corrosão.....	97
Figura 4.12(a) - Amostras 23 e 34, após 3216 após a do produto de corrosão.....	98
Figura 4.13 – Esquema do ensaio de corrosão acelerado, “Pilha eletroquímica”	99
Figura 4.14(a) - Amostras aço/concreto após 9 horas de ensaio	100
Figura 4.14(b) – Barras de aço depois de retirada do concreto, após 9 horas de ensaio	100
Figura 4.15 - Ensaio de tração em corpo-de-prova de aço CA-50A.....	101
Figura 4.16 - Ensaio de tração em corpo-de-prova de aço CA-50A: Visualização do CLIP GAGE utilizado.....	102
Figura 4.17 - Gráfico Tensão x Deformação: aço CA-50A (sem corrosão).....	102

CAPITULO 5

Figura 5.1 - Força x deformação: corpo-de-prova não submetido à corrosão	105
Figura 5.2 - Tensão x deformação: corpo-de-prova não submetido à corrosão	105
Figura 5.3 - Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2016h.....	106
Figura 5.4 - Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2016h.....	107
Figura 5.5 - Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2376h.....	107
Figura 5.6 - Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2376h.....	108
Figura 5.7 - Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2904h.....	108

Figura 5.8 - Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2904h.....	109
Figura 5.9 - Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 7:30h.....	110
Figura 5.10 - Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 7:30 h.....	110
Figura 5.11 - Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 9:30h.....	111
Figura 5.12 - Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 9:30 h.....	111
Figura 5.13 - Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 10:30 h.....	112
Figura 5.14 - Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 10:30 h.....	112
Figura 5.15 - Representação esquemática, simplificada, da danificação devido à corrosão e a um carregamento mecânico	114
Figura 5.16 - Gráfico tensão x deformação no primeiro descarregamento, aço CA-50A não submetido à corrosão	117
Figura 5.17 - Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A (não exposto à corrosão), danificação devido a um carregamento mecânico.....	119
Figura 5.18 - Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2016 horas de exposição na câmara de corrosão	120
Figura 5.19 - Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2376 horas de exposição na câmara de corrosão	121
Figura 5.20 - Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2904 horas de exposição na câmara de corrosão	122
Figura 5.21 - Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A	122
Figura 5.22 - Gráfico Tensão x Deformação das amostras submetidas ao ensaio de salt spray, mostrando a redução na tensão e na deformação em decorrência da corrosão.....	123
Figura 5.23 - Gráfico Tensão x Deformação das amostras submetidas ao ensaio de corrosão “pilha eletrolítica, mostrando a redução na tensão e na deformação em decorrência da corrosão.....	125

Figura 5.24 - Gráfico Tensão x Deformação: comportamento da tensão das amostras CP13 que foi exposta ao ensaio de salt spray por 2016 h e o CP28 submetido ao ensaio “pilha eletrolítica’ por 7:30..... 126

Figura 5.25 - Gráfico Tensão x Deformação: comportamento da tensão das amostras CP16 que foi exposta ao ensaio de salt spray por 2376 h e o CP33 submetido ao ensaio “pilha eletrolítica’ por 9:30..... 126

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 3

Tabela 3.1 – Parâmetros de alguns materiais (ordem de grandeza)	84
--	----

CAPITULO 4

Tabela 4.1 – Distribuição das amostras por tipo de ensaio.....	89
---	----

Tabela 4.2 - Tempo de exposição à névoa salina das amostras na câmara de corrosão.....	96
---	----

Tabela 4.3 – Tempo de duração do ensaio de corrosão “Pilha Eletrolítica”	100
---	-----

Tabela 4.4 - Procedimento de aplicação de sucessivos carregamento e descarregamento.....	103
---	-----

CAPITULO 5

Tabela 5.1 - Resultados do ensaio de tração (carregamento-descarregamento) do CP04	106
---	-----

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de tração (carregamento-descarregamento) do CP13	107
---	-----

Tabela 5.3 - Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) do CP16	108
---	-----

Tabela 5.4 - Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) do CP21	109
---	-----

Tabela 5.5 - Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) das amostras que foram submetidas ao ensaio de corrosão “pilha eletrolítica”	113
--	-----

Tabela 5.6 - Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento (Amostras sem corrosão).....	118
--	-----

Tabela 5.7 - Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento (Amostra com 2016 horas).....	119
---	-----

Tabela 5.8 - Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento (Amostra com 2376 horas)	120
--	-----

Tabela 5.9 - Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento (Amostra com 2904 horas)..... 121

Tabela 5.10 – Comportamento da tensão em função do tempo de exposição à corrosão das amostras que foram expostas ao ensaio de salt spray..... 124

LISTA DE SÍMBOLOS

GREGOS

ε	Deformação obtida no ensaio de tração,
ε_e	Deformação no início do escoamento,
\mathcal{E}_r	Percentual de deformação na fratura,
ε_{ij}	Deformações normais na direção i ,
$\tilde{\varepsilon}$	Deformação linear efetiva,
ρ	Densidade,
$\tilde{\rho}$	Densidade modificada,
σ	Tensão,
$\tilde{\sigma}$	Tensão efetiva,
σ_R	Tensão de ruptura,
σ_u	Tensão última,
σ_{ij}	Tensões normais na direção i ,
ν	Coefficiente de Poisson,
$\lambda(d)$	Uma função de valor escalar envolvendo a variável de dano,
I	Tensor identidade de primeira ordem,
II	Tensor identidade de quarta ordem

LATINOS

$a_{Est. Red.}$	Atividade do estado reduzido do eletrodo,
$a_{Est. Oxid.}$	Atividade do estado oxidado do eletrodo,
D	Dano,
D_C	Dano crítico,
D_{Corr}	Dano devido à corrosão,
D_n^*	Dano associada a uma certa direção n .
d	Espessura ou profundidade carbonatada (mm);

E	Potencial de eletrodo observado,
E^0	Potencial-padrão,
E	Módulo de Elasticidade Longitudinal,
E_i	Módulo de elasticidade na direção i ,
\tilde{E}	Módulo de Elasticidade Longitudinal danificado,
\mathbf{E}	Tensor de rigidez secante elástica,
F	Constante de Faraday,
F_m	Carga Máxima,
i	Corrente elétrica em Ampères (A),
K	Matriz de rigidez global,
k	coeficiente de carbonatação,
N_r	Número de ciclos de ruptura,
n	Valência dos íons do metal,
R	Constante dos gases perfeitos,
r	Taxa de corrosão em mm de penetração média por ano,
r	Resistividade,
\tilde{S}	Área efetiva resistente,
S	Área considerada,
S_D	Área dos defeitos,
T	Matriz de transformação,
V_d	Volume danificado,

RESUMO

Estruturas de concreto armado, como qualquer outra estrutura que utiliza componentes metálicos, está sujeita à corrosão, sendo essa um dos principais fenômenos responsáveis pela deterioração destas estruturas. Assim, um estudo deste fenômeno é de grande importância para melhor descrever o comportamento mecânico dessas estruturas.

Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo principal analisar a degradação das propriedades mecânicas de barras de aço utilizadas na construção civil, considerando o efeito da corrosão nessas propriedades, e desenvolver um modelo simplificado para evolução do dano, através da teoria da mecânica do dano em meios contínuos. Um estudo foi desenvolvido sobre a corrosão e a degradação das propriedades mecânicas de barras de aço CA-50A. Foram confeccionadas amostras que, inicialmente, foram submetidas ao ensaio de corrosão acelerado. Algumas dessas amostras foram expostas ao ensaio de corrosão acelerado (Salt Spray) durante intervalos de tempo crescentes, as demais amostras foram embutidas em cilindros de concreto e submetidas ao ensaio de corrosão acelerado "Pilha eletrolítica". Após os ensaios de corrosão, foram realizados ensaios mecânicos de tração com carregamento e descarregamento, onde, obteve-se o módulo de elasticidade em cada descarregamento. Então, o conceito de medida de dano, através da variação do módulo de elasticidade descrito por LEMAITRE, foi aplicado para determinar o dano em função da deformação para cada amostra. Com a análise da evolução do dano das amostras submetidas a diferentes intervalos de tempo de exposição à corrosão, o modelo de dano apresentado por LEMAITRE foi reescrito em função do dano devido a um carregamento mecânico e a corrosão.

Palavras-Chave: Mecânica do Dano, corrosão, concreto armado e integridade estrutural

ABSTRACT

Structures of reinforced concrete, as any another structure that uses metallic components, are subjected to corrosion, being this, one of the main factors for the degradation of these structures. Thus, a study of this phenomenon is very important to describe the mechanical behavior of them.

In this way, this research has as main objective to analyze the degradation of the mechanical properties of steel bars used in the civil construction, considering the effect of corrosion in these properties, and to develop a simplified model for the evolution of the damage, through the theory of the Continuum Damage Mechanics. A study was developed in steel bars CA-50A.

Steel bars specimens were confectioned and some of them were submitted to an accelerated corrosion test (Salt Spray) for different intervals of time. The others specimens were involved in cylinders of concrete and submitted to a different accelerated corrosion test, "the electrolytic cell". After the corrosion test, the specimens were submitted to the mechanical test of traction with loading and unloading, getting the Elasticity Modulus for each unloading.

Then, the concept of measure of damage through the variation of the Elasticity Modulus, introduced by LEMAITRE, was applied. The damage in function of the deformation for each specimen was obtained. Finally, with the analysis of the damage in the different specimen, the variable Damage in function of the mechanical loading and the corrosion was written.

Keywords: Damage Mechanics, Corrosion, reinforced concrete and structural integrity.

Capítulo 1

Introdução

1.1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Desde o início de sua existência, o homem tem se preocupado em “viver” cada vez melhor. Nesse sentido, ele tem buscado a cada dia melhores condições de moradia, trabalho e lazer. Inicialmente os homens refugiavam-se em lugares que a natureza lhe oferecia: aberturas nas rochas, cavernas, grutas, etc. Mais tarde começaram a construir abrigos com pele de animais, fibras de vegetais das árvores e posteriormente surgiram as primeiras construções em pedras e tijolos. Através de observações da natureza, desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais, de técnicas e formas estruturais, temos como um exemplo do resultado desse processo de desenvolvimento, o concreto armado, que é utilizado pela engenharia em diversas aplicações estruturais.

A idéia de associar barras metálicas à pedra ou argamassa para aumentar as solicitações em serviço foi observada pela primeira vez durante a recuperação das ruínas das termas de Caracalla em Roma. Em 1770, Jacques Germain associou o ferro à pedra natural na construção da estrutura da Igreja de Santa Genoveva, hoje *Pantheon*, em Paris. Onde foram construídas vigas horizontais com barras longitudinais retas na zona de tração e barras transversais de cisalhamento, Figura 1.1.

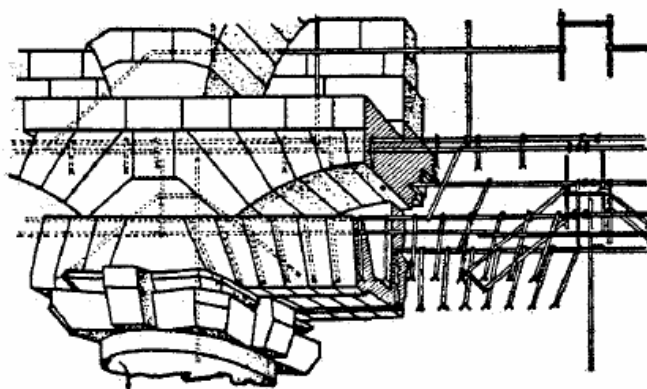


Figura 1.1 – Alvenaria de Pedra armada, Pantheon em Paris (KAEFER, 1998).

Mas, só após 30 anos do desenvolvimento do cimento Portland, por Joseph Aspdin na Inglaterra em 1824, com as primeiras experiências de Joseph Louis Lambot, o concreto armado passou a ser aplicado em construções com diferentes finalidades. Uma das primeiras aplicações do concreto armado foi à construção de um barco por Lambot (Figura 1.2), motivado pelos problemas de manutenção das canoas de madeira utilizadas para lazer em um lago em sua propriedade.

Hoje, o material formado por cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), água e aditivos associados a barras de aço forma o denominado concreto armado, que apresenta boa resistência à compressão e a tração. Com essas características mecânicas, o concreto armado é um dos materiais mais utilizados em construções civis no Brasil e largamente utilizado em todo o mundo.

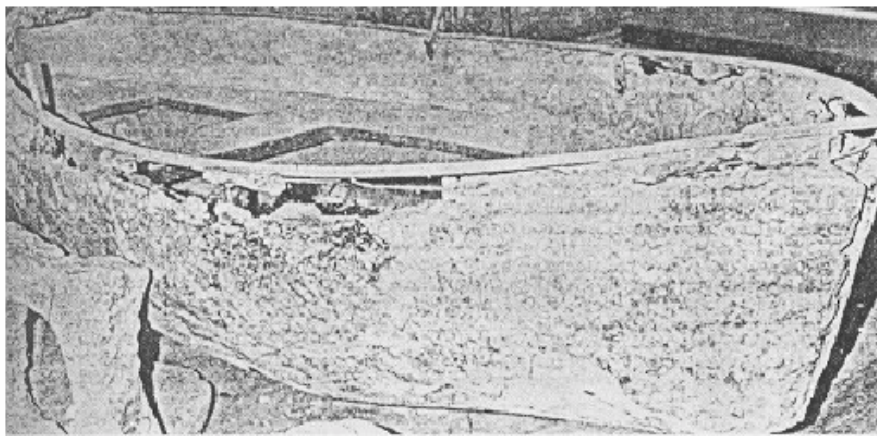


Figura 1.2 – Remanescente de um dos barcos de Lambot (KAEFER, 1998).

Contudo, estruturas de concreto armado, como toda estrutura que utiliza componentes metálicos, podem sofrer um processo de corrosão resultado de reações naturais degenerativas que ocorrem no material interagindo com o meio ambiente em conjunto, ou não, com ações mecânicas e de outras naturezas. Uma preocupação da tecnologia do concreto, atualmente, é com a durabilidade e recuperação dessas estruturas. Sendo que a corrosão é um dos principais responsáveis pela redução desta durabilidade.

Uma das motivações para a realização deste trabalho foi o alto índice de falhas e baixa vida útil, apresentada pelos postes de concreto da rede de distribuição de energia elétrica do estado do Ceará, em especial aqueles situados na zona litorânea, na qual a atmosfera é mais agressiva. Logo, faz-se necessário uma maior compreensão do comportamento mecânico dessas estruturas, através do conhecimento do seu estado de danificação. Portanto, neste trabalho é realizado o estudo da danificação das barras utilizadas em armaduras de concreto armado por meio da aplicação do conceito da Mecânica do Dano.

A Mecânica do Dano é um campo da Mecânica dos Sólidos que possibilitando descrever situações em que a Mecânica da Fratura tradicional apresenta-se de forma muito complexa ou insolúvel. Enquanto que a mecânica da fratura lida com as condições de propagação de uma fissura macroscópica imersa num meio contínuo íntegro, a mecânica do dano se ocupa do efeito sobre a resposta do material, de um processo de microfissuração distribuída que se desenvolve numa etapa preliminar à formação da fissura discreta (LEMAITRE, 1992).

O conceito de Mecânica do Dano foi introduzido por KACHANOV, em 1958, com o intuito de justificar a ruptura precocemente em metais, observada em regime de deformação lenta. Desde então, vários outros estudos têm sido realizados e hoje, a mecânica do dano tem sido aplicada com sucesso em diversos campos para avaliar a integridade de componentes estruturais. No caso de estruturas de concreto, a aplicação dessa teoria teve início na década de 80 por Jack Mazars. Vários modelos constitutivos fundamentados com base nessa teoria foram desenvolvidos, dentre esses, os denominados “modelos simplificados” têm sido aplicados com bons resultados em determinados casos particulares.

1.2. Objetivos

Tendo em vista que a corrosão é um dos principais fenômenos responsáveis pela deterioração do concreto armado, principalmente na zona litorânea e em especial na cearense, que tem uma das atmosferas mais agressivas do mundo, o estudo do efeito desse fenômeno na danificação de estruturas de concreto armado é extremamente importante para melhor descrever o seu comportamento mecânico.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar a degradação das propriedades mecânicas de barras de aço utilizadas na construção civil, considerando o efeito da corrosão nessas propriedades. Bem como,

desenvolver um modelo simplificado para evolução do dano, através da teoria da mecânica do dano em meios contínuos.

Os demais capítulos deste trabalho são descritos a seguir:

CAPÍTULO 2

Esta pesquisa teve início com uma revisão bibliográfica, que é apresentada neste capítulo, onde são descritos inicialmente os aços utilizados em estruturas de concreto armado: definição, classificação e propriedades mecânicas etc. Também é feita uma abordagem sobre corrosão em geral. Nesta revisão é apresentado um histórico da evolução da aplicação da teoria da Mecânica do Dano desde o início de sua aplicação, em 1958 por KACHANOV, até os dias atuais. Ainda, neste capítulo, são apresentados os aspectos fenomenológicos do Dano e suas diferentes manifestações.

CAPÍTULO 3

Neste capítulo, são abordados os fundamentos teóricos sobre a corrosão em armaduras de concreto armado e a Mecânica do Dano. Inicialmente são abordados os mecanismos de corrosão das armaduras, onde são discutidas as condições básicas para a ocorrência da corrosão, os mecanismos de ação dos íons agressivos e as duas fases do processo de corrosão: iniciação e propagação. Nos fundamentos da Mecânica do Dano, inicialmente, a danificação é considerada isotrópica, ou seja, a variável de dano é definida, para o caso uniaxial, como sendo escalar. Posteriormente, com a introdução da definição de tensor de segunda ordem, a variável de dano foi reescrita na forma tensorial para os casos de danificação multiaxial anisotrópica e finalmente foi discutido o modelo de medida de dano através da variação do módulo de elasticidade, que é o modelo base utilizado neste trabalho.

CAPÍTULO 4

O desenvolvimento experimental é apresentado neste capítulo. Ele tem como objetivo analisar a danificação em amostras de barras de aço CA-50A, submetendo-as à corrosão e posteriormente a ensaios mecânicos de tração com sucessivos carregamentos e descarregamentos. Com o histórico da tensão-deformação do ensaio de tração são obtidos módulo elasticidade em cada descarregamento, que serão substituídos no modelo matemático para a determinação do dano.

Inicialmente, são descritos os materiais e métodos para preparação das amostras, em seguida os ensaios de corrosão acelerado e mecânico de tração.

CAPÍTULO 5

São apresentados os resultados obtidos nos ensaios de corrosão e mecânicos de tração. Os dados obtidos nesses ensaios foram substituídos em um Modelo Matemático de Dano, onde se determinou a evolução devido à corrosão e aplicação de um carregamento.

CAPÍTULO 6

Neste capítulo, são descritas as conclusões obtidas na realização deste trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. AÇOS

O aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes de seu processo de fabricação (CHIAVERINI, 1996).

Os aços são obtidos através da mistura de minério de ferro, coque e fundentes, como o calcário, que são sinterizados em altos fornos a temperaturas próximas de 1500 graus °C. Adiciona-se, posteriormente, silício, manganês e fósforo e principalmente carbono, obtendo-se ferro gusa que sofre uma oxidação em fornos especiais, transformando a mistura em aço líquido, que é moldado em lingotes.

O limite de 0,008% de carbono está relacionado à sua máxima solubilidade no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11%

corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e ocorre à temperatura de 1148°C.

As propriedades mecânicas dos aços como resistência, dureza, ductilidade e alongamento, dependem muito de sua composição química e de sua microestrutura e podem ser modificadas por tratamentos térmicos ou termoquímicos. Com relação à composição química, quando o aço é resfriado, normalmente, à medida que se aumenta o teor de carbono, melhoram as propriedades relativas à resistência mecânica (limite de escoamento), o limite de resistência mecânica à tração (ruptura) e a dureza. Em contrapartida, pioram as propriedades relativas à ductilidade e a tenacidade.

A microestrutura está intimamente ligada à composição química e depende do processo de fabricação do aço (se foi fundido, trabalhado a quente ou trabalhado a frio), do tamanho do grão e da velocidade do resfriamento, etc.

O aço quando trabalhado em temperatura abaixo da zona crítica, os grãos permanecem deformados e diz-se que o aço está encruado. Ele pode ser encruado mecanicamente, por tração, por compressão ou por torção, com a finalidade de se aumentar a resistência de escoamento e a de ruptura. Se o aço carbono encruado for levado a uma temperatura na faixa de 600 °C a 680 °C, ele perde o encruamento, readquirindo as propriedades iniciais. Por outro lado, se o aço for submetido a um aquecimento prolongado, ou superaquecido a temperatura próxima a 1150 °C, terá uma granulação mais grosseira.

No caso de aços para concreto armado, o conhecimento da composição química e do processo de fabricação do aço é muito importante, pois com a utilização de barra ou fios de aço em obras de construção civil, em caso de incêndio na edificação (temperaturas maiores que 600 °C) o conhecimento do tratamento mecânico sofrido pelo aço pode fornecer dados com relação à segurança da estrutura.

2.1.1. Classificação dos Aços

Não existe uma classificação dos aços considerada precisa e completa, principalmente com relação aos aços-liga, pois a cada dia é pesquisado a inclusão de novos elementos e, conseqüentemente, obtidos novos aços. No entanto, CHIAVERINI (1996) apresenta a seguinte classificação:

- **Aço-carbono** ou “liga ferro-carbono” contendo geralmente 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação.

Estes podem ser subdivididos em:

- Aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,2%;
 - Aços de médio teor de carbono, com C entre 0,2 e 0,5%;
 - Aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,5%.
- **Aço-liga** ou “aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresentam elementos residuais acima dos que são considerados normais”.
- O aço-liga, pode ser dividido em dois grupos:
- Aços de baixo teor de ligas, com elementos de liga abaixo de 8%;
 - Aços de alto teor de ligas, com elemento de liga acima de 8%.

2.1.2. Barras de Aços Utilizadas em Estrutura de Concreto Armado

Aços para concreto armado são ligas de ferro-carbono que para melhorar suas propriedades contém elementos como manganês, silício, cromo e além de impurezas não metálicas como combinações de fósforo e enxofre. Conforme a composição, resultam propriedades diferentes, sendo que o teor de carbono desempenha papel preponderante.

Vergalhão para concreto armado comercialmente tem comprimento nominal entre 10 m a 12 m (Figura 2.1), podendo ser de secção circular lisas ou com saliências.

Barras lisas são fabricadas apenas para aços de baixa resistência, enquanto que barras de aço de alta resistência exigem saliências.

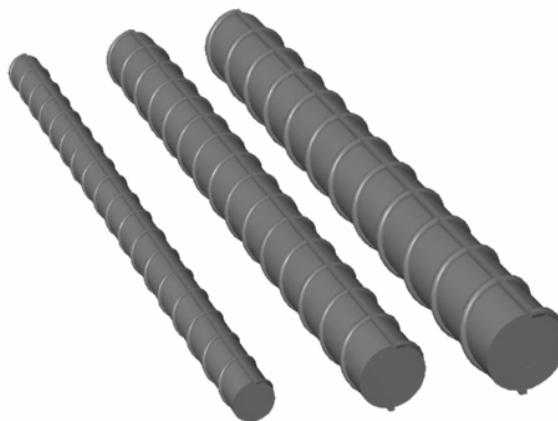


Figura 2.1- Vergalhões CA-50A.

2.1.2.1. Características Mecânicas

Quanto ao processo de fabricação, os aços podem ser classificados como: aços de dureza natural ou laminados a quente, aços conformados a frio e aços “patenting” (ou patenteados).

Os aços de dureza natural são obtidos por laminação a quente e geralmente apresenta um limite de escoamento bem definido, suas propriedades dependem essencialmente da sua composição química. Já os aços conformados a frio, são aqueles obtidos por deformação a uma temperatura inferior à temperatura de recristalização, após a laminação.

Os aços patenting são fios de alto teor em carbono patenteados e trefilados com utilização preponderante em estruturas de concreto protendido.

Diagrama Tensão Deformação

Quando solicitados à tração axial, aço laminado a quente e o aço conformado a frio apresentam diagrama tensão deformação como o mostrados nas Figura 2.2 e Figura 2.3, respectivamente.

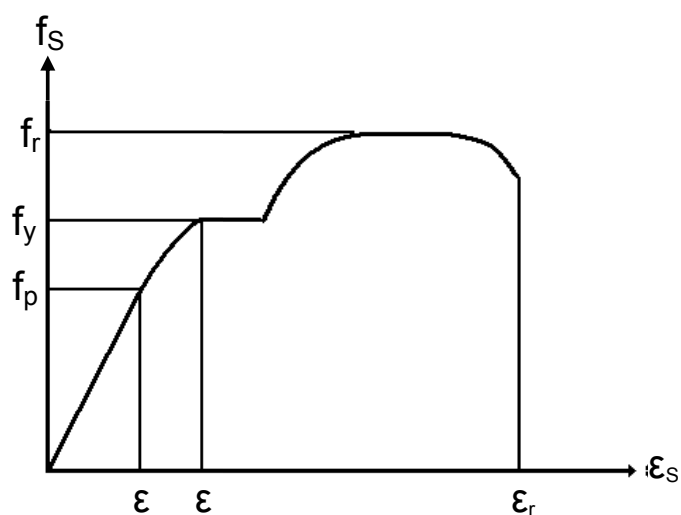


Figura 2.2- Diagrama tensão-deformação dos aços de dureza natural (ALMEIDA, 2002).

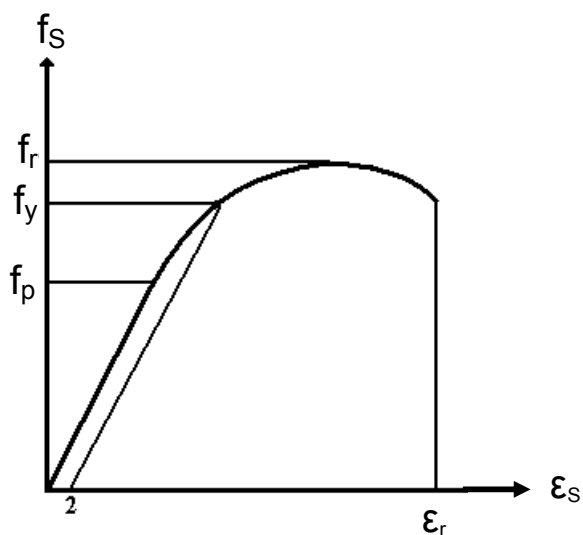


Figura 2.3- Diagrama tensão-deformação dos aços conformados a frio (ALMEIDA, 2002).

Onde,

f_p = é o limite de proporcionalidade, a maior tensão para qual se verifica proporcionalidade entre a tensão e a deformação.

f_y = é o limite de escoamento, é a tensão correspondente ao início do período de escoamento.

f_r = é o limite de resistência, é a tensão máxima que o material pode suportar.

ε_r = é a deformação na qual ocorre a ruptura do material.

- **Aços para concreto armado segundo a NBR 7480 (EB-3)**

Barras e fio de aços são classificados segundo a Norma EB-3 como:

- Aços classe A - os aços laminados a quente;
- Aços classe B - os aços conformados a frio.

Ambas as classes são classificadas em categoria de acordo com suas características mecânicas: CA-25, CA-50 e CA-60.

O aço CA-25 é fabricado somente por laminação a quente, já os aços CA-50 e CA-60 são fabricados tanto por laminação, como também conformados a frio.

A nomenclatura dos aços segundo a Norma EB-3, é a seguinte:

- CA-25
- CA-50A e CA-50B
- CA-60B

Onde,

CA - indica ser o aço para concreto armado;

A ou B - é a classe que o aço pertence;

25, 50 ou 60 - é o valor da resistência característica da tensão de escoamento real ou convencional em kgf/mm².

2.2. CORROSÃO

Corrosão é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliado ou não a esforços mecânicos (GENTIL,1996).

Um conceito mais abrangente de corrosão é o apresentado por DUTRA (1991), ele define corrosão como “*a deterioração dos materiais pela ação do meio*”

A corrosão sendo um processo destrutivo, causa danos à praticamente todos os setores da atividade humana. Assim, ela é importante tanto do ponto de vista econômico quanto social. Pesquisas realizadas em diversos Países mostram que as perdas econômicas causadas pela corrosão são estimadas entre 3 a 4% do Produto Nacional Bruto (PNB).

Com relação ao aspecto social, a corrosão é muito importante principalmente no que se refere a fatores de segurança. Muitos acidentes têm ocorrido por falhas de corrosão de equipamentos industriais (caldeiras, vasos de pressão, etc), de meios de transportes (automóveis, avião, etc) ou de estruturas (pontes, edifícios, etc).

A Figura 2.4, mostra um acidente que ocorreu em uma esfera de GLP que ocasionou a morte de um trabalhador e outro ficou gravemente ferido, eles estavam sob a esfera no momento do acidente. Este acidente ocorreu devido a uma severa corrosão nas pernas, pela infiltração de água internamente à proteção contra fogo nas pernas.

A Figura 2.5 mostra o rompimento de um oleoduto devido à corrosão. O impacto negativo ao ambiente natural causado por este tipo vazamento compreende, de maneira geral, não apenas a contaminação de solos, subsolos, águas e danos aos a fauna e flora presentes nas proximidades do duto, abrangem também, toda a micro e macro fauna associada, durante os trabalhos de reparo na faixa desses dutos.



Figura 2.4 – Esfera de GLP com capacidade de 2000 m³: O acidente ocorreu devido a uma severa corrosão nas pernas.



Figura 2.5 – Oleoduto rompido por corrosão.

A Figura 2.6 mostra uma foto de um edifício localizado próximo à orla marítima de Fortaleza-Ce (Praia do Futuro), onde se pode observar a corrosão na maioria das colunas e vigas (com as armaduras já expostas).



Figura 2.6 – Corrosão em armaduras de edifício em estado avançado.

No caso da corrosão em materiais metálicos, o fenômeno é chamado de corrosão metálica e é definida como *a transformação dos materiais metálicos pela ação química ou eletroquímica do meio*.

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, O_2 , S, H_2S , CO_2 entre outros, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Então, pode-se dizer que a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos, Figura 2.7.

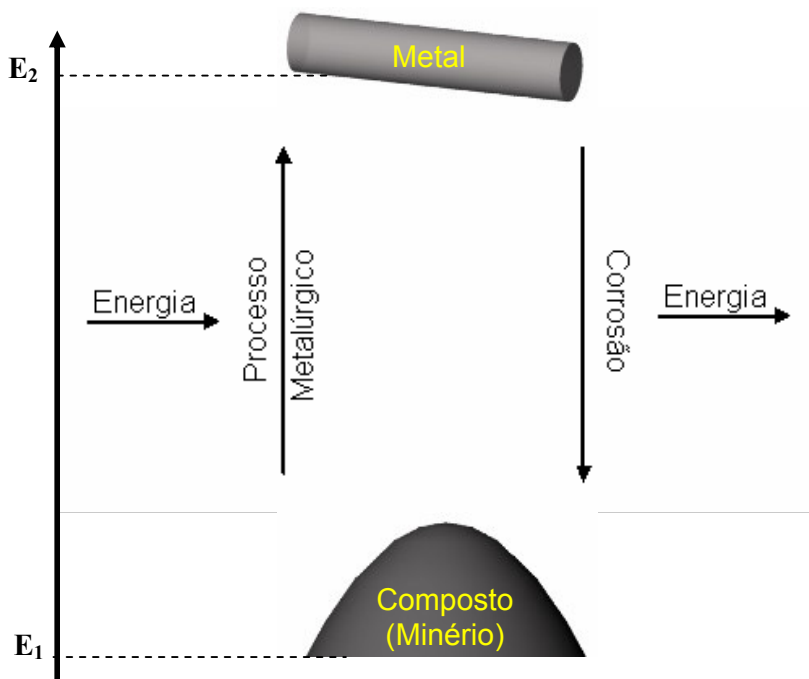


Figura 2.7- Ciclo dos metais (PIMENTA, 2003).

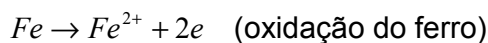
Segundo CASCUDO (1997), no processo de corrosão de um material metálico, o material é convertido a um estado não metálico e quando isso ocorre, ele perde suas propriedades essenciais tais como: resistência mecânica, elasticidade e ductilidade.

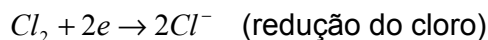
2.2.1 Oxidação e Redução

O átomo, no seu estado fundamental, tem o número de elétrons (carga negativa) igual ao número de prótons (carga positiva). No entanto, o átomo pode perder ou ganhar elétrons e, quando isso ocorre, têm-se os denominados íons positivos e negativos, respectivamente.

A oxidação e redução são definidos em termo de elétrons como:

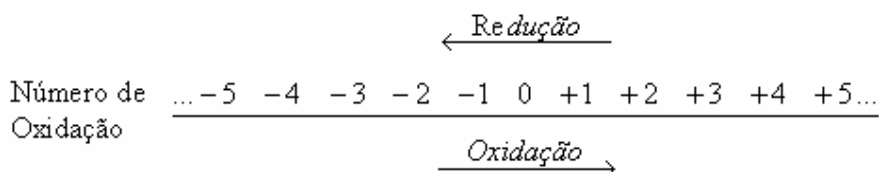
- **Oxidação** é a perda de elétrons por uma espécie química;
- **Redução** é o ganho de elétrons por uma espécie química.





Um conceito mais geral de oxidação e redução é definido em termo de número de oxidação (Nox), número de elétrons cedidos ou recebidos por um elemento ao formar um composto, (GENTIL, 1996):

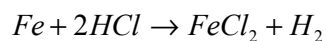
- **Oxidação** é perda de elétrons, ocasionando aumento do número de oxidação (Nox).
- **Redução** é ganho de elétrons, ocasionando diminuição do número de oxidação (Nox).



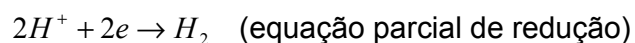
2.2.1.1. Reações de Oxi-redução ou Redox

São reações onde há variação do número de oxidação, e em alguns casos, perda e ganho de elétrons. O fenômeno de oxi-redução é simultâneo, sempre que há oxidação (*perda de elétrons*), existe também redução (*ganho de elétrons*).

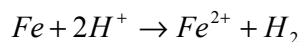
Como exemplo de reação de oxi-redução, tem-se o ferro quando atacado pelo o ácido clorídrico desprendendo hidrogênio, segundo a equação química:



Esta equação é de oxi-redução, pois temos:



A soma dessas duas equações parciais dará a equação total de oxi-redução:



Na reação de oxi-redução, a substância que *oxida* outra é denominada *agente oxidante* ou simplesmente *oxidante*, isto é, a espécie química que *recebe* elétrons de outra e *sofre redução*. Já, o *agente redutor* ou *redutor* é a substância que *reduz* outra, ou seja, é a espécie química que *doa* elétrons à outra e *sofre oxidação*. O número de elétrons doados pelo *redutor* é sempre igual ao número de elétrons recebido pelo *oxidante*.

2.2.2. Potencial de Eletrodo

Ao colocar um metal em uma solução aquosa com a qual não reage, há um princípio de ionização do metal que passa à solução aquosa na forma de cátions, perdendo energia até estabelecer um equilíbrio com o meio. Os elétrons ficam retidos na superfície do metal e os cátions na solução, próximo da superfície do metal devido à atração elétrica dos elétrons. Moléculas polarizadas de água são atraídas para a superfície do metal e forma uma camada orientada chamada dipolo, como ilustrado na Figura 2.8 (HELENE, 1993).

O plano de cargas positivas que contém os cátions na solução, mais próximos da superfície negativa do metal é conhecido como plano de Helmholtz externo. O potencial elétrico resultante entre o plano de cargas positivas e cargas negativas da superfície é denominado potencial de eletrodo.

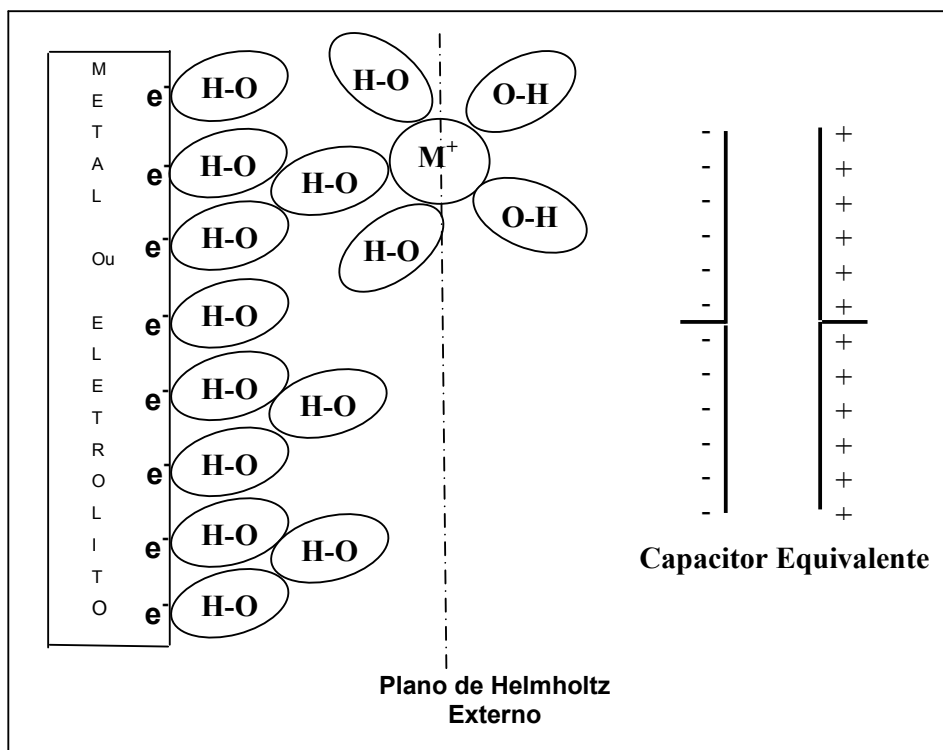


Figura 2.8 - Plano de Helmholtz (HELENE, 1993).

2.2.2.1. Potencial de Eletrodo Padrão

O potencial de eletrodo mostra a tendência de uma reação se passar no eletrodo, isto é, dá a medida da facilidade com que os átomos do eletrodo metálico perdem elétrons ou da facilidade com que os íons recebem elétrons (GENTIL, 1996).

O potencial, medido em Volt, desenvolvido em um metal imerso em uma solução 1 M de seus íons é denominado potencial padrão ou potencial normal.

Para medir o potencial de um eletrodo qualquer, é necessário ter um valor de referência. Então, foi desenvolvido o eletrodo normal de hidrogênio que foi escolhido como referência, tendo este potencial nulo. O eletrodo

normal de hidrogênio (Figura 2.9) é constituído de um fio de platina coberto com platina finamente dividida que absorve grande quantidade de hidrogênio, agindo como se fosse um eletrodo de hidrogênio. Esse eletrodo é imerso em uma solução 1M de íons de hidrogênio, através do qual o hidrogênio gasoso é borbulhado sob pressão de 1 atm e temperatura de 25 °C.

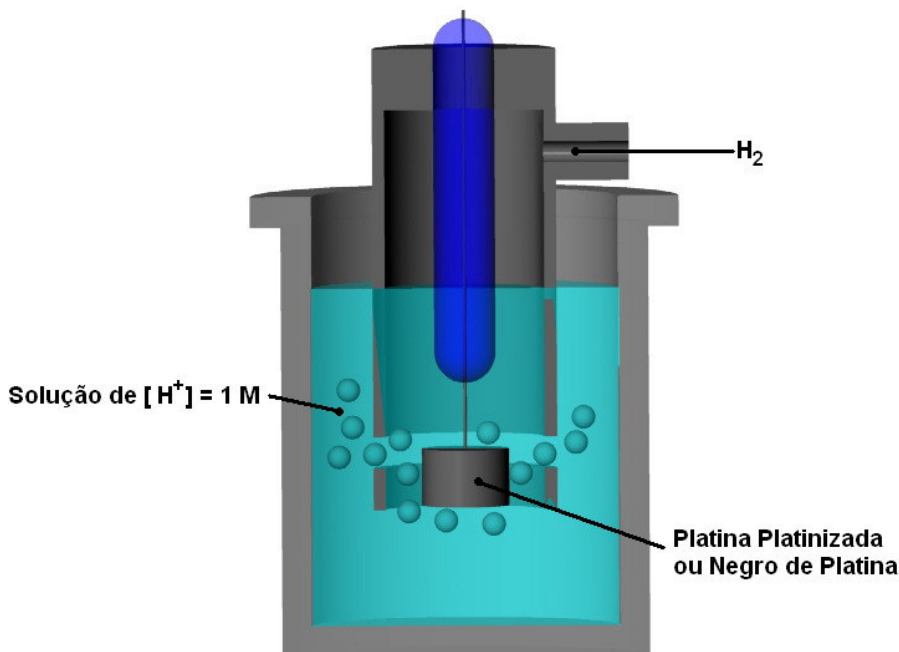


Figura 2.9- Eletrodo normal de hidrogênio.

O potencial de eletrodo padrão de um elemento é a diferença de potencial expressa em Volt entre o elemento e uma solução 1M de seus íons em relação ao eletrodo normal de hidrogênio, já que este tem potencial igual a zero (GENTIL, 1996).

Além do eletrodo de hidrogênio são usados outros eletrodos como referência, como eletrodo de calomelano, prata-cloreto de prata e cobre-sulfato de cobre.

Comparando-se os metais com o eletrodo padrão de hidrogênio (Figura 2.9), têm-se os potenciais de eletrodo padrão (E°), que serão

organizados em tabela de seus potenciais-padrão de eletrodo, que é uma escala de medidas relativas ao hidrogênio.

Na prática nem sempre é possível ou de interesse, ter concentrações iônicas das espécies presentes igual a 1M, assim têm-se potenciais de eletrodo diferentes dos apresentados na tabela de potenciais-padrão. Para determinar esses potenciais pode-se utilizar a equação desenvolvida por Nernst (FORTES, 1995):

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Est. Red.}}{a_{Est. Oxid.}} \quad (2.1)$$

Onde,

E é o potencial de eletrodo observado;

E^0 é o potencial-padrão;

R é a constante dos gases perfeitos;

T é a temperatura em graus Kelvin;

n é o número de elétrons envolvidos ou número de elétrons recebidos pelo agente oxidante ou cedido pelo agente redutor;

F é a constante de Faraday;

$a_{Est. Red.}$ é atividade do estado reduzido do eletrodo;

$a_{Est. Oxid.}$ é atividade do estado oxidado do eletrodo;

2.2.3. Pilha Eletroquímica ou Célula de Corrosão

A corrosão pode ser classificada em química ou eletroquímica, segundo a natureza do processo.

A corrosão química ocorre através de reação gás-metal, com formação de uma película de óxido. Esse processo de corrosão é lento e não provoca deterioração substancial do material, exceto quando se trata de gás extremamente agressivo e elevadas temperaturas.

O processo de corrosão eletroquímica ou aquosa é o mais freqüente na natureza, o ataque é de natureza eletroquímica, e ocorre em meio aquoso como resultado de uma pilha ou célula de corrosão.

As pilhas eletroquímicas são dispositivos que permitem a transformação de energia química em elétrica ou elétrica em química, sendo muito importante no estudo da corrosão.

Esquemáticamente uma pilha eletroquímica (Figura 2.10) apresenta os seguintes componentes:

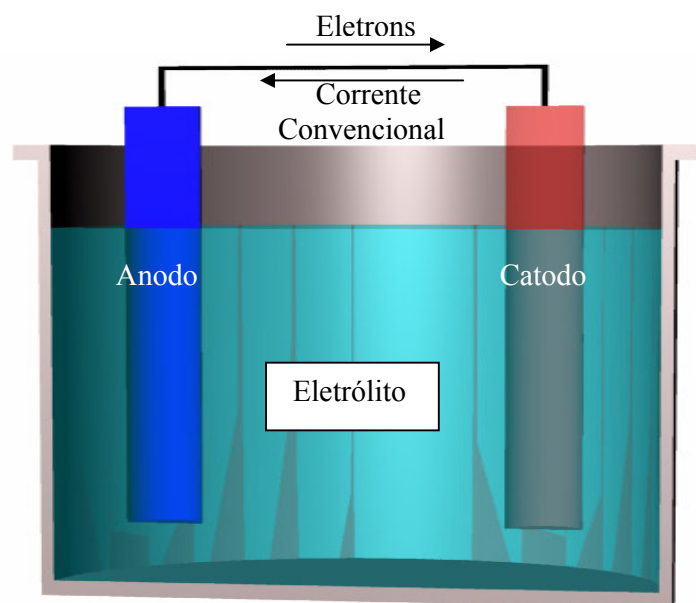


Figura 2.10 - Célula eletroquímica (GENTIL, 1996).

- **Anodo** - eletrodo em que há oxidação e onde a corrente elétrica em forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- **Eletrólito** - condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transporta a corrente elétrica do anodo para o catodo;

- **Catodo** - eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito ou o eletrodo na qual as cargas negativas entram na solução, provocando reações de redução;
- **Circuito metálico** - ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

Devido à diferença de potencial entre dois pontos de uma superfície metálica tem-se como consequência a formação de uma pilha de corrosão. Essa diferença de potencial é conhecida como força eletromotriz (GENTIL,1996). Segundo a convenção de sinais usada pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), ela é:

$$E_{\text{pilha}} = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}} \quad (2.2)$$

Não pode-se entender pilhas de corrosão sem o conceito de oxidação e redução, pois as reações da corrosão eletroquímica envolvem sempre reações de oxidação-redução.

Na Figura 2.11, pode-se observar o processo de corrosão na área anódica do material, onde ocorrem reações de oxidação. Sendo a passagem do metal da forma reduzida para a forma iônica, sua principal.

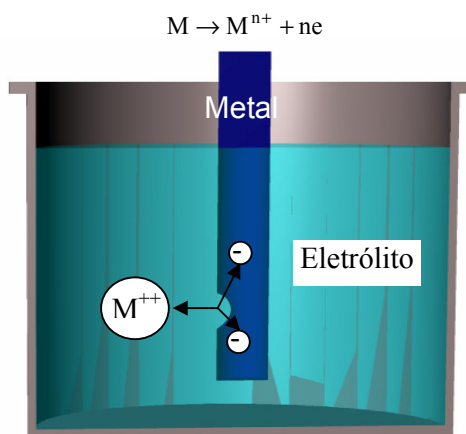


Figura 2.11 - Reação área anódica (GENTIL, 1996).

Segundo PIMENTA (2003), os principais tipos de pilha são:

Pilha de eletrodo diferente: É o tipo de pilha de corrosão que ocorre quando dois metais ou ligas diferentes são colocados em contato elétrico na presença de um eletrólito. Esse tipo de pilha é chamada de pilha galvânica. A diferença de potencial da pilha será tão mais acentuada, quanto mais distantes estiverem os materiais na tabela de potenciais no eletrólito considerado. O anodo da pilha é o metal mais ativo na tabela de potenciais, isto é, cede elétrons, ocorrendo assim, corrosão.

Pilha de ação local: Essa pilha ocorre em um mesmo metal devido à heterogeneidades diversas, decorrentes de composição química, textura do material, tensões internas, dentre outras, é provavelmente a pilha mais freqüente na natureza. A Figura 2.12 mostra de forma esquemática essa pilha.

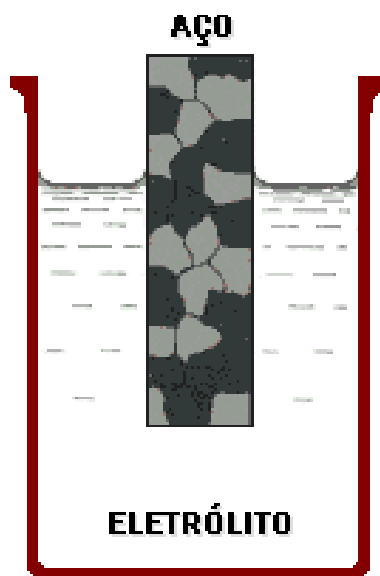


Figura 2.12 - Pilha de ação local (PIMENTA, 2003).

Pilha ativa-passiva: essa pilha ocorre nos materiais formadores de película protetora, como por exemplo: o cromo, o alumínio, os aços inoxidáveis, titânio, dentre outros. A película protetora se constitui numa fina e aderente

camada de óxido ou outro composto insolúvel nas suas superfícies. Se a película for danificada em algum ponto por ação mecânica e, principalmente pela ação de íons halogenetos (especialmente cloreto), será formada uma área ativa que funcionará como anodo, na presença de uma grande área passiva (catódica), conseqüentemente tem-se a formação de uma pilha e teremos assim, uma corrosão localizada.

Pilha de concentração iônica diferencial: Essa pilha é formada por material metálico de mesma natureza e surge quando o material metálico é exposto a concentrações diferentes de seus próprios íons. Pilha desse tipo ocorre em frestas (Figura 2.13), quando o meio corrosivo é líquido. Neste caso, o interior da fresta recebe pouca movimentação de eletrólito, tendendo a ficar mais concentrado em íons de metal (área catódica), enquanto que a parte externa da fresta fica menos concentrada (área anódica), ocorrendo desta forma, corrosão das bordas da fresta.

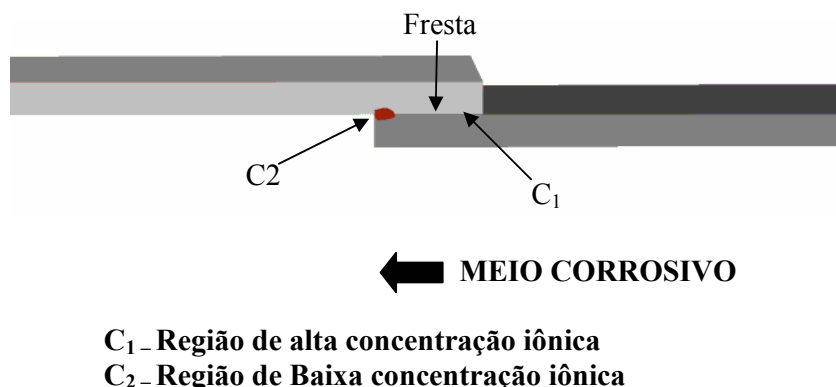


Figura 2.13 - Pilha de concentração iônica diferencial.

Pilha de aeração diferencial ou de oxigenação diferencial: é uma pilha constituída de eletrodos de um só material metálico em contato com um mesmo eletrólito e formada por diferentes concentrações de oxigênio. Nesta pilha (Figura 2.14), o anodo é o eletrodo menos aerado e o catodo é o eletrodo mais aerado.

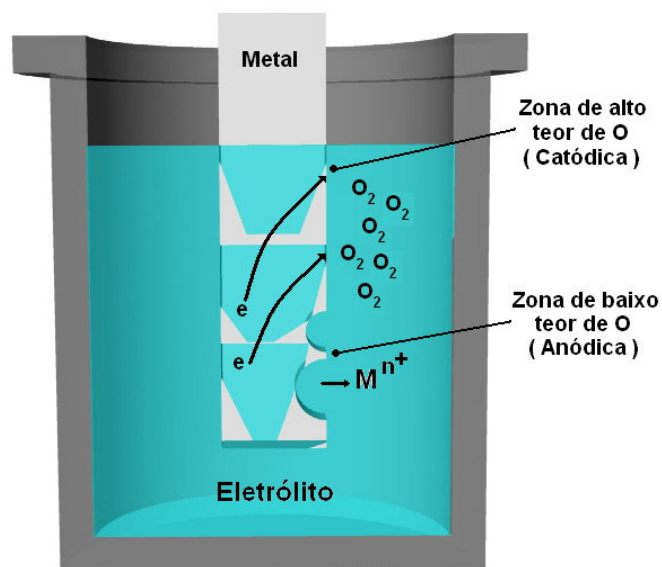


Figura 2.14 - Pilha de concentração diferencial de oxigênio.

Pilha de Temperaturas Diferentes: Essa pilha é constituída de eletrodos de um mesmo material metálico, porém estes eletrodos se encontram em diferentes temperaturas. Costuma ocorrer quando o material metálico está imerso em um eletrólito que apresenta áreas de diferentes temperaturas.

Pilha Eletrolítica: Nesta pilha a diferença de potencial ocorre devido a uma fonte de energia externa, não sendo necessário que os eletrodos sejam diferentes em sua natureza química (GENTIL, 1996).

2.2.4. Cinética da Corrosão

A velocidade ou cinética de corrosão eletroquímica expressa a perda de massa do material em função do tempo decorrido por unidade de área.

Do ponto de vista de engenharia, os processos lentos de corrosão que não chegam a prejudicar a estrutura até o final de sua vida útil podem ser considerados *processos não corrosivos*. Daí, não basta saber em que condições podem ou não ocorrer à corrosão, mas é fundamental o conhecimento a que taxas ela é processada. (HELENE, 1993).

O desgaste na superfície do metal pode ser expresso de diversas formas, pela perda de massa da amostra ou corpo de prova, durante o ensaio de corrosão.

A perda de massa é influenciada tanto pela área exposta como pelo tempo de exposição, sendo esta variável estimada em *taxa de corrosão*. Uma das unidades usadas é o *miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia (mdd)*.

Tendo em vista que essa unidade dificulta a visualização da profundidade do ataque, é usual sua conversão para outras unidades, sendo uma das mais usadas a *ipy (polegadas de penetração por ano)* ou seja,

$$mdd = ipy.694,44.\rho, \quad (2.3)$$

onde, ρ é a massa específica do metal (g/cm^3).

A taxa de corrosão também pode ser expressa em mpy (milésimo de polegada de penetração por ano) ou mmpy (milímetros de penetração por ano). De acordo com GENTIL (1996), são utilizadas, para conversão, as fórmulas:

$$\begin{aligned} mmpy &= mdd.0,036/\rho \\ mpy &= mdd.1,44/\rho \end{aligned} \quad (2.4)$$

A massa desgastada, ou quantidade de metal corroído, na área anódica, pode ser calculada pelo uso da relação quantitativa existente entre a quantidade de corrente que passa, através de um eletrólito, e a massa do metal que é oxidado (corroído) ou reduzido nos eletrodos. A taxa de corrosão poderá ser, também, mensurada através do fluxo de elétrons, ou seja, da corrente passante.

A equação que relaciona a perda de massa do metal com o fluxo de elétrons é conhecida por Lei de Faraday, ou seja (HELENE, 1993):

$$m = \frac{i \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (2.5)$$

onde:

m = massa em gramas do metal corroída (g);

i = corrente elétrica em Ampères (A);

t = tempo em segundos (s);

a = massa atômica em gramas (g);

n = valência dos íons do metal e

F = constante de Faraday (96.500C).

Quando a equação 2.5 é dividida pelo tempo e pela área da seção considerada (área de fluência da corrente), é obtida a taxa de corrosão:

$$r = \frac{I_{corr} \cdot a}{n \cdot F} \quad (2.6)$$

Onde,

r = taxa de corrosão g/cm² por s

I_{corr} = densidade de corrente ou corrente de corrosão em μ A/cm².

Esta equação mostra a proporcionalidade entre a taxa de corrosão e a corrente, ou seja, a concentração de corrente em uma pequena área pode resultar em intensa corrosão.

Pela (Equação.2.6) nota-se que, para um mesmo metal, a taxa de corrosão passa a ser proporcional apenas à corrente de corrosão (I_{corr}), pois a , n e F são constantes. Daí, é possível escrever $k = a/n \cdot F$. Assim:

$$r = k \cdot I_{corr} \quad (2.7)$$

Para a mesma velocidade de corrosão, quanto maior a densidade de corrente anódica, com relação à catódica, mais prejudicial será a corrosão,

uma vez que esta, não podendo ocorrer na superfície total, se processará em pequenas áreas, existindo corrosão *puntiforme ou por pite*.

A velocidade de corrosão eletroquímica raramente tem valor constante, portanto sua representação é realizada por meio de curvas de corrosão, evitando-se valores isolados, que não são representativos.

Segundo HELENE (1993), a *taxa de corrosão* pode ser estimada pela perda de massa, através da equação,

$$r = \frac{10 \cdot m}{A \cdot t \cdot \rho_{Fe}} \quad (2.8)$$

Onde:

r = taxa de corrosão em mm de penetração média por ano (mm/ano);

m = perda de massa (g);

A = área corroída (cm²);

t = tempo (ano) e

ρ_{Fe} = massa específica do ferro (g/cm³);

2.2.5. Corrosão em Armaduras de Concreto

O concreto é um material composto formado através da mistura de cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), água e aditivos. Após a mistura dos componentes ocorre uma série de reações químicas e após o endurecimento, podem-se observar três fases distintas: argamassa, agregado graúdo e uma zona de transição, interface, argamassa-agregado. Essas três fases são apresentadas de forma esquemática na figura 2.15.

O agregado graúdo é o material inerte envolto pela a argamassa, a argamassa é composta pelo agregado miúdo e uma pasta constituída de água e cimento. Entre o agregado graúdo e a pasta existe uma zona de transição, uma camada delgada com aproximadamente 10 a 50 µm. Esta fase surge durante o processo de cura, quando um filme de água se forma

ao redor dos agregados graúdos. Essa região próxima ao agregado tem uma relação água/cimento (a/c) maior que as mais afastadas sendo, geralmente, essa fase mais fraca que as outras duas (GUELLO, 2002).

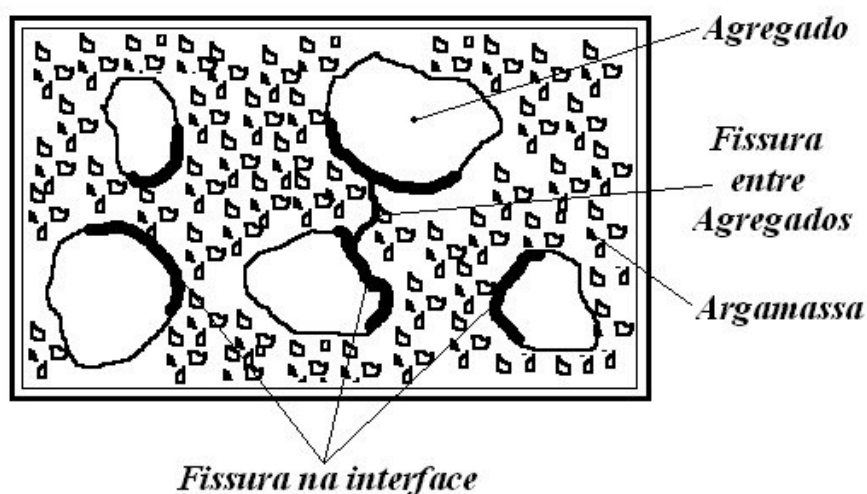


Figura 2.15 – Três fases distintas que compõem o concreto.

O concreto é caracterizado estruturalmente por apresentar alta resistência à compressão. No entanto, ele apresenta baixa resistência à tração. Devido à baixa resistência a tração, o concreto é associado a barras de aço formando o denominado concreto armado. Sendo este um dos materiais mais utilizados em construções civis no Brasil e largamente utilizado em todo o mundo.

Estruturas de concreto armado, como toda estrutura que utiliza componentes metálicos, pode sofrer um processo de corrosão, resultado de reações naturais, degenerativas que ocorrem no material interagindo com o meio ambiente em conjunto ou não com ações mecânicas e de outras naturezas. As figuras 2.16 a 2.18 mostram a corrosão em algumas estruturas de concreto armado.



Figura 2. 16 – Pilar de viaduto: a corrosão nas armaduras em estado avançado.



Figura 2.17 - Corrosão das armaduras em lajes de concreto armado.



Figura 2.18 - Corrosão em estado avançado em armaduras de colunas de edifício.

O concreto que envolve a armadura de aço, quando executado sem os devidos cuidados, pode não funcionar como uma barreira perfeita, permitindo que os vergalhões sofram ataques de íons agressivos ou de substâncias ácidas existentes na atmosfera.

A corrosão da armadura de concreto é de grande importância e deve ser evitada, pois além de provocar a redução da área metálica, os produtos da corrosão constituídos de óxi-hidróxidos de ferro podem ocupar volume várias vezes superior ao volume original do aço da armadura, podendo causar pressão de expansão de até 15 MPa, que poderá causar a fissuração do concreto, afetando a estabilidade da estrutura (HELENE, 1993). A Figura 2.19 mostra como ocorre a fissuração do concreto.

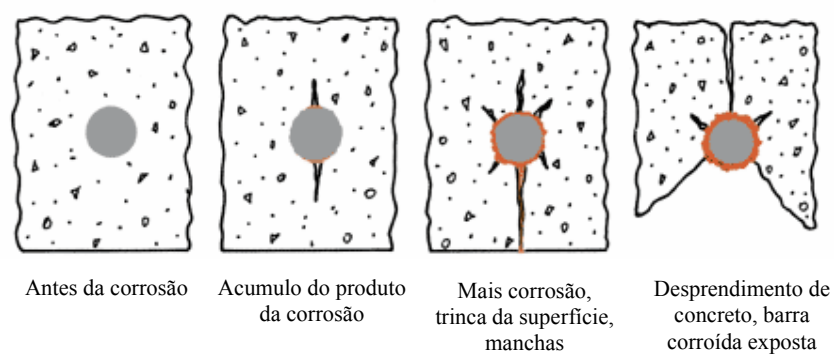


Figura 2.19 – Mecanismo de fissuração do concreto armado: o processo se inicia com a expansão da superfície da barra causando trincas na interface aço/concreto. Com o tempo o produto da corrosão vai se acumulando e surgindo mais trincas, estas, se propaga provocando o desprendimento do concreto e a barra corroida fica exposta.

A Figura 2.20, mostra a corrosão na armadura em colunas de um edifício. Onde, pode-se observar região com trincas, devido à expansão das superfícies das armaduras e outras nas quais já ocorreu o desprendimento do concreto, estando as armaduras totalmente expostas.



Figura 2.20 - Corrosão em armadura de concreto, lascamento do concreto devido à expansão do produto da corrosão nas armaduras.

A corrosão de armaduras de concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta resistividade elétrica, consideravelmente mais alta que a dos eletrólitos comum (CASCUDO, 1997).

2.3. MECÂNICA DO DANO

2.3.1. Introdução

A Mecânica do Dano é um campo da Mecânica dos Sólidos que tem evoluído bastante nas últimas décadas, possibilitando descrever situações em que a Mecânica da Fratura Tradicional apresenta-se de forma muito complexa ou insolúvel, estabelecendo uma relação entre esta e o contínuo clássico (LEMAITRE, 1992).

Enquanto que a mecânica da fratura lida com as condições de propagação de uma fissura macroscópica imersa num meio contínuo íntegro, a mecânica do dano se ocupa do efeito sobre a resposta do material, de um processo de microfissuração distribuída que se desenvolve numa etapa preliminar à formação da fissura discreta.

A resposta não-linear dos sólidos, é uma manifestação de processos irreversíveis que ocorrem em sua microestrutura, tais como: contornos de grão, mudanças de porosidade, mudanças de fase, imperfeições na rede cristalina, difusão de elementos químicos, etc. Alguns desses processos têm origem em microdefeitos constituídos por inclusões ou vazios, os quais, pelas suas características, favorecem a concentração de microtensões. Esses microdefeitos constituem o que se entende por *dano* inicial do material (PROÊNÇA, 2000).

O primeiro a introduzir o conceito de Dano foi KACHANOV em 1958, com o intuito de justificar a ruptura precocemente em metais, submetidos a regime de deformação lenta. Deste então, vários outros estudos têm sido realizados.

RABOTINOV (1968), propôs a utilização da variável de dano como um redutor da rigidez inicial do material.

Equações constitutivas foram formuladas termodinamicamente e identificadas para muitos fenômenos, tais como: fluência sob fadiga de baixo ciclo em metais (LEMAITRE, 1971), fluência (LECKIE-HULT, 1974), fadiga de alto ciclo (CHABOCHE, 1974), interação fadiga-fluência e plasticidade-dúctil.

A suposição do dano isotrópico, é normalmente suficiente para prever a capacidade de carregamento, o número de ciclos ou o tempo para a falha local em componentes estruturais. Os cálculos não são muito difíceis por causa da natureza escalar da variável de dano, neste caso. Para o dano anisotrópico, a variável é de natureza tensorial (CHABOCHE, 1978, MURAKAMI, KRAJCINOVIC) e o trabalho a ser feito para a identificação dos modelos e para suas aplicações é mais complexo.

Mais recentemente a chamada Mecânica do Dano em Meios Contínuos (“*Continuum Damage Mechanics*”) foi formalizada por LEMAITRE & CHABOCHE (1985) com base numa metodologia fundamentada na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Desde 1975, a mecânica do dano tem sido aplicada com sucesso em diversos campos para avaliar a integridade de componentes estruturais e, nos últimos anos, tem crescido bastante os campos de sua aplicação:

Anos 80 – Fadiga de baixo ciclo; Dano em compósito e em concreto.

Anos 90 – Fadiga de alto ciclo; Dano em materiais pouco dúcteis e Dano em cerâmicas.

Os modelos de dano, segundo a natureza da variável de dano usada, podem ser classificados como escalares (ou isotrópicos) e anisotrópicos. Nos modelos anisotrópicos, a variável dano é uma grandeza tensorial e apresenta um campo maior de aplicação, embora, a identificação dos parâmetros do modelo seja bastante complexa.

Já os modelos escalares são conceitualmente simples e tem um número reduzido de parâmetros a serem identificados. Mas a sua aplicação pode ser restrita a algumas situações.

O modelo de dano para fratura dúctil de LEMAITRE é um modelo escalar indicado para aplicação em materiais dúcteis e será implementado para aplicação em barras de aços utilizadas na construção civil, levando em consideração o efeito da corrosão nessas barras.

2.3.2. Aspectos Fenomenológicos do Dano

2.3.2.1. Introdução

A Mecânica do Dano estuda através de variável mecânica os mecanismos envolvidos na deterioração do material quando este é submetido a um carregamento.

Segundo LEMAITRE (1996), o dano pode ser observado em diferentes escalas. Em micro-escala, o dano é a acumulação de micro-tensões na vizinhança dos defeitos ou interfaces e a quebra de ligações atômicas. Em média-escala é o crescimento e coalescência de micro-trincas ou micro-vazios nos quais se inicia a trinca. Na macro-escala, o Dano é o crescimento e propagação de trincas.

Os dois primeiros estágios, a acumulação de micro-tensões na vizinhança de defeitos e o crescimento e coalescência de micro-trincas ou micro-vazios, podem ser estudados por meio da variável dano definida na Mecânica dos Meios Contínuos em nível de média-escala. O terceiro estágio é geralmente estudado usando a mecânica da fratura com as variáveis definidas em nível de macro-escala.

Quando se estuda os diferentes tipos de materiais observa-se que, embora eles possuam diferentes estruturas físicas, esses apresentam comportamento mecânico qualitativamente semelhante. Todos eles, (sejam

os metais e suas ligas, os polímeros, compósitos, cerâmicos, madeira e concreto etc), apresentam um comportamento elástico, escoamento, alguma plasticidade ou deformação irreversível, laços de histerese, dano pelo carregamento uniforme ou por fadiga e crescimento de trinca submetida a carregamentos estáticos ou dinâmicos. Isto significa que as propriedades comuns a média-escala, podem ser explicadas por alguns mecanismos de energia que são similares para todos esses materiais. Essa é a principal razão que torna possível explicar o comportamento do material com sucesso pela mecânica dos meios contínuos e a termodinâmica dos processos irreversíveis, as quais modelam os materiais sem detalhar a complexidade de suas microestruturas físicas.

2.3.2.2. *Natureza Física do Estado Sólido e do Dano*

Todo material é composto de átomos que são mantidos unidos por meio de ligações resultantes de campos eletromagnéticos. A elasticidade dos materiais está diretamente relacionada com o movimento relativo de seus átomos.

Quando ocorre a quebra de ligações começa o processo de dano. Por exemplo, os metais são organizados em cristais ou grãos: um arranjo regular de átomos, exceto muitas linhas de discordâncias onde faltam átomos. Se aplicarmos uma tensão cisalhante a discordância pode se mover um espaçamento atômico ocorrendo a deformação plástica por deslizamento, mas o balanço energético é nulo (pois há quebra e formação de ligação), como ilustrado na Figura 2.21.

Se uma discordância é parada por um micro-defeito ou concentração de micro-tensões esta cria uma região confinada na qual outras discordâncias podem ser paradas. Este último processo não ocorre sem quebra de ligações atômicas, as quais danificam o material como apresentada na Figura 2.22. Outro mecanismo de dano em metais é a quebra de ligações intergranular e decoesão entre inclusões e a matriz.

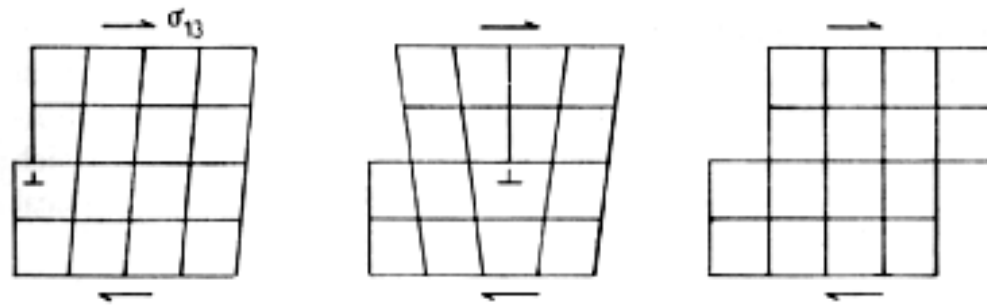


Figura 2.21 - Deformação plástica através do movimento de discordância (por J. Lemaitre).

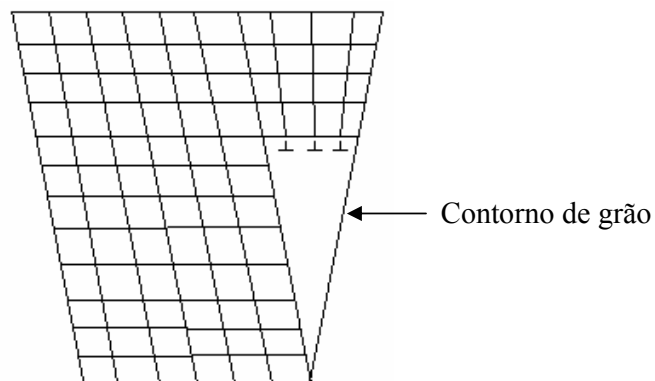


Figura 2.22- Dano por nucleação de micro-trinca devido ao acúmulo de discordâncias (por D. Krajcinovic).

Em polímeros, o dano ocorre pela a quebra de ligações que existem entre as longas cadeias de moléculas;

Nos compósitos, o dano é a quebra de ligação entre a fibra e a matriz polimérica;

Em materiais cerâmicos, a danificação é principalmente a micro-decoesão entre inclusões e a matriz;

No concreto, o mecanismo de dano é também a decoesão entre o agregado e a pasta de cimento com complexa influência da água;

Na madeira, o ponto mais fraco onde ocorre o dano é a quebra de ligações das células celulósicas;

Segundo LEMAITRE (1996), em todos esses casos, a elasticidade é diretamente influenciada pelo o dano desde que o número de ligações atômicas responsáveis pela elasticidade decresça com o dano. Esse acoplamento, o qual ocorre no estado dos materiais definidos aqui pela deformação elástica e o dano, é chamado de “estado de acoplamento”.

2.3.2.3. Deslizamento, Plasticidade e Deformação Irreversível

A plasticidade é diretamente relacionada aos deslizamentos. Em metais o deslizamento ocorre através do movimento de discordância e por maclagem, como mostrado na figura 2.21 ou através do escalonamento e/ou multiplicação de discordância.

Em outros materiais, a deformação irreversível pode ocorrer por diferentes mecanismos:

- Rearranjo moléculas, em polímero;
- Micro-trinca em cerâmicas, onde a grande resistência da rede não permite o movimento de discordâncias;
- Deslizamento ao longo de superfícies e decoesão em concreto;
- Rearranjo das células, em madeira.

Em todos os casos, o dano influencia a plasticidade ou a deformação irreversível porque a resistência da área elementar decresce com o número decrescente de ligações. O dano não influencia diretamente o mecanismo de deslizamento por si só, isto é, não há um estado de acoplamento.

2.3.2.4. Escala Fenomenológica de Deformação e Dano

A mecânica do contínuo trabalha com quantidades definidas em um aspecto matemático. Do ponto de vista físico estas quantidades representam a médias de um certo volume. O elemento de volume representativo (EVR), deve ser suficientemente pequeno para evitar alto gradiente, mas grande o suficiente para representar a média dos micro-processos. Para objetivo experimental e análise numérica, segundo LEMAITRE (1996), é útil considerar a seguinte ordem magnitude para o elemento de volume representativo:

- Metal e cerâmica : $0,1 \text{ mm}^3$
- Polímeros e muitos compósitos: 1 mm^3
- Madeira: 10 mm^3
- Concreto: 100 mm^3

Outra propriedade importante a ser considerada é que o dano é sempre muito mais localizado que a tensão.

A danificação em metais, compósitos, polímeros, concreto, cerâmicas e madeira, decorre que o dano se manifesta em duas escalas preferencialmente: a micro-escala, típica dos meios homogêneos, onde se dá o rompimento das ligações entre átomos, e a média-escala é aquela onde há perda de coesão entre agregados e matriz ou fibras e matriz no caso dos materiais cimentícios e compósitos, respectivamente.

Os modelos constitutivos da mecânica do contínuo são formulados visando aplicações macroscópicas, ou seja, para fins de análise estrutural e nessa escala (macro-escala) é usual considerar os meios como contínuos. O elo entre os fenômenos que ocorrem na micro e média-escalas e as respostas constitutivas na macro-escala podem ser construído mediante a definição de variáveis internas, que essencialmente tem o efeito de produzir alterações das propriedades mecânicas a serem atribuídas ao meio contínuo. Deste modo, o dano se manifestar, por exemplo, na redução da resistência e da rigidez do meio contínuo equivalente.

2.3.2.5. Diferentes Manifestações de Dano

O dano em micro-escala é governado de modo geral pela quebra de ligações atômicas, já em media escala, pode-se manifestar de diversas formas dependendo da natureza do material, do tipo de carregamento e da temperatura.

LEMAITRE (1996), classifica o dano como:

a) Dano Frágil

O dano é denominado frágil quando a trinca é iniciada em média-escala sem grande deformação plástica. Apenas para dar uma ordem de grandeza pode-se dizer que a razão deformação plástica e elástica é menor que um.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} < 1 \quad (2.9)$$

Isto significa que a força de clivagem é menor que aquela que poderá produzir deslizamento, mas é maior que a força necessária para a quebra de ligações atômicas. O grau de localização do dano é alto, Figura 2.23.

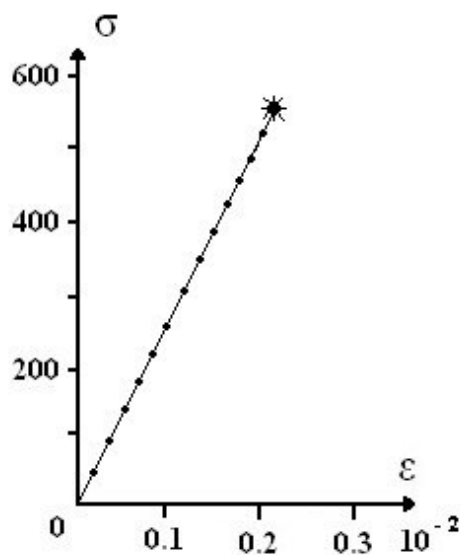


Figura 2.23 – Curva tensão-deformação em fratura frágil.

b) Dano Dúctil

O dano é dúctil quando ocorre simultaneamente com deformação plástica maior que um certo valor inicial p_D . Ele resulta da nucleação de cavidades e decoesões entre inclusões e a matriz, seguida do crescimento e coalescência através do fenômeno de instabilidade plástica, figura 2.24.

Como conseqüência, o grau de localização do dano dúctil é comparável com o da deformação plástica.

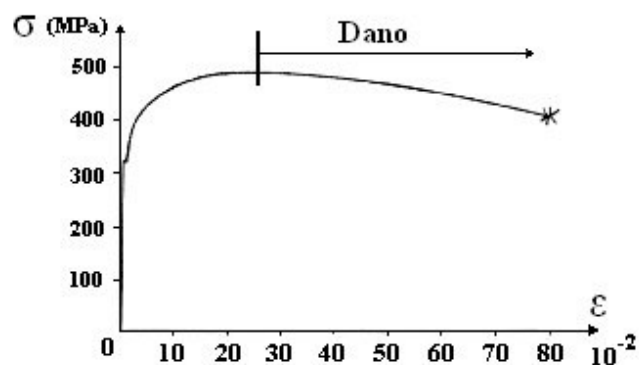


Figura 2.24 - Curva tensão-deformação do aço AISI 1010 (por J. Dufailly).

c) Dano por Fluência

Quando um metal é carregado à elevada temperatura, acima de 1/3 da temperatura de fusão, a deformação plástica envolve viscosidade, isto é, o material pode ser deformado a tensão constante. Quando a deformação é suficientemente grande, ocorrem decoesões intergranulares que produzem dano e um aumento na taxa de deformação mediante um período de fluência acelerada.

Assim, o gradiente de dano por fluência é similar ao gradiente de visco-plasticidade, Figura 2.25.

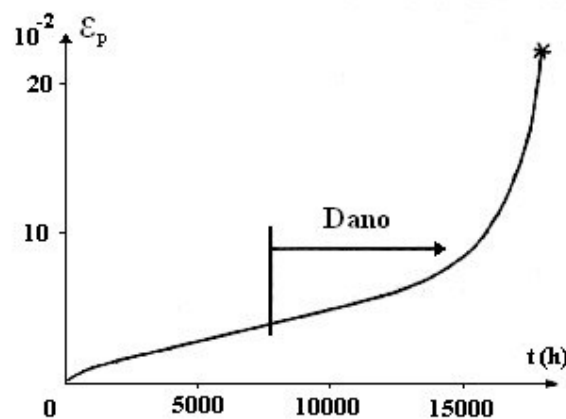


Figura 2.25- Curva de fluência do aço inoxidável A 542 a 550°C, submetido a carregamento de tração constante (por A. Benallal)

d) Dano por Fadiga de Baixo Ciclo

Quando um material é submetido a carregamento cíclico cujos valores de tensões ou deformações são elevados, o dano se desenvolve juntamente com deformação plástica cíclica, logo após um período de incubação e procedendo às fases de nucleação e propagação de microtrincas. O grau de localização do dano é maior que para o dano por fluência e dúctil, visto que a fadiga de baixo ciclo é caracterizada por alto valor de tensão e baixo número de ciclos de ruptura, N_r :

$$N_r < 10000 \text{ ciclos} \quad (2.10)$$

Se a deformação do material é localizada, o dano induz uma queda na amplitude da tensão como mostrado na figura 2.26, para dois loop de tensão-deformação corresponde a um ciclo estabilizado e a um ciclo fechado para a ruptura.

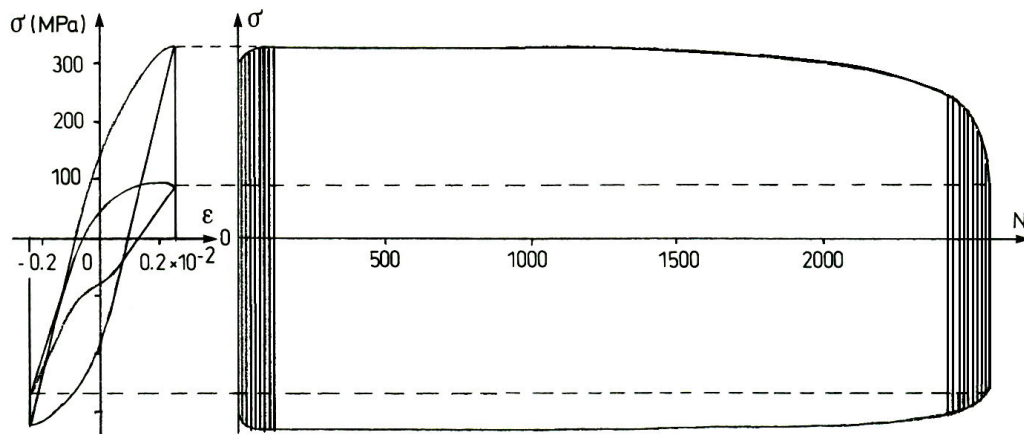


Figura 2.26 - Curva de fadiga de baixo ciclo do aço inoxidável A 316L, submetido a carregamento cíclico de tensão e compressão (por J. Dufailly).

e) Dano por Fadiga de Alto Ciclo

Quando um material é carregado com baixos valores de tensão, a deformação plástica remanescente a meso-nível é pequena e pode ser desprezível. Em alguns pontos, a micro-escala, ela pode ser alta onde a micro-trinca transgranular ocorre apenas em alguns planos, e mais frequentemente na superfície do espécime pelo mecanismo de intrusão-extrusão.

O número de ciclos de falha pode ser muito grande:

$$N_r > 100000 \text{ ciclos} \quad (2.11)$$

Como consequência, a localização do dano é alta e a queda de tensão num nível intermediário para um experimento semelhante ao da figura 2.26, ocorre depois na figura 2.27.

Observa-se que para o dano frágil e o dano por fadiga de alto ciclo a curva tensão-deformação obtida pelo o ensaio clássico em média-escala usualmente não representa o comportamento verdadeiro para a deformação e dano. Isto porque o espaço localizado induz zonas de micro-plasticidade e zonas de dano muito menores que aquelas das experiências. No entanto,

ele é usado porque experimentos mecânicos em micro-escala são difíceis de serem executados. Além disso, tem-se que os resultados são médias de quantidades não uniformes sobre um volume intermediário. O teste de micro-dureza pode ajudar a caracterizar um micro-volume, embora o seu estado de tensão seja complexo.

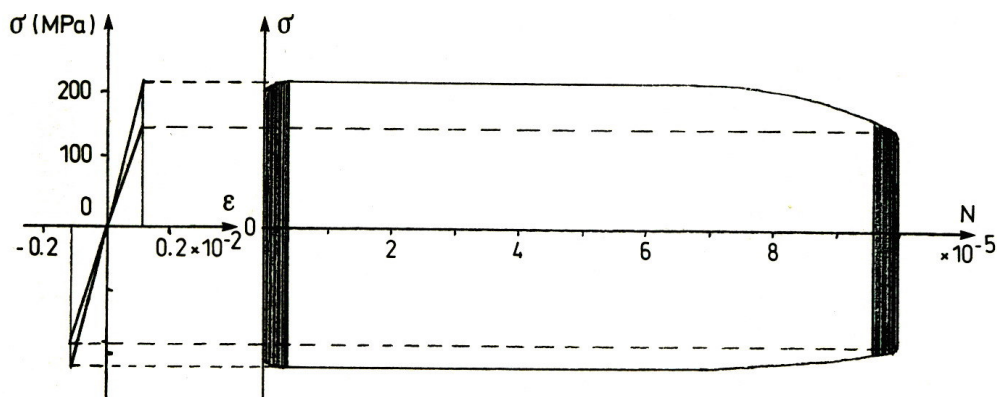


Figura 2.27 – Curva de fadiga de alto ciclo do aço inoxidável A 316, submetido a carregamento cíclico de tensão e compressão (por L. Engel e H. Klingele).

2.3.3. A Mecânica do Dano e a Mecânica da Fratura

A mecânica do dano em meios contínuos leva em conta os efeitos da degradação em modo difuso e progressivo de sólidos, quando submetidos a ações de natureza mecânica ou não-mecânica por meio de redução das propriedades de resistência e rigidez do material.

Enquanto que a mecânica da fratura lida com as condições de propagação de uma fissura macroscópica imersa num meio contínuo íntegro, a mecânica do dano se ocupa do efeito, sobre a resposta do material, de um processo de microfissuração distribuída que se desenvolve numa etapa preliminar à formação da fissura discreta. A teoria permite descrever localmente, observando-se um “elemento de volume representativo” do material em torno do ponto considerado. A evolução dos

fenômenos que se desenvolvem entre um estado inicial, relativo a uma situação do material íntegro, e um estado final, caracterizado pela formação de uma fissura macroscópica que equivale à ruptura do elemento de volume.

A maioria dos materiais ditos granulares tem no dano a razão básica de sua resposta não-linear. No caso do concreto, um material no qual a fissuração difusa é responsável de modo dominante pela resposta inicial não-linear, a mecânica do dano é capaz de formular modelos constitutivos bastante representativos, que se aplicam também à análise de estruturas em concreto armado, particularmente nos regimes de serviço, nos quais a fissuração discreta apresenta-se em inúmeros casos com distribuição sistemática.

Não se pode considerar que o dano seja mensurável diretamente, pois procedimentos voltados para tal fim não são viáveis. Porém, é possível quantificá-lo de forma indireta medindo-se a redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo o módulo de elasticidade.

No que se refere à transição de um estado de dano distribuído para uma fratura discreta, esta pode ser considerada como o resultado de um processo de localização do dano numa certa região de pequena largura do meio, seguido de sua evolução numa faixa progressivamente mais estreita até a formação da descontinuidade.

Em síntese, a diferença entre Mecânica do Dano e Mecânica da Fratura pode ser colocada, segundo Janson & Hult (1977), da seguinte forma:

- Na Mecânica do Dano a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um campo de defeitos (micro-fissuras ou poros) considerados continuamente distribuído;
- Na Mecânica da Fratura a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um único defeito, como uma fissura pontiaguda pré-definida, num meio mecanicamente intacto.

A figura 2.28 apresenta esquematicamente a iniciação e crescimento de uma trinca, distinção do campo de atuação mecânica do dano e da fratura.

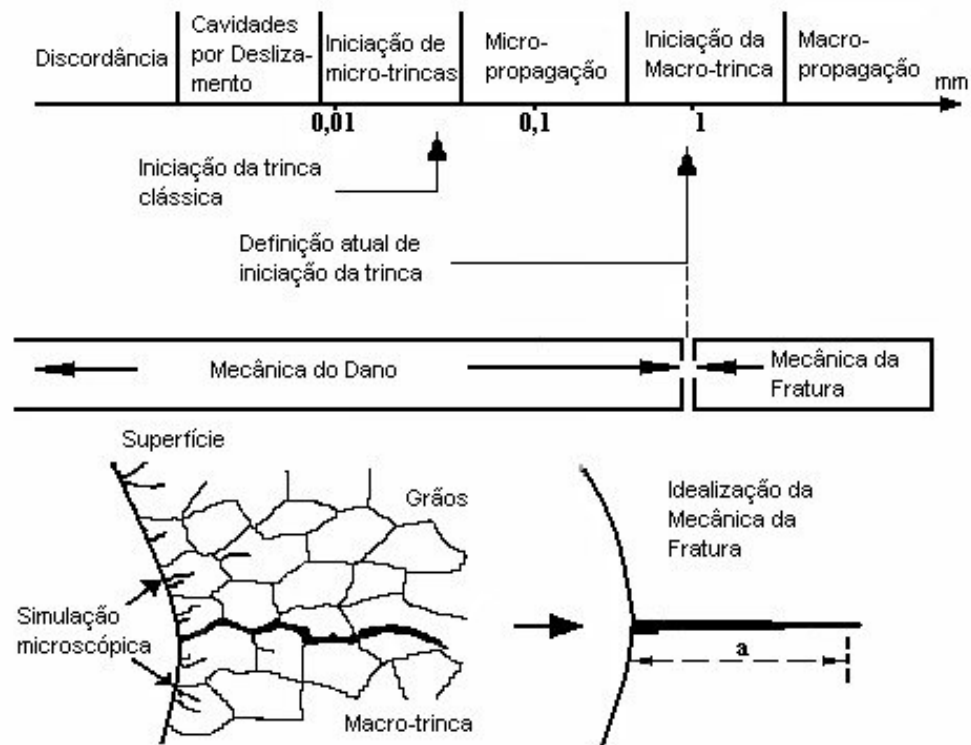


Figura 2.28- Ilustração esquemática da iniciação de uma trinca macroscópica (por J. L. Chaboche, 1987).

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

3.1. O MECANISMO DA CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO

O mecanismo da corrosão da armadura em concreto armado é uma manifestação específica da corrosão eletroquímica em meio aquoso, embora o eletrólito confinado a uma rede de poros existentes no concreto possui resistividade elétrica bem mais elevada do que a verificada nos eletrólitos típicos ou comuns.

Segundo HELENE (1993), para que a corrosão ocorra deve existir três condições básicas: existência de um eletrólito, diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio. A ausência de um desses elementos impedirá o início da corrosão ou cessará o processo, caso já esteja em andamento.

- **Existência de um eletrólito**

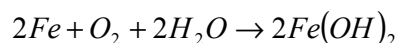
A água está sempre presente no concreto, e na maioria das vezes em quantidade suficiente para atuar como eletrólito, atuando no transporte de íons necessários às reações de corrosão eletroquímica.

- **Diferença de potencial de eletrodo**

A diferença de umidade, de aeração, de concentração salina, de tensão no aço ou concreto entre dois pontos da barra, pode gerar uma diferença de potencial de eletrodo capaz de desencadear pilhas ou cadeias de pilhas eletroquímicas.

- **Presença de oxigênio**

É necessário que haja oxigênio para a formação da ferrugem, produto da corrosão, segundo reações tais como:



O produto da corrosão, a ferrugem, nem sempre é $Fe(OH)_2$, mas uma gama de óxido/hidróxidos de ferro.

Após o início da hidratação do concreto, forma-se uma película de passivação no aço envolto pela pasta de cimento hidratado. Essa película é composta de $\gamma-Fe_2O_3$ (lepidocrocita) com espessura da ordem de 4 Å, esta apresenta baixa condutividade iônica, baixa solubilidade e boa aderência ao aço. A passividade é mantida devido à alta alcalinidade da solução dos poros do concreto, pH entre 12,5 e 13,5. Essa elevada alcalinidade é por causa do hidróxido de cálcio - $Ca(OH)_2$, proveniente das reações de hidratação do cimento (silicato tricálcio - C_3S e silicatos dicálcio- C_2S).

Para um pH de aproximadamente 12,5 no concreto, segundo POURBAIX, citado por FORTES (1995), as reações de eletrodo verificadas são de passivação. Assim, barras de aço no interior do concreto, em meio

alcalino, estão protegidas do fenômeno de corrosão, devido á presença de uma capa ou película protetora que envolve a armadura.

No entanto, esta película pode ser destruída, seja pela carbonatação (redução do pH da fase líquida dos poros da pasta do concreto) ou pela presença de agentes agressivos como: cloretos – Cl, sulfetos, nitratos e óxidos de enxofre. Com a perda da passividade, a célula de corrosão eletroquímica se desenvolve podendo causar sérios danos à estrutura.

Segundo HELENE (1993), qualquer heterogeneidade na estrutura, na superfície da armadura ou na vizinhança das barras de aço é suficiente para gerar uma diferença de potencial de eletrodo e desenvolver uma célula eletroquímica de corrosão.

As pilas eletroquímicas que geralmente ocorrem no concreto são dos seguintes tipos:

- Pilha de aeração diferencial – é provavelmente a mais comum em estruturas de concreto armado e deve-se a diferença de acesso de oxigênio entre regiões contíguas da armadura;
- Pilha de concentração salina diferencial – é o segundo tipo em frequência e importância nas estruturas de concreto armado. Surge como resultado de diferença de concentração de sais nos poros capilares e fissuras do concreto, ou seja, diferença de concentração dos íons intersticial. Essa diferença de concentração iônica pode ser de origem intrínseca ao concreto tais como diferentes materiais na composição do concreto, diferentes proporções dos materiais no traço e qualidade deficiente da mistura do concreto ou de origem externa;
- Pilha de tensão diferencial – surge como resultado de diferença de tensões nas diversas partes de uma mesma armadura ou entre armaduras que foram obtidas por diferentes meios ou tratamentos. O contorno de grãos com elevada energia são partes extremamente sensíveis e ativas da estrutura do metal, sendo mais facilmente atacados por ação iônica quando o metal está sob tensão elevada;

- Pilha de temperatura diferencial – é a célula de corrosão resultante da diferença de temperatura entre duas regiões circunvizinhas da mesma barra ou de barras conectadas eletricamente por estribos ou soldas, onde as regiões de baixa temperatura atuam como anodo e as de alta como catodos;
- Pilha imposta – são células resultantes de correntes externas a estrutura, erráticas e de fuga.

A corrosão eletroquímica da armadura do concreto pode ser representada conforme a Figura 3.1.

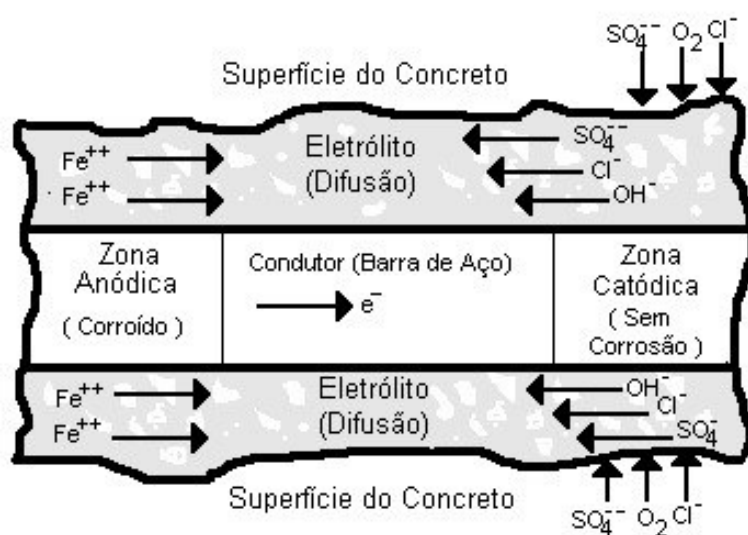


Figura 3.1- Célula de corrosão em concreto armado (SILVA, 1995).

Como em qualquer outra célula eletroquímica, nesta célula tem-se um ânodo, cátodo, condutor elétrico e um eletrólito.

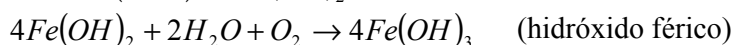
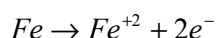
O mecanismo da corrosão eletroquímica da armadura do concreto é descrito sucintamente a seguir:

Inicialmente, a película passivadora do aço é destruída por ação do dióxido de carbono (CO_2), oxigênio e agentes agressivos, principalmente os íons cloretos. A concentração destes elementos ao longo da armadura é

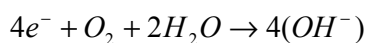
variável, assim, surge uma diferença de potencial necessária para a formação da célula eletroquímica. Forma-se uma região anódica e uma região catódica, ligadas pelo eletrólito na forma de água dos poros da pasta endurecida. Os íons de ferro, Fe^{+2} , com carga elétrica positiva no anodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres, e^- , com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o catodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combina com a água e o oxigênio para formar íons de hidroxila, OH^- . Estes íons se deslocam pelo eletrólito e combinam com os íons ferrosos formando hidróxido ferroso que por outra oxidação se transforma em hidróxido férrico (ferrugem).

As reações que ocorrem no anodo e catodo são as seguintes:

Reações anódicas:



Reação catódica:



Segundo GENTIL (1996), a corrosão eletroquímica da armadura pode ser classificada como:

- **Corrosão uniforme:** corrosão em toda a extensão da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo;
- **Corrosão puntiforme ou por pite:** os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades, também chamados alvéolos;
- **Corrosão intragranular:** é processada entre os grãos dos cristais do metal e quando os vergalhões sofrem, principalmente, tensões de tração, podem fissurar ou fraturar perdendo sua estabilidade;
- **Corrosão transgranular:** que se realiza intragrãos da rede cristalina, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos;

- **Fragilização pelo hidrogênio:** corrosão originada pela ação do hidrogênio atômico na sua difusão pelos vergalhões da armadura, propiciando a sua fragilização e, em conseqüência, a fratura.

3.1.1. Modelo de Vida Útil de Tuutti

O modelo de corrosão proposto por Tuutti, subdivide o processo de corrosão em dois períodos, iniciação e propagação, Figura 3.2.

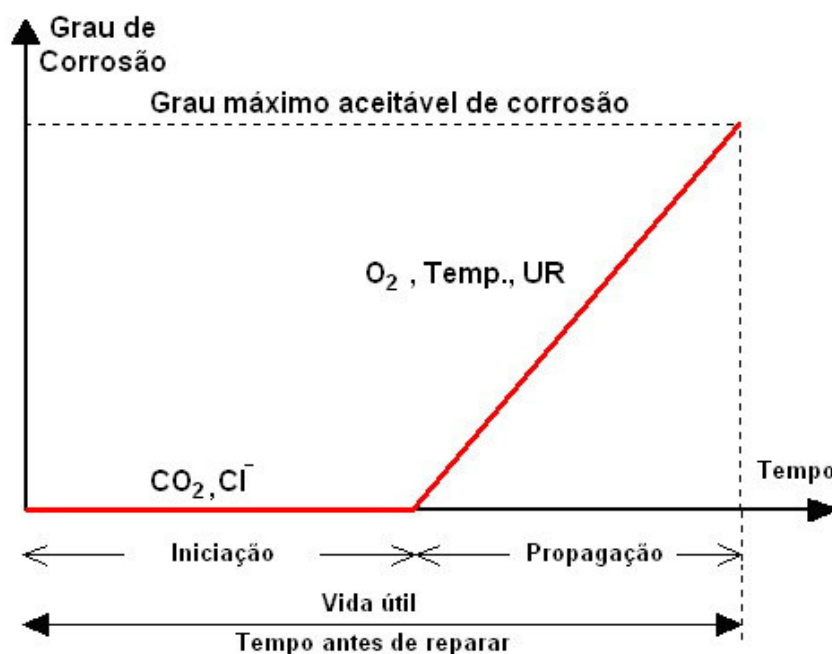


Figura 3.2- Modelo de vida útil de TUUTTI (CASCUDO, 1997).

a) Período de iniciação – corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação do agente agressivo em atravessar o concreto de cobrimento, alcançar a armadura e despassiva-la.

A perda de proteção ocorre, geralmente, através da ação de elementos agressivos provenientes de meio externos, que atua sobre a

estrutura de concreto reduzindo a elevada alcalinidade ou pela presença de uma quantidade suficiente de íons cloreto que atingem a superfície da armadura por um dos mecanismos de transporte de massa ou íons: absorção capilar de líquidos, difusão de gases e líquidos por gradiente de concentração, permeabilidade de gases e líquidos por gradiente de pressão e migração de íons por ação de um campo elétrico.

- **Ação dos íons cloretos (Cl⁻)**

Os íons cloretos podem vir do meio externo e atingir a armadura por difusão ou podem já se encontrar no interior do concreto devido à água de amassamento e/ou agregados contaminados e aditivos .

Mesmo que o concreto não possua cloretos, eles podem atingir a armadura de aço, oriundos do exterior, através da rede de poros, caso a estrutura esteja em atmosfera marinha ou outro ambiente que contenha cloretos. A quantidade de cloretos é incrementada temporalmente chegando, até mesmo, a atacar toda a superfície da armadura, podendo provocar velocidades de corrosão intensas e perigosas.

O transporte de cloretos, como de outros líquidos, no interior do concreto é influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Assim, a interconexão dos poros (que determina a porosidade aberta) e a distribuição do tamanho dos poros são fatores muito importantes. A porosidade aberta possibilita o transporte de substâncias e caracteriza a permeabilidade da pasta, já o tamanho dos poros influencia a velocidade de transporte (CASCUDO, 1997).

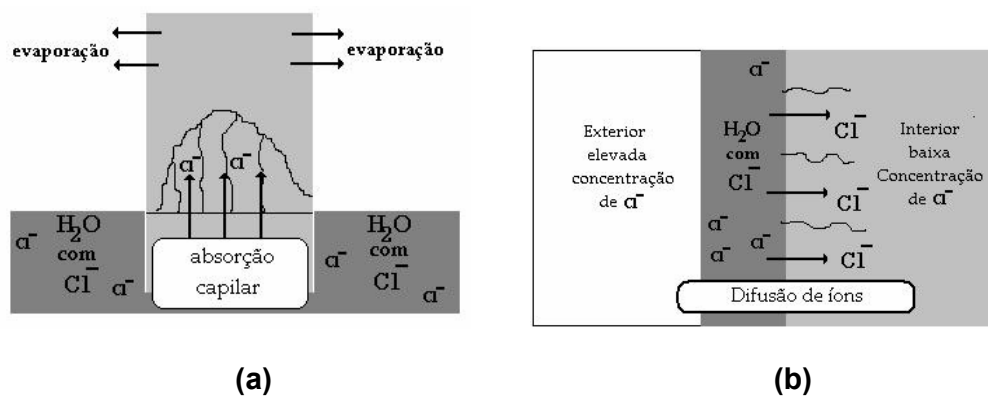
Os cloretos podem ser transportados no concreto através dos *mecanismos de absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração*.

- **Absorção** - a absorção de soluções líquidas ricas em íons cloretos provenientes de sais dissolvidos é, geralmente, o passo inicial para a contaminação de estruturas de concreto armado. Esta contaminação ocorre logo após o contato do líquido com o substrato. A absorção

depende da porosidade aberta (pólos capilares interconectados entre si), permitindo o transporte das substâncias líquidas contaminadas para o interior do concreto. Ela depende também do diâmetro dos poros e das características intrínsecas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial.

- **Difusão iônica** – o movimento dos cloretos no interior do concreto, onde a umidade é mais elevada, ocorre essencialmente por difusão em meio aquoso. A difusão ocorre devido a gradientes de concentração iônica entre o meio externo e o interior do concreto.
- **Permeabilidade** - a permeabilidade é um dos principais parâmetros de qualidade do concreto e representa a facilidade com que dada substância transpõe um dado volume de concreto. O transporte de cloretos ocorre devido a um gradiente de pressão e está relacionado com a interconexão dos poros capilares e será tanto mais acentuado quanto maior for o diâmetro dos poros e da comunicação entre eles.
- **Migração iônica** – ocorre devido à existência de um campo elétrico. No concreto a migração de íons cloretos pode se processar pelo o próprio campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico.

Estes mecanismos de transporte de cloretos estão ilustrados na Figura 3.3.



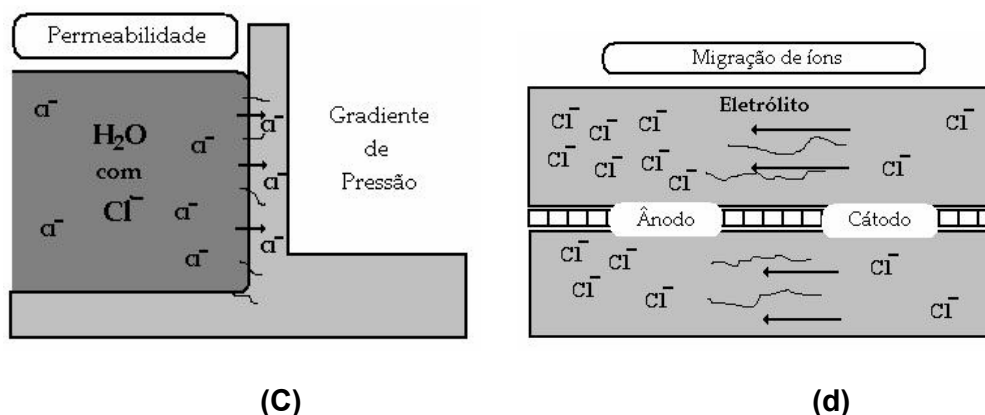


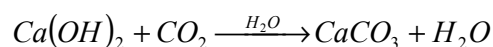
Figura 3.3 - Mecanismos de transporte de íons cloretos no concreto (HELENE, 1993): (a) absorção capilar; (b) difusão iônica; (c) permeabilidade; (d) migração iônica.

• Carbonatação

O concreto quando exposto aos gases ácidos como o gás carbônico (CO₂), o dióxido de enxofre (SO₂) e o gás sulfídrico (H₂S), podem ter o pH da solução intersticial existente nos seus poros reduzido. Esta alta alcalinidade é devido, principalmente à presença do hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, liberado nas reações de hidratação do cimento Portland.

O processo de transformação, por ação do gás carbônico-CO₂, dos compostos do cimento em carbonatos é chamado de *carbonatação*.

O processo de carbonatação do concreto ocorre lentamente segundo a reação principal:



Uma característica desse processo é a existência de uma *frente de carbonatação*, e não de uma neutralização localizada ou puntiforme. A reação anterior se dará não a uma profundidade específica, mas numa certa faixa de profundidade dependendo da disponibilidade de CO₂.

A carbonatação, apesar de responsável por um incremento pequeno de retração, por si só, não prejudica o concreto simples. No entanto, ela

reduz a alcalinidade da solução presente nos poros ao redor das armaduras. O pH de precipitação do carbonato de cálcio, $CaCO_3$, é de 8,3 a 9 à temperatura ambiente, este reduz substancialmente as condições de estabilidade química da capa ou película passivadora do aço.

O hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, é menos solúvel que os outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH). Assim, o hidróxido de cálcio encontra-se normalmente em forma de cristais na solução presentes nos poros do concreto, enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. Como a solubilidade do $Ca(OH)_2$ depende da concentração de OH^- na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH passando a seguir ao $Ca(OH)_2$. Os silicatos e aluminatos também podem ser atacados e transformados em carbonatos de cálcios, alumina e sílica hidratada, deteriorando ainda mais a pasta de cimento. O processo de carbonatação apresenta uma serie de reações intermediarias complexas tendo como produto final, predominantemente, o carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

A velocidade de carbonatação pode ser obtida, em geral, pela equação:

$$d = k\sqrt{t} \quad (3.1)$$

Onde,

d – espessura ou profundidade de carbonatada (mm);

k – coeficiente de carbonatação, depende da difusividade do CO_2 (mm/ano);

t – tempo de exposição (ano).

A penetração de CO_2 no concreto ocorre predominantemente por difusão, sendo a taxa de difusão de CO_2 na água cerca de 10^4 vezes mais baixa que no ar, a penetração de CO_2 será determinada pela estrutura dos poros e pela presença de água neles, Figura 3.4. No entanto, se os poros estiverem secos, o CO_2 difunde-se no interior deles, mas a carbonatação não ocorre pela falta de água.

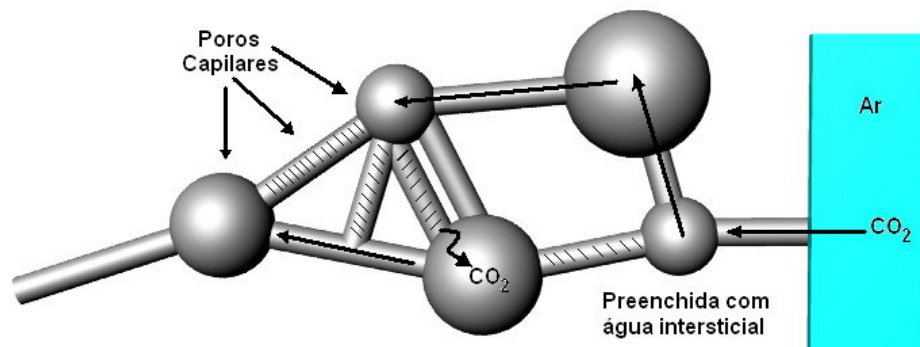


Figura 3.4 - Representação esquemática do processo de difusão do CO_2 no concreto. Os poros capilares de maior diâmetro que não estão totalmente preenchidos com água atuam como canal de transporte do CO_2 . Os capilares de diâmetros menores e os preenchidos com água atuam como retardadores do processo de carbonatação (HELENE, 1993).

b) Período de propagação – consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo.

Despassivada a armadura, pela a chegada da frente de carbonatação e/ou pela ação dos íons cloretos, ela fica vulnerável à corrosão e pode ocorrer a propagação do fenômeno, desde que exista os elementos básicos para a formação da pilha eletroquímica (existência de um eletrólito, diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio).

3.2. Fundamentos da Mecânica do Dano

3.2.1. Definição da Variável Dano

O Dano é a deterioração progressiva, que ocorre no material antes da falha. Não se pode considerar que o dano seja mensurável diretamente, pois procedimentos voltados para tal fim não são viáveis. No entanto, é possível quantificá-lo de forma indireta medindo-se a redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo, o módulo de elasticidade.

Considere um sólido com defeitos em sua microestrutura do qual é retirado um elemento de volume representativo.

Elemento de volume representativo é um elemento com dimensões suficientemente grande para que se possa admitir homogeneidade para a distribuição dos defeitos nele contidos, mas ao mesmo tempo suficientemente pequeno para admitir continuidade para as funções representativas dos fenômenos que ocorrem nele, para ser considerado um ponto material do contínuo, LEMAITRE & CHABOCHE (1985).

Seja S , a área de uma das faces do elemento orientado por um tensor normal de direção n (Figura 3.5).

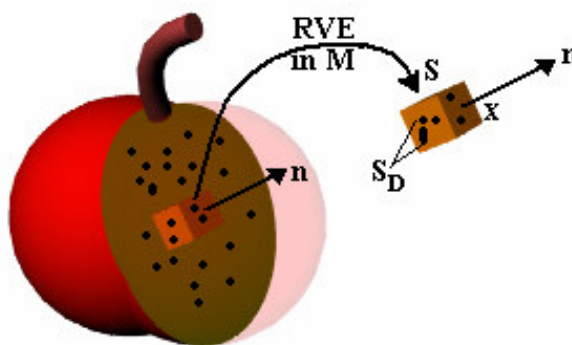


Figura 3.5 - Elemento de volume representativo.

Considere \tilde{S} como sendo a área íntegra (área que efetivamente resiste aos esforços) da seção S considerada. Então a área dos defeitos (S_D) é :

$$S_D = S - \tilde{S} \quad (3.2)$$

Por definição, LEMAITRE & CHABOCHE (1985), o dano D_n , no caso associado a um plano de normal n , é definido como :

$$D_n = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{S_D}{S} \quad (3.3)$$

A variável de dano assume valores contínuos no intervalo $0 \leq D_n \leq 1$, sendo que $D_n = 0$ corresponde a situação do material íntegro e $D_n = 1$ indica um estado de total deterioração.

O Dano é isotrópico quando a variável de dano é uniforme em qualquer direção n , isto é, o dano no material é representado por apenas uma variável escalar, $D = D_n$.

3.2.2. Definição de Tensão Efetiva

O conceito de tensão efetiva foi introduzido em 1968 por RABOTNOV. Ele é definido considerando uma situação de solitação uniaxial sobre o elemento de volume (Figura 3.6), constituída por uma força F aplicada nas faces opostas orientada pela direção n .

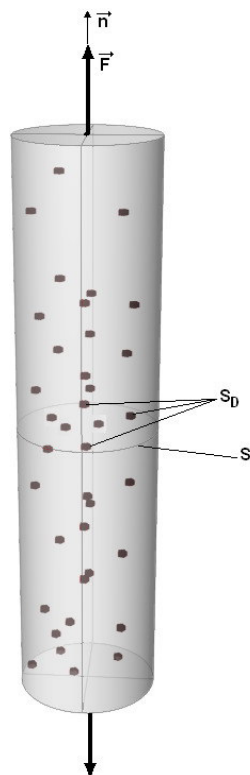


Figura 3.6 – Elemento com danificação unidimensional.

Admitindo-se que o conjunto de defeitos seja totalmente incapaz de transferir tensões, pode-se definir uma tensão dita efetiva levando-se em conta somente a parte íntegra da seção. Defin-se tensão efetiva para um caso unidimensional, como:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (3.4)$$

Onde F é a força aplicada na seção do elemento representativo e \tilde{S} é a área efetiva.

Assim, a área efetiva resistente pode ser expressa em função da variável de dano como:

$$\tilde{S} = S - S_D = S(1 - D) \quad (3.5)$$

Levando-se em conta a relação (3.4) segue que :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1 - D)} \quad (3.6)$$

tem-se que: $\tilde{\sigma} \geq \sigma$

Em particular, nota-se que:

$\tilde{\sigma} = \sigma$ para material localmente íntegro;

$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$ para material totalmente danificado localmente.

3.2.3. Definição da Deformação Efetiva

Um conceito dual ao de tensão efetiva é o de deformação efetiva e também decorre da análise de uma situação de deformação uniaxial imposta

ao elemento de volume orientado segundo uma certa direção definida pelo versor n .

Seja, então, $\Delta \ell$ a variação do comprimento inicial ℓ_0 por efeito da deformação imposta. A medida de deformação linear nominal é definida pela relação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\Delta \ell_0} \quad (3.7)$$

Entretanto, se o elemento de volume possui inicialmente defeitos ou descontinuidades internas, elas se abrem de uma certa quantidade, que em conjunto pode ser representada por Δ_d . Assim sendo, no processo de deformação (Figura 3.7), somente a parcela $\Delta \ell - \Delta_d$ é que efetivamente deve ser considerada numa medida da deformação.

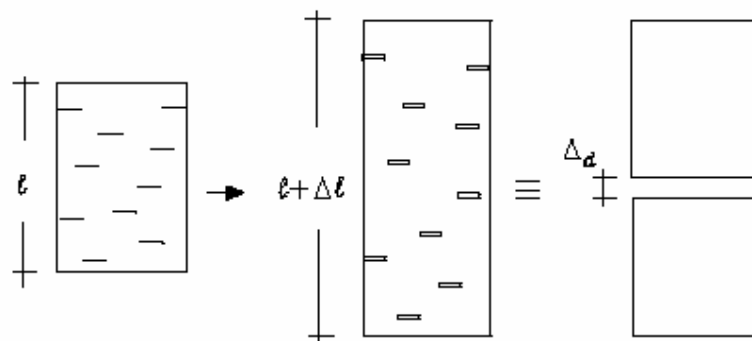


Figura 3.7 – Acréscimo de comprimento devido à abertura de defeitos.

Segue daí que a medida efetiva da deformação linear pode ser definida como:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta \ell - \Delta_d}{\ell_0} \quad (3.8)$$

Uma segunda definição para uma variável de dano pode então ser proposta:

$$D_n^* = \frac{\Delta_d}{\Delta \ell} \quad (3.9)$$

Nota-se que essa definição é também associada a uma certa direção n . Levando-se em conta a nova variável de dano, segue que as medidas nominal e efetiva da deformação linear se relacionam por:

$$\tilde{\varepsilon} = (1 - D_n^*) \varepsilon \quad (3.10)$$

As duas variáveis escalares de dano introduzidas pelas equações (3.3) e (3.9) podem ser unificadas se for considerado que o volume correspondente à parte danificada é o mesmo nos dois casos. Esta consideração é bastante lógica pois se trata de uma situação de solitação uniaxial sobre um mesmo volume, onde ora se analisa o equilíbrio das tensões ora a compatibilidade das deformações. Assim sendo, o volume danificado pode ser representado de duas formas:

$$V_d = S_0 \Delta \ell = S \Delta_d \quad (3.11)$$

Considerando-se as relações (3.3) e (3.9), segue que:

$$D_n = D_n^* \quad \forall n \quad (3.12)$$

3.2.4. Princípios gerais de equivalências de respostas constitutivas

Os princípios descritos a seguir permitem que se formulem relações constitutivas para meios contínuos com dano envolvendo medidas nominais de tensão e de deformação.

Segundo LEMAITRE, no âmbito dos meios contínuos, um axioma constitutivo fundamental é o da ação local, isto é, a resposta constitutiva num ponto não depende daquilo que ocorre nos elementos vizinhos. Estendendo-se esse axioma ao meio com dano, resulta que a relação constitutiva para um ponto na parte íntegra não é afetada pelo dano, porém nessa parte é importante lembrar que devem ser consideradas a tensão efetiva e a deformação efetiva. Assim sendo, pode-se estabelecer um princípio geral de equivalência da resposta constitutiva:

“A lei constitutiva do meio danificado é obtida da lei constitutiva do meio íntegro onde o tensor de tensões é substituído pelo tensor de tensão efetiva e o tensor linear de deformações pelo tensor de deformação efetiva.”

Restringindo-se a análise ainda ao caso uniaxial, e sendo o meio íntegro supostamente elástico linear, o princípio enunciado leva à seguinte relação:

$$\tilde{\sigma} = E \tilde{\varepsilon} \quad (3.13)$$

3.2.4.1. Relação constitutiva envolvendo equivalência de energia

Substituindo-se na relação (3.13) as relações que definem $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\varepsilon}$, (3.6) e (3.10) respectivamente, e já levando-se em conta a (3.10), segue que:

$$\sigma = (1 - D)^2 E \varepsilon \quad (3.14)$$

Essa última relação vale então para o meio contínuo equivalente e envolve quantidades nominais. Nota-se, por outro lado, que:

$$\tilde{\sigma} \tilde{\varepsilon} = \sigma \varepsilon \quad (3.15)$$

Portanto, pode-se afirmar que o meio contínuo equivalente reproduz a mesma quantidade de energia do meio danificado.

Por outro lado, observando-se a relação (2.14), pode-se definir o módulo secante de rigidez elástica (\tilde{E}) do meio danificado como:

$$\tilde{E} = (1 - D)^2 E \quad (3.16)$$

A relação anterior coloca em evidência a degradação do módulo de rigidez elástico inicial do material causada pela danificação. Isolando-se a variável de dano, obtém-se:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

Essa relação indica que é possível identificar os valores de dano com base em medidas experimentais do módulo secante de rigidez elástica em ensaios uniaxiais com deformação controlada (Figura 3.8).

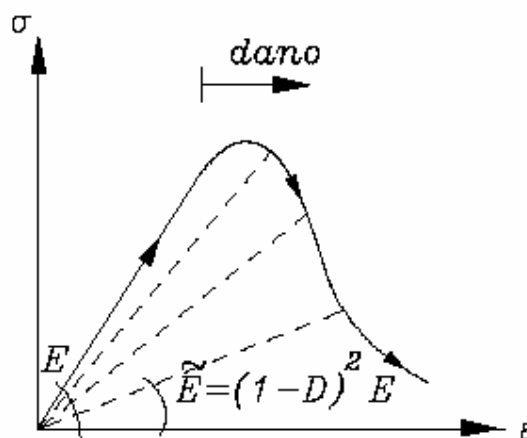


Figura 3.8 - Variação da rigidez secante do meio contínuo equivalente.

3.2.4.2. Relação constitutiva envolvendo equivalência-deformação

O princípio da equivalência de deformação, proposto por LEMAITRE & CHABOCHE (1985), diz que:

“O estado de deformação de um material com dano é obtido da lei do comportamento do material íntegro onde o tensor de tensões é substituído pelo tensor de tensão efetiva” (Figura 3.9).

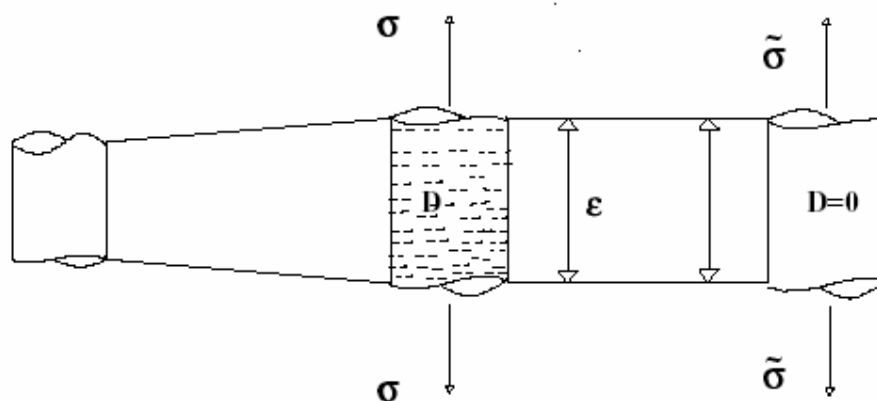


Figura 3.9 - Hipótese de deformação equivalente.

Considerando um material elástico linear, pode-se escrever a seguinte relação para a tensão-deformação efetiva:

$$\tilde{\sigma} = E \tilde{\epsilon} \quad (3.18)$$

Da definição de tensão efetiva (equação 3.6), da substituição desta na equação anterior, temos:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (3.19)$$

Da relação anterior, o módulo de rigidez elástica (\tilde{E}) para um meio contínuo de resposta equivalente ao meio deteriorado resulta:

$$\tilde{E} = (1 - D)E \quad (3.20)$$

A variável de dano pode ser identificada por :

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E} \right) \quad (3.21)$$

3.2.5. Definição Geométrica de Tensor de Dano de Segunda Ordem

Segundo Murakami, citado por Lemaitre (1996), para um tipo mais complexo de anisotropia e uso em carregamento não proporcional, é possível estender a definição de superfície de dano introduzida para uma dimensão.

Lembrando, que δS representa a área da superfície com dano nesta superfície δS_D , então, $\delta S - \delta S_D = \delta S(1 - D)$ representa a área não danificada de deformação equivalente da configuração não danificada.

Considere um elemento de volume representativo (EVR) de um material danificado após o descarregamento e uma área da região seccionada definida pela orientação \vec{n} com superfície δS , como ilustrada na Figura 3.10. Considere, também, a deformação equivalente na configuração de descarregamento no mesmo sistema de coordenadas. O EVR tem mudado e em particularmente a área seccionada tem se transformado para uma orientação diferente $\vec{\tilde{n}}$ devido a anisotropia do dano, e uma menor área $\delta \tilde{S}$. Assumindo que a forma permanece a mesma, $\vec{n} \delta S$ é transformado em $\vec{\tilde{n}} \delta \tilde{S}$.

Em analogia com o caso unidimensional, o tensor de 2ª ordem que transforma o vetor $\vec{n} \delta S$ no vetor $\vec{\tilde{n}} \delta \tilde{S}$ característico é denominado por:

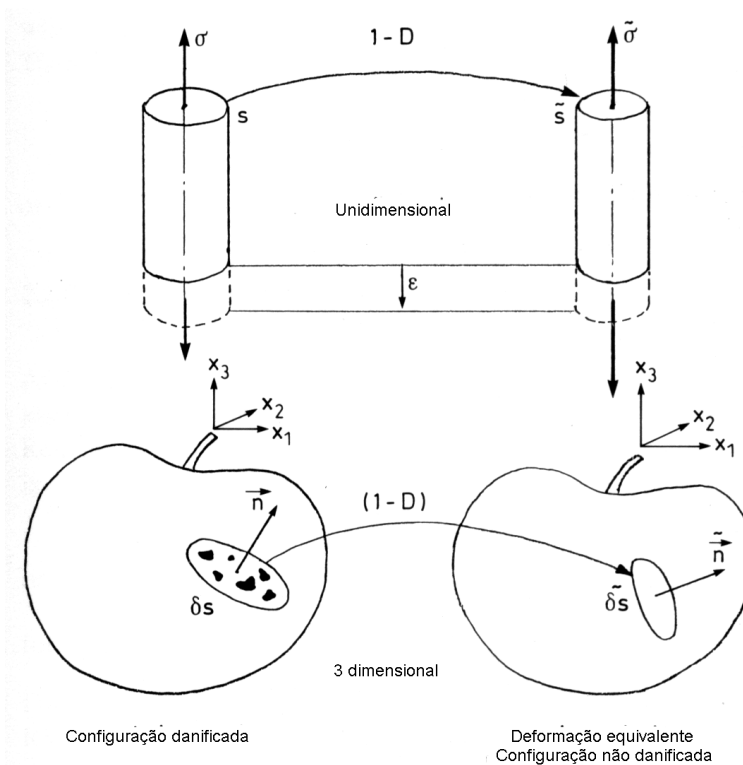


Figura 3.10 – Dano isotrópico unidimensional e dano anisotrópico em três dimensões.

$$(\mathbf{I} - \mathbf{D}) \vec{n} \delta S = \vec{\tilde{n}} \delta \tilde{S} \quad \text{ou} \quad (I_{ij} - D_{ij}) n_j \delta S = \tilde{n}_i \delta \tilde{S} \quad (3.22)$$

$(\mathbf{I} - \mathbf{D})$, onde \mathbf{I} é o tensor unitário de segunda ordem, e \mathbf{D} é a variável dano, tensor de 2ª ordem. Ele é simétrico e tem três valores principais D_1, D_2 e D_3 na coordenada principal (X_1, X_2, X_3) que corresponde a redução da área de um tetraédrico fechado em coordenadas (X_1, X_2, X_3) .

Seja, PQR um triângulo de área δS no tetraédrico OPQR, Figura 3.11, que se transforma em um triângulo $\tilde{P}\tilde{Q}\tilde{R}$ de área $\delta \tilde{S}$ na equivalência de deformação na configuração danificada, então temos:

$$\begin{aligned}
 \vec{n} = \vec{X}_1 & \quad PQR \rightarrow \tilde{P}\tilde{Q}\tilde{R} \rightarrow (I_{ij} - D_{ij}) \cdot n_j \delta S = \tilde{n}_i \delta \tilde{S}; \\
 \vec{n} = \vec{X}_2 & \quad OQR \rightarrow \tilde{O}\tilde{Q}\tilde{R} \rightarrow (1 - D_1) \delta A_1 = \delta \tilde{A}_1, \\
 \vec{n} = \vec{X}_3 & \quad ORP \rightarrow \tilde{O}\tilde{R}\tilde{P} \rightarrow (1 - D_2) \delta A_2 = \delta \tilde{A}_2, \\
 & \quad OPQ \rightarrow \tilde{O}\tilde{P}\tilde{Q} \rightarrow (1 - D_3) \delta A_3 = \delta \tilde{A}_3
 \end{aligned}$$

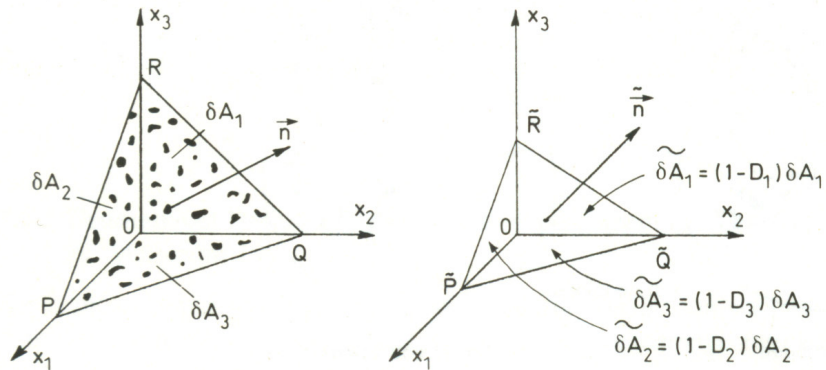


Figura 3.11 – Principal valores do tensor dano (LEMAITRE, 1996).

Esta propriedade de simetria com relação aos três planos faz com que o dano seja ortotrópico. Apesar do dano ser ortotrópico, ele abrange um grande campo de aplicação.

Para definir a tensão efetiva, primeiramente vamos escrever o vetor tensão \vec{T} em duas configuração para o caso unidimensional:

$$T_i \delta S = \tilde{T}_i \delta \tilde{S} \tag{3.23}$$

Introduzindo o tensor tensão efetiva, $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{\sigma}_{ij} \tilde{n}_j = \tilde{T}_i \tag{3.24}$$

Então, pode-se escrever,

$$\sigma_{ij} n_j \delta \mathcal{S} = \tilde{\sigma}_{ij} \tilde{n}_j \delta \tilde{\mathcal{S}} \quad (3.25)$$

Ou com a definição de $(\mathbf{I} - \mathbf{D})$,

$$\begin{aligned} \tilde{n}_j \delta \tilde{\mathcal{S}} &= (I_{ij} - D_{ij}) n_i \delta \mathcal{S} \\ \sigma_{ij} n_j &= \tilde{\sigma}_{ij} (I_{kj} - D_{kj}) n_k \quad \forall \vec{n} \end{aligned} \quad (3.26)$$

O tensor tensão efetiva pode ser definido como:

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \quad (3.27)$$

Mas, isto conduz a um tensor não simétrico. Apenas a parte simétrica contribui para as equações constitutivas da elasticidade e plasticidade, considerando,

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{2} \left[\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} + (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \cdot \boldsymbol{\sigma} \right] \quad (3.28)$$

Quando a direção principal de tensão e dano coincide, tem-se:

$$\left[\tilde{\boldsymbol{\sigma}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1}{1-D_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_2}{1-D_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_3}{1-D_3} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

A definição de dano como um tensor simétrico de 2ª ordem, e este associado à tensão efetiva é a base para o desenvolvimento de uma completa teoria de dano mecânico ortotrópico, da mesma forma como para o caso isotrópico.

3.2.6. Forma Generalizada das Relações Constitutivas para Casos Multiaxiais

A forma generalizada estabelece uma relação entre os tensores de segunda ordem de tensão e de deformação por meio de um tensor constitutivo de rigidez secante elástica com dano (Proença, 2000). Esse tensor constitutivo pertence à família dos tensores de quarta ordem, e nesta seção serão discutidas suas propriedades, particularmente a simetria que, como se mostra em seguida, depende do tipo de equivalência adotada.

De uma maneira geral é razoável imaginar que se um certo material inicialmente isotrópico é submetido a um carregamento com uma certa direção definida, a microfissuração induzida também apresentará uma certa orientação. Assim sendo, pode-se então esperar que a danificação gere anisotropia. A danificação com preservação da isotropia pode ser admitida como um caso particular, justificável se a micro-fissuração se apresentar com orientação difusa.

Então, as formas gerais devem contemplar a anisotropia e, nesse sentido a variável escalar de dano, do caso unidimensional passa a assumir a natureza de um operador tensorial de quarta ordem.

A notação a ser adotada para os tensores de segunda ordem será letras maiúsculas, e os de quarta ordem letras maiúsculas em negrito. Em particular o tensor de deformações passará a ser representado também pela letra E .

Introduzindo-se o tensor identidade de quarta ordem (\mathbf{II}), as formas generalizadas das expressões (3.6) e (3.10), referentes aos tensores de tensão e de deformação efetivas, podem ser dadas por:

$$\tilde{\mathbf{T}} = (\mathbf{II} - \mathbf{D})^{-1} \mathbf{T} \quad (3.30a)$$

$$\tilde{\mathbf{E}} = (\mathbf{II} - \mathbf{D})^{\mathbf{T}} \mathbf{E} \quad (3.30b)$$

Observa-se que a transposição indicada no operador de deformação efetiva é proposital e facilita os desenvolvimentos algébricos que seguirão. Nota-se que, necessariamente, os tensores de quarta ordem das relações anteriores devem apresentar a chamada propriedade de simetria menor, pois relacionam tensores simétricos de segunda ordem.

Segundo JIRÁSEK (2002), um tensor de 4ª ordem, por exemplo, \mathbf{D} , apresenta simetria menor quando:

$$\mathbf{D}_{ijkl} = \mathbf{D}_{jikl} = \mathbf{D}_{ijlk} = \mathbf{D}_{jilk}, \quad \forall i, j, k, l$$

E apresenta simetria maior para:

$$\mathbf{D}_{ijkl} = \mathbf{D}_{klij}, \quad \forall i, j, k, l$$

A relação geral entre os tensores efetivos é então dada por:

$$\mathbf{T} = \mathbf{E} \tilde{\mathbf{E}} \quad (3.30c)$$

Onde, \mathbf{E} é o tensor de rigidez secante elástica, de quarta ordem, simétrico e positivo.

Combinando-se as relações (3.30), obtém-se:

$$\begin{aligned} (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \mathbf{T} &= \mathbf{E} (\mathbf{I} - \mathbf{D})^T \mathbf{E} \\ \mathbf{T} &= (\mathbf{I} - \mathbf{D}) \mathbf{E} (\mathbf{I} - \mathbf{D})^T \mathbf{E} \end{aligned} \quad (3.31)$$

A expressão anterior pode ainda ser escrita na forma:

$$\mathbf{T} = \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{E} \quad (3.32)$$

Onde,

$$\tilde{\mathbf{E}} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})\mathbf{E}(\mathbf{I} - \mathbf{D})^T \quad (3.33)$$

é o tensor de rigidez secante elástica do meio danificado. Nota-se que esse tensor é simétrico (com simetria menor e maior).

Uma outra observação importante decorre do desenvolvimento da operação de produto interno entre os tensores efetivos das relações (3.30a) e (3.30b):

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}} \cdot \tilde{\mathbf{E}} &= (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \mathbf{T} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^T \mathbf{E} \\ &= \mathbf{T} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-T} (\mathbf{I} - \mathbf{D})^T \mathbf{E} \\ &= \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Portanto, a equivalência em energia é verificada com formas propostas para os tensores efetivos.

Segundo LEMAITRE & CHABOCHE (2002), dois outros tensores constitutivos de dano podem ser deduzidos considerando-se as equivalências em deformação e em tensão. Assim, na primeira delas tem-se como condição que: $\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{E}$. Combinando-se as (3.30c) e (3.30a) segue que:

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})\mathbf{E}\mathbf{E} \quad (3.35)$$

o tensor de rigidez secante elástica do meio danificado fica expresso na forma:

$$\tilde{\mathbf{E}} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})\mathbf{E} \quad (3.36)$$

o qual apresenta apenas a simetria menor.

Na equivalência em tensão tem-se como condição que: $\tilde{\mathbf{T}} = \mathbf{T}$. Combinando-se as (3.30c) e (3.30b) resulta:

$$\mathbf{T} = \mathbf{E}(\mathbf{II} - \mathbf{D})^T \mathbf{E} \quad (3.37)$$

e o tensor de rigidez secante elástica do meio danificado passa a ser expresso na forma :

$$\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{E}(\mathbf{II} - \mathbf{D})^T \quad (3.38)$$

que também apresenta apenas simetria menor.

3.2.7. Tensores Isotrópicos e Anisotrópicos de Rigidez Secante com Dano Escalar

Entre as possibilidades de equivalência analisadas, a de deformação expressa pela relação (3.35), tem sido a mais freqüentemente utilizada, e sobre a qual serão feitos os comentários a seguir.

Em primeiro lugar, nota-se que até o momento nada foi admitido quanto à forma do tensor de dano \mathbf{D} . Em particular, o caso de dano escalar é recuperado adotando-se para sua forma: $\mathbf{D} = d\mathbf{II}$, onde d é um escalar. Da relação (3.36) segue que:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}} &= (\mathbf{II} - d\mathbf{II})\mathbf{E} \\ &= (1-d)\mathbf{II}\mathbf{E} \\ &= (1-d)\mathbf{E} \end{aligned} \quad (3.39)$$

o que constitui uma generalização direta da relação (3.20).

O conceito de isotropia pode também estar associado à preservação das direções principais dos tensores de tensão correspondentes aos estados de meio íntegro e danificado. É o que ocorre com essa primeira particularização feita para o tensor \mathbf{D} , pois o escalar $(1-d)$ não altera as

direções principais do tensor de tensões. Mas, todas as componentes do tensor constitutivo são penalizadas igualmente por uma variável escalar de dano.

Ainda no âmbito da isotropia, ao tensor de dano pode-se dar a seguinte forma:

$$\mathbf{D} = d(\mathbf{I} \otimes \mathbf{I}) \quad (3.40)$$

onde \mathbf{I} é um tensor identidade de segunda ordem. Nessas condições a relação (3.36) fornece:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}} &= [\mathbf{II} - d(\mathbf{I} \otimes \mathbf{I})]\mathbf{E} \\ &= \mathbf{II}\mathbf{E} - d(\mathbf{I} \otimes \mathbf{E}\mathbf{I}) \end{aligned} \quad (3.41)$$

A aplicação da relação (3.41) sobre um tensor de deformações leva à seguinte expressão para o tensor de tensão do meio danificado:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= [\mathbf{II} - d(\mathbf{I} \otimes \mathbf{I})]\mathbf{E}\mathbf{E} \\ &= \mathbf{E}\mathbf{II} - d(\mathbf{I} \otimes \mathbf{E}\mathbf{I})\mathbf{E} \\ &= \mathbf{E}\mathbf{II} - d(\mathbf{E}\mathbf{I} \cdot \mathbf{E})\mathbf{I} \\ &= \mathbf{E}\mathbf{II} - d \operatorname{tr}(\mathbf{E}\mathbf{E})\mathbf{I} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Onde, $\operatorname{tr}(\mathbf{E}\mathbf{E})\mathbf{I}/3$ é por definição a parte hidrostática do tensor de tensão do meio íntegro. Então, nesse caso a danificação tem reflexo sobre a parte hidrostática do tensor de tensão e não altera as direções principais do tensor inicial; trata-se, de um caso de dano isótropo. Entretanto, observa-se que somente as componentes de tensão normal são penalizadas.

Os dois casos anteriores podem ser reunidos adotando-se para o tensor de dano a seguinte representação:

$$\mathbf{D} = d_1 \mathbf{II} + d_2 (\mathbf{I} \otimes \mathbf{I}) \quad (3.43)$$

onde d_1 e d_2 são duas variáveis escalares de dano.

Nessas condições resulta a seguinte relação para o tensor constitutivo de dano:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{E}} &= [\mathbf{II} - d_1 \mathbf{II} - d_2 (\mathbf{I} \otimes \mathbf{I})] \mathbf{E} \\ &= (\mathbf{I} - d_1) \mathbf{E} - d_2 (\mathbf{I} \otimes \mathbf{E} \mathbf{I})\end{aligned}\quad (3.44)$$

A aplicação da relação (3.44) sobre um tensor de deformações conduz à seguinte expressão para o tensor de tensão do meio danificado:

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= [(\mathbf{I} - d_1) \mathbf{II} - d_2 (\mathbf{I} \otimes \mathbf{I})] \mathbf{E} \mathbf{E} \\ &= (\mathbf{I} - d_1) \mathbf{E} \mathbf{E} - d_2 \text{tr}(\mathbf{E} \mathbf{E}) \mathbf{I}\end{aligned}\quad (3.45)$$

Definindo-se a tensão normal média como: $\sigma_m = \text{tr}(\mathbf{E} \mathbf{E})/3$ e tomando-se um caso particular em que $3d_2 = \mathbf{I} - d_1$, a expressão (3.45) passa a ser escrita na forma:

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= (\mathbf{I} - d_1) (\mathbf{E} \mathbf{E} - \sigma_m \mathbf{I}) \\ &= (\mathbf{I} - d_1) \mathbf{S}\end{aligned}\quad (3.46)$$

onde, \mathbf{S} simboliza a parte desviadora do tensor de tensões original.

Todas as formas adotadas até agora para o tensor de dano geram modelos escalares isotrópicos. Entretanto é possível propor modelos de dano escalar anisotrópicos e, nesses casos, os tensores de dano podem ser representados pela seguinte forma geral:

$$\mathbf{D} = \lambda(d) \mathbf{M} \quad (3.47)$$

onde $\lambda(d)$ é uma função de valor escalar envolvendo a variável de dano e \mathbf{M} é um tensor constante dito de anisotropia, pois seu efeito pode ser o de gerar um operador anisotrópico de rigidez secante com dano.

Concluindo, observa-se que modelos não-escalares de dano anisotrópico podem ser obtidos propondo-se para o tensor de dano a seguinte forma geral:

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}(d) \quad (3.48)$$

Onde, \mathbf{M} não é mais um tensor constante, mas dependente do nível de danificação, e d pode ser uma variável de natureza tensorial superior, de primeira ou segunda ordem.

Segundo MARCELO Jr (2004), para o dano anisotrópico, temos:

$$\tilde{\mathbf{T}} = \mathbf{M}(\mathbf{D}) : \mathbf{T} \quad (3.49)$$

Onde o símbolo ($:$) indica o produto tensorial “contraído” de 2ª ordem e $\mathbf{M}(\mathbf{D})$ é chamado de tensor efetivo de dano. E em uma análise tri-dimensional:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-D_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-D_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_1)(1-D_2)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_1)(1-D_3)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_2)(1-D_3)}} \end{bmatrix}$$

3.2.8. Variação do Módulo de Elasticidade

Segundo LEMAITRE (1996), a variável dano pode ser mensurável por meio de vários procedimentos tais como: Observação microscópica, variação de densidade, variação do módulo de Elasticidade, propagação de ondas ultra-sônicas, variação da micro-dureza e variação da resistência elétrica.

Dentre as várias formas de mensuração do dano, a da variação do módulo de elasticidade, tem sido uma das mais utilizadas. Um exemplo de aplicação desse método é apresentado por MARCELO Jr (2004), em materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro. A Figura 3.12 mostra o gráfico Dano em função da deformação desse material.

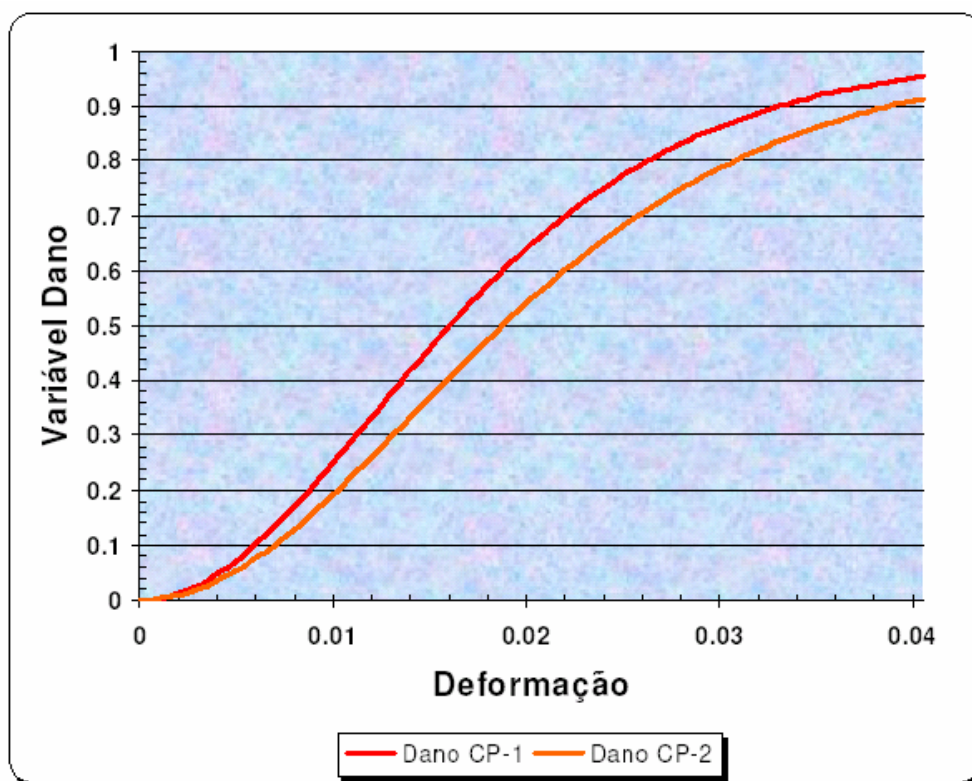


Figura 3.12 – Gráfico Dano x Deformação: material compósito polimérico reforçado por fibras de vidro (por, A. Marcelo Jr, 2004).

Esse é um método de medida indireta baseada na influência do dano na elasticidade do material, descrito na seção 3.2.4.2.

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (3.19)$$

Esse é método destrutivo que requer fabricação de corpos de prova a fim de se executar testes mecânicos. Supondo-se uniformes os danos homogêneos na medida da seção do corpo de prova.

Se $\tilde{E} = E(1-D)$, é considerado como o módulo de elasticidade efetivo do material danificado, o valor do dano pode ser obtido através de medidas de \tilde{E} , uma vez que o módulo de Young E é conhecido e:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (3.21)$$

A utilização desse método requer medidas exatas de deformação. Strain gauges são comumente usados, e \tilde{E} é medido mais exatamente durante os descarregamentos. Um exemplo é mostrado na Figura 3.13 para um dano dúctil, em cobre, induzido por grandes deformações, onde σ_v é a tensão verdadeira,

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.50)$$

Essa técnica pode ser usada para muitas formas de dano, desde que o dano seja uniformemente distribuído no volume no qual a deformação é medida, essa é a limitação principal do método. Se o dano é extremamente localizado, como em fadiga de alto ciclo de metais, por exemplo, outro método deve ser usado.

Algumas outras precauções relacionadas à não linearidades, segundo LEMAITRE (1996), devem ser consideradas. No início e no fim do trajeto do

descarregamento no plano (σ, ε) existem pequenas não linearidades, devido a efeitos viscosos ou de endurecimento e também devido aos dispositivos experimentais. É melhor ignorá-los essas regiões e identificar \tilde{E} na escala:

$$0.15 \frac{F_{\max}}{S} < \frac{F}{S} < 0.85 \frac{F_{\max}}{S}$$

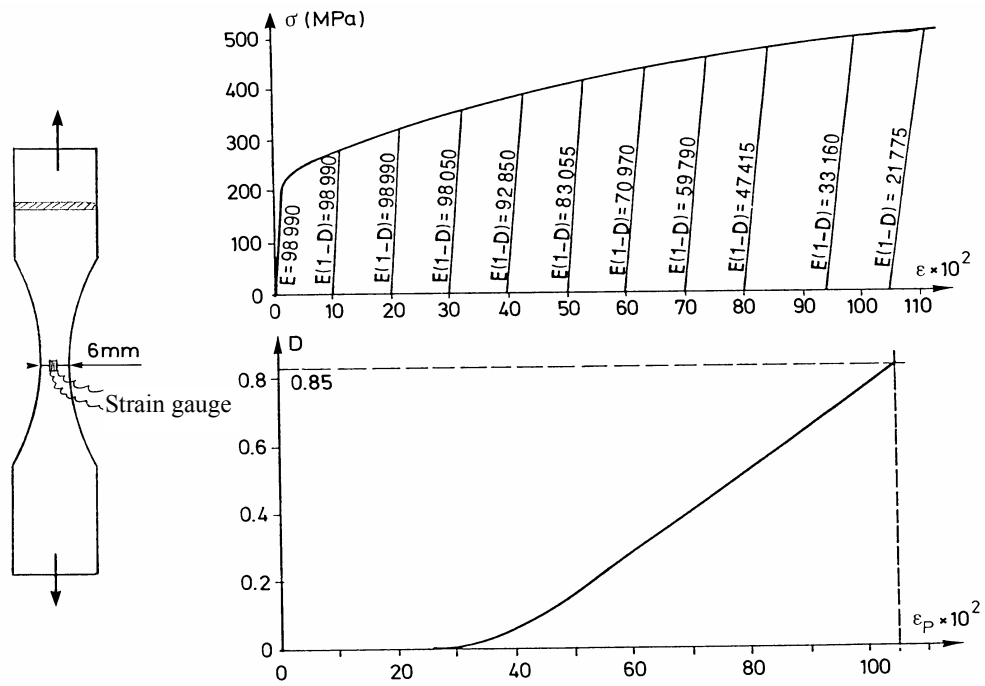


Figura 3.13 - Medida de dano dúctil em cobre 99.9% a temperatura ambiente (LEMAITRE, 1996).

É muito importante sempre usar o mesmo procedimento para avaliar E e a evolução de \tilde{E} .

Para danos dúcteis ou por fadiga de baixo ciclo em metais, o procedimento deve ser perturbado um tanto por um decréscimo precoce de

\tilde{E} em níveis baixos de deformação ou durante os primeiros ciclos. Isso é devido à micro-plasticidade relacionada aos movimentos reversíveis das discordâncias, e ao desenvolvimento de textura, mas não do dano. Como esse fenômeno é rapidamente saturado e pode-se considerar:

$$D = 0 \text{ para } \varepsilon < \varepsilon_D \text{ (deformação de início da danificação)}$$

$$D = 0 \text{ para } N < N^* \text{ (o numero de ciclos para a estabilização)}$$

Para polímeros ou compósitos, para evitar o efeito viscoso ou visco-elasticidade, a taxa de deformação durante os descarregamentos deve ser a mesma para a medida de E e \tilde{E} . Um exemplo de uma medida de dano em um compósito carbono-carbono é apresentado na Figura 3.14.

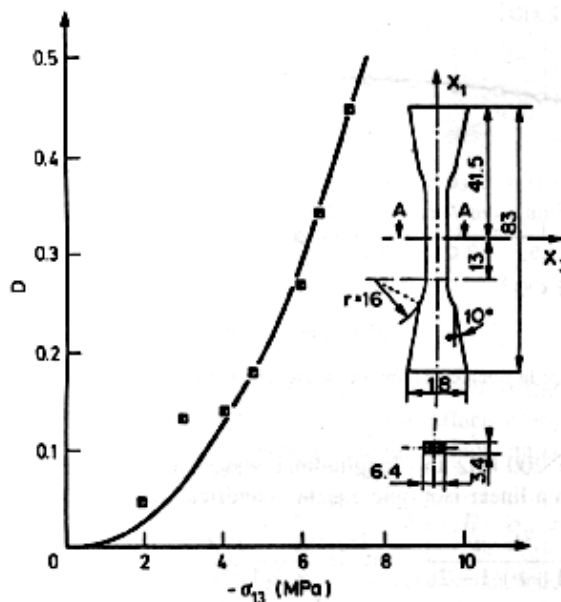


Figura 3.14 – Evolução de dano frágil em compósito carbono-carbono (LEMAITRE, 1996).

Para concreto, é importante observar a distribuição “uniforme” das trincas, pois o método não será válido se uma simples trinca grande se desenvolve. Um exemplo é mostrado dado na Figura 3.15.

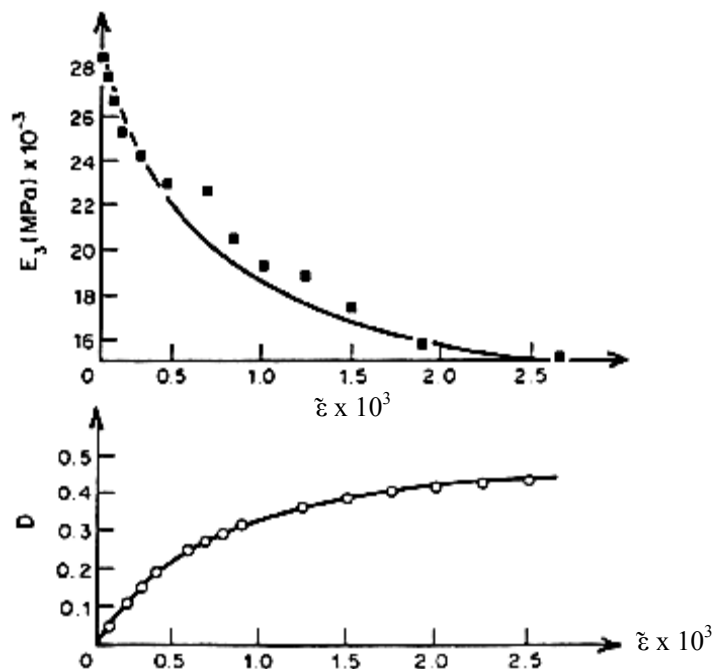


Figura 3.15 – Evolução de dano frágil em concreto submetido à compressão (LEMAITRE, 1996).

3.2.9. Critério de Ruptura

Segundo LEMAITRE, a ruptura em média escala é a iniciação de trinca a qual ocupa a superfície inteira do EVR, isto é, $D=1$. Em muitos casos isto causa um processo de instabilidade que repentinamente induz a decoesão de átomos restringindo a área restante. Isto corresponde ao valor crítico de dano (D_c), que depende do material e das condições do carregamento. A decoesão final dos átomos é caracterizado pelo valor crítico da tensão efetiva que atua sobre a área resistente. Vamos chamar esta tensão de $\tilde{\sigma}$, por que esta é a máxima tensão que pode ser aplicada ao material.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D_c} = \sigma_{\infty} \tag{3.51}$$

Particularmente, σ_{∞} pode ser aproximadamente a tensão última σ_u que é fácil de ser identificada e é sempre menor.

Então a equação:

$$D_c \approx 1 - \frac{\sigma}{\sigma_u} \quad (3.52)$$

Dá o valor crítico do dano para iniciação de uma trinca média para um estado unidimensional de tensão σ . A tensão última σ_u pode ser identificada como uma característica do material, D_c pode variar de aproximadamente zero para fratura frágil até aproximadamente um, para fratura puramente dúctil. Mas usualmente D_c assume valores entre 0.2 a 0.5.

Esta relação aplicada em ensaio com tração monotônico puro, define-se o dano crítico correspondente D_{1c} considerado para um material característico:

$$D_{1c} = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (3.53)$$

Onde σ_R é a tensão de ruptura.

A tabela 3.1 apresenta parâmetros de alguns materiais, dentre eles o dano crítico. Estes valores apresentados são apenas para se ter uma idéia de ordem de grandeza, pois eles podem variar com o modelo de dano utilizado e com as condições do material.

Tabela 3.1 – Parâmetros de alguns materiais (ordem de grandeza), por Lemaitre (1996).

Material	Temperatura (°C)	Elasticidade		Plasticidade			Dano	
		E MPa	ν	σ_f MPa	σ_y MPa	σ_u MPa	$\varepsilon_p D$	D_{1c}
Aço AISI 1010	20	190000	0,28	200	320	700	0,44	0,20
Aço Inoxidável	20	200000	0,30	180	260	700	0,10	0,15
AISI 316	600	140000	0,32	3	6	-	0	0,50
Cobre	20	100000	0,33	100	190	300	0,35	0,85
Liga de Alumínio 2024	20	2000	0,32	250	300	500	0,03	0,23
Cerâmica a base de Alumina	20	400000	0,20	300	306	500	0,10	0,99
Concreto em tensão	20	30000	0,20	1,5	2,5	3	0	0,20

Capítulo 4

Análise Experimental

4.1. INTRODUÇÃO

A parte experimental consiste na realização de ensaios de corrosão acelerados e ensaios mecânicos de tração. Em ambos os ensaios são utilizadas amostras de barras de aço CA-50A (Vergalhão GG 50 fabricado pela Gerdau), com o objetivo de analisar a influência da corrosão no processo de danificação dessas barras. Assim, foram realizados ensaios de tração em amostras de barras de aço CA-50A (Figura 4.1) “íntegras”, ou seja, não submetidas á corrosão, as quais foram definidas como amostras padrão. Outras amostras foram, inicialmente, submetidas a ensaio de corrosão acelerado: Salt Spray (exposição à névoa salina) e “Pilha eletroquímica”.

As amostras submetidas ao ensaio Salt Spray são semelhante às amostras padrão. Já as amostras que foram submetidas ao outro ensaio de corrosão (“Pilha eletrolítica”) são amostras aço/concreto, isto é, barras de

aço CA-50A embutidas em cilindros de concreto, como apresentado na Figura 4.2.



Figura 4.1 – Corpos-de-prova de aço CA-50A.

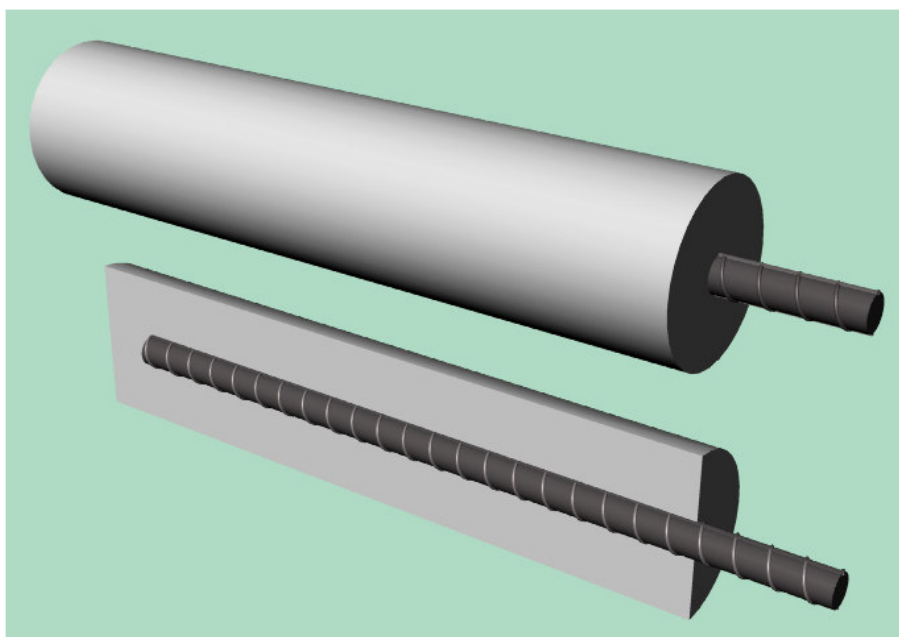


Figura 4.2 - Modelo de corpo-de-prova, aço/concreto, para ensaio de corrosão acelerado.

Após o ensaio de corrosão das amostras aço/concreto, as barras de aço são retiradas do interior do concreto para serem submetidas a ensaio de tração.

4.2. Análise Metalográfica do Aço CA-50A

Para análise metalográfica foram retiradas amostras de aço CA-50A e embutidas a quente em baquelite, seguida de polimento em papel de carbetto de silício em granulometria decrescente, lixas de 200 à 1200, prosseguindo o polimento com pasta de diamante com granulometria de 6 μm à 1 μm . Essas amostras foram atacadas com solução de nital à 0,3%, em seguida analisadas em microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30 acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva de raios-X (EDX) Link Analytical QX-2000.

A Figura 4.3 apresenta uma micrografia do centro da amostra, onde pode-se observar que esta tem uma microestrutura composta por perlita e ferrita com a presença de algumas inclusões.

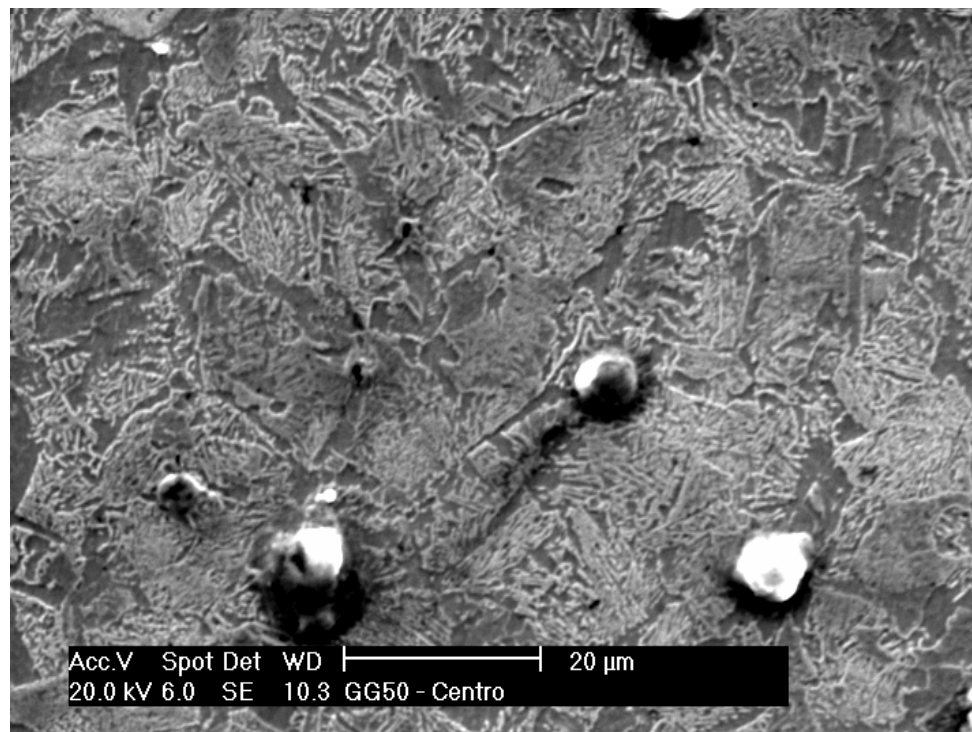


Figura 4.3 – Microestrutura do aço CA-50A, centro da amostra.

Também foi selecionada a região próxima à superfície da amostra, onde, observa-se que esta apresenta uma microestrutura martensítica. Essa microestrutura é apresentada na Figuras 4.4.

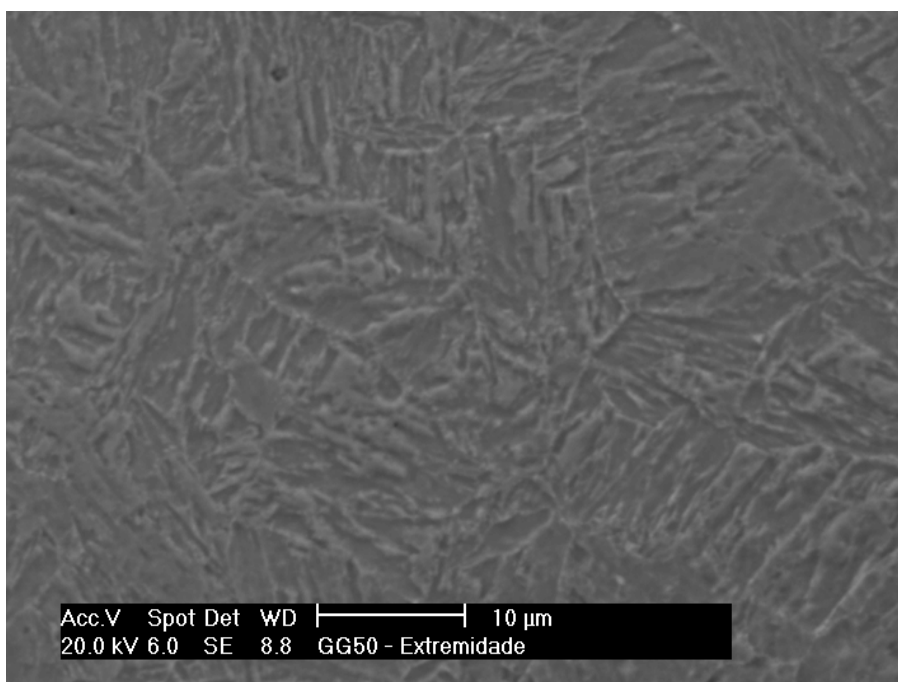


Figura 4.4 – Microestrutura do aço CA-50A, próximo à superfície da amostra.

Foram realizados ensaios de dureza, onde, observou-se que o vergalhão é composto de um núcleo de menor dureza (média 275 HV), com uma microestrutura composta de perlita e ferrita, e de uma pequena região próxima à superfície com dureza que varia de 327 HV à 275 HV (275 HV é a dureza na superfície da amostra), com uma microestrutura martensítica.

4.3. Preparação das amostras

Inicialmente foram preparados 39 corpos-de-prova de barra de aço CA-50A com diâmetro nominal de 10 mm e comprimento total (L_t) de 220 mm. sendo L_c , distância entre as garras da máquina em ensaio de tração, igual a 100 mm, determinado segundo as normas NBR 7480 (1996) – barras e fios de aço destinado a armaduras para concreto armado e NBR ISO 6892

(2002) – Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Estes corpos-de-prova estão ilustrados na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Amostras de barras de aço CA-50A.

A Tabela 4.1, apresenta a descrição e distribuição desses corpos-de-prova de acordo com os tipos de ensaios as quais foram submetidas.

Tabela 4.1 – Distribuição das amostras por tipo de ensaio.

Amostras (Nº)	Definição
01 a 06	Amostras padrão – serão submetidas apenas ao ensaio de tração.
07 a 27	Amostras Tipo 1 – serão inicialmente expostas corrosão (Ensaio de Salt Spray) e em seguida ao ensaio de tração.
28 a 39	Amostras Tipo 2 - serão embutidas em concreto, em seguida submetidas ao ensaio de corrosão acelerado (“Pilha eletrolítica”) e posteriormente retiradas do concreto e realizado o ensaio de tração.

4.3.1. Confeção dos Corpos-de-prova de aço/concreto

Para a confecção das amostras de aço/concreto, foram utilizadas formas em tubo PVC com 50 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento, Figura 4.6. Tendo a barra de aço 10 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento, esta, centralizada na forma tem-se um cobrimento de 20 mm, que é maior que o mínimo (15 mm) permitido em poste de concreto armado, segundo a norma NBR 8451 - especificação de poste de concreto armado utilizado na rede de distribuição de energia.



Figura 4.6(a) – Forma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova de aço/concreto.



Figura 4.6(b) – Vista de topo da forma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova de aço/concreto.

Na confecção dos corpos-de-prova, utilizou-se o traço (1:2,5:3) com relação água/cimento (a/c) igual a 0,8. A quantidade de cada material utilizada para a moldagem dos corpos de prova foi a seguinte:

- 6,8 kg de cimento
- 17,0 kg de areia
- 20 kg de brita
- 5,44 l de água

O procedimento para a mistura dos agregados, cimento e área foram o seguinte: inicialmente, realizou-se a pesagem da areia, da brita, do cimento e da água, todas de acordo com traço do concreto anteriormente especificado. Em seguida, com a betoneira ligada (Figura 4.7), inicialmente colocou-se uma parte da água, depois a brita e em seguida o cimento. Após 5 minutos, adicionou-se o restante de água e acrescentou a areia.



Figura 4.7 – Mistura dos agregados.

Após a mistura dos agregados, cimento e água, com betoneira, os corpos-de-prova foram moldados utilizando o seguinte procedimento:

- Depois de centralizadas as barras de aço nas formas, estas foram para uma mesa vibratória. Com a mesa vibratória ligada, foi colocando-se argamassa, em pequenas camadas, em intervalos de tempo de 3 minutos, de tal forma a permitir a moldagem destes sem “bicheiras”;
- Após a moldagem, os corpos-de-prova foram colocados em um ambiente climatizado á temperatura de 22°C, permanecendo neste por 24 horas, quando foram retirados os moldes e em seguida as amostras (Figura 4.8) foram mergulhadas em um tanque com água por 28 dias.



Figura 4.8 – Corpo de prova de aço/concreto.

- Também, foram moldados 3 corpos-de-prova de concreto cilíndricos de 100 mm de diâmetro com 200 mm de comprimento (Figura 4.9(a)), que foram utilizados para determinar a resistência à compressão do concreto utilizado nas amostras de aço-concreto. Após 60 dias da moldagem, estes foram submetidos a ensaio de compressão, Figura 4.9(b), e apresentaram uma resistência à compressão (f_{ck}) média de 12,5 MPa.



Figura 4.9(a) – Corpos-de-prova de concreto, utilizados para a determinar da resistência à compressão do concreto utilizados na confecção das amostras aço-concreto.



Figura 4.9(b) – Ensaio de compressão realizado para determinar a resistência à compressão característica (f_{ck}) do concreto.

4.4. Ensaio de Corrosão

4.4.1. Ensaio de Salt Spray

O método de ensaio mais simples para avaliar a corrosão (efeito dos íons agressivos) em concreto armado, é a exposição em atmosferas agressivas por tempo prolongado de amostras de concreto, com aço embutido, preparados em laboratório. Entretanto, este teste pode levar vários anos para retratar claramente o comportamento do aço. Métodos alternativos têm sido desenvolvidos e utilizados quando informações sobre processo de corrosão precisam ser obtidas em curto espaço de tempo ou quando se deseja informações rápidas sobre as tendências associadas a uma variável particular que é alterada enquanto outras permanecem constantes.

Um ensaio muito utilizado é o Salt Spray, exposição à névoa salina. Esse ensaio têm sido utilizado desde os anos 70 como ensaio de corrosão acelerado, com a finalidade de avaliar novos revestimentos metálicos, novas tintas, bem como testar variados tipos de tratamentos químicos e tratamento prévio de tintas para o uso como produto de revestimento de chapa ou folhas de aço.

Este ensaio é muito utilizado para simular atmosfera marinha. Várias experiências têm mostrado que embora este teste tenha apresentado resultados um tanto similares a aqueles expostos á atmosfera marinha, ele não reproduz todos os fatores que estão envolvidos no ambiente marinho, muito menos em diferentes condições de exposição. A validade deste teste para um dado material, depende da extensão para a qual uma correlação tenha sido estabelecida, entre os resultados do teste e o comportamento das condições de serviço esperado.

Após a confecção das amostras Tipo 1, elas foram submetidas a ensaio de corrosão acelerado, em câmara de Corrosão (Figura 4.10), na Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial – NUTEC.



Figura 4.10(a) – Câmara de ensaio de corrosão acelerado, Salt Spray, da Divisão de Química do NUTEC.



Figura 4. 10(b) – Amostras de aço e aço-concreto no interior da câmara de corrosão, após 5 dias de exposição.

O ensaio de corrosão foi realizado conforme a NBR 8094 – material metálico revestido e não revestido corrosão por exposição á névoa salina, e a norma ASTM 117, ou seja, utilizou-se uma solução de 5% cloreto de sódio (NaCl) com pH entre 6,5 a 7,2 e a temperatura na zona de exposição da câmara, foi mantida á (35 ± 2) °C.

Após a preparação da solução e feito os ajustes da câmara conforme as normas citadas anteriormente, e identificadas às amostras, estas foram colocadas na câmara de corrosão. Foi feito um acompanhamento da corrosão através de inspeção visual periodicamente, e após 504 horas de exposição observou-se que a corrosão das amostras do Tipo 1 já teria influência perceptiva, quando da realização do ensaio mecânico de tração. Então, com 504 horas de exposição foi retirada as duas primeiras amostras para a realização do ensaio mecânico.

As outras amostras do Tipo 1, foram tiradas da câmara de corrosão com a quantidade de horas de exposição conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tempo de exposição à névoa salina das amostras na câmara de corrosão.

Amostra Tipo 1	Tempo de Exposição (em horas)
7 E 8	504
9 E 10	936
11 E 12	1848
13 E 14	2016
15 E 16	2376
17 E 18	2472
19 E 20	2712
21 E 22	2904
23 , 24 E 25	3216
26 E 27	3528

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram fotos das amostras que foram expostas na câmara de corrosão por 1848 horas e 3216 horas, respectivamente. Pode-se observar que com 3216 horas de ensaio de Salt Spray as amostras estão bastante corroídas.



Amostra 11



Amostra 12

Figura 4.11 – Amostras 11 e 12, após 1848 horas de exposição na câmara de corrosão.



Amostra 23

Amostra 24

Figura 4.12(a) – Amostras 23 e 24, após 3216 horas de exposição na câmara de corrosão

Após o ensaio de corrosão, foi removida a camada oxidada, feita a pesagem dessas amostras, onde se observou uma redução percentual média da massa de 22%. Estas amostras após a remoção da camada oxidada são mostradas na Figura 4.12(b)



Figura 4.12(b) – Amostras 23 e 24, após remoção do produto da corrosão.

4.4.2. Ensaio de Corrosão Acelerado “Pilha Eletrolítica”

Tendo em vista que as barras das amostras aço/concreto submetidas ao ensaio de Salt Spray, não apresentaria corrosão significativa para o tempo disponível para a realização deste trabalho, utilizou-se um Método de ensaio de corrosão acelerado (Pilha Eletroquímica) que é fundamentado nas três condições básicas necessárias para que o processo de corrosão se desenvolva, apresentado na seção 3.1:

- Existência de um eletrólito;
- Diferencia de potencial de eletrodo;
- Presença de oxigênio.

Além das condições básicas citadas, podem ter a presença de agentes agressivos como o dióxido de carbono e os íons cloretos.

Portanto, para acelerar o processo de corrosão foi utilizado como eletrólito uma solução 0,6 molar de cloreto de sódio (com concentração salina de 3,5%, aproximadamente a mesma da água do mar), como diferença de potencial foi utilizada uma fonte com potencial constante de 60V. O sistema utilizado esta esquematicamente apresentado na Figura 4.13.

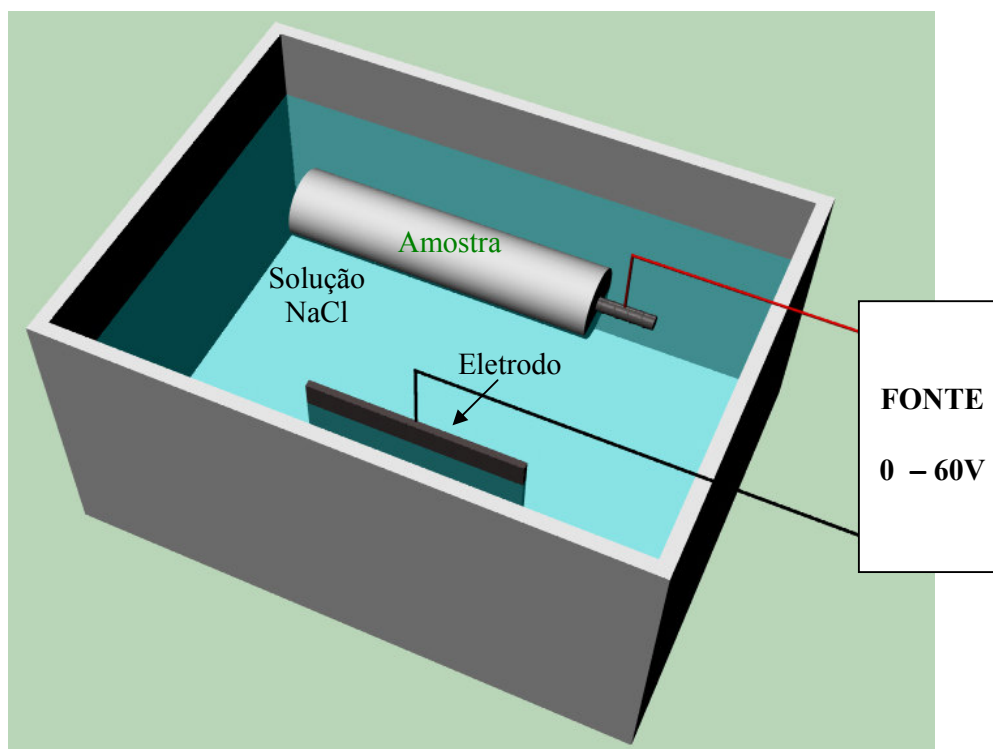


Figura 4.13 - Esquema do ensaio de corrosão acelerado, “Pilha eletroquímica”.

Na figura 4.13, tem-se um recipiente contendo uma solução 0,6 molar de cloreto de sódio, onde está parcialmente imersa uma amostra aço/concreto e um eletrodo. À barra de aço embutida no concreto é conectada a um dos terminais da fonte de alimentação, de potencial constante (60V), o outro terminal é ligado ao eletrodo imerso na solução. Assim, entre a barra de aço e a solução fica estabelecida uma diferença de potencial de 60V.

Na Figura 4.14, apresenta-se uma amostra após 11:30 horas de ensaio. Nesta figura pode-se observar que o concreto já apresenta fissuras ocasionadas pela expansão do produto da corrosão.



Figura 4.14 (a) - Amostra aço/concreto após 11:30 horas.



Figura 4.14 (b) - Barra de aço depois de retirada do concreto.

A duração dos ensaios das demais amostras esta apresentada na tabela seguinte.

Tabela 4.3 – Tempo de duração do ensaio de corrosão “Pilha Eletrolítica”

Amostras	Tempo de ensaio
28 e 29	7:30 h
30 e 31	8:30 h
32 e 33	9:30 h
34 e 35	10:30 h
36 , 37 e 38	12:00 h

4.5. Ensaio de tração

Com o objetivo de obter a evolução do dano através da variação do módulo de elasticidade, conforme a equação 3.21 escrita por LEMAITRE, das amostras “íntegras” (sem corrosão) e das amostras submetidas à corrosão, foram realizados ensaios mecânicos de tração convencional e ensaios de tração com carregamento e descarregamento.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para a sua realização utilizou-se uma máquina universal de ensaios da marca MTS, modelo 810 Material Test System, Figura 4.15.



Figura 4.15 – Ensaio de tração em corpo-de-prova de aço CA-50A.

4.5.1. Ensaio de Tração Convencional

Inicialmente, foram realizados 03 ensaios de tração convencional em amostras não expostas a corrosão para determinar algumas propriedades mecânicas do material como módulo de elasticidade, tensão e deformação de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura e deformação máxima. O conhecimento dessas características do material em estudo, CA-50A, é

importante para a realização do ensaio de tração com carregamento e descarregamento.

Na realização de todos os ensaios de tração foram utilizados CLIP GAGE da marca MTS, como ilustrado na figura 4.16.



Figura 4.16 – Ensaio de tração em corpo-de-prova de aço CA-50A: Visualização do CLIP GAGE utilizado.

A Figura 4.17, mostra o gráfico de tensão e função da deformação da amostra 01 (não exposta à corrosão).

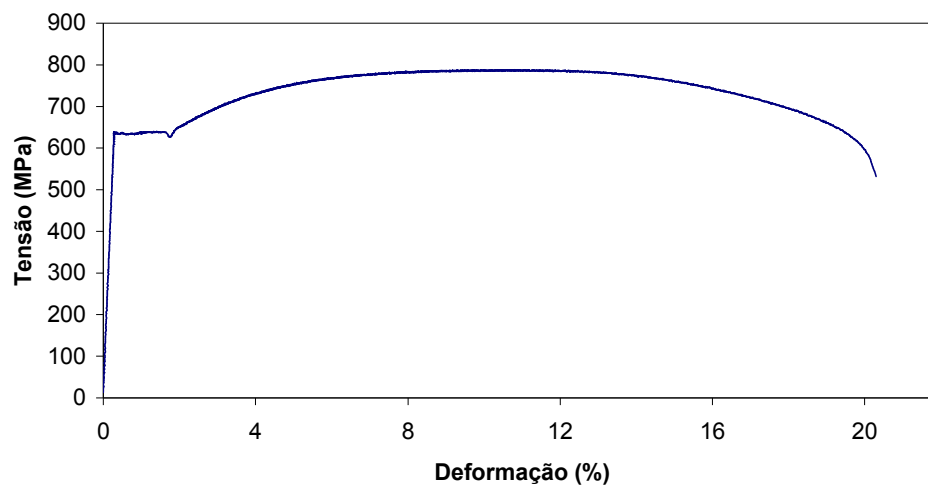


Figura 4.17 – Gráfico Tensão x Deformação: aço CA-50A (Sem corrosão).

Com a realização dos ensaios dos 03 corpos-de-prova determinou-se:

Modulo de Elasticidade: 210,3 GPa

Tensão de escoamento: 642 MPa

Tensão máxima: 782 MPa

Deformação no escoamento (%): 0,38

Deformação máxima (%): 20

4.5.2. Ensaio de tração com carregamento e descarregamento

Este ensaio tem como objetivo obter o módulo de elasticidade em função da deformação, e assim, determinar a evolução do dano, para todas as amostras, padrão (não submetidas à corrosão) e as que foram expostas à corrosão.

Esse ensaio consiste na aplicação de um carregamento até uma deformação 0,2%, seguida de descarregamento, recarregamento até 1% e descarregamento, procedendo-se sucessivos carregamentos e descarregamento conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Procedimento de aplicação de sucessivos carregamento e descarregamento.

Ciclo	Carregamento até a deformação (%)	Descarregamento até a carga
1	0,20	0
2	1,0	0
3	2,0	0
4	3,5	0
5	5,0	0
6	6,5	0
7	8,0	0
8	9,5	0
9	11,0	0
10	12,5	0
11	14,0	0
12	15,5	0
13	17,0	0
14	18,5	0
15	Ruptura	

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5.1. Resultados dos Ensaios de Tração com Carregamento-descarregamento

Conforme descrito no Capítulo 4 deste trabalho, após os ensaios de corrosão as amostras foram submetidas ao ensaio de tração com carregamento-descarregamento. Neste Capítulo são apresentados resultados dos ensaios de tração de algumas das amostras do Tipo 1 e do Tipo 2.

Também é feita uma análise desses resultados, onde se pode observar que nestas amostras ocorrem uma perda de resistência mecânica e elasticidade em decorrência da corrosão. Isto ocorre por causa da danificação do material devido á corrosão.

5.1.1. Resultados das Amostras Tipo 1 que foram submetidas ao ensaio de Salt Spray

– Corpo-de-prova 04 (Sem corrosão)

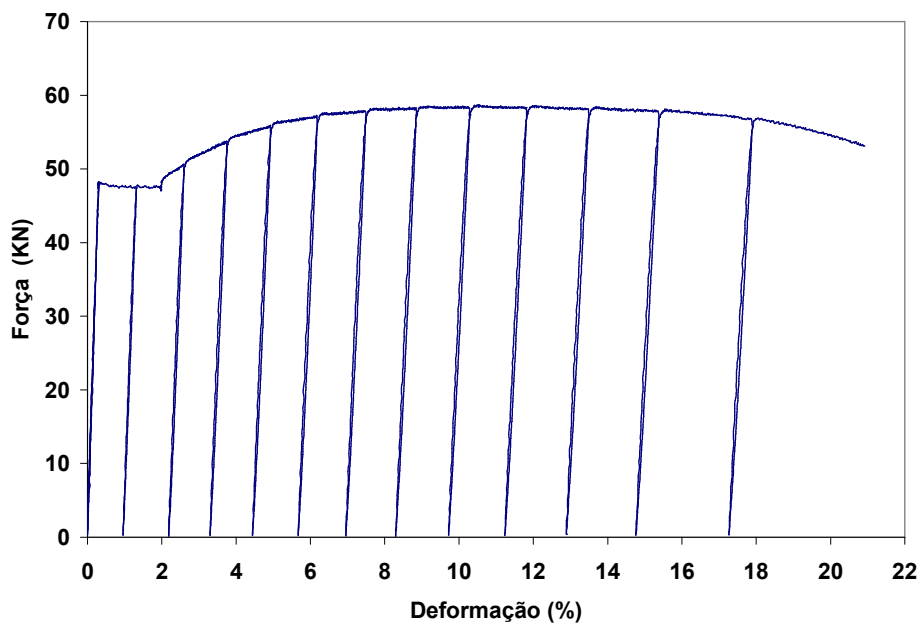


Figura 5.1 – Força x deformação: corpo-de-prova não submetido à corrosão.

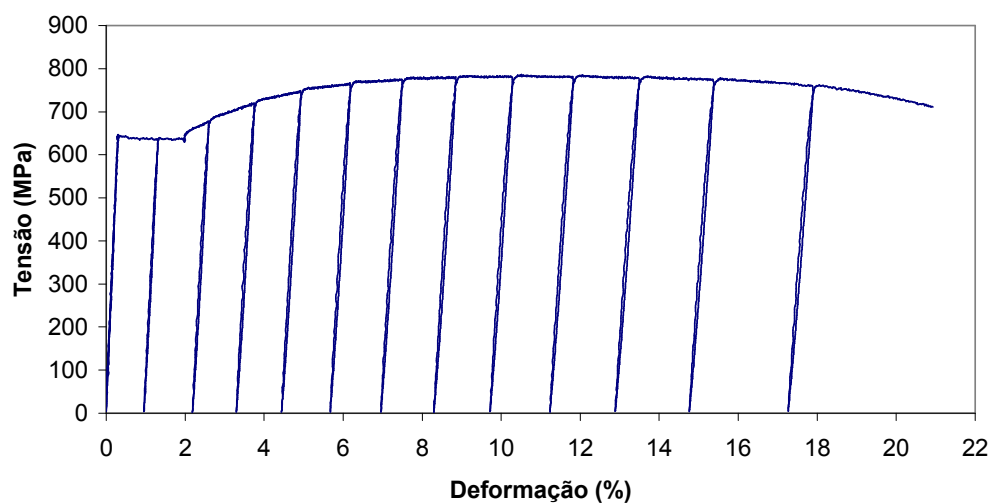


Figura 5.2 – Tensão x deformação: corpo-de-prova não submetido à corrosão.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de tração (carregamento-descarregamento) do CP04.

F_e (N)	F_m (N)	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	ε_e (%)	ε_r (%)	E_0 (GPa)
47430	58494	636	782	0,30	20,5	210,3

Onde:

F_e – Carga no escoamento;

F_m – Carga máxima;

σ_e – Tensão de escoamento;

σ_m – Tensão máxima;

ε_e – Deformação no início do escoamento;

ε_r – Deformação na ruptura;

E_0 - Modulo de elasticidade obtido no primeiro carregamento.

– **Corpo-de-prova 13 (com 2016 h de ensaio de salt spray)**

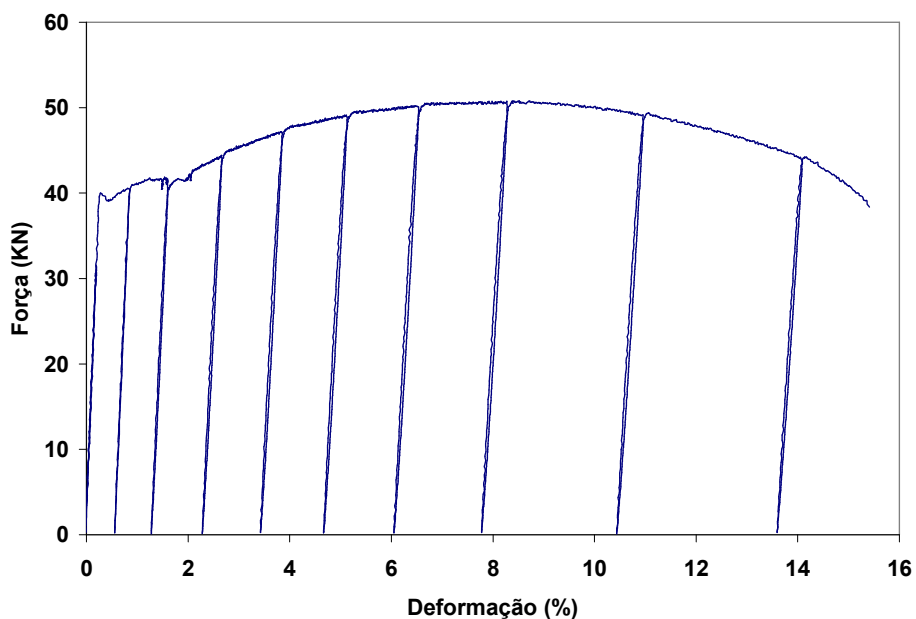


Figura 5.3 – Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2016 h.

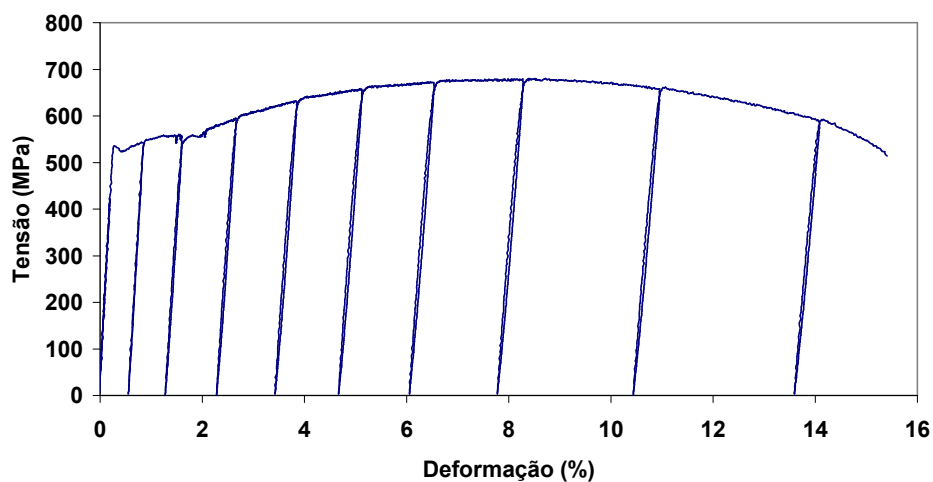


Figura 5.4 – Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2016 h.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de tração (carregamento-descarregamento) do CP13.

F_e (N)	F_m (N)	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	ϵ_e (%)	ϵ_r (%)	E_0 (GPa)
39535	50050	525	677	0,27	15,4	193,8

– **Corpo-de-prova 16 (com 2376 h de ensaio de salt spray)**

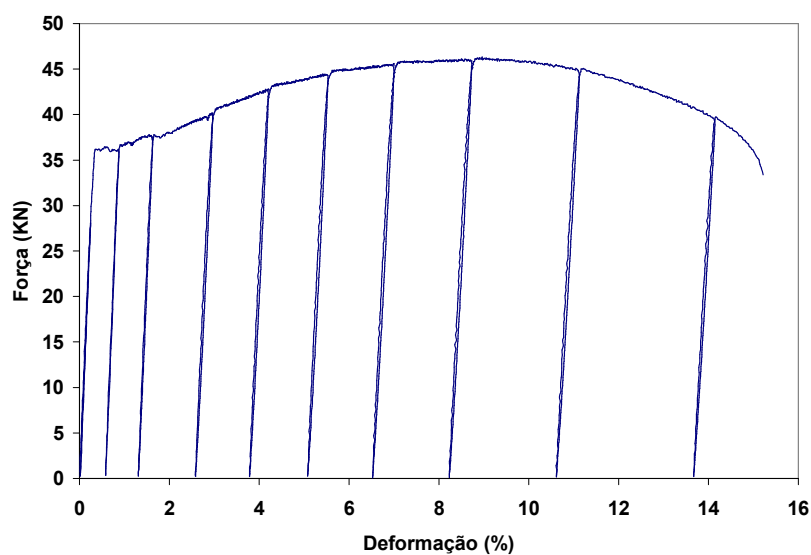


Figura 5.5 – Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2376 h.

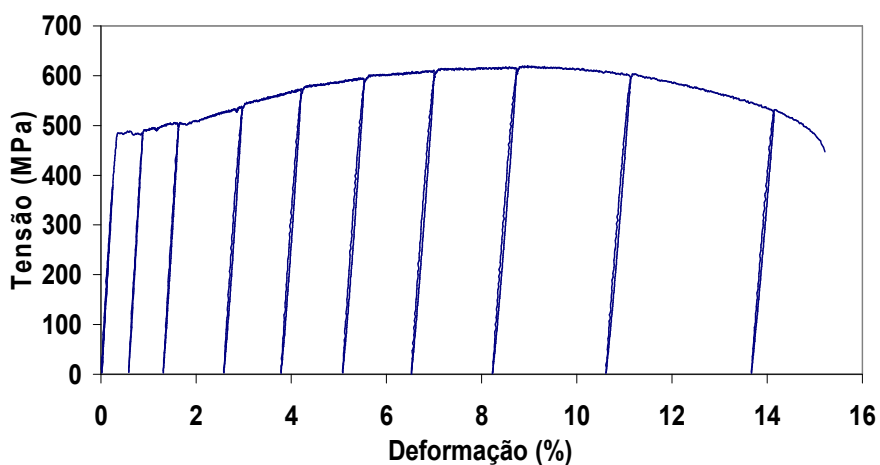


Figura 5.6 – Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2376 h.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) do CP16.

F_e (N)	F_m (N)	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	ϵ_e (%)	ϵ_r (%)	E_0 (GPa)
36034	46077	482	616	0,3	15	166,7

– **Corpo-de-prova 21 (com 2904 h de ensaio de salt spray)**

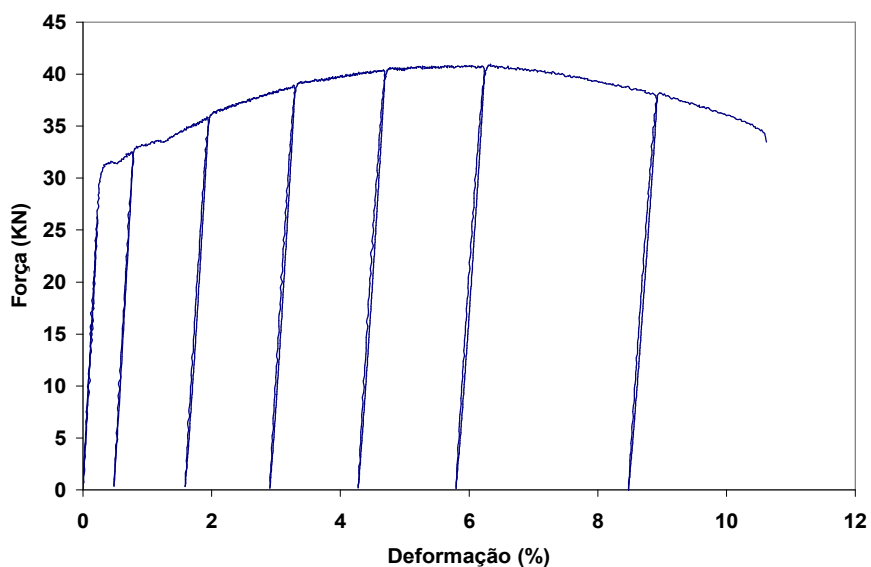


Figura 5.7 – Força x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2904 h.

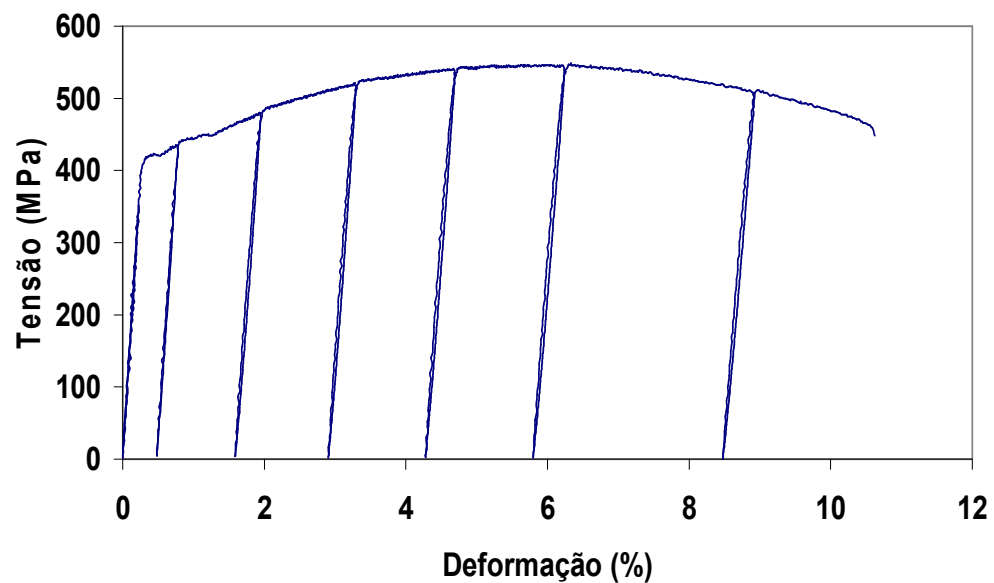


Figura 5.8 – Tensão x deformação: corpo-de-prova exposto à corrosão por 2904 h.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) do CP21.

F_e (N)	F_m (N)	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	ε_e (%)	ε_r (%)	E_0 (GPa)
31392	40515	420	541	0,26	10,6	153,1

5.1.2. Resultados dos Ensaios de Tração das Amostras Tipo 2, que Foram Submetidas ao Ensaio de Corrosão “Pilha Eletrolítica”

– Corpo-de-prova 28 (7:30 h)

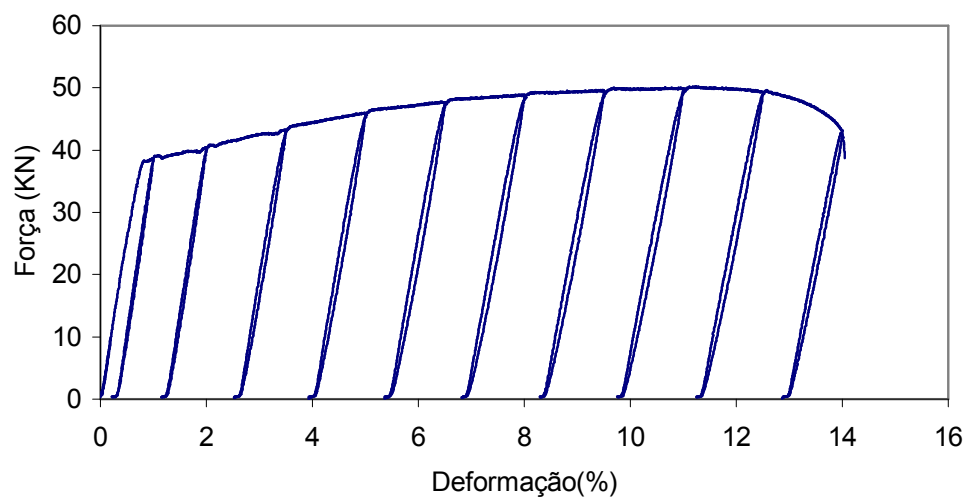


Figura 5.9 – Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 7:30 h.

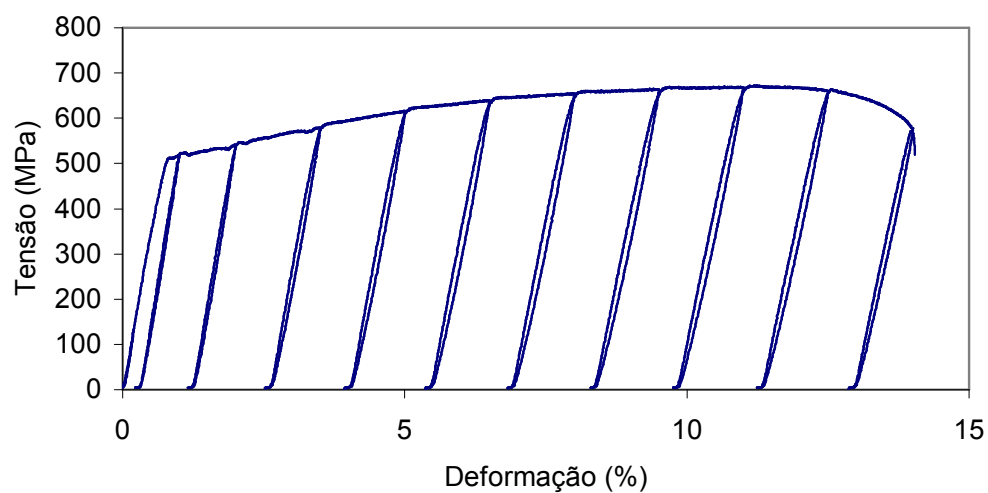
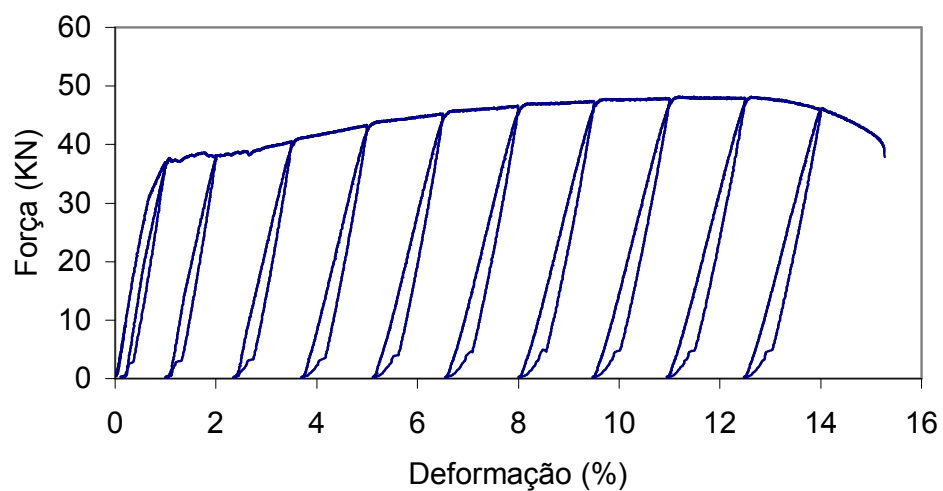
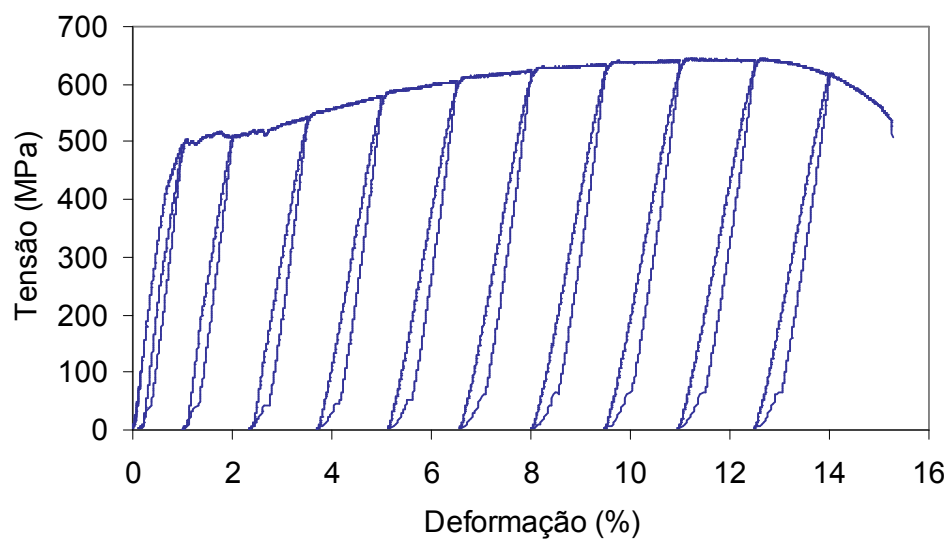


Figura 5.10 – Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 7:30 h.

– **Corpo-de-prova 33 (9:30 h)****Figura 5.11** – Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 9:30 h.**Figura 5.12** – Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 9:30 h.

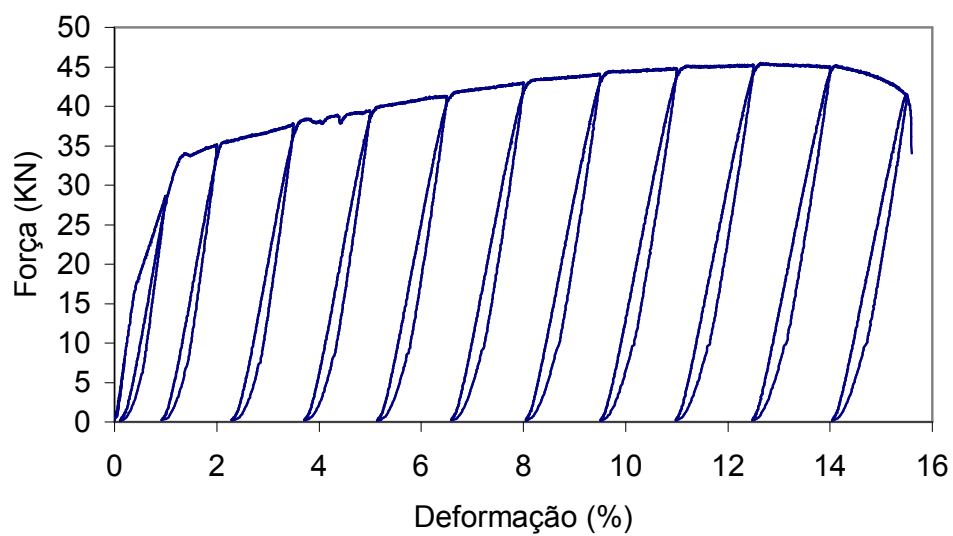
– **Corpo-de-prova 35 (10:30 h)**

Figura 5.13 – Força x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 10:30 h.

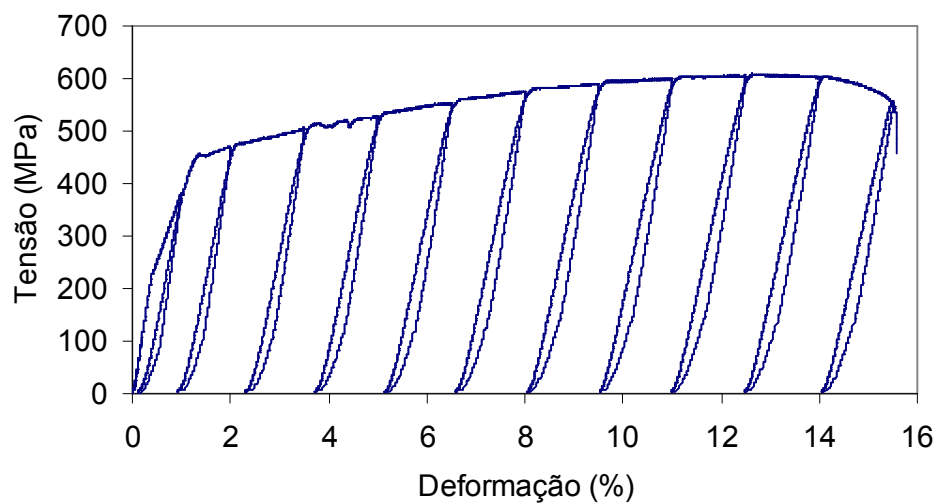


Figura 5.14 – Tensão x deformação: corpo-de-prova submetido à corrosão por 10:30 h.

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de tração (com carregamento-descarregamento) das amostras que foram submetidas ao ensaio de corrosão “pilha eletrolítica”

Amostras	F_e (N)	F_m (N)	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)
CP04 (Sem corr)	47430	58494	636	782
CP28 (7:30 h)	38212	50232	510	672
CP33 (9:30 h)	37296	48151	497	644
CP35 (10:30 h)	33918	45487	451	609
CP38 (12 h)		45865		614

5.2. Modelo Matemático de Dano

Seja S , a área da seção transversal do elemento da Figura 5.15 na situação (3), S_{Dc} a área dos defeitos devido à corrosão e S_{Dm} a área dos defeitos provenientes de solicitações mecânicas e outras naturezas.

Então, a área total dos defeitos (S_D) é:

$$S_D = S_{Dc} + S_{Dm} \quad (5.1)$$

Considere \tilde{S} como sendo a área íntegra (área que efetivamente resiste aos esforços) da seção S considerada. Então a área dos defeitos (S_D) é:

$$S_D = S - \tilde{S} \quad (5.2)$$

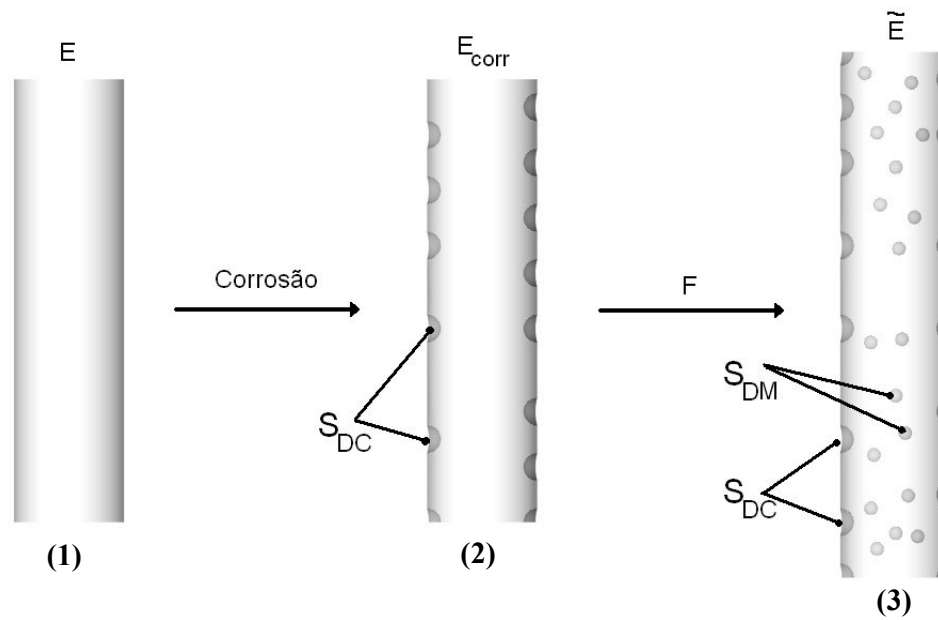


Figura 5.15 – Representação esquemática, simplificada, da danificação devido à corrosão e a um carregamento mecânico.

Por definição, LEMAITRE & CHABOCHE (1985) , o dano caso associado a um plano de normal n , é definido como:

$$D = \frac{S_D}{S} \tag{5.3}$$

Mas, seguindo o mesmo procedimento de LEMAITRE, descrito na seção 3.2.4, obtém-se:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}_0}{E} \right) \tag{5.4}$$

Onde:

E - é o módulo de Young;

\tilde{E}_0 - é o módulo de elasticidade obtido no primeiro carregamento.

Mas, sabe-se que:

$$S_D = S_{Dc} + S_{Dm}$$

Assim, a equação 5.3 pode ser escrita na forma:

$$D = \frac{S_{Dc}}{S} + \frac{S_{Dm}}{S}$$

A função **D**, na forma escrita anteriormente, representa a soma do dano devido à corrosão (D_{Corr}) e a um carregamento mecânico (D_M):

$$D = D_{Corr} + D_M \quad (5.5)$$

Então,

$$D_{Corr} = 1 - \left(\frac{E_{corr}}{E} \right) \quad (5.6)$$

D_{Corr} é função da corrosão (meio corrosivo, concentração dos íons agressivos, do tempo de exposição etc.) e pode ser quantificado por meio da redução do módulo de elasticidade devido à corrosão, sendo este obtido no primeiro carregamento.

Da equação 5.5, tem-se:

$$D_M = D - D_{Corr} \quad (5.7)$$

Substituindo as equações 5.4 e 5.6, na equação anterior obtém-se:

$$\begin{aligned} D_M &= 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E} \right) - \left(1 - \frac{E_{corr}}{E} \right) \\ D_M &= \frac{E_{corr}}{E} - \frac{\tilde{E}}{E} \\ D_M &= \frac{E_{corr} - \tilde{E}}{E} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Mas, no primeiro carregamento tem-se:

$E_{corr} = E_0$ e também $\tilde{E} = E_0$, onde E_0 é o módulo de elasticidade obtido no início do primeiro carregamento, portanto as equações 5.6 e 5.8 podem ser reescrita na forma:

$$D_{Corr} = 1 - \left(\frac{E_0}{E} \right) \quad (5.9)$$

$$D_M = \frac{E_0 - \tilde{E}_0}{E} \quad (5.10)$$

D assume valores contidos no intervalo $0 \leq D \leq 1$, D é igual a 0 para o material integro e igual a 1 para o material totalmente danificado.

D_{Corr} e D_M podem assumir valores contidos no intervalo 0 e 1.

Observa-se que para o material sem corrosão $E_0 = \tilde{E}$, então:

$$D_M = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (5.11)$$

5.3. Determinação da Evolução do Dano

Com o histórico de carregamento versus deformação, obtidos nos ensaios com carregamento-descarregamento, determinou-se o módulo de elasticidade para cada descarregamento. Na determinação dos módulos de elasticidade foram tomadas algumas precauções relacionadas à não linearidades no início e no fim do trajeto do descarregamento. Esta não linearidade, segundo LEMAITRE (1996), ocorre devido a efeitos viscosos ou de endurecimento e também devido aos dispositivos experimentais.

Portanto, os módulos de elasticidade foram obtidos através da determinação do coeficiente angular da curva tensão versus deformação em cada descarregamento para o intervalo de tensão 150 a 250 MPa. Para

obter o módulo de elasticidade, foi feito um gráfico tensão versus deformação para cada descarregamento para o intervalo de tensão citado anteriormente. Após traçar este gráfico foi feita uma regressão linear, então, determinou-se o coeficiente angular da reta (módulo de elasticidade), como mostrado na Figura 5.16.

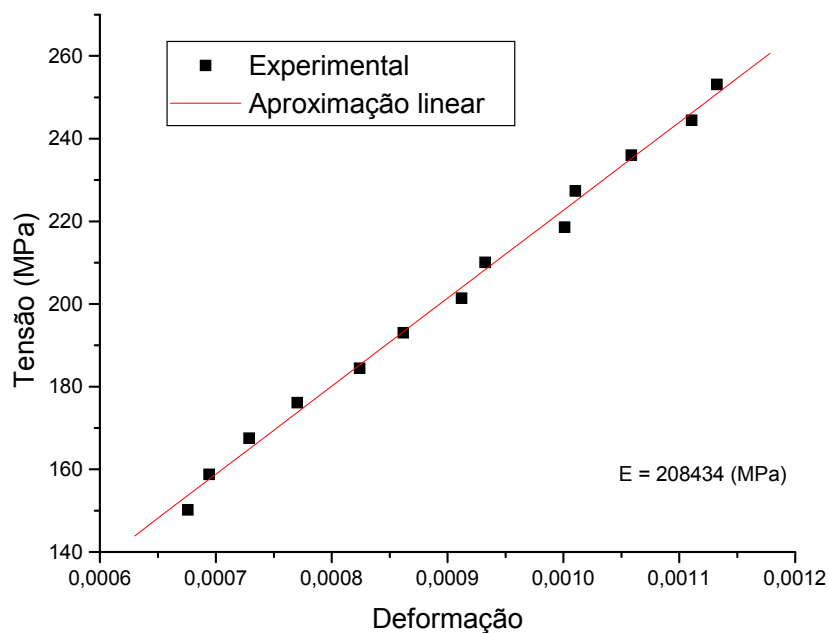


Figura 5.16 – Gráfico tensão x deformação no primeiro descarregamento, aço CA-50A não submetido à corrosão.

Utilizou-se o mesmo procedimento para os demais descarregamentos e corpos-de-prova ensaiados. Com a determinação do módulo de elasticidade em cada descarregamento, calculou-se o dano através da equação 5.4:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}_0}{E} \right)$$

Onde:

E - é o módulo de elasticidade da amostra não submetida à corrosão, obtido no primeiro carregamento;

\tilde{E} - é o módulo de elasticidade obtido nos sucessivos descarregamentos.

– **Corpo-de-prova 04 (sem corrosão)**

Tabela 5.6 – Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento

Descarregamento	E (MPa)	D	ϵ (%)	ϵ_p (%)
1°	210264,4*	0	0	0
2°	208434	0,008705	0,203	0
3°	198940,4	0,053856	0,300	0
4°	170438,8	0,189407	1,316	0,960
5°	155964,2	0,258247	2,600	2,184
6°	147052	0,300633	3,749	3,298
7°	142155,2	0,323922	4,923	4,442
8°	136350,4	0,351529	6,161	5,672
9°	135489,5	0,355623	7,486	6,957
10°	130895,7	0,377471	8,900	8,297
11°	127626,4	0,393019	10,280	9,717
12°	123429,9	0,412978	11,803	11,240
13°	119620,3	0,431096	13,483	12,890
14°	116516,5	0,445857	15,374	14,770
15°	111768,2	0,468440	17,886	17,268

* Obtido no primeiro carregamento

Onde:

E – módulo de elasticidade;

D – dano, obtido através da aplicação do modelo de Lemaitre;

ϵ – deformação no início do descarregamento;

ϵ_p - deformação no final do descarregamento (deformação plástica).

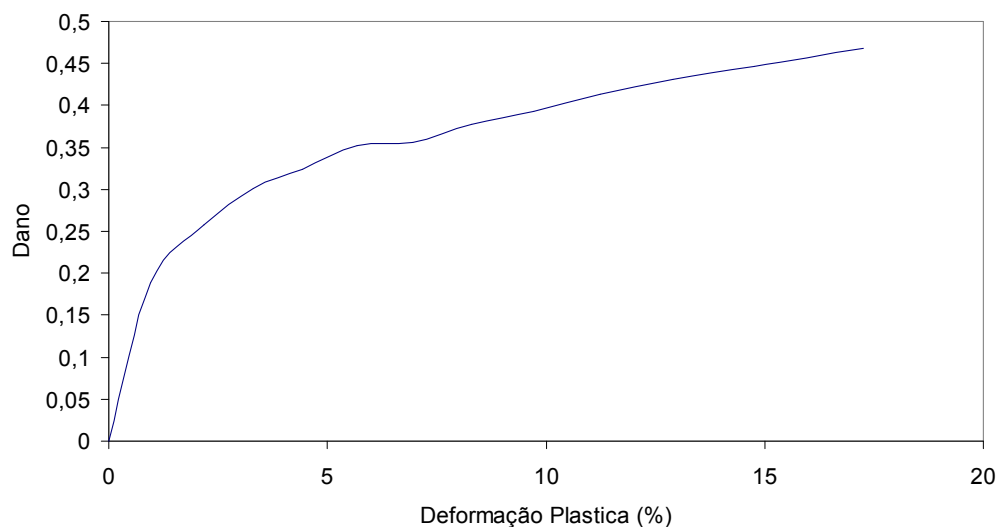


Figura 5.17 – Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A (não exposto à corrosão), danificação devido a um carregamento mecânico.

– **Corpo-de-prova 13 (com 2016 h de ensaio de salt spray)**

Tabela 5.7 – Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento

Descarregamento	E (MPa)	D	ϵ (%)	ϵ_p (%)
1º	193832*	0,078151	0	0
2º	193820	0,078208	0,189	0
3º	184130	0,124293	0,855	0,555
4º	165589	0,212472	1,606	1,278
5º	149224	0,290303	2,656	2,285
6º	140151	0,333453	3,849	3,429
7º	137232	0,347336	5,123	4,672
8º	129035	0,386320	6,536	6,057
9º	126713	0,397364	8,280	7,784
10º	120039	0,429104	10,952	10,442
11º	113695	0,459276	14,076	13,597

* Obtido no primeiro carregamento

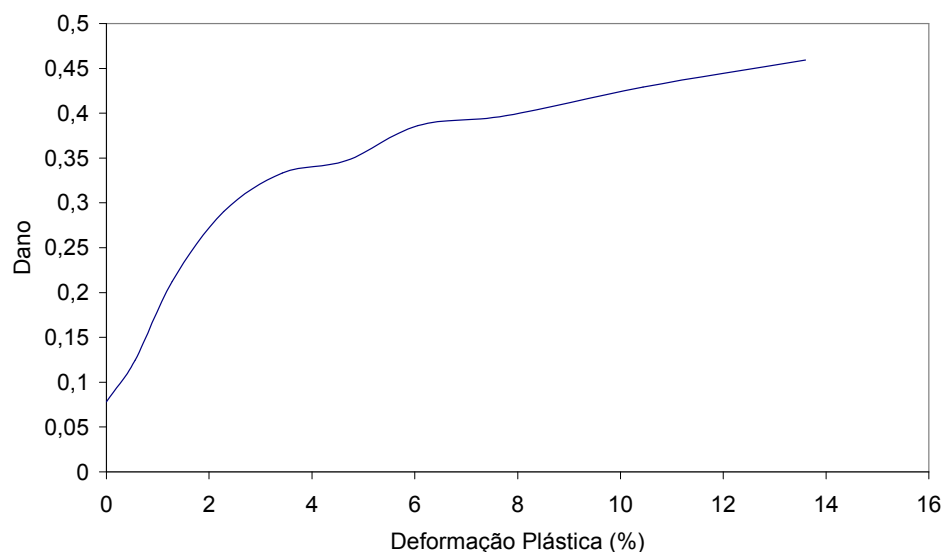


Figura 5.18 – Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2016 horas de exposição na câmara de corrosão.

– **Corpo-de-prova 16 (com 2376 h de ensaio de salt spray)**

Tabela 5.8 – Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento

Descarregamento	E (MPa)	D	ϵ (%)	ϵ_p (%)
1º	166744,6*	0,206977	0	0
2º	166158,1	0,209766	0,243	0
3º	160768,8	0,235397	0,873	0,587
4º	152188,8	0,276203	1,620	1,310
5º	137602,3	0,345575	2,966	2,588
6º	130931,6	0,377300	4,199	3,790
7º	121622,7	0,421573	5,530	5,082
8º	120403,8	0,427370	7,000	6,529
9º	115930,9	0,448642	8,730	8,240
10º	111577,3	0,469348	11,130	10,620
11º	109583,8	0,478829	14,140	13,673

* Obtido no primeiro carregamento

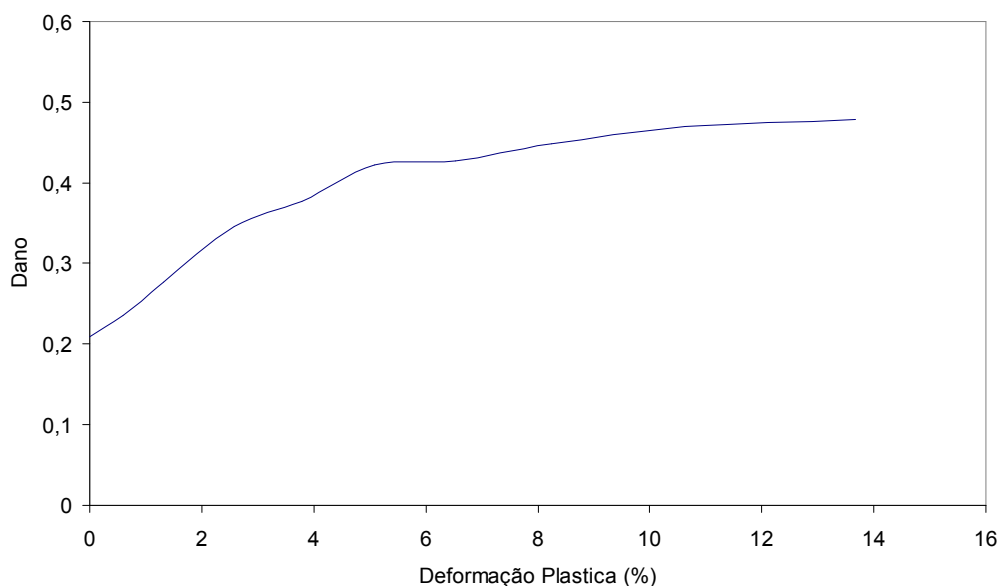


Figura 5.19 – Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2376 horas de exposição na câmara de corrosão.

– **Corpo-de-prova 21 (com 2904 h de ensaio de salt spray)**

Tabela 5.9 – Módulos de Elasticidade obtidos em cada descarregamento

Descarregamento	E (MPa)	D	ϵ (%)	ϵ_p (%)
1º	153082*	0,271955	0	0
2º	153058	0,272069	0,220	0
3º	142386	0,322821	0,773	0,484
4º	136429	0,351155	1,950	1,590
5º	132214	0,371200	3,297	2,910
6º	127296,6	0,394588	4,690	4,278
7º	119422	0,432039	6,235	5,796
8º	115000	0,453070	8,918	8,480

* Obtido no primeiro carregamento

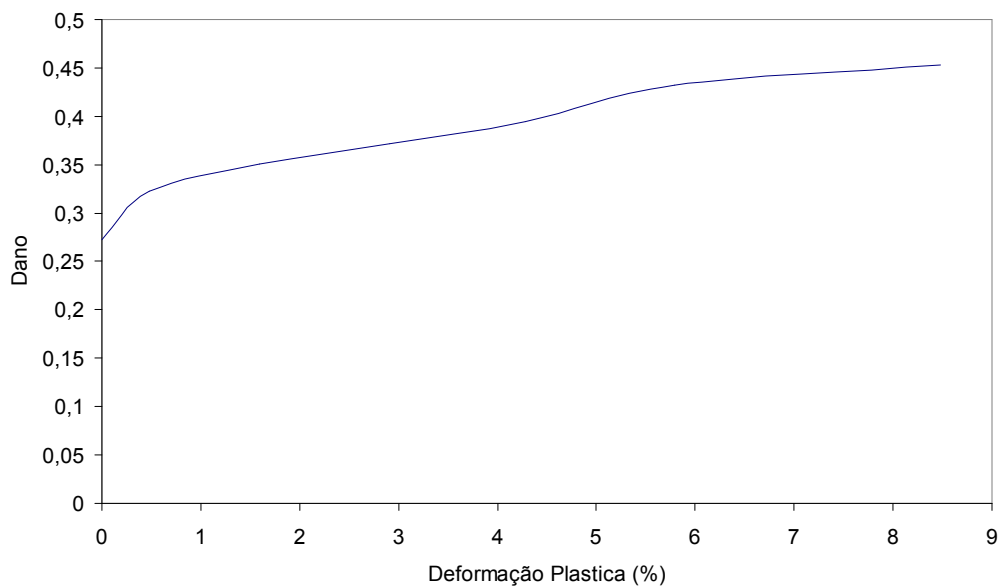


Figura 5.20 – Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A após 2904 horas de exposição na câmara de corrosão.

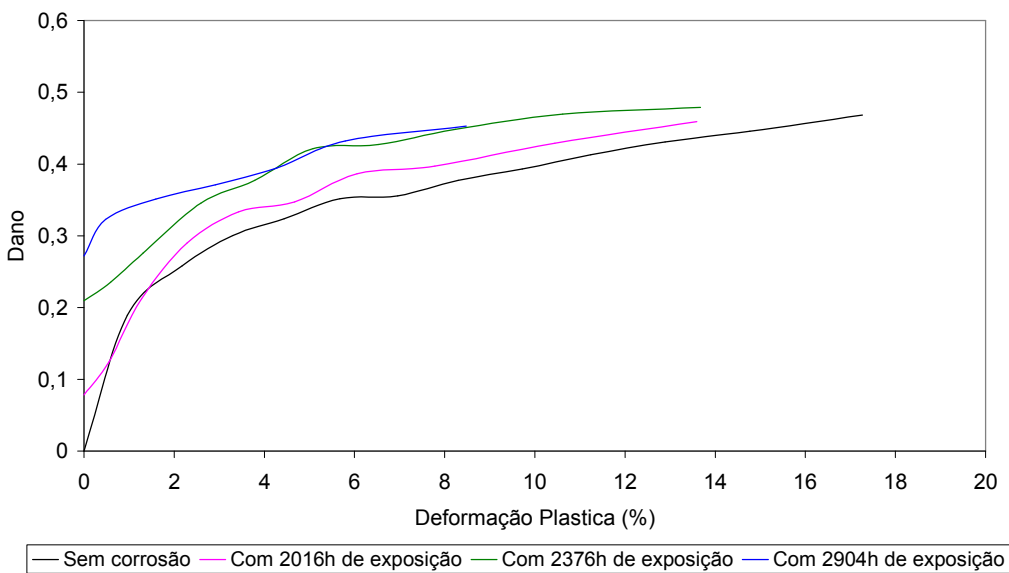


Figura 5.21 – Gráfico Dano x Deformação Plástica (%): Aço CA-50A.

Com a análise dos resultados dos ensaios realizados em amostras sobre diferentes condições (ensaio de corrosão e tempo de exposição)

pode-se observar que a corrosão nas amostras de vergalhão que foram expostas na câmara de corrosão (ensaio de sal spray), amostras Tipo 1, além de causar um dano inicial, ela reduz a resistência à tração e o alongamento do material com o tempo de exposição. Isto pode ser observado na Figura 5.21 e na Tabela 5.10.

Lembrando, que na obtenção da tensão não foi considerada a redução da área da seção transversal da amostra devido à corrosão. Uma das formas de determinar esta redução da área, aproximada, seria através da medida perda de massa. Entretanto, para determinação do dano não é necessário fazer esta consideração, pois para o cálculo do módulo de elasticidade do material danificado a tensão é obtida sobre a área considerada, S , e não sobre a área efetiva (\tilde{S}).

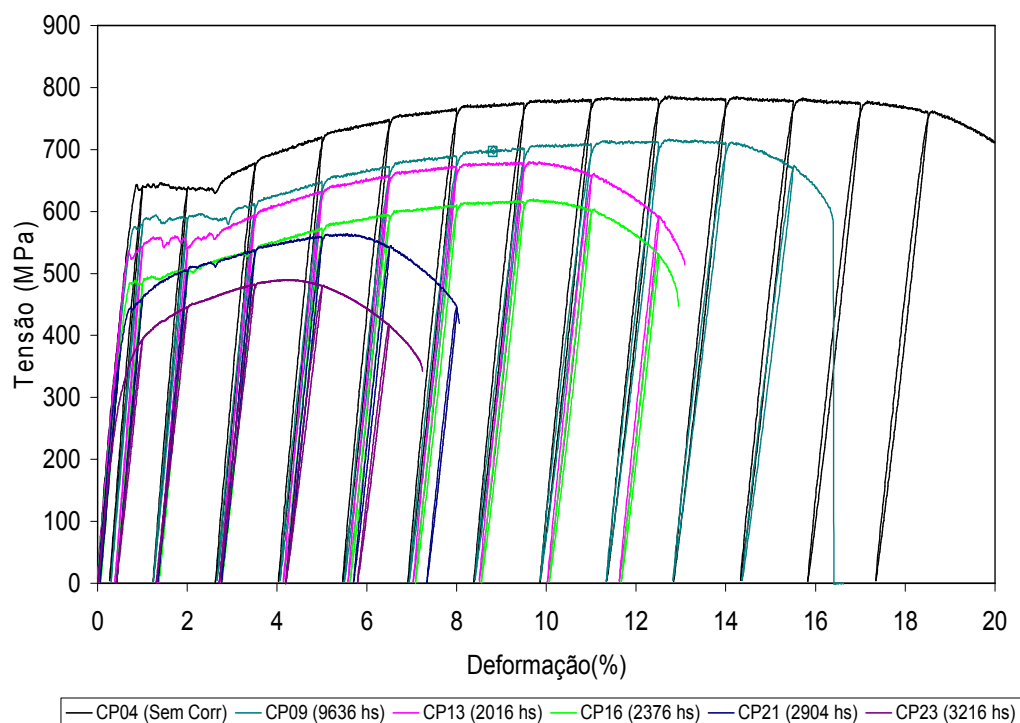


Figura 5.22- Gráfico tensão x deformação das amostras submetidas ao ensaio de salt spray, mostrado a redução na tensão e na deformação em decorrência da corrosão.

Tabela 5.10 – comportamento da tensão em função do tempo de exposição à corrosão das amostras que foram expostas ao ensaio de salt spray.

Tempo de exposição (horas)	Tensão máxima (MPa)	Redução percentual
0	782	0
504	714	8,7
936	711	9,1
1848	635	18,8
2376	616	21,2
2472	564	27,9
2904	541	30,8
3216	536	31,5
3528	528	32,5

As amostras que foram submetidas ao ensaio de corrosão acelerado “pilha eletrolítica” apresentaram uma redução significativa da tensão e deformação com relação àquelas que não foram expostas à corrosão. No entanto, com relação ao intervalo de tempo ao qual foram submetidas à corrosão, o comportamento da tensão e principalmente da deformação dessas amostras foram bem próximo, Figura 5.22. Lembrando que nas amostras com 12 horas de ensaio o concreto já estava totalmente fissurado, resultado da expansão do produto da corrosão, deixando a barra totalmente exposta.

Esta diferença de comportamento da tensão e da deformação, principalmente, entre as amostras que foram expostas ao salt spray e aquelas que foram embutidas em concreto e em seguida submetidas ao ensaio de corrosão acelerada “pilha eletrolítica”, pode está relacionado com o tipo de ensaio de corrosão aos quais foram submetidas e pelo processo no qual ocorre a corrosão na barra embutida no concreto e na barra sem

cobrimento de concreto. Tudo indica que naquelas a influência maior da corrosão na danificação do material, ocorre na redução da área da seção da barra e esta ocorre de forma mais uniforme ao longo da barra com relação ao outro tipo de ensaio.

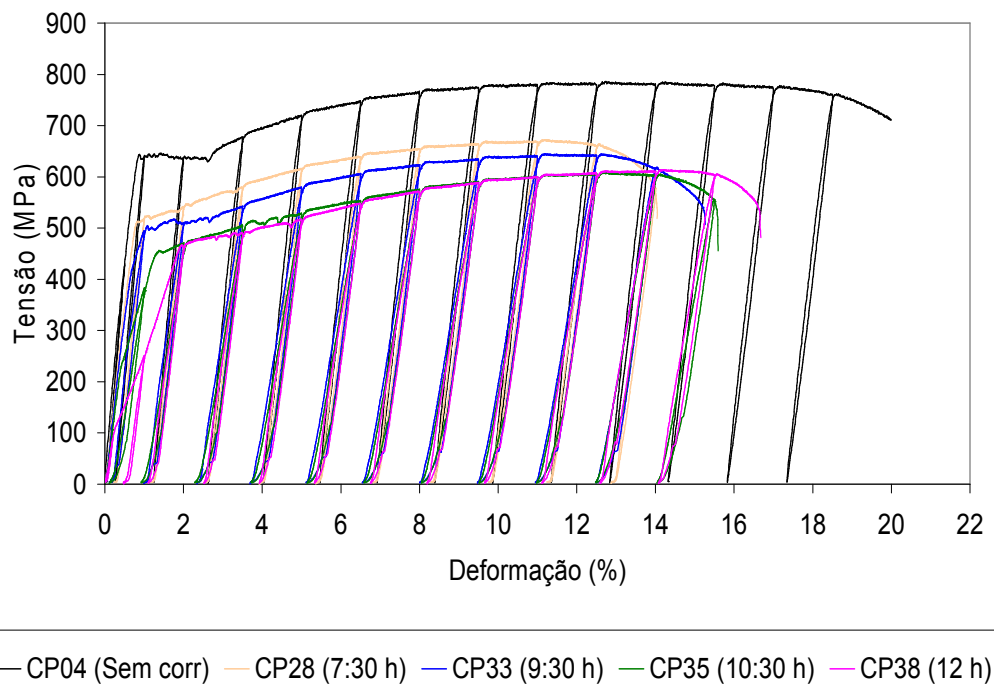


Figura 5.23 - Gráfico tensão x deformação das amostras submetidas ao ensaio de corrosão “pilha eletrolítica”, mostrado a redução na tensão e na deformação em decorrência da corrosão.

Os corpos-de-prova, como o CP28, que foram submetidos ao ensaio de corrosão acelerada “pilha eletrolítica” por 7:30 horas, apresentaram no ensaio de tração com carregamento e descarregamento o comportamento da tensão próximo daquela obtida no ensaio do CP13, exposto na câmara de corrosão por 2016 horas, Figura 5.23. Já as amostras com 9:30 horas de exposição ao ensaio “Pilha eletrolítica”, o comportamento da tensão tende a das que foram expostas por 2376 horas ao ensaio de salt spray, Figura 5.24.

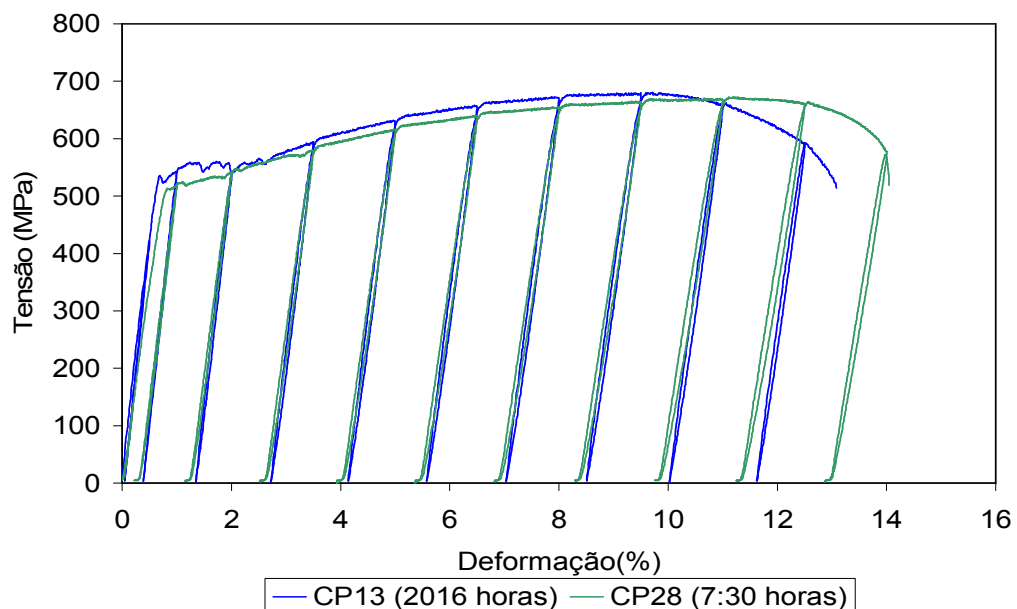


Figura 5.24 – Gráfico tensão x deformação: comportamento da tensão das amostras CP13 que foi exposta ao ensaio de sal spray por 2016 h e CP28 submetido ao ensaio “pilha eletrolítica” por 7:30 h.

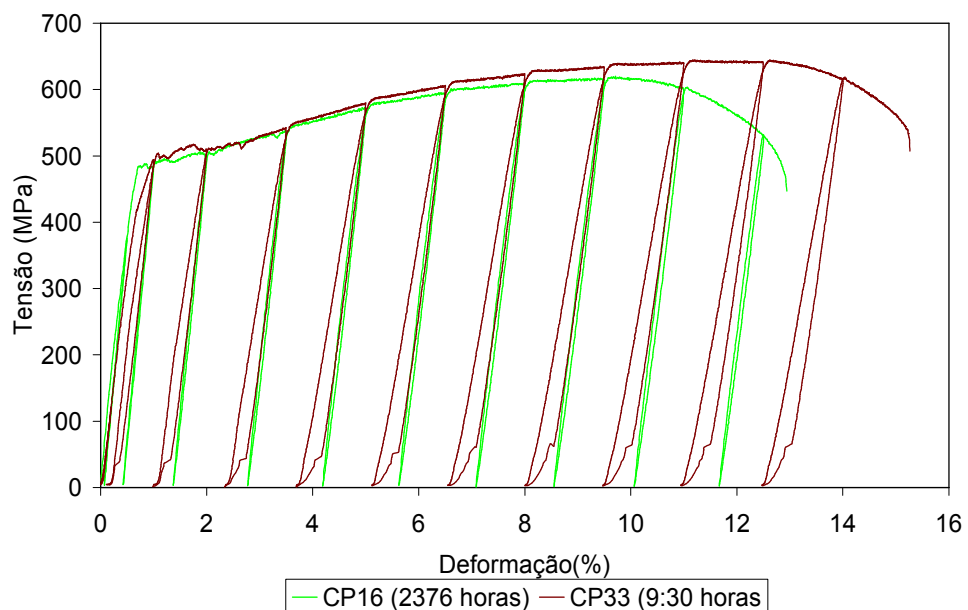


Figura 5.25 – Gráfico tensão x deformação: comportamento da tensão das amostras CP16 que foi exposta ao ensaio de sal spray por 2376 h e CP33 submetido ao ensaio “pilha eletrolítica” por 9:30 h.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

6.1. Conclusões

No desenvolvimento deste trabalho foi abordado a danificação de barras de aço CA-50A, utilizadas na construção civil, devido a um carregamento mecânico e em decorrência da corrosão a qual foram submetidas. A corrosão, mesmo em estágio não avançado, contribui significativamente para danificação da barras, além de danificar o concreto. O Modelo Matemático de Dano apresentado neste trabalho, até um certo estágio da corrosão (2376 h) descreveu satisfatoriamente o estado de danificação do material em estudo.

Com a análise dos dados dos experimentos realizados pode-se concluir que:

- **Amostras de vergalhão que foram expostas à corrosão sem cobrimento de concreto (amostras Tipo 1)**

Com análise dos resultados dos ensaios realizados nestas amostras observa-se que a corrosão reduz significativamente a tensão máxima do vergalhão, bem como o alongamento percentual e o módulo de rigidez. A corrosão, inicialmente, ocorre com a perda maior de material de resistência mais elevada, pois o vergalhão é composto de uma pequena região próxima à superfície de maior dureza (375 HV) com uma microestrutura martensítica e de um núcleo de menor dureza (274 HV), que tem uma microestrutura composta de perlita e ferrita. As amostras não expostas à corrosão apresentaram uma tensão máxima de aproximadamente 782 MPa, já as que foram expostas por 2904 horas a tensão máxima obtida foi aproximadamente de 541 MPa, que corresponde a uma redução de 30,7%.

Essa redução é devido à danificação do material que é verificado através da redução do módulo de elasticidade, e pode ser identificada no gráfico dano versus deformação como sendo um dano inicial, ou seja, antes mesmo do material ser deformado, ele já apresenta um dano que aumenta com o tempo de exposição à corrosão.

A ruptura das amostras sem corrosão e das que foram expostas na câmara de corrosão por até 2376 h, ocorreu com aproximadamente mesmo dano crítico (D_C), $D_C = 0,46$. Comprovando, assim, a validade do modelo matemático utilizado, pois o dano crítico é uma característica do material, ou seja, para um mesmo material, para um determinado modelo matemático de dano utilizado, este deve apresentar o mesmo dano crítico.

Para um tempo de até 2376 horas de ensaio de salt spray, recomenda-se o uso do Modelo de Dano proposto.

Para tempo de exposição acima de 2376 horas, observa-se que algumas das amostras submetidas ao ensaio de corrosão pela mesma quantidade de horas, apresentaram um comportamento na evolução do dano diferente (apresentaram dano inicial e dano crítico diferente). Isto

indica, que o modelo matemático de dano utilizado só é válido até um certo estágio da corrosão, pois, a partir deste estágio, a distribuição dos defeitos devido à corrosão não podem ser considerados homogêneos, ou seja, as condições de elemento de volume representativo, descrita na seção 3.2.1, sobre o qual é feita a formulação desse modelo matemático não é satisfeita.

O dano inicial cresce com o tempo de exposição, as amostras com 2376 h de exposição apresentou um dano de 0,21, que corresponde a 45,6% do dano crítico. Isto mostra que a corrosão pode reduzir significativamente a capacidade da estrutura comprometendo a sua segurança.

- **Amostras de vergalhão que foram embutidas e submetidas ao ensaio de corrosão acelerado “pilha eletrolítica” (amostras Tipo 2)**

As amostras com 12 horas de ensaio de corrosão (pilha eletrolítica), já apresentam o concreto totalmente fissurado, resultado da expansão do produto da corrosão, deixando a barra totalmente exposta. A corrosão além de danificar as armaduras, das estruturas de concreto, reduzindo a sua capacidade de suportar carregamento e a deformação de ruptura, ela causa a fissuração do concreto, que se não forem tomadas às devidas providências poderá ocasionar o colapso estrutural.

Nas amostras com 12 horas de ensaio (que já apresentavam fissuras no concreto) foi observada uma tensão máxima de 614 MPa que corresponde a 78,5 % da observada nas amostras sem corrosão.

Apesar dessas amostras apresentaram uma redução significativa da tensão e deformação com relação às amostras que não foram expostas à corrosão, no intervalo de tempo ao qual foram submetidas à corrosão, essas amostras não apresentaram uma redução crescente com o tempo de ensaio de corrosão como aquelas amostras que foram expostas ao ensaio de salt spray. O que indica que a corrosão no ensaio de “pilha eletrolítica” é mais

uniforme é sua influência maior na danificação ocorre na redução da área da seção da barra.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Trabalhos como esse são extremamente importantes, não só pelo o seu conteúdo em si, mas por fazer uma abordagem de algo novo na literatura e que com certeza contribuirá para o desenvolvimento de novas pesquisas que poderá ampliar ainda mais o campo de aplicação da teoria da mecânica do dano.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Estudar mais a danificação identificando o limite de aplicação do modelo apresentado e desenvolver um outro modelo matemático para um estágio mais avançado da corrosão.
- Estudar a danificação devido à corrosão das barras de aço através do método de variação da resistência elétrica.
- Aplicar o modelo apresentado a outros tipos de aços e matérias.
- Desenvolver um modelo de dano para o concreto armado considerando a corrosão.
- Fazer um estudo comparativo dos ensaios salt spray e “pilha eletrolítica”, utilizando amostras de concreto com barra de aço embutida e solução com a mesma concentração de NaCl.
- Correlacionar através de ensaio experimental o tempo de ensaio acelerado com o do ensaio de corrosão atmosférica.
- Fazer um estudo da danificação relacionando a corrosão na fração volumétrica das fases presentes no material, pois no caso dos vergalhões utilizados neste trabalho eles são compostos de um núcleo

com uma microestrutura composta por perlita e ferrita (dureza média de 274 HV) e uma pequena região próxima à superfície com uma microestrutura martensítica de maior dureza, a resistência do vergalhão é função da fração volumétrica dessas fases.

Referências Bibliográficas

- ALLIX, O., HILD, F. (2002). Continuum Damage Mechanics of Materials and Structures. Elsevier.
- ALMEIDA, L. C. (2002). Aços para concreto armado. Notas de aulas – Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas.
- BENALLAL, Ahmed (2002). Continuous Damage and Fracture, Elsevier.
- BENELLAL, A., PROENÇA, S. P. B. (2003). Recent developments in the modelling of rupture in solids. Proceedings of the International Symposium held at Foz do Iguaçu, Brazil.
- CALLISTER, W. D. (2002). Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª ed. , Rio de Janeiro, LTC.
- CASCUDO, Oswaldo (1997). O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. UFG, PINI, Goiânia.

- CHABOCHE, J.L. (1987). Continuum Damage Mechanics: Present State and Future Trends. Nuclear E. D., vol.105, p.19 – 33.
- CHIAVERINI, Vicente (1996). Aços e ferro fundido. 7ª ed, São Paulo, ABM.
- DUTRA, Aldo C.; NUNES, Laerce de P. (1991). “Proteção Catódica - Técnica de Combate à Corrosão”. 2ª ed., Rio de Janeiro/RJ, Editora McKlausen.
- FORTES, Lyttelton R. (1995). Corrosão na armadura de concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará.
- GENTIL, Vicente (1996). Corrosão. 3ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara.
- GUELLO, Gustavo A. (2002). Simulação computacional de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HELENE, Paulo R. L. (1986). Corrosão em armaduras para concreto armado. IPT, PINI, São Paulo.
- JIRÁSEK, Milan (2002). Technical University of Catalonia (UPC) – Barcelona - November 2002.
- KAEFER, L. F. A Evolução do Concreto Armado. São Paulo - Brasil, 1998. Notas de Aula do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de São Carlos – USP.
- KRAJCINOVIC, D. (1989). Damage mechanics. Mechanics of Materials, vol.8, p.117-197
- LEMAITRE, J. (1996). A course on Damage Mechanics. 2 ed. Cachan: Springer, 225 p.
- LEMAITRE, J. (1984). How to use damage mechanics. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, v. 80. p. 233-245.

- LEMAITRE, J. (2002). Introduction to continuum damage mechanics. Continuum Damage Mechanics of material and Structures, Cachan, p. 235-258.
- LEMAITRE, J., CHABOCHE, J. (2002). Mechanics of solid materials.
- LEMAITRE, J. & DUFAILY, J. (1987). Damage Measurements. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 28, p. 643 – 661.
- MARCELO JR, A. O. (2004). Aplicação da Mecânica da Danificação em Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras de Vidro. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, Paulo J. M. (1994). “Estrutura, Propriedades e Materiais”. PINI. São Paulo.
- NEVILLE, Adam M. (1982). “Propriedades do Concreto”. Tradução: Salvador E. Giammusso. São Paulo. PINI. São Paulo.
- NBR-7480 (1996). Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. ABNT.
- NBR-6118 (2004). Projeto de estrutura de concreto – procedimento. ABNT.
- NBR ISO 6892 (2002). Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. ABNT.
- PIMENTA, G.S. (2003). Uma Abordagem Geral. ABRACO
- PROENÇA, S. P. B. (2000). Introdução à Mecânica do Dano e Fraturamento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- PROENÇA, S.P.B & VENTURINI, W.S. (2000). Applications of damage mechanics to reinforced concrete structures. Continuous Damage and Fracture, Cachan, p. 233-241.
- POURBAIX, Marcel. (1974). “Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions”. Houston, NACE, 1974.

SOUZA, S. A. (1995). Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 5ª ed, Blücher Ltda.

TAI, W. H. (1990). Plastic damage and ductile fracture in mild steels. Eng. Fract. Mech., v.37, p.853.