

CONSULTA  
FD-3093

São Paulo  
2002

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia.

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO  
PLÁSTICA SOBRE A TAXA DE CORROSÃO DO  
COBRE ELETROLÍTICO EM ÁGUA PURA**

**BYUNG SIK KIM**

OK

2002

São Paulo

Orientador:  
Prof. Dr. Edison Gonçalves

Area de Concentração:  
Engenharia Mecânica - Projeto e Fabricação

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO  
PLÁSTICA SOBRE A TAXA DE CORROSÃO DO  
COBRE ELETROLÍTICO EM ÁGUA PURA**

**BYUNG SIK KIM**

E aos meus pais e à Ana.

que criou este mundo segundo Sua boa vontade.

Ao SENHOR Deus,

DEDICATÓRIA

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela Sua graça abundante e misericórdia que salvou um homem pecador, enviando Seu Filho amado, Jesus Cristo.

Ao Professor Dr. Edison Gonçalves pela sua orientação e ajuda pessoal para concluir este trabalho e também pela sua grande generosidade.

À minha esposa Ana Kim(Myung Soon Ryou) pela oração e compreensão durante este trabalho. E aos missionários no Brasil, Elias Park, Maria Park, Timóteo Han, Teresa Han, Isaque Baek, Rebeca Baek, Paulo Kim, Sara Kim, José Kim, Rebeca Kim, Noé Jeong, Priscila Jeong, Josué Lee, Maria Lee, Josué Ahn, Rute Ahn, Calebe Jeon, Graça Jeon, Zacarias Paek, Isabel Paek, Mateus Kim, Paula Kim e todos os pastores na Coreia do Sul, que me deram ânimo, apoio e oração.

As colaborações dos Eng<sup>os</sup>. Gelson Gomes Falcão Filho, Cezar Flores, Anderson de Oliveira Fernandes, Amaury Cardoso Bastos Jr., André Wulhost, Juan Carlos Silveiro, e dos Prof<sup>os</sup>. Dr<sup>os</sup>. Gilberto F. M. de Souza, Carlos Alberto Nunes Dias, George C. Kachan, Wolfgang K. Reick, . Miguel A. Buelta, Arnaldo, Gilmar F. Batalha e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Izabel F. Machado.

Aos companheiros sempre presentes em todos os passos desse trabalho. Ao Eng. Elieil D. de Oliveira do IPEN na realização dos ensaios de tração.

À Itaipu Binacional pela contribuição financeira ao Projeto de Pesquisa, bem como ao seu corpo técnico.

Ao CNPq pela bolsa de estudo para realizar este trabalho.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho.

# ÍNDICE

I	Dedicatória
II	Agradecimentos
III	Índice
V	Lista de Figuras
IX	Lista de Tabelas
X	Lista de Abreviaturas
XI	Lista de Símbolos
XIII	Resumo
XIV	Abstract

1	<b>1 INTRODUÇÃO</b>
1.1	ASPECTOS GERAIS
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO
1.3	ESCOPO DO TRABALHO
2	<b>2 CARACTERÍSTICAS DO COBRE ELETROLÍTICO</b>
2.1	INTRODUÇÃO
2.2	TIPOS DE COBRE COMERCIAIS SEMI-ACABADOS
2.2.1	Cobre Comercialmente Puro (mais de 99,3% de Cu)
2.2.2	Ligas com Alto Teor de Cobre (mais de 96% de Cu)
2.3	CARACTERÍSTICA ATÔMICA DO COBRE
2.4	DENSIDADE DO COBRE
2.5	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COBRE
2.6	CARACTERÍSTICA TÉRMICA DO COBRE
2.7	CARACTERÍSTICA ELÉTRICA DO COBRE
2.8	FABRICAÇÃO DO COBRE ELETROLÍTICO
2.8.1	Trabalho a quente
2.8.2	Trabalho a frio

104	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
95	APÊNDICE I : RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO
94	7.2 RECOMENDAÇÕES
93	7.1 CONCLUSÕES
93	7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES
91	6.3 ANÁLISE DAS FOTOGRAFIAS METALOGRAFICAS
80	6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORROSAO
80	6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO
80	6 ANÁLISE DOS RESULTADOS
76	5.6.3 <i>Resultados Experimentais dos Ensaio de Corrosão</i>
74	
71	5.6.2 <i>Fotografias das Superfícies Obtidas pelo Método Metalográfico</i>
71	5.6.1 <i>Resultados Experimentais dos Ensaio de Tração</i>
71	5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS
68	5.5 PROCEDIMENTO DA FINALIZAÇÃO DOS ENSAIOS
65	5.4 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS
63	5.3 PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DOS CORPOS DE PROVA
61	5.2 CORPOS DE PROVA
56	5.1 APARELHAGEM EXPERIMENTAL
56	5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS
49	4.4 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS IMPORTANTES
43	4.3 COMPORTAMENTO DO COBRE EM MEIO AQUOSO
41	4.2 FORMAS DE CORROSAO
32	4.1 CONCEITOS BÁSICOS DE CORROSAO
32	4 FENÔMENO DE CORROSAO DO COBRE EM ÁGUA PURA
29	3.3 FUNDAMENTOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EM NÍVEL ATÔMICO
25	3.2 CORPO DE PROVA
20	3.1 ASPECTOS GERAIS
20	3 PRINCÍPIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Figura 3.1 Curva Tensão-Deformação do Aço-doce Recozido, SUBBARAO et al., 1973.....	21
Figura 3.2 Curva de Carga e Descarga Sucessivas sobre Alongamento, PHILLIPS, 1956.....	24
Figura 3.3 Diagramas de Carga e Deformação Plástica, PHILLIPS, 1956: (a) A linha de descarga é proporcional à linha inicial; (b) A linha de descarga é proporcional à linha OF; (c) A linha de descarga é proporcional ao declive inicial.....	24
Figura 3.4 Esquema dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração, SOUZA, 1979: (a) Secção Circular, (b) Secção Retangular.....	26
Figura 3.5 Policristais (a) Grãos poliedricos; (b) Estrutura atômica, COTRELL, 1964.....	30
Figura 4.1 Esquema de Corrosão, PANOSSIAN, 1993.....	32
Figura 4.2 Estrutura da Dupla Camada Elétrica, WOLYNEC, 1992.....	34
Figura 4.3 Esquema de Variação da Energia Livre Eletroquímica $G_{el}$ de um Metal Polarizado Anodicamente de $\eta_a$ . $\alpha$ é o Coeficiente de Transferência ou de Simetria, WOLYNEC, 1992.....	38
Figura 4.4 Curvas de Polarização Anódica ( $i_a$ ) e Catódica ( $i_c$ ) num Diagrama Logarítmico. $E_a$ = Potencial de Equilíbrio; $i_0$ = Densidade de Corrente	39
de Troca, WOLYNEC, 1992.....	39
Figura 4.5 Curvas de Polarização Anódica ( $i_a$ ) e Catódica ( $i_c$ ) num Diagrama Logarítmico. $E_a$ = Potencial de Equilíbrio de Reação Anódica; $E_c$ = Potencial de Reação Catódica; $E^*$ = Potencial de Corrosão; $i^*$ = Densidade de Corrente de Corrosão.....	40
Figura 4.6 Diagrama de Equilíbrio de Potencial-pH para o Sistema de Cobre-Água, a 25°C, ZOUBOV, VANLEUGENHAGHE e POURBAIX, 1966.....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.7 Taxas Médias de Corrosão do Cobre em Água Pura à 30°C, SCHLEITHOFF, 1990 .....	46
Figura 4.8 Depósitos na Entrada e Saída dos Condutores Ocos, SCHLEITHOFF, 1990 .....	48
Figura 4.9 Influência da Temperatura para a Taxa de Corrosão do Cobre, BASTOS, 1997 .....	50
Figura 4.10 Influência do pH da Água Pura sobre a Taxa de Corrosão, BASTOS, 1997 .....	51
Figura 4.11 Variação de Espessura da Câmara Oxida com pH (EC: Método Eletroquímico; e WL: Método de Perda de Massa; T=30°C; Tempo de Imersão: 24 horas), FENG et al., 1997 .....	52
Figura 4.12 $i_{corr}$ do Cobre na Solução de Vários Valores de pH (T=30°C, Tempo de Imersão: 24 horas), FENG et al., 1997 .....	53
Figura 4.14 Variação da Taxa de Corrosão de Cobre em Função da Variação da Velocidade de Fluxo (Água Pura com uma Faixa de Teor de Oxigênio Dissolvido entre 100 e 500ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e Temperatura 35°C), WULFHORST, 1997 .....	54
Figura 5.1 Aparelhagem Experimental Empregada no Ensaio de Corrosão .....	56
Figura 5.2 Corpo de Prova para Ensaio de Tração (Unidade:mm) .....	62
Figura 5.3 Corpo de Prova (Amostra) depois da Ruptura .....	73
Figura 5.4 Fotografia da Superfície do Corpo de Prova Sem Deformação, Obtida pelo Método Metalográfico (Escala:200x) .....	75
Figura 5.5 Fotografia da Superfície do Corpo de Prova com 2,75% de Deformação Plástica, Obtida pelo Método Metalográfico (Escala:200x) .....	75
Figura 5.6 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 20°C, pH=6,3 e 835ppb do Teor de Oxigênio .....	77



Figura 5.7 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 40°C, pH=6,4 e 960ppb do Teor de Oxigênio .....	77
Figura 5.8 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 50°C, pH=6,7 e 1.028ppb do Teor de Oxigênio .....	78
Figura 5.9 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 60°C, pH=6,5 e 987ppb do Teor de Oxigênio .....	78
Figura 5.10 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 70°C, pH=6,6 e 985ppb do Teor de Oxigênio .....	79
Figura 6.1 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 20°C, pH=6,3 e 835ppb do Teor de Oxigênio .....	81
Figura 6.2 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 40°C, pH=6,4 e 960ppb do Teor de Oxigênio .....	81
Figura 6.3 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 50°C, pH=6,7 e 1.028ppb do Teor de Oxigênio .....	82
Figura 6.4 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 60°C, pH=6,5 e 987ppb do Teor de Oxigênio .....	82
Figura 6.5 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 70°C, pH=6,6 e 985ppb do Teor de Oxigênio .....	83
Figura 6.6 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica em Vários Valores de Temperatura.....	85
Figura 6.7 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 0% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio .....	86
Figura 6.8 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 2,75% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio .....	86
Figura 6.9 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 2,75% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio .....	87

Figura 6.10 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 3,25% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	87
Figura 6.11 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 11,25% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	88
Figura 6.12 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 12% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	88
Figura 6.13 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 21% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	89
Figura 6.14 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 21,5% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	89
Figura 6.15 Esquema Qualificativo da Taxa de Corrosão sobre a Temperatura nas Condições: pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio.....	90
Figura 6.16 Efeito da Temperatura na Taxa de Corrosão, FONTANA, 1986 ....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Variação da Densidade dos Tipos de Cobre, GERHARTZ et al. (1986).....	13
Tabela 2.2 Variação da Densidade com a Temperatura, GERHARTZ et al. (1986).....	14
Tabela 2.3 Propriedades Mecânicas de Cobre Genérico a Temperatura Ambiente, GERHARTZ et al. (1986).....	15
Tabela 2.4 Propriedades Térmicas do Cobre, GERHARTZ et al. (1986).....	16
Tabela 2.5 Variação da Condutividade Elétrica e Térmica do Cobre com a Temperatura, GERHARTZ et al. (1986).....	17
Tabela 3.1 Módulo de Elasticidade de Alguns Metais e Ligas à Temperatura Ambiente, SOUZA, 1974.....	22
Tabela 3.2 Símbolos Importantes, Suas Definições e Descrições, ABNT MB-4, 1992.....	27
Tabela 3.3 Dimensões Recomendadas para os Corpos de Prova, ABNT MB-4, 1992.....	28
Tabela 4.1 Série Eletroquímica das Principais Reações a 25°C, WOLYNEC, 1992.....	36
Tabela 5.1 Especificação do Cobre Eletrolítico Utilizado nos Ensaios.....	61
Tabela 5.2 Dados Obtidos pelo Ensaio de Tração com a Amostra do Corpo de Prova até a Ruptura.....	72
Tabela 5.3 Dados Obtidos pelos Ensaios de Tração.....	72
Tabela 5.4 Dimensões dos Corpos de Prova na Área Útil após os Ensaios de Tração.....	73
Tabela 5.5 Dimensões dos Corpos de Prova para os Ensaios de Corrosão.....	74

ABM	-	Associação Brasileira de Metais
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	-	American Society for Metals
ASTM	-	American Society for Testing Materials
CFC	-	Estrutura Cúbica de Face Centrada (Face-Centered Cubic)
CGC	-	Camada de Gouy-Chapman
Cu-CAST	-	Casting Copper (Cobre Refundido)
Cu-DHP	-	Deoxidized, High Residual Phosphorus Copper
Cu-DLP	-	Deoxidized, Low Residual Phosphorus Copper
Cu-ETP	-	Electrolytic Tough Pitch Copper
Cu-FRH	-	Fire Refined, High Conductivity Copper
Cu-FRTP	-	Fire Refined, Tough Pitch Copper
Cu-OF	-	Oxygen-Free Copper
DCH	-	Dupla Camada de Helmholtz
DIN	-	Deutsches Institut für Normung e.V.(German Standards)
EC	-	Electro Chemical Method
EPUSP	-	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IACS	-	International Annealed Copper Standard
IEC	-	International Electrochemical Commission
IPEN	-	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
UNS	-	Unified Numbering System
WL	-	Weight Loss Method

## LISTA DE ABRÉVIATURAS

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Alongamento
a <sub>ox</sub>	Atividade dos oxidantes
a <sub>red</sub>	Atividade dos reductores
A	Alongamento percentual após ruptura
A	Área afetada pela corrosão
b	Largura do corpo de prova de seção retangular
b	Declive de Tafel
b <sub>a</sub>	Declive de Tafel anódico
b <sub>c</sub>	Declive de Tafel catódico
d	Diámetro da parte útil do corpo de prova de seção reta circular
e	Espessura do corpo de prova de seção retangular
E	Módulo de elasticidade
E	Potencial de equilibrio observado
E <sup>o</sup>	Potencial de eletrodo padrão, em volt
E <sub>a</sub>	Potencial de equilibrio da reação anódica
E <sub>c</sub>	Potencial de equilibrio da reação catódica
E <sub>e</sub>	Potencial de equilibrio
E*	Potencial de corrosão
F	Constante de Faraday, equivalente a 96.494 KC/mol
G <sub>e</sub>	Energia livre em equilibrio
G*	Energia livre de ativação
i	Densidade de corrente
i <sub>a</sub>	Densidade de corrente anódica
i <sub>c</sub>	Densidade de corrente catódica
i <sub>o</sub>	Densidade de corrente de troca
i*	Densidade de corrente de corrosão
k	Constante no cálculo da taxa de corrosão (8,76.10 <sup>6</sup> )
L <sub>o</sub>	Comprimento inicial
L <sub>c</sub>	Comprimento da parte útil do corpo de prova
L <sub>r</sub>	Comprimento final após ruptura

$L_t$	Comprimento total do corpo de prova
$LE_s$	Limite superior de escoamento
$LE_l$	Limite inferior de escoamento
LR	Limite de resistência
R	Raio de concordância
R	Constante do gás perfeito, equivalente a $8,314 \text{ joule}/(\text{K} \cdot \text{mol})$
$R^2$	Coefficiente de determinação
$S_0$	Area média da secção reta da parte útil do corpo de prova antes da aplicação da força
$S_f$	Area da menor secção reta do corpo de prova após ruptura
t	Tempo de ensaio, em hora
T	Temperatura
TC	Tendência à corrosão
$U_R$	Resiliência
W	Perda de massa
z	Número de elétrons envolvidos na reação
Z	Coefficiente percentual de estricção
$\alpha$	Coefficiente de transferência
$\sigma$	Tensão
$\epsilon$	Deformação
$\epsilon'$	Deformação lateral
$\eta$	Sobreensão

O cobre eletrolítico é um metal bastante usado para aplicações industriais e de engenharia pela sua boa resistência à corrosão, trabalhabilidade mecânica e excelente condutividade elétrica e térmica. A Usina Hidroelétrica de ITAIPU também adotou um sistema de refrigeração à água, empregando condutores ocios de cobre, para a obtenção de maior eficiência econômica. Entretanto, o fenômeno de corrosão do cobre ocorreu nos condutores ocios das barras estatísticas dos hidrogenadores e seus depósitos entupiram nos bocais de entrada e saída da barra, resultando em um grande prejuízo econômico. Para resolver esse problema, precisa-se entender o fenômeno da corrosão do cobre no meio de água pura.

Neste trabalho, utilizando corpos de prova de cobre eletrolítico, que foram retirados de chapas laminadas e tracionados na máquina de tração, realizaram-se ensaios de corrosão em condições predeterminadas de pH e teor de oxigênio dissolvido em água pura. Através da medição de perda de massa dos corpos de prova, calculou-se a taxa de corrosão do cobre em função da deformação plástica. Os resultados mostraram que a deformação plástica devido à fabricação dos condutores ocios tem pouca influência sobre o processo corrosivo do cobre em baixas temperaturas. Em temperaturas elevadas, observou-se também que a deformação plástica não apresenta uma influência clara sobre a taxa de corrosão do cobre em água pura.

## RESUMO

## ABSTRACT

The electrolytic copper is a broadly used metal for industrial and engineering applications, because of its good resistance to corrosion, mechanical properties and excellent electrical and thermal conductivity. The ITAPU Hydraulic Plant also adopted a water cooling refrigeration system, using copper hollow conductors for the attainment of a better economic efficiency. However, the corrosion phenomenon of copper occurred at the hollow conductors of the stator windings of hydrogenerator and its deposits had obstructed in the nipples of input and output of the stator winding, resulting a great economic damage. To solve this problem, it is necessary to understand the copper corrosion phenomenon in pure water.

At this study, utilizing the electrolytic copper specimens, which were taken from laminated plate and which had pulled in the tensile testing machine, corrosion experiments were realized at the predetermined conditions of pH and dissolved oxygen content in pure water. Through the weight loss measuring of copper specimen, the copper corrosion rates were calculated for different values of plastic deformation. The results show that the plastic deformation due to the hollow conductor fabrication has a little influence at the copper corrosion process at low temperature. At the elevated temperature, it was observed that the influence of plastic deformation did not have any clear tendency on the copper corrosion rate in pure water.



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Aspectos Gerais

O calor gerado durante a operação dos hidrogenadores deve ser dissipado a fim de não prejudicar as condições de funcionamento dos componentes das máquinas. Desde a fabricação dos primeiros hidrogenadores, um método de refrigeração a ar foi utilizado com excelentes resultados. Com o aumento da capacidade dos hidrogenadores por razões econômicas, o sistema de refrigeração a ar não foi capaz de dissipar o calor gerado nos hidrogenadores durante seu funcionamento.

No caso dos hidrogenadores, a refrigeração à água tem sido adotada visando à obtenção de maior eficiência econômica, pois possibilita a redução do número de barras e de sua seção transversal devido à maior densidade de corrente admissível, ao comparar com o enrolamento do estator de um gerador similar, resfriado a ar. Em particular, o uso de condutores de cobre com água de alta pureza e resistividade fluindo através deles tem encontrado uma vasta aplicação no circuito de refrigeração das barras estatóricas de hidrogenadores, OZELAME; FURMANN (1986).

A Usina Hidroelétrica de ITAIPU BINACIONAL, localizada no Rio Paraná, na fronteira Brasil/Paraguai, possui 18 hidrogenadores, cada um dos quais fornecendo uma potência de 737 MVA para o lado brasileiro com a frequência de 60 Hz, e de 823,6 MVA para o lado paraguaio com a frequência de 50 Hz.

O sistema de refrigeração dos hidrogenadores adotado na Usina de ITAIPU BINACIONAL deveria ser do tipo "sistema sem manutenção", de acordo com o estabelecido pelos fabricantes. Entretanto, apesar de ser empregado um complexo sistema de tratamento da água de resfriamento, tem-se observado a ocorrência de corrosão nos condutores ocios do barramento do enrolamento de estator dos hidrogenadores, com acúmulo de produtos de corrosão na região dos bocais de entrada e saída da água, o que leva à redução de volume do líquido circulante nos condutores ocios, com o consequente aumento da temperatura de saída do circuito de refrigeração, atingindo o limite superior da temperatura de funcionamento da máquina.

Ao longo dos últimos anos o Departamento de Engenharia de ITAIPU BINACIONAL tem também registrado uma série de paradas dos hidrogenadores causadas por entupimento parcial dos condutores ocios de algumas barras do circuito de refrigeração, causando a parada do hidrogenador para limpeza e remoção destes produtos, resultando em grande prejuízo econômico, Informe Técnico Itaipu Binacional (1992).

Para resolver esse problema seria necessário analisar o fenômeno de corrosão dos condutores ocios de cobre que compõem as barras estatóricas do enrolamento dos hidrogenadores, em presença de água pura, através de experimentos que simulem as reais condições de operação do hidrogenador, considerando-se os aspectos das características da instalação industrial empregada na planta de refrigeração.

A corrosão é um fenômeno complexo dentro da ciência físico-química

e para entendê-la é necessário aprofundar-se no estudo da Termodinâmica e da Cinética das reações químicas e eletroquímicas. Através dos ensaios experimentais de corrosão realizados anteriormente, BASTOS (1997); WULFHORST (1997) e BENÍTEZ (1998), pôde-se sugerir as melhores condições da operação do sistema de refrigeração para evitar o acúmulo de produtos da corrosão do cobre nas barras estatóricas dos hidrogenadores.

## **1.2 Objetivo do Trabalho**

Visando à caracterização do fenômeno de corrosão do cobre eletrolítico em água pura, BASTOS (1997) realizou ensaios convencionais, sob condições controladas de temperatura e atmosfera, WULFHORST (1997), ensaios assistidos por fluxo com discos rotativos e BENÍTEZ (1998), ensaios sob as condições energizadas com o objetivo de se determinar a influência das principais variáveis e a taxa de corrosão no processo corrosivo do cobre. Mas, com os resultados dos ensaios supracitados não se pôde entender plenamente o fenômeno de corrosão que ocorre no sistema de refrigeração nos hidrogenadores. Também não se encontra na literatura nenhum ensaio feito tendo interesse na influência da deformação plástica devido ao processo de fabricação do mesmo, sobre a taxa de corrosão.

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da deformação plástica existente nos condutores ocios de cobre, que compõem os enrolamentos estatóricos dos hidrogenadores, sobre a taxa de corrosão. O método de perda de massa dos corpos de prova é utilizado para se calcular

a taxa de corrosão do cobre em água pura e verificar a influência da deformação plástica na taxa de corrosão do cobre em condições predeterminadas de temperatura, pH e teor de oxigênio.

### **1.3 Escopo do Trabalho**

Após esta breve introdução ao problema do sistema de refrigeração da Usina Hidroelétrica de ITAIPU BINACIONAL, justificando e mostrando a relevância deste estudo, as características do cobre eletrolítico empregado na fabricação das barras estatóricas são apresentadas no Capítulo 2.

No Capítulo 3 apresentam-se os princípios dos ensaios de tração utilizados para induzir a deformação plástica nos corpos de prova de cobre eletrolítico e fundamentos de deformação plástica em nível atômico.

No Capítulo 4 apresentam-se os conceitos de corrosão, formas de corrosão, comportamento do cobre no meio aquoso e a influência das variáveis importantes, através de uma breve revisão bibliográfica.

No Capítulo 5 apresentam-se os corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de tração e de corrosão, mais especificamente o cobre eletrolítico, que é comumente empregado na fabricação de componentes elétricos. Em seguida, é apresentada a especificação detalhada dos ensaios de tração e de corrosão, contendo informações sobre os procedimentos de preparação dos corpos de prova, de preparação da água pura, descrição da aparelhagem experimental utilizada nos ensaios, bem como os procedimentos de execução, acompanhamento e finalização dos ensaios. O

procedimento de cálculo da taxa de corrosão e as técnicas para monitoração do pH, da temperatura e do teor de  $O_2$  da água são incluídos neste Capítulo. No final deste Capítulo apresentam-se os resultados obtidos através de tabelas, gráficos e de fotografias obtidas pelo método metalográfico. No Capítulo 6 são analisados os resultados obtidos, através de gráficos, mostrando a influência da deformação plástica sobre a taxa de corrosão e comparando com resultados extraídos da literatura. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações mais importantes para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

## 2 CARACTERÍSTICAS DO COBRE ELETROLÍTICO

### 2.1 Introdução

O Cobre é um metal largamente usado em vista de sua boa

resistência à corrosão combinada com boa trabalhabilidade mecânica,

excelente condutividade elétrica e térmica e facilidade nas operações de

soldagem e brasagem. Especialmente, o Cobre eletrolítico é a forma de

Cobre mais comumente usada para aplicações industriais e de engenharia.

Este Cobre é considerado muito puro, contendo apenas cerca de 0,03 a

0,04% de Oxigênio sob a forma de óxido cuproso ( $Cu_2O$ ). O óxido cuproso,

quando distribuído uniformemente, praticamente não afeta a resistência à

tração e a condutibilidade elétrica, PHILLIPS (1945).

Infelizmente, o Cobre eletrolítico é facilmente suscetível de se tornar

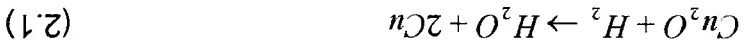
frágil se for aquecido em atmosfera que contenha Hidrogênio a temperatura

superior a 400°C, pois a partir dessa temperatura o Hidrogênio difunde-se

através do Cobre e reage com o óxido cuproso para formar vapor d'água, o

qual apresenta nessa temperatura pressão suficiente para romper a coesão

entre os grãos.



O Cobre eletrolítico comercial tem baixa temperatura de

amolecimento e por isso não pode ser utilizado quando se deseja empregá-

Os Cobre comerciais semi-acabados podem ser subdivididos em duas classes: Cobre comercialmente puros, isto é, ligas de Cobre designadas segundo a norma UNS (Unified Numbering System) de C10000

## **2.2 Tipos de Cobre Comerciais Semi-acabados**

As variações nas propriedades são causadas tanto pelas imperfeições na rede cristalina (discordâncias, lacunas e átomos intersticiais) como por imperfeições químicas (soluções sólidas substitucionais).

a) Tipo de Cobre, segundo o teor de Oxigênio: Cobre eletrolítico tenaz, Cobre desoxidado e Cobre sem Oxigênio;

b) Teor de impurezas naturais (por exemplo, Arsênico) ou remanescentes de aditivos (por exemplo, Fósforo), que formam soluções sólidas ou fases segregadas nos contornos do grão;

c) Tratamentos térmicos e/ou mecânicos de fabricação do metal, tais como: Cobre recozido (mole), Cobre fundido, Cobre laminado à quente, Cobre trabalhado a frio (encruado) e Cobre sinterizado.

Em geral, as propriedades do Cobre metálico dependem do grau de pureza e de seu processo de fabricação, e as variações das propriedades são causadas por, GERHARTZ et al. (1986):

Io em temperaturas mais elevadas sob a forma de metal encruado, sendo fornecido sob várias formas, tais como lingotes para vergalhões, lingotes chatos, tarugos e placas, bem como sob as formas de transformação mecânica: vergalhões, arames, tubos, chapas, folhas e perfis extrudados.

a C15600, tendo um mínimo de 99,3% Cu e ligas com alto teor de Cobre, que tem designações começando com a UNS C16000 até C19600 e tendo um mínimo de 96,0% em peso de Cobre.

## 2.2.1 Cobre Comercialmente Puro (mais de 99,3% de Cu)

Nas ligas de Cobre, existem diversos elementos que são adicionados com fins específicos e um elemento que é especialmente excluído, o Oxigênio. A menos que precauções especiais sejam tomadas para prevenir o contato com o ar quando o Cobre está fundido, o Oxigênio é absorvido no Cobre líquido. Ele permanece lá a menos que o Cobre seja desoxidado. A presença de Oxigênio no Cobre tem diversos efeitos prejudiciais, tais como, GERHARTZ et al. (1986):

a) Fragilização por Hidrogênio é uma probabilidade durante a brasagem ou soldagem, a qualquer hora quando o Cobre é aquecido acima de 450°C e o Hidrogênio esteja presente na atmosfera ou meio;

b) A condutividade elétrica é um pouco reduzida e os elementos usados para desoxidar o Cobre a reduzem ainda mais;

c) Óxidos agem como inclusões que reduzem a conformabilidade. A laminação posterior acentua o efeito dos óxidos;

d) Os óxidos de Cobre dentro da estrutura interferem com a recristalização e o crescimento de grão durante o recozimento.

O problema do Oxigênio é contornado por um destes três métodos:  
a) Processamento do Cobre líquido de tal modo a excluir o Oxigênio



através do uso de câmaras de vácuo ou atmosferas redutoras ou inertes durante a fusão, vazamento e fundição. Entretanto, isto não evita a absorção de Oxigênio numa etapa posterior (recozimento, soldagem, etc.);

b) Uso de técnicas normais de fusão e fundição, porém adicionando desoxidantes ao Cobre fundido para combinar com o Oxigênio. Os desoxidantes mais comuns são Fósforo, Boro, Zircônio e Magnésio;

c) Reconhecendo que o Oxigênio está presente, porém, trabalhando dentro das limitações pelo Oxigênio durante o processamento subsequente.

Os principais tipos de Cobre comercialmente puro seriam, BRESCIANI FILHO (1975):

a) Cobre eletrolítico tenaz (Cu-ETP, C11000, E-Cu57): é o Cobre fundido a partir do Cobre eletrolítico, com um teor mínimo de Cobre 99,90% (Prata até 0,1% dependendo da norma), devendo ter quantidade controlada de Oxigênio com a finalidade de obter-se no molde uma superfície plana, condutividade de 100% IACS (International Annealed Copper Standard);

b) Cobre refinado a fogo de alta condutividade (Cu-FRH, E-Cu58 ou E-Cu57): é o Cobre refinado a fogo com teor mínimo de Cobre 99,90%, incluindo a Prata e uma condutividade elétrica mínima de 100% IACS no estado recozido;

c) Cobre refinado a fogo tenaz (Cu-FRTP, C12500): é o Cobre

fundido a partir de Cobre refinado a fogo com um teor mínimo de Cobre de 99,80% (ou 99,85%), incluindo a prata, devendo ter quantidade controlada de Oxigênio com a finalidade de se obter no molde uma superfície plana;

d) Cobre desoxidado com Fósforo, baixo teor residual de Fósforo (Cu-DLP, C1200, SW-Cu): é o Cobre vazado em molde, isento de óxido cuproso, obtido mediante o emprego de Fósforo como desoxidante não metálico, com um teor mínimo de Cobre (e Prata) de 99,90% e teores residuais de Fósforo entre 0,004 e 0,012%;

e) Cobre desoxidado com Fósforo, alto teor residual de Fósforo (Cu-DHP, C1220, SF-Cu): é obtido da mesma forma que o Cu-DLP, com um teor mínimo de Cobre de 99,80% (ou 99,90%) e teores residuais de Fósforo entre 0,015 e 0,04%;

f) Cobre isento de Oxigênio (Cu-OF, C10200, OF-Cu): é o Cobre eletrolítico de alta condutibilidade, no mínimo 100% IACS, processado posteriormente de tal maneira que não contenha nem óxido cuproso e nem resíduos de desoxidantes e com um teor mínimo de Cobre (e Prata) de 99,95% (ou 99,99%);

g) Cobre refundido (Cu-CAST): é o Cobre fundido obtido a partir do Cobre secundário e destinado a fabricação de ligas de Cobre. Segundo a norma brasileira ABNT TB-5u, divide-se em dois grupos: Cu-CAST Grau A (teor mínimo de 99,75% de Cobre) e Grau B (teor mínimo de 99,50% de Cobre).

## 2.2.2 Ligas com Alto Teor de Cobre (mais de 96% de Cu)

As ligas com alto teor de Cobre contêm diversos outros elementos de liga, tal como os Cobre comercialmente puros. Estes elementos de liga comuns a ambos os grupos estão presentes geralmente em maior percentagem nas ligas de alto teor de Cobre, e estas ligas são agrupadas com relação a seu elemento de liga maior.

Dentre estas ligas, podem ser citada as listadas abaixo, BRESCIANI

FILHO (1975):

- a) Cobre-Cádmio: as ligas de Cobre-Cádmio (UNS C16200 até UNS 16500) contêm Cádmio, desde 0,6 até 1,2% em peso. As ligas com maior teor de Cádmio tem dureza mais elevada e temperatura de amolecimento mais alta que a das ligas com menor teor de Cádmio. A redução na condutividade elétrica de 96 para 90% IACS é modesta. O Estanho é um elemento de liga endurecedor, produzindo um aumento de resistência de 15% e uma redução na temperatura de amolecimento;

- b) Cobre-Berílio: as ligas Cobre-Berílio constituem um subgrupo dentro dos grupos das ligas de alto teor de Cobre (C17000 até C17700). A adição de 2% de peso de Berílio e pequena quantidade de Cobalto produz uma liga de Cobre com uma resistência muito elevada (C17200 ou CuBe<sub>2</sub>-CoNi) com um limite de resistência mecânica à tração de 1380MPa. O Berílio é caro, tornando o uso das ligas Cu-Be proibitivo, exceto onde suas propriedades de resistência mecânica elevada, boa relaxação e resistência à

Constante de rede	0,36152 nm
Raio atômico	0,1276 nm
Volume atômico	7,114 cm <sup>3</sup> /mol

O número atômico do Cobre é 29, e a massa atômica é 63,546. A ponto de fusão numa rede cúbica de face centrada (CFC). A análise de raio-pressões moderadas, o Cobre cristaliza desde temperaturas baixas até seu X a 20°C da as seguintes dimensões, GERHARTZ et al. (1986):

### 2.3 Característica Atômica do Cobre

nas normas DIN 1785, ASTM B 133M-92 e a UNS. comercialmente puro e ligas com alto teor de Cobre podem ser verificadas As especificações para as principais classificações do Cobre mas também como um refinador de grão. Cromo presente não atua apenas como elemento endurecedor, 80% IACS versus 100% IACS em relação ao Cobre C11000. O 220MPa e uma condutividade elétrica moderadamente elevada de com uma resistência mecânica à tração de 380MPa versus intermetálicas são precipitadas para se chegar a uma liga de Cobre peso produzindo uma outra família de ligas tratáveis, partículas c) Cobre-Cromo: o Cromo é adicionado ao Cobre em até 1,2% em corrosão sejam imprescindíveis;

## 2.4 Densidade do Cobre

A densidade teórica a 20°C, calculada a partir da constante de rede e da massa atômica, é 8,93g/cm<sup>3</sup>. O padrão internacional foi fixado em 8,89g/cm<sup>3</sup> em 1913 pelo IEC (International Electrochemical Commission). Para o Cobre 99,999%, o valor máximo se aproxima a 8,96g/cm<sup>3</sup>, GERHARTZ et al. (1986).

A densidade do Cobre comercial depende de sua composição, especialmente do teor de Oxigênio, do seu tratamento térmico e mecânico e da temperatura. A Tabela 2.1 mostra uma faixa ampla de valores da densidade do Cobre. Observa-se que a densidade do Cobre trabalhado a frio é mais elevada que aqueles do fundido devido ao Cobre fundido ter poros e cavidades de gases retidos. O volume específico a 20°C é 0,112cm<sup>3</sup>/g.

**Tabela 2.1 Variação da Densidade dos Tipos de Cobre, GERHARTZ et al. (1986)**

Tipos de Cobre	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Cobre encruado e recozido	8,89 – 8,93
Cobre eletrolítico tenaz fundido	8,30 – 8,70
Cobre sem oxigênio, fundido	8,85 – 8,93

Na Tabela 2.2 pode-se ver a variação da densidade com a temperatura. A densidade do Cobre é quase uma função linear da temperatura, tal como indicado na Tabela 2.2.

O Cobre puro tem uma destacada trabalhabilidade a quente, ou seja, sem fragilidade a quente, mas sua resistência à temperatura elevada é baixa. Impurezas prejudiciais, que reduzem a resistência a temperaturas elevadas, são principalmente Chumbo, Bismuto, Antimônio, Selênio, Telúrio e Enxofre. A concentração do óxido de tais elementos nos contornos do grão durante o aquecimento provoca a fragilização. Entretanto, tal efeito pode ser desejável quando se requer fácil usinabilidade. Em temperaturas abaixo de zero, o Cobre é um material de alta resistência sem fragilidade a frio, estado mole original.

O Cobre de alta pureza é um metal extremamente dúctil. O trabalho a frio aumenta a dureza e a resistência à tração e o recozimento subsequente elimina o encruamento e endurecimento de modo que pode se voltar ao

## 2.5 Características Mecânicas do Cobre

Temperatura (°C)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1083 (Ponto de fusão)	8,32
900	8,47
600	8,68
20	8,93

et al. (1986)

Tabela 2.2 Variação da Densidade com a Temperatura, GERHARTZ

As mudanças nas propriedades mecânicas típicas, tais como resistência à tração, alongamento e dureza, provocadas pelo tratamento térmico surgem devido, principalmente, à recristalização. A temperatura de recristalização do Cobre é de cerca de 140°C para o Cobre puro e está entre 200 e 300°C para os tipos de Cobre mais comuns. As propriedades mecânicas mais importantes são dadas na Tabela 2.3 para o Cobre metálico genérico.

**Tabela 2.3 Propriedades Mecânicas de Cobre Genérico a Temperatura Ambiente, GERHARTZ et al. (1986)**

Propriedade	Unidade	Cobre Recozido (mole)	Cobre Trabalhado à Frio (encruado, duro)
Módulo de Elasticidade	GPa	100 – 120	120 – 130
Módulo de Cisalhamento	GPa	40 – 45	45 – 50
Coefficiente de Poisson	-	0,35	0,35
Resistência à Tração	MPa	200 – 250	300 – 360
Limite de escoamento	MPa	40 – 120	250 – 320
Alongamento	%	30 – 40	3 – 5
Dureza Brinell	(HB)	40 – 50	80 – 110
Dureza Vickers	(HV)	45 – 55	90 – 120
Dureza Mohs	-	~3	-

## 2.6 Característica Térmica do Cobre

Os valores das propriedades térmicas mais importantes estão

compilados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Propriedades Térmicas do Cobre, GERHARTZ et al. (1986)

Propriedade	Unidade	Valor
Ponto de Fusão	K	1356 (1083°C)
Ponto de ebulição	K	2868 (2595°C)
Calor de fusão	J/g	210
Calor de vaporização	J/g	4810
Pressão de vapor	Pa	0,073
Capacidade térmica específica	J/g.K	0,385
a 20°C (293K) e 1 bar (100KPa)		
Calor específico médio	J/g.K	0,411
0 - 300°C (273 a 573K)		
Coefficiente de dilatação térmica	K <sup>-1</sup>	16,9 X 10 <sup>-6</sup>
0 - 100°C (273 a 373K)		
Condutividade térmica	W/m.K	394
a 20°C (293K)		

## 2.7 Característica Elétrica do Cobre

A propriedade mais importante do Cobre é a sua alta condutividade

elétrica: dentre os metais apenas a Prata é melhor condutora tanto à



condutividade térmica quanto à elétrica. Na Tabela 2.5 observa-se a variação da condutividade elétrica e térmica do Cobre com a temperatura. Também verifica-se uma forte dependência com a temperatura.

**Tabela 2.5 Variação da Condutividade Elétrica e Térmica do Cobre com a Temperatura, GERHARTZ et al. (1986)**

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Condutividade Elétrica (μS/m)
-100	435	110
0	398	60
20	394	58
100	385	44

## 2.8 Fabricação do Cobre Eletrolítico

Os metais são trabalhados por meio de carregamentos mecânicos a fim de se obter, DOYLE et al. (1962):

- formas desejadas;

- propriedades mecânicas melhores.

O trabalho a quente (recozimento) é efetuado acima da temperatura de recristalização e o trabalho a frio (encruamento) é efetuado à temperatura ambiente.

## 2.8.1 Trabalho a quente

Acima da temperatura crítica, e até o ponto de fusão, o grão fica cada vez maior. Quanto mais alta a temperatura, tanto mais rápido o crescimento. Quanto mais tempo, tanto maiores se tornam os grãos. Quanto mais alta a temperatura, menor resistência tem o metal e é mais fácil os grãos serem quebrados em partes menores.

### 1) Vantagens do trabalho a quente:

- Não altera a dureza com a ductilidade do metal;

- Torna o metal mais tenaz;

- O processo é mais rápido e máquinas pequenas podem ser usadas.

### 2) Desvantagens do trabalho a quente:

- Exige ferramentas resistentes ao calor;

- Ocorre oxidação e formação de carepa na superfície do metal;

- A tolerância é menos precisa.

## 2.8.2 Trabalho a frio

O metal trabalhado a frio é conformado até sua forma final por meio da aplicação de pressão a temperatura abaixo da temperatura crítica e na maioria das vezes à temperatura nominalmente igual à ambiente.

### 1) Vantagens do trabalho a frio:

- Tolerância rigorosa;

- Bons acabamentos superficiais;

- Melhores propriedades mecânicas.

2) Desvantagens do trabalho a frio:

- Causam-se tensões residuais dentro dos metais;

- Acontece endurecimento superficial;

- Forças relativamente grandes devem ser aplicadas.

Para se determinar as propriedades mecânicas de um material por tração, a melhor maneira é ensaiar um corpo de prova retirado da peça original. A carga é fornecida pelo dinamômetro da máquina de ensaio e a deformação é obtida mais comumente por meio de um extensômetro. Os instrumentos para medir deslocamento são numerosos, tais como os ópticos, os elétricos e os eletrônicos. Dentre eles o mais simples é o extensômetro mecânico com relógio comparador, do qual é oportuno que se faça uma breve descrição. Esse tipo de extensômetro consiste resumidamente num micrômetro com precisão de 0,001mm montado num dispositivo formado por dois tubos metálicos interpenetrantes, contendo cada um uma garra que serve para fixar o extensômetro no corpo de prova. O micrômetro é fixado nos tubos e o seu ponteiro já indica a deformação, a medida que o tubo externo desliza sobre o interno, pela ação crescente da força de tração no corpo de prova imposta pela máquina. A distância entre

esse corpo é submetido a um esforço qualquer, SOUZA (1974).  
desse corpo (deslocamento), por unidade da mesma dimensão, quando área. A deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer sobre ele, sendo caracterizada dimensionalmente como força por unidade de interna que surge em um corpo, quando são aplicados esforços externos A tensão pode ser definida genericamente como sendo a resistência

### **3.1 Aspectos Gerais**

## **3 PRINCÍPIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO**

as duas garras é denominada braço do extensômetro. Através desta distância obtém-se a deformação.

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão-deformação, que está relacionado com o carregamento aplicado no corpo de prova e o deslocamento que ocorre entre dois pontos do mesmo. O diagrama tensão-deformação é obtido de forma contínua até o corpo de prova se romper. Na Figura 3.1 mostra-se esquematicamente o gráfico tensão-deformação do aço-doce recozido.

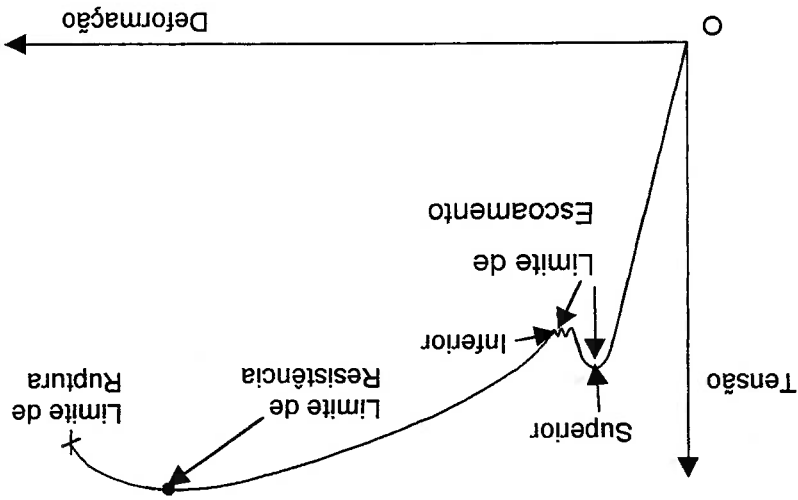


Figura 3.1 Curva Tensão-Deformação do Aço-doce Recozido, SUBBARAO et al., 1973

Verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

que corresponde à lei de Hooke, onde "σ" é a tensão, "E" é o módulo de

elasticidade e "ε" é a deformação.

O módulo de elasticidade (E) é a medida da rigidez do material, quanto maior o módulo de elasticidade, menor é a deformação elástica, tornando-se o metal mais rígido. O módulo de elasticidade é determinado pelas forças de ligação entre os átomos de um metal. Como essas forças mantêm-se constantes na zona de comportamento elástico para cada estrutura dos metais, o módulo de elasticidade, para os metais, resulta em uma das propriedades que menos variam. Entretanto, ele é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, aumentando-se a temperatura, decresce o valor do módulo de elasticidade. Os valores aproximados desse módulo para alguns metais e ligas são dados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 Módulo de Elasticidade de Alguns Metais e Ligas à Temperatura Ambiente, SOUZA, 1974**

Metal	E(kgf/mm <sup>2</sup> )	Liga	E(kgf/mm <sup>2</sup> )
Ferro, Níquel, Cobalto	21.000	Aços-Carbono e Aços-Liga	21.000
Molibdênio, Tungstênio	35.000	Aços inoxidáveis austeníticos	19.600
Cobre	11.900	Ferro fundido nodular	14.000(média)
Alumínio	7.000	Bronzes e Latões	7.700-11.900
Magnésio	4.550	Bronzes de Manganês	10.500(média)
Zinco	9.800	Ligas de Alumínio	7.000-7.450
Zircônio	10.150	Monel (Liga de Níquel)	13.000-18.200
Estanho	4.200	Invar (Liga de Níquel-Ferro)	14.000
Titânio	10.000	Ligas de Titânio	11.200-12.100
Chumbo	1.750	Ligas de Magnésio	4.550(média)
Ouro, Prata	7.800	Ligas de Estanho	5.100-5.400
Platina	15.800	Ligas de Chumbo	1.400-2.950

O escoamento é um tipo de transição heterogênea que ocorre entre a

deformação elástica e plástica. Para o cobre e diversas ligas de cobre, entretanto, devido à grande plasticidade que estes materiais apresentam, o cálculo é baseado pelo ponto da curva correspondente a uma deformação total de 0,5%. Em casos onde os limites de escoamento não são evidentes, convencionalmente usam-se valores de tensão correspondentes a 0,01, 0,1, 0,2 ou 0,5% de deformação total.

A resiliência é a capacidade de um metal de absorver energia quando deformado elasticamente. Para a determinação do módulo de resiliência ( $U_R$ ) pode-se obter do diagrama tensão-deformação.

$$U_R = \int \sigma d\varepsilon = \int E\varepsilon d\varepsilon = E \frac{\varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (3.2)$$

Por outro lado, também pode-se calcular o coeficiente de Poisson:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

onde  $\varepsilon'$  é a deformação lateral. Após atingida a carga máxima, ocorre a estricção do material, que é uma diminuição da seção transversal do corpo de prova na região onde vai ocorrer a ruptura.

Um material deformado elasticamente retorna à sua forma original assim que é retirada a carga. Entretanto, se a carga for maior que a do ponto de escoamento, o material pode ser deformado permanentemente. O modo em que os materiais sofrem deformação permanente é denominado plástico. Na Figura 3.2 mostra-se um diagrama tensão-deformação enfatizando-se o comportamento sob carregamentos e descarregamentos sucessivos sob a ocorrência de deformações plásticas.

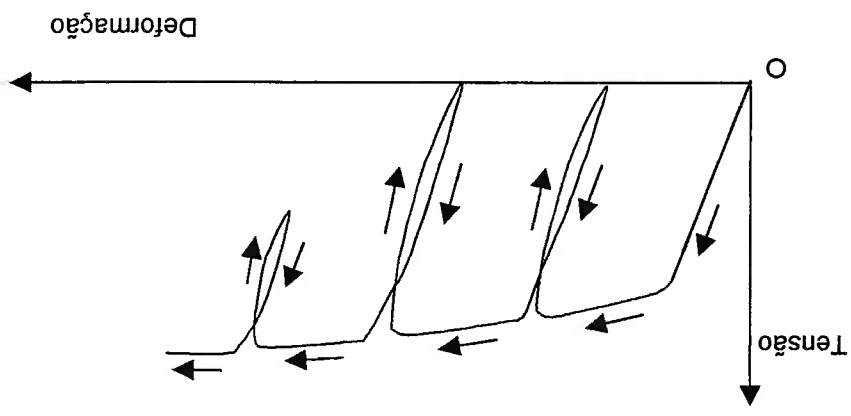


Figura 3.2 Curva de Carga e Descarga Sucessivas sobre Alongamento, PHILLIPS, 1956

A deformação de um material acima do limite de escoamento é parcialmente plástica, e parcialmente elástica. Por isso, encontram-se três tipos de gráfico que determinam o declive da linha de descarga depois do limite de escoamento. Na Figura 3.3 mostram-se estes três tipos de gráfico.

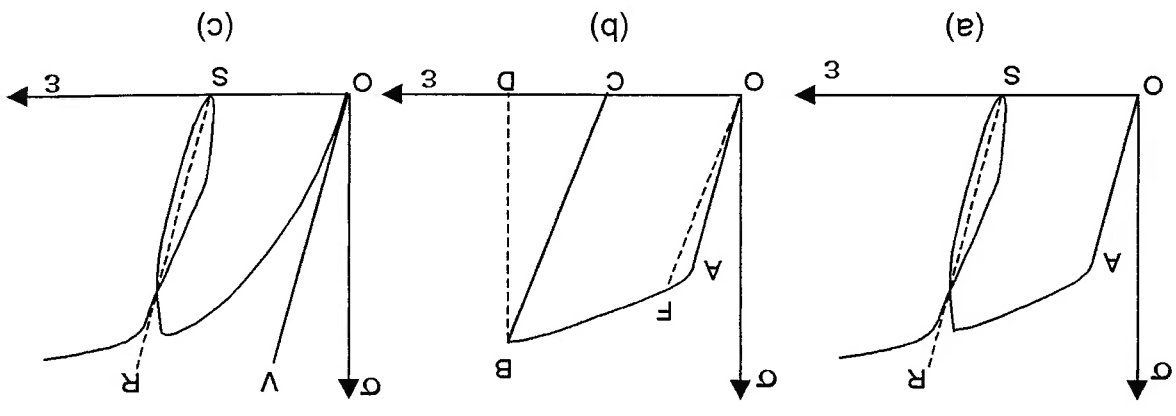


Figura 3.3 Diagramas de Carga e Deformação Plástica, PHILLIPS, 1956:  
 (a) A linha de descarga é proporcional à linha inicial;  
 (b) A linha de descarga é proporcional à linha OF;  
 (c) A linha de descarga é proporcional ao declive inicial.



Geralmente o comportamento da maioria dos metais é semelhante ao gráfico (a) da Figura 3.3. Entretanto, o comportamento do Cobre eletrolítico é semelhante ao gráfico (c) da Figura 3.3.

### **3.2 Corpo de Prova**

Os ensaios de tração geralmente são feitos em corpos de prova normalizados pelas várias associações de normas técnicas pelas razões seguintes:

- a) Facilidade de adaptação na máquina de ensaios e de execução dos ensaios;

- b) Possibilidade de comparação das propriedades dos metais, tais como os limites de escoamento, tensões máximas, módulos de elasticidade, alongamento e estricções.

Os corpos de prova normalizados pelas ABNT MB-4/92 são mostrados na Figura 3.4 e na Tabela 3.2 são apresentados com algumas definições dos termos importantes relacionados ao ensaio de tração.

Quando os corpos de prova são retirados de chapas, cuja espessura é igual ou inferior a 5mm, o comprimento inicial deve ser de 50mm e a largura de 12,5mm conforme o método brasileiro de Ensaio de tração de materiais metálicos da ABNT MB-4.

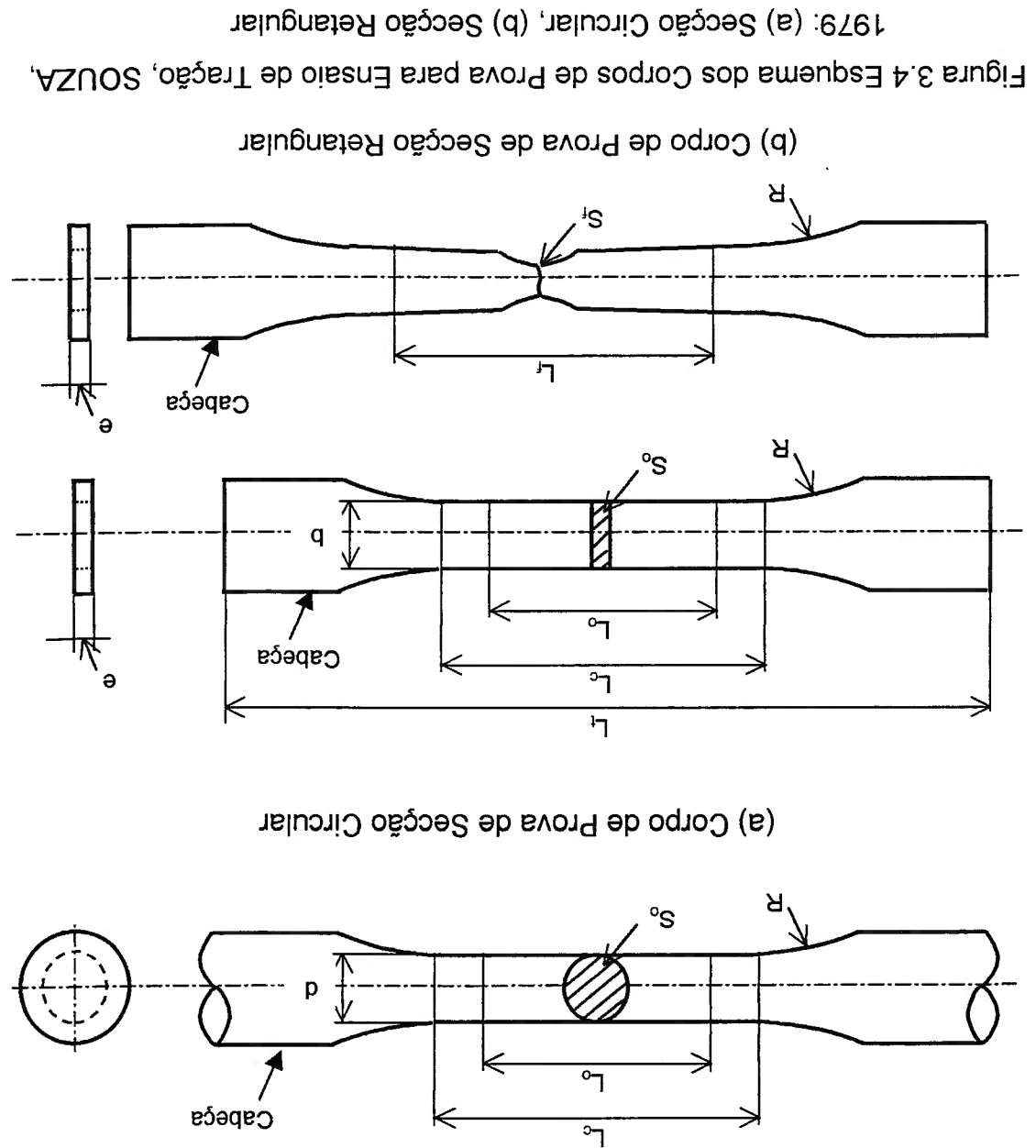


Tabela 3.2 Símbolos Importantes, Suas Definições e Descrições, ABNT

MB-4, 1992

Símbolo	Definição e Descrição
d	Diâmetro da parte útil do corpo de prova de seção reta circular
e	Espessura do corpo de prova de seção reta retangular
b	Largura do corpo de prova de seção reta retangular
L <sub>0</sub>	Comprimento inicial – comprimento entre marcas antes da aplicação da força (base da medida)
L <sub>0</sub>	Comprimento da parte útil – distância entre as zonas de concordância
L <sub>t</sub>	Comprimento total do corpo de prova
L <sub>f</sub>	Comprimento final – comprimento entre as marcas após a ruptura do corpo de prova, medido após recomposição
a	Alongamento – diferença entre o comprimento entre marcas num dado instante do ensaio e o comprimento inicial, L <sub>0</sub>
A	Alongamento percentual – é igual a $100 \cdot (L_f - L_0) / L_0$
S <sub>0</sub>	Área média da seção reta – área média da seção transversal reta da parte útil do corpo de prova antes da aplicação da força
S <sub>f</sub>	Área da menor seção reta – área da menor seção transversal reta da parte útil do corpo de prova após a ruptura
LE <sub>s</sub>	Limite superior de escoamento – valor da tensão convencional no ponto onde se inicia o escoamento
LE <sub>i</sub>	Limite inferior de escoamento – Menor valor da tensão convencional durante o escoamento
Z	Coeficiente percentual de estricção – é igual a $100 \cdot (S_0 - S_f) / S_0$
E	Módulo de elasticidade – a medida da rigidez dos materiais
LR	Limite de resistência – a carga máxima aplicada no corpo de prova
R	Ratão de concordância

Na Tabela 3.3 mostram-se as dimensões recomendadas para os

corpos de prova pela ABNT.

**Tabela 3.3 Dimensões Recomendadas para os Corpos de Prova, ABNT**

**MB-4, 1992**

Corpo de Prova	Diâmetro (d, mm)	Largura (b, mm)	Comprimento da Área Útil (L <sub>o</sub> , mm)	Raio da Concordância (R, mm)
Circular Padrão	d=10	-	L <sub>o</sub> ≥ L <sub>o</sub> +d	R>d
Circular Reduzido	d<10	-	L <sub>o</sub> +d ≤ L <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> +d	R>d
Retangular Padrão (e ≤ 5 mm)	-	b=12,5	L <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> +1,5S <sub>o</sub>	R>1,6b
Retangular Padrão (e > 5 mm)	-	b=40	L <sub>o</sub> >L <sub>o</sub> +1,5S <sub>o</sub>	R>b/2,6
Retangular Reduzido (e ≤ 5 mm)	-	b<12,5	L <sub>o</sub> +1,5S <sub>o</sub> ≤ S <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> +2,5S <sub>o</sub>	R>b
Retangular Reduzido (e > 5 mm)	-	b<40	L <sub>o</sub> +1,5S <sub>o</sub> ≤ S <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> <L <sub>o</sub> +2,5S <sub>o</sub>	R>b/2,6

Segundo a ABNT, o comprimento inicial (L<sub>o</sub>) e o comprimento da área útil (L<sub>u</sub>) dos corpos de prova são recomendados as seguintes formas:

$$L_o = 5,65 \times \sqrt{S_o} \quad (3.2)$$

$$L_o \geq L_o + 1,5 \times \sqrt{S_o} \quad (3.3)$$

Os corpos de prova devem ser marcados antes de serem submetidos ao ensaio, com riscos espaçados igualmente. Após o ensaio, se a ruptura se der no terço central do corpo de prova, basta medir o comprimento final através das duas marcas de referências extremas.

### **3.3 Fundamentos de Deformação Plástica em Nível Atômico**

Em vários materiais cristalinos há normalmente conglomerados cristalinos chamados de policristais. Geralmente as maiores dos metais compõem-se de grande quantidade de pequenos cristais de forma irregular, chamados grãos. A estrutura dos grãos pode ser vista através do método metalográfico, o qual é amplamente usado para exame das superfícies dos metais e ligas. O procedimento do método metalográfico é o seguinte:

a. Lixar a superfície do corpo de prova utilizando as lixas com granulometria fina;

b. Polir a superfície com o pó fino e abrasivo tais como alumina ou magnésia no pano bem macio;

c. Atacar a superfície com ácido diluído ou com reagente químico;

d. Observar os grãos do metal por meio da reflexão microscópica

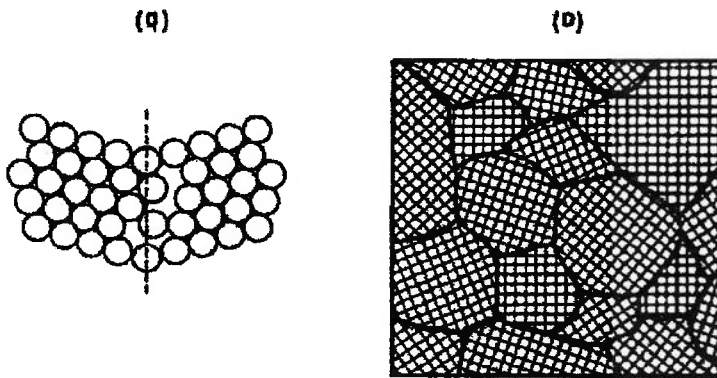
de luz que é refletida em várias direções de acordo com as orientações dos seus cristais.

Na Figura 3.5 mostram-se esquematicamente policristais em nível

atômico.

A deformação plástica ocorre quando os planos atômicos escorregam uns sobre os outros e pode ocorrer também via maclações. Em metais utilizados comercialmente, os grãos são orientados de maneiras diversas, de modo que o caminho de escorregamento plástico tem que mudar de direção entre um grão e o seguinte. Isso significa que há mais planos disponíveis para escorregamento em resposta a tensões aplicadas de qualquer direção. Esse fato explica porque os metais com granulação fina mostram maiores valores de ductilidade. Investigações recentes mostram que uma ação plástica de escorregamento dentro de um cristal é efetuada por discordância. Diversos átomos são deslocados do seu espaçamento normal para criar uma discordância. Esta situação pode ser detectada por ataque metalográfico, uma vez que um reagente ataca uma discordância mais rapidamente do que ataca qualquer outro local ao longo do plano de escorregamento. Na medida em que a tensão aumenta, a discordância se

Figura 3.5 Policristais (a) Grãos polidrícos; (b) Estrutura atômica, COTRELL, 1964



move e a deformação aumenta até que ela encontre uma barreira, tais como um contorno de grão ou outra discordância.

Segundo FONTANA (1984), os contornos de grão são áreas de alta energia e quimicamente mais ativos. Por isso, geralmente, os contornos de grão são atacados um pouco mais rapidamente pela corrosão do que as faces de grão quando expostos em solução corrosiva.

## 4 FENÔMENO DE CORROSÃO DO COBRE EM ÁGUA PURA

### 4.1 Conceitos Básicos de Corrosão

A corrosão pode-se definir como a transformação de um material, geralmente metálico, pela sua interação química ou eletroquímica com o meio ambiente, aliada a esforços mecânicos ou não, PANOSSIAN (1993). A Figura 4.1 mostra um esquema de corrosão baseado nesta definição.

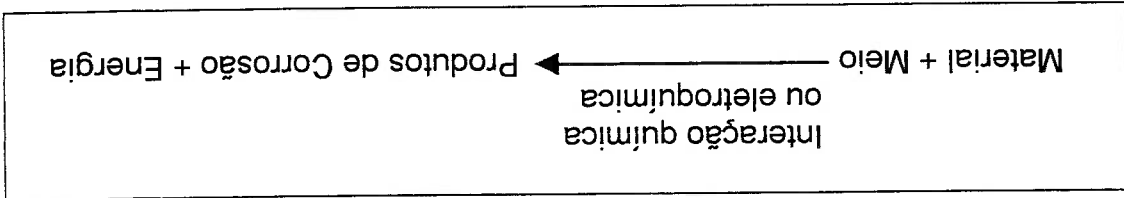


Figura 4.1 Esquema de Corrosão, PANOSSIAN, 1993

Pelo esquema, é possível detectar as quatro formas de combate à corrosão nos casos em que se tem deterioração do material:

1) **Selecionar o metal adequado:** selecionando o metal (ou liga) que não reaja com um certo meio ou reaja com a velocidade de reação desprezível, pode-se diminuir a taxa de corrosão.

2) **Modificar o meio:** controlando o meio, por exemplo, com controle de pH, gases dissolvidos e adição de inibidores, pode-se combater a corrosão. Cabe ressaltar que este tipo de controle é adequado para sistemas fechados.

3) **Interpor barreira entre o metal e o meio:** é possível isolar o metal do meio através de interposição de barreiras, tais como revestimentos de tintas, óleo e passivação.



4) **Fornecer energia:** pode-se interromper a interação entre o metal e o meio fornecendo energia ao sistema. É o caso da proteção catódica.

Geralmente, a transformação de um metal, ou seja, a deterioração causada pela interação físico-química entre o material e seu meio ambiente representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tornando-o inadequado para o uso.

Essa corrosão é um processo espontâneo, transformando os materiais metálicos de modo que não se podem atingir aos seus desempenhos destinados. Estes fenômenos de corrosão de metais são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades da indústria.

Embora a corrosão do metal tenha algumas vantagens, por exemplo, oxidação de aços inoxidáveis com formação da película protetora de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), anodização do alumínio ou suas ligas, fosfatização de superfícies metálicas que permite melhor aderência de tintas, proteção catódica com ânodos de sacrifício e aspecto decorativo de arte, é necessário evitar o fenômeno de corrosão pela questão econômica e de segurança.

Entre os fenômenos de corrosão, a corrosão em meios aquosos é a mais comum, atingindo aproximadamente 90% dos casos conhecidos, segundo WOLYNEC (1992). A corrosão em meios aquosos ocorre por meio de um processo eletroquímico que consiste numa passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica.

Para entender melhor o fenômeno de corrosão, precisa-se conhecer alguns termos ligados à Eletroquímica, Termodinâmica e Cinética. Alguns termos importantes são os seguintes:

1) Eletrodo: um metal que forma uma dupla camada elétrica é chamado de eletrodo. Na Figura 4.2 mostra-se a dupla camada elétrica;

2) Ânodo: um eletrodo que perde seus elétrons. (Região a qual acontece a reação anódica);

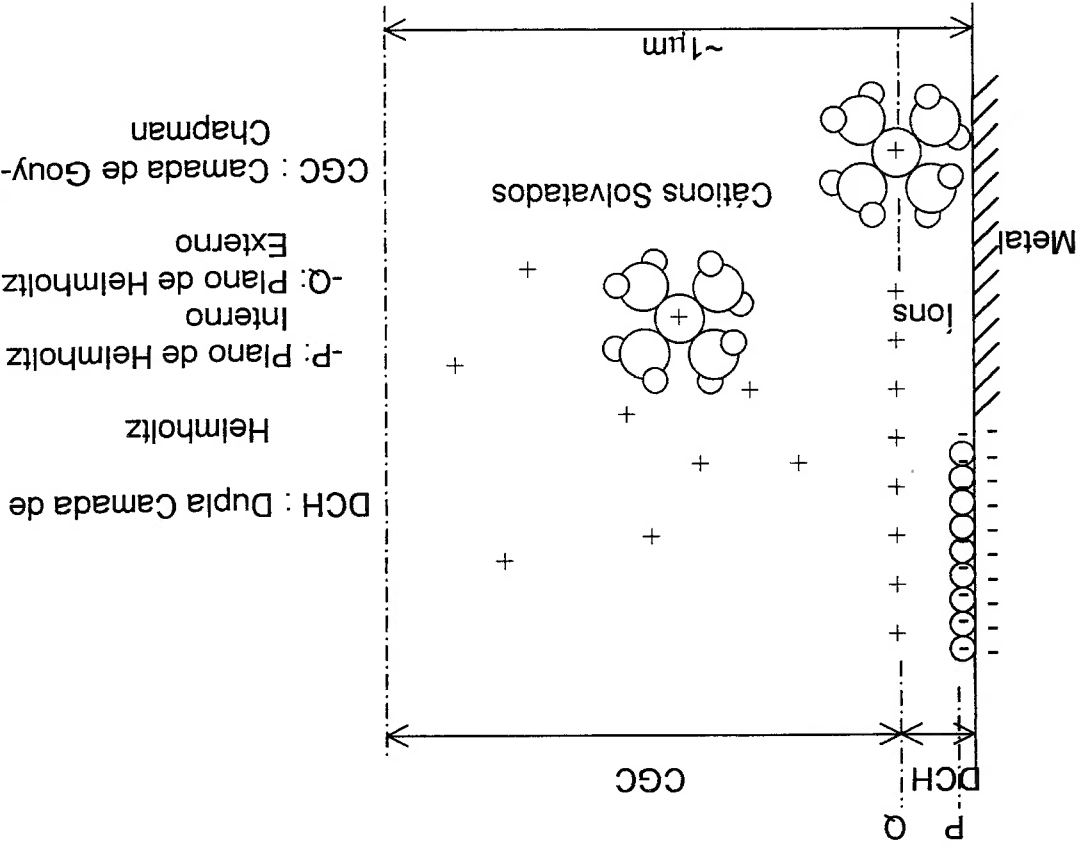


Figura 4.2 Estrutura da Dupla Camada Elétrica, WOLYNEC, 1992

3) Cátodo: um eletrodo que ganha elétrons. (Região na qual acontece a reação catódica);

- 4) Eletrolito: uma solução que conduz ions do ânodo para o cátodo;
- 5) Polarização: quando um potencial de equilíbrio,  $E_e$ , for alterado, diz-se que o eletrodo sofre polarização;
- 6) Equação de Nernst:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{ox.}}{a_{red.}} \quad (4.1)$$

onde: E é o potencial de equilíbrio observado,

$E^\circ$  é o potencial de eletrodo padrão em volt (o potencial de equilíbrio quando as atividades dos reagentes e dos produtos são unitárias),

R é a constante do gás perfeito, equivalente a 8,314 joule/(K.mol),

T é a temperatura absoluta em Kelvin,

z é o número de elétrons envolvidos na reação,

F é a constante de Faraday, equivalente a 96.500,

$a_{ox.}$  é a atividade dos oxidantes,

$a_{red.}$  é a atividade dos redutores.

Seja  $T = 25^\circ\text{C} = 298\text{K}$  e 1 atm da pressão de atmosfera, a

equação (4.1) é dada:

$$E = E^\circ + \frac{0,0591}{z} \log \frac{a_{ox.}}{a_{red.}} \quad (4.2)$$

Esta equação é usada para a nova determinação do potencial do eletrodo a  $25^\circ\text{C}$  diferente dos apresentados na tabela de potenciais padrões.

O conjunto de valores dos potenciais de eletrodo padrão das diferentes reações eletroquímicas constitui a série eletroquímica. Para Na Tabela 4.1 mostram-se os valores das principais reações. Para outras temperaturas os valores de  $E^\circ$  deverão ser procurados em manuais de química. Em alguns casos a variação de  $E^\circ$  com a temperatura é pouco significativa e pode-se utilizar os valores da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Série Eletroquímica das Principais Reações a 25°C, WOLYNEC, 1992

Reação	$E^\circ$ (V <sub>H</sub> )
$Al(OH)_3 + 3e \leftrightarrow Al + 4OH^-$	-2,35
$Mg^{2+} + 2e \leftrightarrow Mg$	-2,34
$Al^{3+} + 3e \leftrightarrow Al$	-1,67
$Zn(OH)_2 + 2e \leftrightarrow Zn + 4OH^-$	-1,216
$Zn(NH_3)_4^{2+} + 2e \leftrightarrow Zn + 4NH_3$	-1,03
$Zn^{2+} + 2e \leftrightarrow Zn$	-0,762
$Fe^{2+} + 2e \leftrightarrow Fe$	-0,440
$Cd^{2+} + 2e \leftrightarrow Cd$	-0,402
$PbSO_4 + 2e \leftrightarrow Pb + SO_4^{2-}$	-0,35
$Ni^{2+} + 2e \leftrightarrow Ni$	-0,250
$Sn^{2+} + 2e \leftrightarrow Sn$	-0,136
$Pb^{2+} + 2e \leftrightarrow Pb$	-0,126
$H^+ + e \leftrightarrow \frac{1}{2}H_2$	0
$Cu^{2+} + e \leftrightarrow Cu^+$	+0,167
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \leftrightarrow H_2SO_3 + H_2O$	+0,20
$Cu^{2+} + 2e \leftrightarrow Cu$	+0,345
$O_2 + 2H^+ + 4e \leftrightarrow 4OH^-$	+0,401
$I_2 + 2e \leftrightarrow 2I^-$	+0,53
$O_2 + 2H_2O + 2e \leftrightarrow H_2O_2$	+0,682
$Fe^{3+} + e \leftrightarrow Fe^{2+}$	+0,771
$Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow 2Hg$	+0,799
$Ag^- + e \leftrightarrow Ag$	+0,800

Tabela 4.1

(Continuação)

Reação	E° (V <sub>H</sub> )
$NO_3^- + 2H^+ + e \leftrightarrow NO_2 + H_2O$	+0,81
$Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg$	+0,854
$2Hg_2^{2+} + 2e \leftrightarrow Hg_2^+$	+0,910
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \leftrightarrow HNO_2 + H_2O$	+0,94
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \leftrightarrow NO + 2H_2O$	+0,96
$Br_2 + 2e \leftrightarrow 2Br^-$	+1,065
$O_2 + 4H^+ + 4e \leftrightarrow 2H_2O$	+1,229
$Cl_2 + 2e \leftrightarrow 2Cl^-$	+1,358
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \leftrightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1,36
$Au^{3+} + 3e \leftrightarrow Au$	+1,42
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \leftrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,52
$SO_4^{2-} + 4H^+ + PbO_2 + 2e \leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$	+1,635
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow 2H_2O$	+1,77
$S_2O_8^{2-} + 2e \leftrightarrow 2SO_4^{2-}$	+2,05
$F_2 + 2e \leftrightarrow 2F^-$	+2,85

## 7) Equação de Butler-Volmer:

$$i = i_0 \left[ \exp \frac{\alpha z F \eta}{RT} - \exp \frac{(1 - \alpha) z F \eta}{RT} \right] \quad (4.3)$$

onde:  $i$  é a densidade de corrente,

$i_0$  é a densidade de corrente de troca,

$\eta$  é a sobreensão (Extensão da polarização medida com

relação ao potencial de equilíbrio)

$\alpha$  é o coeficiente de transferência, a relação entre a

densidade de corrente resultante e a sobreensão

aplicada,

$z$ ,  $F$ ,  $R$  e  $T$  são iguais ao caso da equação de Nernst.

Na Figura 4.3 mostram-se a energia livre de ativação e o

coeficiente de transferência.

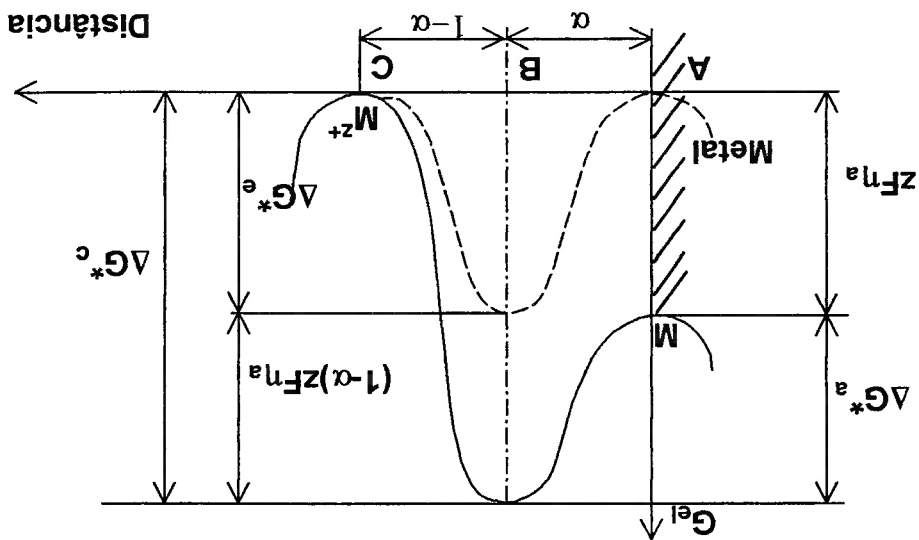


Figura 4.3 Esquema de Variação da Energia Livre Eletroquímica  $G_{el}$  de um Metal Polarizado Anodicamente de  $\eta_a$ .  $\alpha$  é o Coeficiente de Transferência ou de Simetria, WOLYNEC, 1992

8) Equação de Tafel: na equação de Butler-Volmer, se o valor de sobre-tensão for superior a 0,03V, em valor absoluto, um dos termos da equação se torna desprezível em relação ao outro. É conhecida como equação de Tafel dada por:

$$\eta = b \cdot \log \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (4.4)$$

onde: b é declive de Tafel,  $b_a = 2,303 \frac{RT}{\alpha z F}$ ;

$$b_c = -2,303 \frac{RT}{(1-\alpha) z F}$$

9) Curvas de Polarização: as curvas que se obtêm através de representação gráfica em diagramas de potencial de eletrodo em função da densidade de corrente são chamadas de curvas de polarização. Elas são úteis para caracterizar o fenômeno de corrosão. Na Figura 4.4 mostram-se as curvas de polarização esquematicamente.

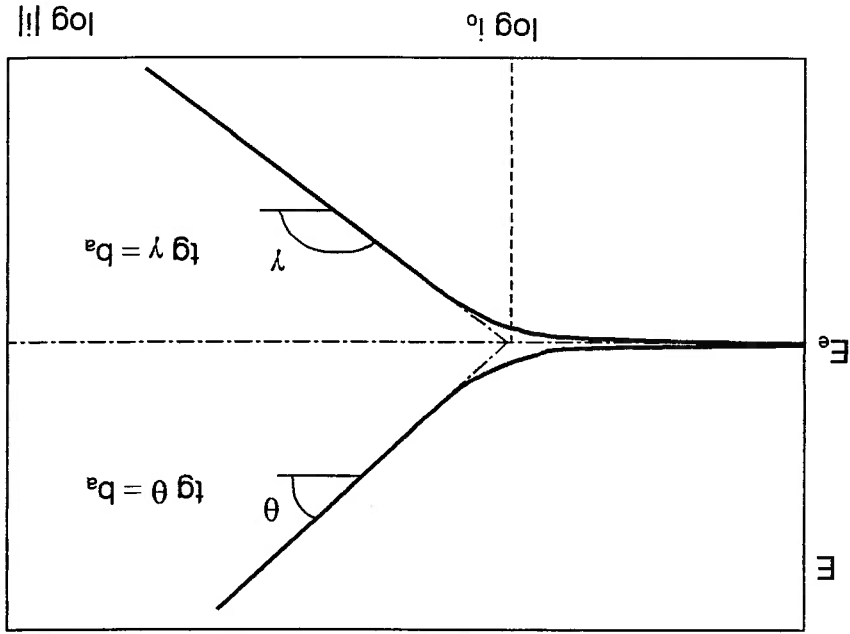


Figura 4.4 Curvas de Polarização Anódica ( $i_a$ ) e Catódica ( $i_c$ ) num Diagrama Logarítmico.  $E_e$  = Potencial de Equilíbrio;  $i_0$  = Densidade de Corrente de Troca, WOLYNEC, 1992

10) Tendência à Corrosão (TC): para haver corrosão é necessário que o potencial de equilíbrio da reação catódica seja maior do que o potencial de equilíbrio da reação anódica. Na Figura 4.5 mostram-

se esquematicamente as curvas de polarização no caso de ocorrer corrosão. A tendência à corrosão é definida por:

$$TC = E_c - E_a \quad (4.5)$$

onde:  $E_c$  é o potencial de equilíbrio da reação catódica,

$E_a$  é o potencial de equilíbrio da reação anódica.

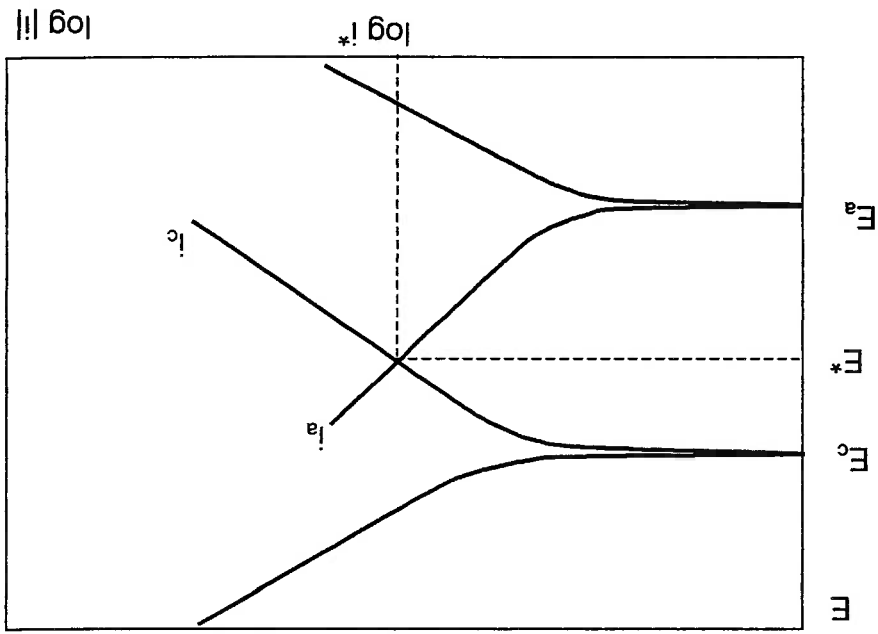


Figura 4.5 Curvas de Polarização Anódica (i<sub>a</sub>) e Catódica (i<sub>c</sub>) num Diagrama

Logarítmico.  $E_a$  = Potencial de Equilíbrio de Reação Anódica;  $E_c$  = Potencial de Equilíbrio de Reação Catódica;  $E^*$  = Potencial de Corrosão;  $i^*$  = Densidade de Corrente de Corrosão

O valor da tendência à corrosão é utilizado na previsão da possibilidade termodinâmica de ocorrência de corrosão. Se TC for inferior a zero ( $TC < 0$ ), não ocorrerá corrosão. Se TC for igual a zero ( $TC = 0$ ), também não ocorrerá corrosão do metal. No entanto, se TC for superior a zero ( $TC > 0$ ), poderá ocorrer corrosão do metal;



## 4.2 Formas de Corrosão

As formas de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou a forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. As formas de corrosão classificadas de acordo com a aparência de corrosão, GENTIL (1996), são as seguintes:

- 1) **Uniforme:** a corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura do material. É conhecida como corrosão generalizada;
- 2) **Por placas:** a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica, formando placas com escavações;
- 3) **Alveolar:** a corrosão se processa na superfície metálica, produzindo sulcos ou escavações, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro;
- 4) **Puntiforme (ou por pite):** a corrosão se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro;
- 5) **Intergranular:** a corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do metal, o qual pode fraturar quando sollicitado por esforços mecânicos, ou seja, sob tensão;
- 6) **Filiforme:** a corrosão se processa sob a forma de finos filamentos. Geralmente ocorre em superfícies metálicas

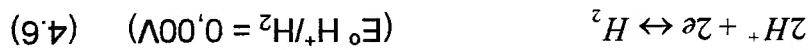
- revestidas com tintas ou com metais, ocasionando o deslocamento do revestimento;
- 7) **Estolição:** a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados;
- 8) **Corrosão gráfitica:** a corrosão se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente;
- 9) **Dezincificação:** é a corrosão que ocorre em ligas de Cobre-zinco (latões), observando-se aparecimento de regiões com coloração avermelhada contrastando com a característica coloração amarela dos latões;
- 10) **Empoamento pelo hidrogênio:** o hidrogênio atômico penetra no metal e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente e em regiões com descontinuidades, com inclusões e vazios, ele se transforma em H<sub>2</sub>, exercendo pressão e originando a formação de bolhas no interior do metal;
- 11) **Em torno do cordão de solda:** forma de corrosão que se observa em torno do cordão de solda;
- 12) **Frestas:** a corrosão se processa pela ocorrência de uma intensa corrosão em frestas que se formam por contato de metal com metal ou com não metal.
- Além disso, pode-se dividir pelas causas ou mecanismos (por aerção diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, sob tensão, seletiva, etc.), pelos fatores mecânicos (sob tensão, sob fadiga, por atrito,

associada à erosão, etc.) e pelo meio corrosivo (atmosférica, pelo solo, pela água do mar, por sais fundidos, etc.)

### 4.3 Comportamento do Cobre em Meio Aquoso

O Cobre é mais nobre que o Hidrogênio, na série eletroquímica e, portanto, termodinamicamente inerte, sem tendência a corroer em água ou em soluções de ácidos não oxidantes, livre de oxigênio dissolvido.

Para o Cobre, à pressão atmosférica, o íon  $H^+$  não pode sofrer a reação de redução:

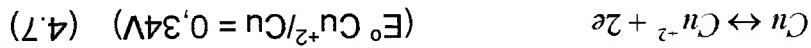


porque o Cobre é mais nobre que o  $H^+$ , na série eletroquímica.

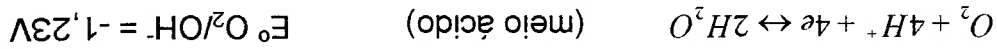
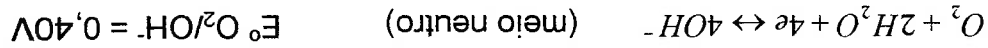
A reação de oxidação do Cobre, segundo MATTISSON e BOCKRIS (1959), é caracterizada pelas reações seguintes:



Dessa forma, a reação determina a cinética do processo global:



Assim, o Cobre, para sofrer corrosão, exige a presença de outra espécie oxidante, que sofre uma das seguintes reações de redução:

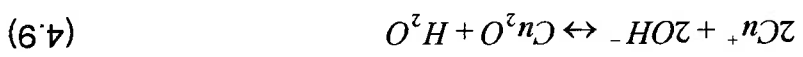


Assim, a reação global de corrosão do Cobre é dada por:

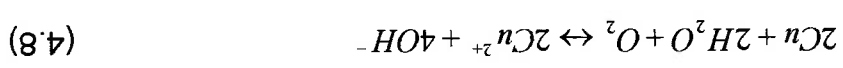
O diagrama de equilíbrio potencial – pH, ou seja, o de POURBAIX mostrado na Figura 4.6, pode ser utilizado para a verificação da possibilidade de ocorrência de corrosão. Cabe analisar em que condições práticas poderá ocorrer a corrosão do Cobre em contato com água. Se a água é perfeitamente des aerada, não se verificará corrosão do Cobre, pois o seu domínio de estabilidade estende-se acima da linha  $\bar{a}$  do diagrama de POURBAIX. Em outras palavras, o potencial de equilíbrio do Cobre está acima do potencial de equilíbrio da reação (4.6), linha  $\bar{a}$ . Em águas aeradas, no entanto, o Cobre poderá corroer, sendo a reação catódica de redução do oxigênio dissolvido, linha  $\bar{b}$ . Os domínios de corrosão indicam que as soluções ácidas e muito alcalinas, tais como ácido sulfúrico e soluções de hidróxido de sódio, poderão corroer fortemente o Cobre se forem ou contiverem oxidantes. Soluções neutras e ligeiramente alcalinas, contendo oxidantes poderão passar o metal. Através dos diagramas de Pourbaix, pode-se observar que os diagramas de equilíbrio constituem-se em convenientes dispositivos para:

CuO.  $Cu^{+2} + 2OH^- \rightarrow \overline{Cu(OH)_2} \rightarrow \overline{CuO} + H_2O$  {azul esverdeado} {marrom a preto}

Em presença de oxidante mais poderoso (mais  $O_2$  presente) forma-se



primeiro óxido protetor  $Cu_2O$ .  
Em soluções mais alcalinas, em presença de oxigênio, forma-se o



1) Visualização de possibilidade de ocorrência de corrosão;

2) Verificação das composições possíveis dos produtos de corrosão;

3) Verificação das possíveis modificações que poderiam impedir ou

minimizar a corrosão.

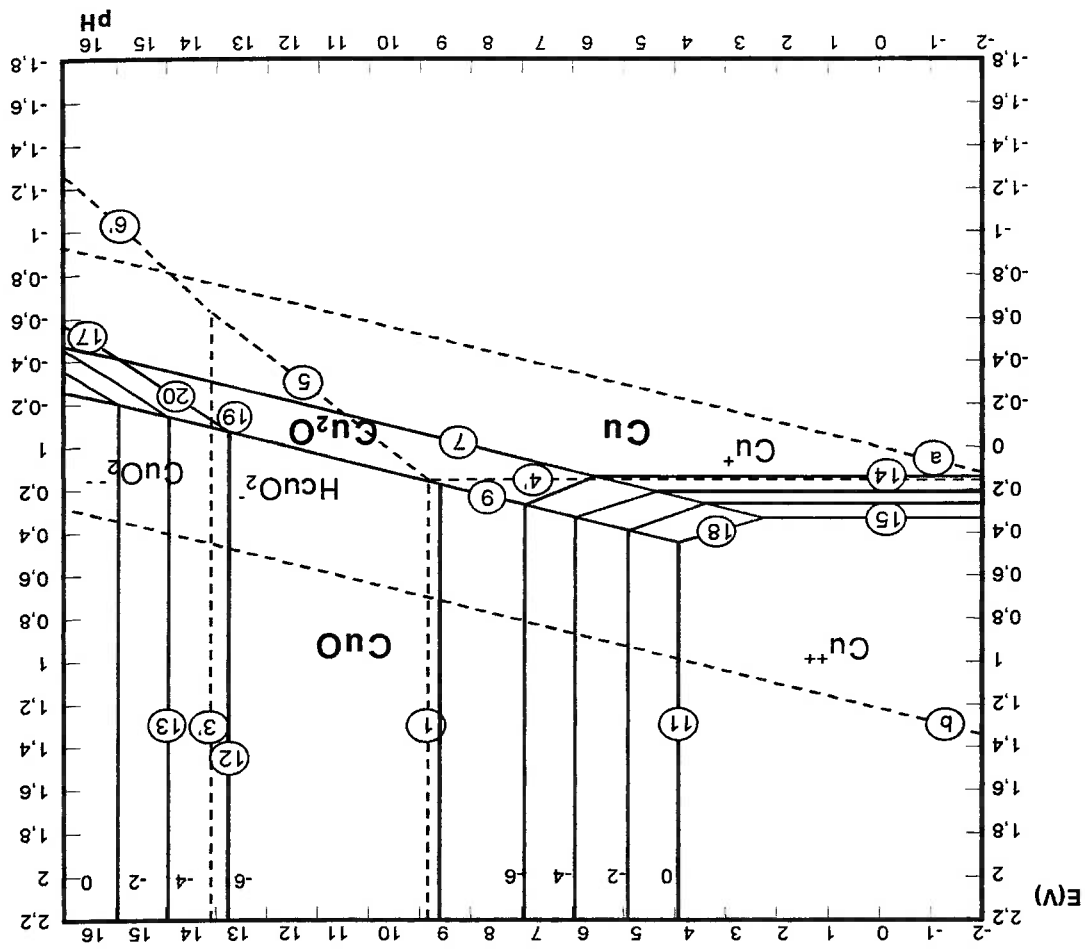
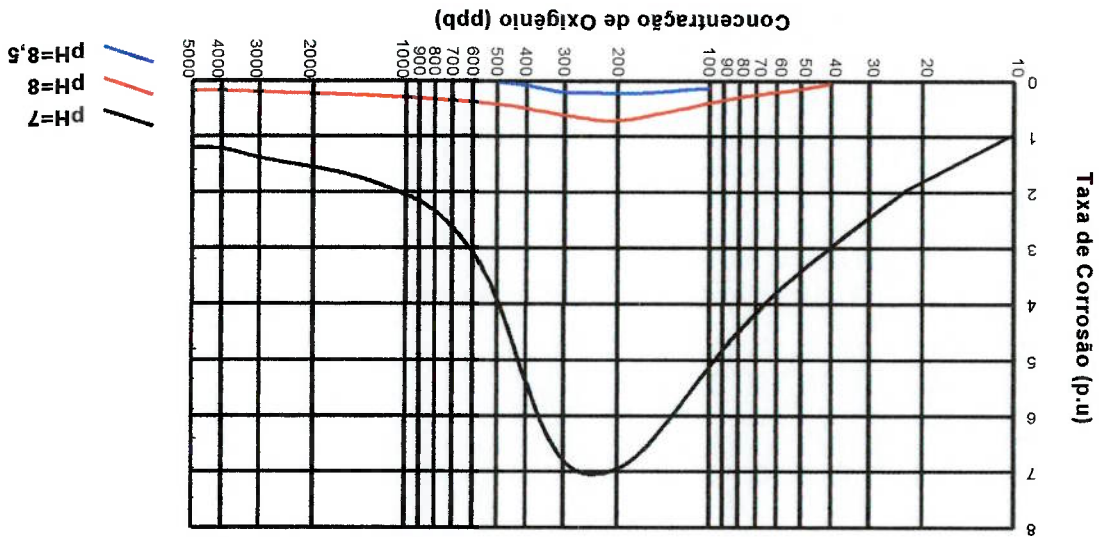


Figura 4.6 Diagrama de Equilíbrio de Potencial-pH para o Sistema de Cobre-Água, a 25°C, ZOUBOV, VANLEUGENHAGHE e POURBAIX, 1966

A Figura 4.7 ilustra a influência dos valores de pH, sobre a corrosão do Cobre. Percebe-se que, quando se está na região de estabilidade dos óxidos protetores (pH=8,5) a influência não é tão grande, mas, para pH=7,0

Segundo SCHLEITHOFF (1990), a falha dos condutores dos hidrogenadores está associada à entrada de ar no sistema, seja por vazamentos ocasionais, seja pela admissão de água de reposição não desaerada. A entrada de ar no sistema, o qual contém  $\text{CO}_2$ , provoca o aumento da acidez com decorrente queda no valor de pH da água de resfriamento, o que acarreta no aumento de solubilidade dos óxidos. Além disso, a entrada de ar implica a entrada de oxigênio no sistema, que atua como oxidante incentivando a oxidação do Cobre com geração de íons  $\text{Cu}^+$  e  $\text{Cu}^{2+}$ , por atingirem-se potenciais mais positivos, levando à formação de óxido cúprico,  $\text{CuO}$ , o qual apresenta maior solubilidade que  $\text{Cu}_2\text{O}$ , em condições mais ácidas ( $\text{pH} < 7,5$ ).

Figura 4.7 Taxas Médias de Corrosão do Cobre em Água Pura à 30°C, SCHLEITHOFF, 1990



é acentuada e existe um teor crítico de  $\text{O}_2$  (200 a 300ppb) onde se tem um valor máximo de velocidade de corrosão, SCHLEITHOFF (1990).

Logo, após a formação de óxido cúprico, o sistema volta às condições "normais", pois o oxigênio é consumido na formação do  $\text{CuO}$  e o  $\text{CO}_2$  é retido na resina trocadora de íons na forma dos íons  $\text{HCO}_3^-$ . Assim, o potencial cai e o pH aumenta, implicando na queda de solubilidade dos óxidos, atingindo-se a saturação e a precipitação do óxido de menor solubilidade. Forma-se primeiro o  $\text{Cu}_2\text{O}$ , enquanto o pH estiver abaixo de 8,5, e, acima desse valor, pode-se formar algum  $\text{CuO}$ .

Uma explicação de caráter apenas teórico para o entupimento dos condutores, em vista de não se terem realizados ensaios práticos em laboratório ou em circuitos que simulem a situação real, é a possibilidade de formação de partículas coloidais de óxido cuproso, e que são arrastadas pelo fluxo de água. Essa suspensão de partículas coloidal dispersa poderia ter seu equilíbrio quebrado ao passar por regiões de maior temperatura (saída dos condutores), coalescendo (juntando-se) e precipitando-se nessas regiões, de maneira contínua. Saliente-se que nessas regiões, entradas e saídas, é onde se gera o maior número destas partículas em função da maior turbulência característica nessas regiões e, assim só uma coalescência provocada por mudança de temperatura poderia explicar o acúmulo de óxido nessas regiões.

A Figura 4.8 mostra os depósitos nos condutores nos próximos das transposições, que são áreas de alta turbulência. Inicialmente, seriam formadas estrias transversais, com estas coletando os produtos de corrosão, os quais levariam à formação de um bloqueio. Estes depósitos também são encontrados nas áreas de entrada e saída que levam a restrições de fluxo.

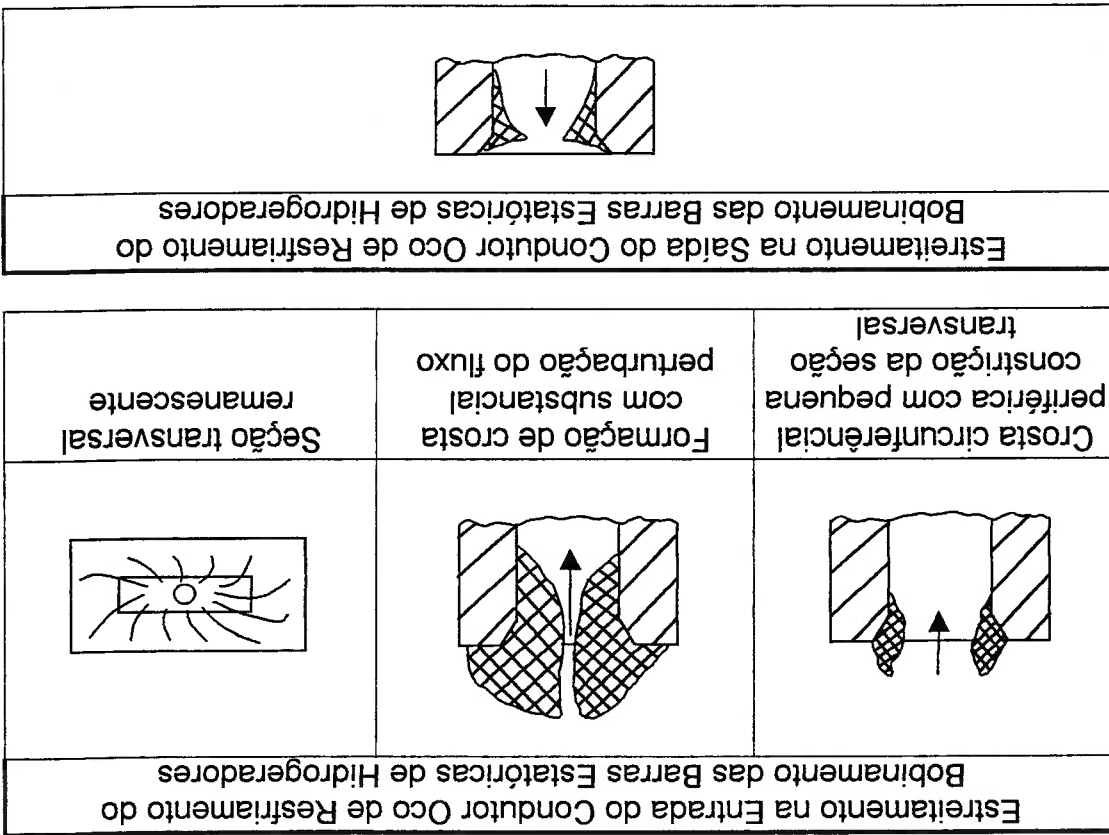


Figura 4.8 Depósitos na Entrada e Saída dos Condutores Ocos, SCHLEITHOFF, 1990

Além da deposição mecânica, a deposição de cristais a partir da solução supersaturada pode ocorrer nas áreas de alta turbulência, o que explica a formação das estrias.



#### **4.4 Influência das Variáveis Importantes**

Através da análise dos resultados de ensaios convencionais de corrosão, BASTOS (1997) recomenda os seguintes parâmetros para a operação do sistema de refrigeração de ITAIPU BINACIONAL:

- 1) Temperatura: menos elevadas, pois, operar a temperaturas elevadas é um fato agravante para os valores de taxa de corrosão;

- 2) Valor de pH: 8,0 - 9,0, pois uma vez que valores mais altos de pH elevam significativamente a condutividade da água;

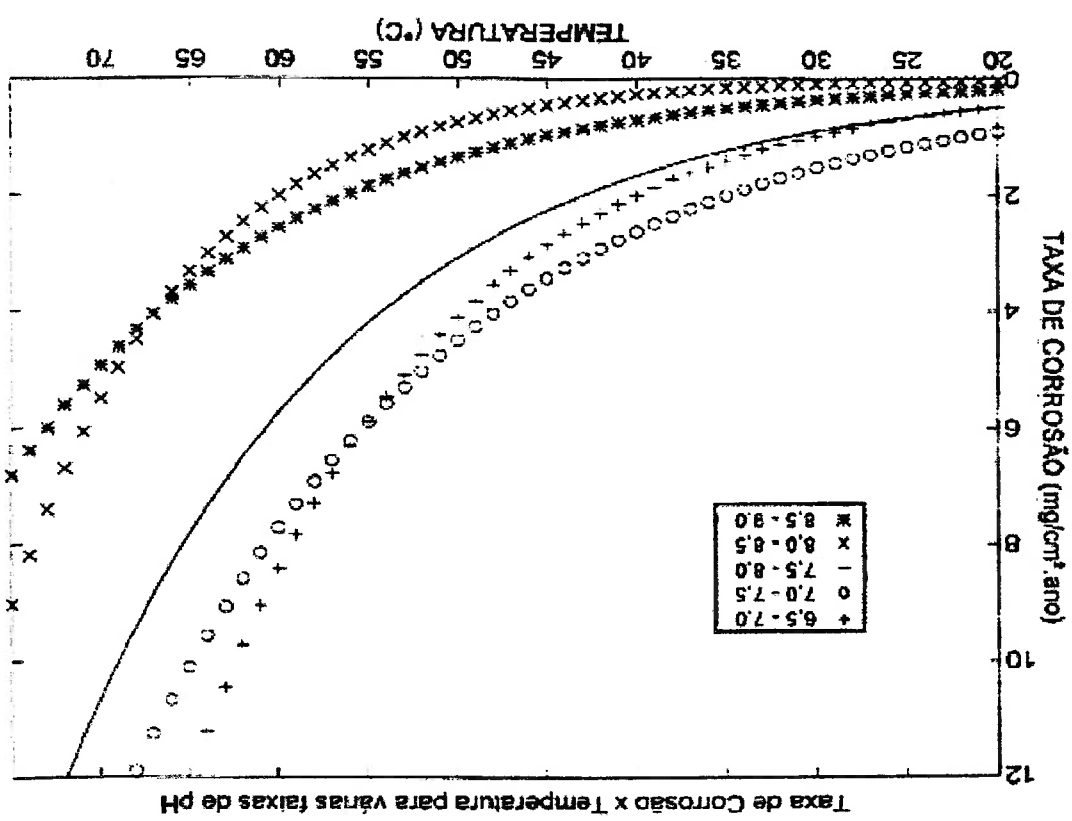
- 3) Teor de oxigênio: manter fora da faixa de 100 – 500ppb.

Foram feitos ensaios entre as temperaturas de 35 à 80°C com a duração de 7 dias por BASTOS (1997). Os resultados demonstram que à medida em que a temperatura aumenta, a taxa de corrosão também aumenta. A Figura 4.9 mostra a influência da temperatura para a taxa de corrosão do Cobre. Nota-se que para temperaturas mais altas, as taxas de corrosão para as curvas apresentadas ficam com valores mais elevados.

- 1) A taxa de corrosão é maior para água pura ácida (pH<7);
- 2) Para a faixa de pH entre 7 e 8, a taxa de corrosão começa a diminuir;
- 3) A faixa de pH entre 8 e 9, a taxa de corrosão é bem menor;
- 4) Para pH maior que 10, a taxa de corrosão tende a crescer novamente.

Em relação à influência do pH da água pura sobre a taxa de corrosão, a Figura 4.10 mostra as seguintes características:

Figura 4.9 Influência da Temperatura para a Taxa de Corrosão do Cobre, BASTOS, 1997



Segundo as conclusões dos FENG, e seus co-autores (1997), que observaram comportamento da corrosão do Cobre em solução aquosa com diferentes valores de pH, usando técnica eletroquímica e análise de superfícies do Cobre, pode-se verificar a tendência da taxa de corrosão em relação à influência do pH. Eles verificaram que a camada passiva forma-se mais densa e coerente no pH igual à 10. Nas Figuras 4.11 e 4.12, mostra-se a variação de espessura da câmara óxida aderida na superfície do corpo de prova e correntes de corrosão do Cobre em relação a vários valores de pH, obtidos através da técnica eletroquímica e gravimétrica.

Figura 4.10 Influência do pH da Água Pura sobre a Taxa de Corrosão, BASTOS, 1997

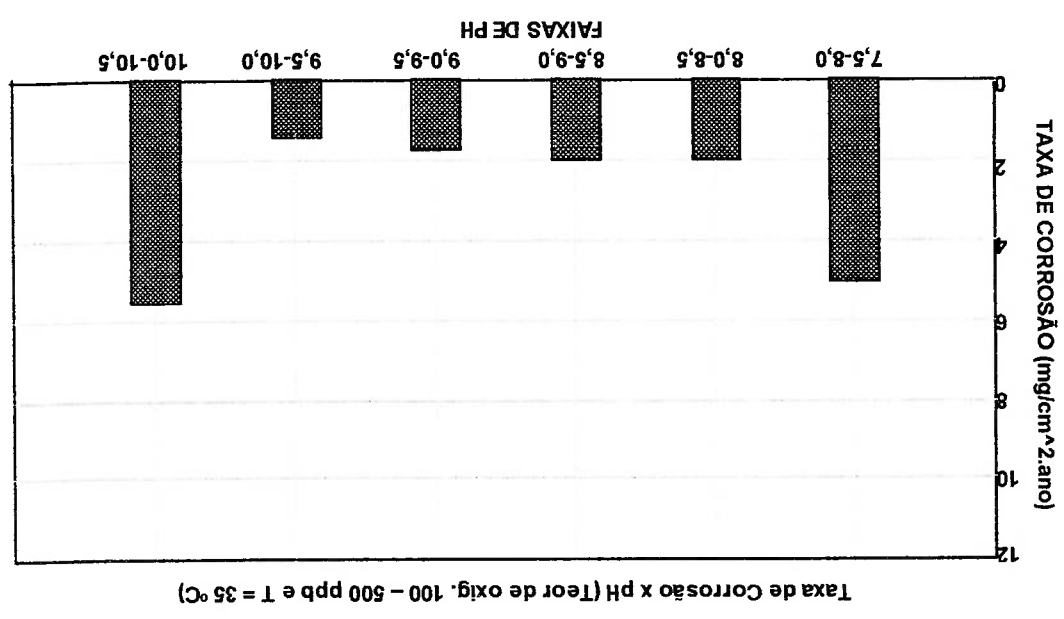


Figura 4.12  $i_{corr}$  do Cobre na Solução de Vários Valores de pH (T=30°C, Tempo de Imersão: 24 horas), FENG et al., 1997

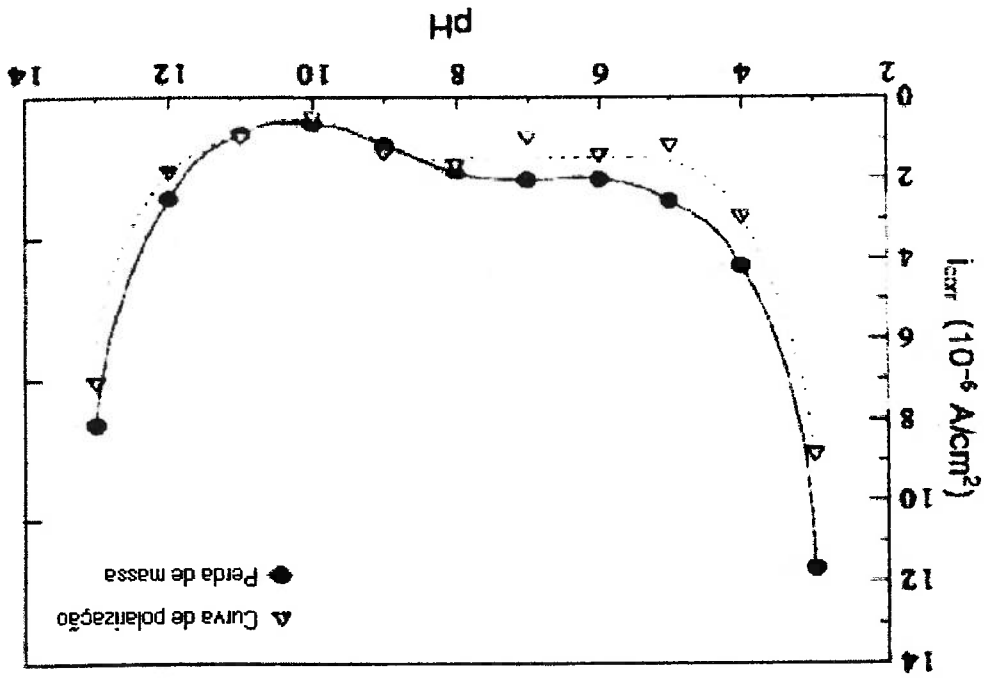
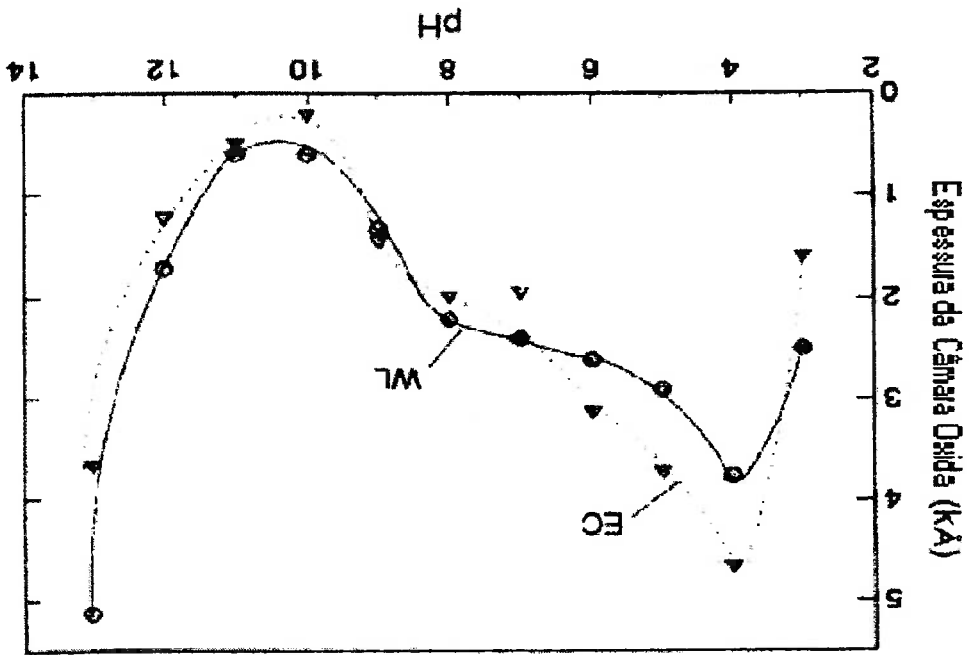


Figura 4.11 Variação de Espessura da Câmara Oxida com pH (EC: Método Eletroquímico; e WL: Método de Perda de Massa; T=30°C; Tempo de Imersão: 24 horas), FENG et al., 1997



O efeito da concentração do oxigênio dissolvido na água é apresentado na Figura 4.13. Observa-se que os valores do teor de  $O_2$  variaram desde cerca de 50ppb até cerca de 1500ppb e a temperatura de ensaio foi de 55°C. Os resultados confirmaram a tendência apresentada por SCHLEITHOFF (1990) de que as taxas de corrosão são maiores para a faixa de concentração de oxigênio dissolvido na água entre 100 e 500ppb, diminuindo para valores fora dessa faixa.

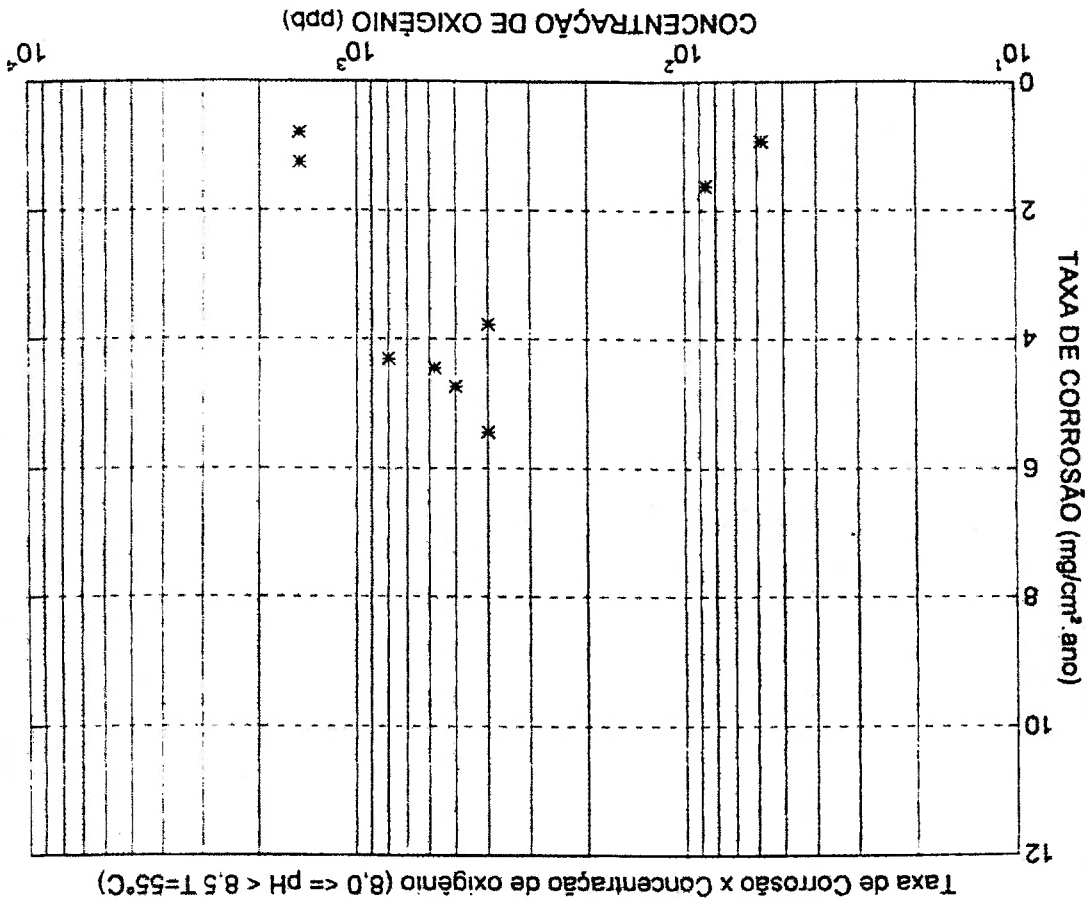


Figura 4.13 Variação da Taxa de Corrosão de Cobre em Função do Teor de Oxigênio Dissolvido em Água Pura com uma Faixa de pH entre 8,0 e 8,5 e Temperatura de 55°C, BASTOS, 1997

WULFHORST (1997) também verificou a influência da temperatura na taxa de corrosão e acrescentou que a velocidade do fluxo tem bastante influência na taxa de corrosão do Cobre. Na Figura 4.14 mostra-se a influência da velocidade do fluxo na taxa de corrosão. Ele verificou que à medida que essa velocidade aumenta, também cresce a taxa de corrosão, de forma crescente e aparentemente linear. Como a diminuição da velocidade acarretaria um aumento da temperatura média da água, e considerando todos os fatores envolvidos, ele recomendou a atual velocidade de 2,0m/s de operação do sistema de refrigeração.

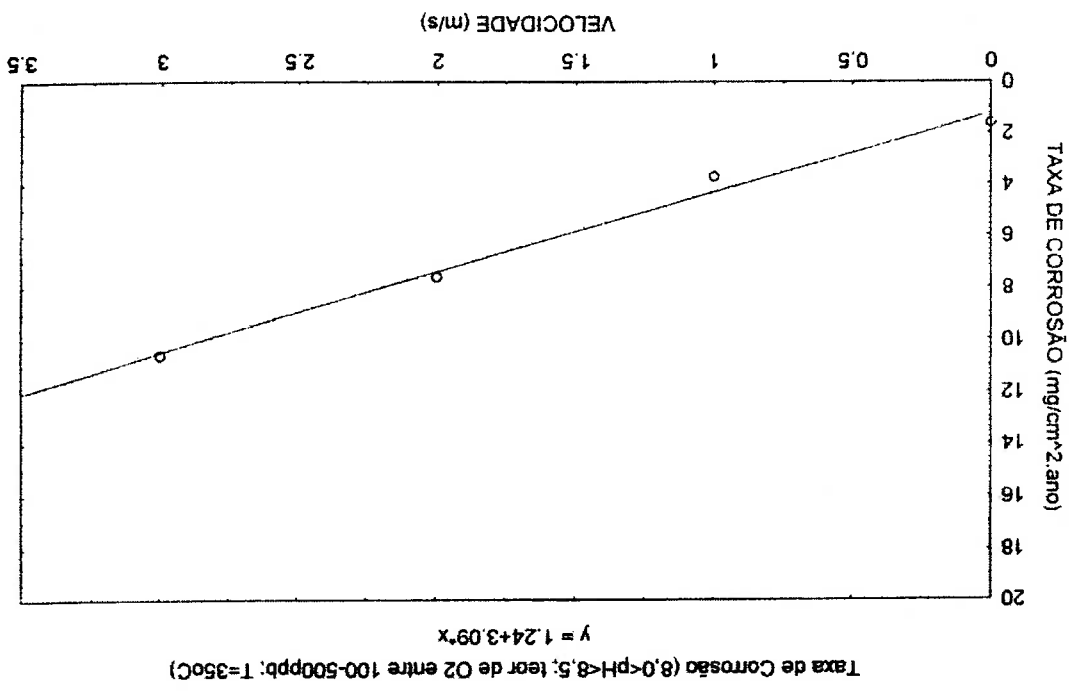


Figura 4.14 Variação da Taxa de Corrosão de Cobre em Função da Variação da Velocidade de Fluxo (Água Pura com uma Faixa de Teor de Oxigênio Dissolvido entre 100 e 500ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e Temperatura 35°C), WULFHORST, 1997

WULFHORST (1997) assumiu que a perda de massa medida no

ensaio é resultado da soma da perda de massa da superfície exposta, em contato com a água pura e da superfície não exposta e também que a corrosão da superfície não exposta é do tipo convencional, ou seja, não há influência do fluxo, para obter estes valores da taxa de corrosão assistida por fluxo, que concordam com a taxa de corrosão obtida através dos resultados dos ensaios convencionais.

BENITEZ (1998) concluiu na sua dissertação que não há influência clara da densidade de corrente elétrica e do campo magnético na taxa de corrosão, pois, à medida que a corrente elétrica aumentou, obtiveram-se taxas de corrosão oscilantes, sem tendência clara. Os resultados dos ensaios com indução magnética também não mostraram nenhum efeito significativo sobre a taxa de corrosão do Cobre em água pura.

## 5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 *Aparelhagem Experimental*

Para execução dos ensaios de corrosão, utilizou-se um recipiente de vidro (cuba), em formato esférico e uma tampa especial que garantiu a estanqueidade do sistema, dentro do qual os corpos de prova estavam imersos. No interior do recipiente foi armazenado um volume de 500ml mais ou menos 25ml de água pura, com condições predeterminadas de pH e teor de oxigênio.

Este recipiente foi utilizado nos ensaios convencionais por BASTOS (1997). O arranjo deste recipiente foi utilizado no ensaio de corrosão e é esquematicamente mostrado na Figura 5.1.

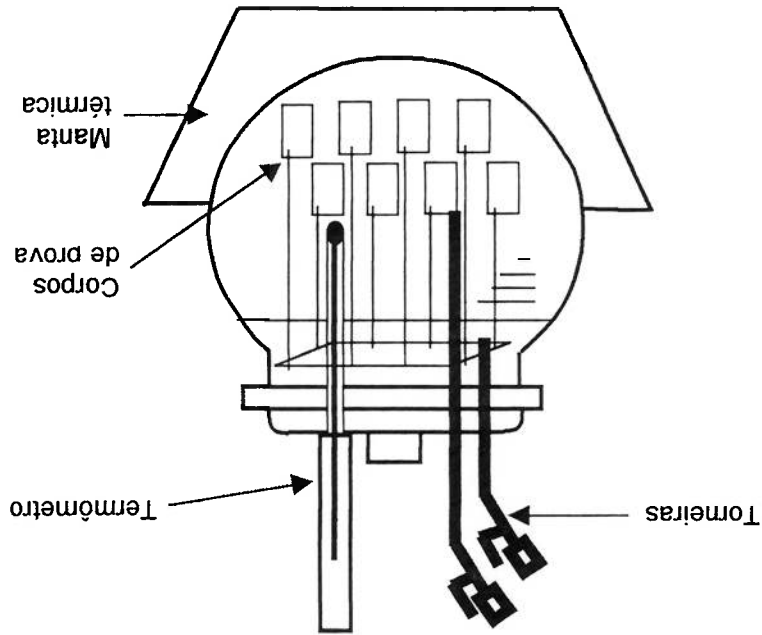


Figura 5.1 Aparelhagem Experimental Empregada no Ensaio de Corrosão



Os equipamentos empregados para medição do pH da água e

concentração de oxigênio dissolvido têm a sua especificação apresentada a

seguir:

1) Medidor de pH: equipamento ORION, Modelo 290A, empregado

para registro de pH da água pura. O equipamento é basicamente

constituído por um eletrodo e por um

registrador/microprocessador. O eletrodo para registro de pH é

mergulhado na água pura no interior do recipiente destinado à

tomada de medida. Para medidas do pH em água pura, isenta de

NaOH, ou com pouca concentração de NaOH, gerando uma baixa

atividade iônica, utilizou-se um ativador de força iônica,

denominado phisa. A especificação básica do equipamento é a

que segue abaixo:

\* temperatura de operação: -5 a 105°C;

\* faixa de medição de pH: -2,000 a 19,999;

\* resolução: 0,001 pH;

\* calibração por fluidos de padrão (pH 1,68; 4,01; 7,00; 10,01;

12,46);

2) Medidor de concentração de oxigênio: equipamento ORBISPHERE

Modelo 26060, para registro da concentração de O<sub>2</sub> na água

pura. Este é basicamente constituído por um sensor e por um

registrador/processador. No caso dos ensaios de corrosão

convencional, o sensor foi acoplado à uma câmara de fluxo.

Através dessa câmara, o fluxo de água pura proveniente da

culpa foi com uma vazão entre 70 e 200ml/min. A especificação

básica do equipamento é a seguinte:

\* faixa de operação de O<sub>2</sub>: 0,1ppb a 20ppm;

\* temperatura de operação, com compensação automática: 0 a

80°C (acima de 80°C podem ocorrer desvios de

compensação);

\* fluxo mínimo na membrana: 70ml/min.

Além dos equipamentos já mencionados, que têm vinculação direta

com a execução e monitoração dos ensaios de corrosão do cobre, existem

alguns equipamentos que foram empregados na preparação e avaliação

destes ensaios, tais como Sistema de Produção de Água Pura, Dessecador

de Corpos de Prova, Balança Analítica e Polítrix, cuja especificação é

apresentada a seguir:

a) Sistema de Produção de Água Pura: este sistema foi empregado na

produção da água filtrada, destilada e deionizada utilizada nos

ensaios de corrosão. O sistema é constituído por dois

equipamentos básicos, os quais são: filtro de água, destilador e

equipamento de troca iônica.

O destilador, ligado a o filtro, produz uma água livre de elementos

contaminantes. Esta água ainda apresenta condutividade elevada,

superior a 20  $\mu$ S/cm, para poder ser caracterizada como água pura. A

retirada de íons, com a finalidade de redução de condutividade, é

executada com o auxílio de um equipamento de troca iônica,

constituído por módulos de purificação que contêm carvão ativo para

remoção de compostos orgânicos dissolvidos e resinas de troca

iónica.

A seguir, apresenta-se a especificação básica destes sistemas:

(i) Destilador FISATOM, modelo 525

- Caldeira fabricada em material estanhado, com defletores e tubos de condensação de aço inoxidável, para evitar a contaminação do vapor com íons metálicos;

- Proteção contra falta de água;

- Rendimento: 5 litros/hora.

(ii) Sistema de troca iónica ELGA Elgastat UHQ-PS

- Condutividade da água deionizada igual ou inferior a 0,5µS/cm;

- Reduzida pressão de entrada;

- Capacidade: 3,3 litros/hora;

- Cartuchos de troca iónica de fácil troca;

- Recirculação da água tratada, para manutenção da sua qualidade.

b) Dessecador: equipamento destinado ao armazenamento de corpos

de prova preparados para o ensaio ou já ensaiados. O mesmo

possui um elemento desumidificador de sílica, sendo que no seu

interior predomina uma atmosfera de pressão reduzida (vácuo),

produzida com auxílio de uma bomba peristáltica, durante o

armazenamento dos corpos de prova que saíram dos ensaios e

aguardavam a limpeza química. O armazenamento de corpos de

prova neste equipamento tem como objetivo a remoção de

umidade dos mesmos, bem como evitar sua contaminação com

elementos presentes no ar atmosférico.

c) Balança analítica: equipamento utilizado na medição da massa dos

corpos de prova, marca OHAUS, Modelo AP250-D, antes e após a execução do ensaio de imersão. A diferença entre estas massas, denominada de perda de massa, foi utilizada para avaliar a taxa de corrosão do Cobre em cada uma das condições adotadas para a água pura, ao longo da execução dos ensaios de imersão. As especificações básicas deste equipamento são:

\* faixa de medição: até 210 g.

\* faixa de resolução: até 52g ..... 0,01mg

52g até 210g ..... 0,1mg

\* autocalibração.

\* compensação automática de vibrações.

Além dos equipamentos mencionados, foram empregados materiais

básicos para um laboratório de química, tais como vidraria em geral (béquer,

pipetas, bureta graduada, pissetes, suportes para vidraria), pinças

metálicas, tanques plásticos para armazenamento de água destilada, escova

para lavagem de vidraria, etc. Foram utilizados alguns reagentes básicos

para preparação de soluções, tais como: ácido clorídrico e etanol (para

lavagem e limpeza dos corpos de prova, antes e após a execução dos

ensaios de imersão). Adicionalmente, utilizou-se um sistema de lixamento

para preparação da superfície dos corpos de prova que foram submetidos ao

Estes corpos de prova deveriam ser estabelecidos de acordo com a norma ABNT MB-4 (1992), apresentada no item 3.2. Entretanto, priorizou-se a obtenção de corpos de prova com deformações plásticas que tivessem as

Material	SAE CA 110
Limite de Resistência	32 kgf/mm <sup>2</sup>
Limite de Escamento	27 kgf/mm <sup>2</sup>
Dureza	90 HB
Condutividade	98 % IACS
Composição Química Nominal (%)	
Cu	99,95
Sn	0,01
Zn	0,01
Fe	0,0079
P	0,0055
Pb	0,005
Ni	0,004
Al	0,0026
Si	0,0003

**Tabela 5.1 Especificação do Cobre Eletrolítico Utilizado nos Ensaios**

Os corpos de prova para os ensaios de corrosão foram confeccionados com cobre eletrolítico SAE CA110, cuja especificação é apresentada na Tabela 5.1. A chapa de cobre apresentava um comprimento de 120mm, largura 60mm e espessura 3,18mm (1/8").

### 5.2 Corpos de Prova

STRUERS DPU-10. ensaio de imersão. O aparelho utilizado foi uma poltriz metalográfica

dimensões adequadas para a análise de corrosão do cobre eletrolítico em água pura. A fim de obter-se o maior número possível de corpos de prova com o resto da chapa utilizada nos ensaios de corrosão convencionais, procurou-se reduzir as dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração, mas que não prejudicassem a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de corrosão. Utilizando uma guilhotina, confeccionaram-se pequenas chapas retangulares com comprimento de 80mm e largura de 34mm.

Depois, com o auxílio de uma fresadora, confeccionaram-se os corpos de prova de forma a serem utilizados nos ensaios de tração. Na Figura 5.2 mostra-se o corpo de prova confeccionado para ensaios de tração. Com estes corpos de prova, realizaram-se ensaios de tração, utilizando uma máquina de tração no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). A máquina que se utilizou nos ensaios de tração dos corpos de prova foi INSTRON, modelo 4400, cuja capacidade é de 10 toneladas de carga (Universal Testing System).

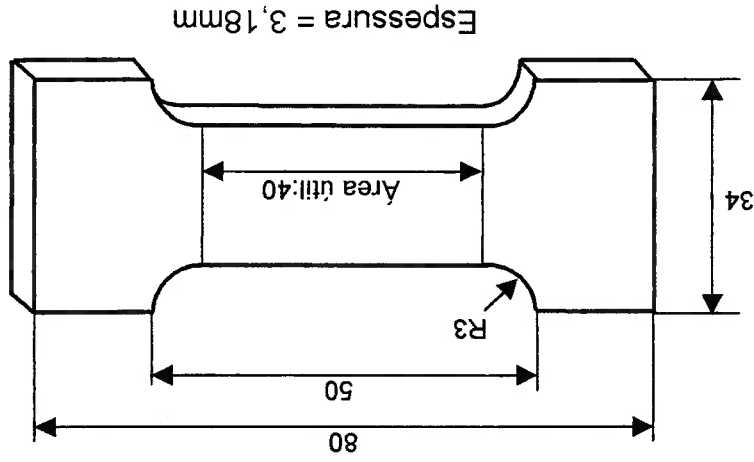


Figura 5.2 Corpo de Prova para Ensaio de Tração (Unidade:mm)

Os corpos de prova foram submetidos a um procedimento de limpeza superficial, antes de serem inseridos no interior do recipiente de ensaio. Este procedimento foi executado após o corte dos corpos de prova que tinham sido ensaiados na máquina de tração.

### **5.3 Procedimento de Limpeza dos Corpos de Prova**

Depois dos ensaios de tração, confeccionaram-se, com auxílio da guilhotina, novamente os corpos de prova de forma retangular com área superficial total de  $2.950\text{mm}^2$ , a fim de usá-los em ensaios gravimétricos de corrosão. Deve-se ressaltar que os corpos de prova tiveram as suas superfícies submetidas a um procedimento de preparação, antes de serem imersos em água pura para execução dos ensaios de corrosão. Tais procedimentos são descritos no decorrer deste Capítulo.

respectivamente:

Para se obterem determinadas deformações dos corpos de prova, primeiro, realizou-se ensaio de tração com um corpo de prova até se romper. Obteve-se o gráfico de carga-deformação do cobre até a ruptura. A partir deste gráfico determinaram-se as deformações desejadas de acordo com as porcentagens de 10, 20 e 30% de deformação total, aproximadamente. Obtiveram-se deformações plásticas permanentes: 3, 11,5 e 21%,

Este procedimento tem como objetivo a remoção de impurezas da

superfície dos corpos de prova, as quais poderiam influenciar o processo de corrosão de Cobre, alterando os resultados experimentais.

O procedimento de limpeza dos corpos de prova foi desenvolvido em conformidade com as exigências da norma ASTM G1-81, "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens".

A sequência de limpeza adotada foi a seguinte:

- 1) Lixar os corpos de prova com lixas com granulometria 180, 360 e 600 µm. Estes lixamentos foram executados com o auxílio da polítriz STRUERS, Modelo DPU-10. Deve-se ressaltar que todas as faces dos corpos de prova são lixadas, evitando a formação de sulcos superficiais, que poderiam afetar o fenômeno de corrosão;
- 2) Lavar os corpos de prova com água corrente, empregando detergente neutro a fim de tirar todas as partículas da impureza na superfície dos corpos de prova;
- 3) Lavar os corpos de prova com água destilada e deionizada, em seguida, com álcool etílico absoluto para análise;
- 4) Secar os corpos de prova, empregando lenços de papel;
- 5) Repetir a operação de lavagem dos corpos de prova com água destilada e deionizada;
- 6) Secar os corpos de prova, utilizando lenços de papel;
- 7) Manter os corpos de prova armazenados no interior do secador até o início do ensaio, sendo que esse período de armazenamento deve ser superior a 1 hora.



#### **5.4 Procedimento de Preparação dos Ensaios**

- 1) Lavar o conjunto de vidraria (cuba, tampa, termômetro, hastes torneiras e fios de nylon). A lavagem deve ser executada com água corrente e sabão neutro, e em seguida, são feitos mais três enxágues das peças, empregando-se água destilada e deionizada;
- 2) Secar as peças e a vidraria em ar atmosférico numa mesa forrada com papel toalha;
- 3) Montar o conjunto de recipiente esférico, tampa, termômetro, hastes torneiras e manta térmica. Todos os equipamentos que são montados na tampa já devem ser devidamente instalados nessa fase;
- 4) Pesar o conjunto de recipiente esférico, tampa e manta térmica em uma balança digital, com capacidade para 10kg de carga. Anotar o valor;
- 5) Zerar a balança digital com o conjunto de recipiente, tampa e manta térmica posicionado sobre a mesma;
- 6) Adicionar água destilada e deionizada, recém produzida, através do orifício central da tampa, até a balança marcar 5600g, correspondendo a 5600ml de água;
- 7) Fechar o orifício central com a tampa apoiada;
- 8) Transferir o conjunto de cuba e manta térmica para a bancada de ensaios;

- 9) Ligar a manta térmica com o nível de aquecimento adequado correspondente a uma dada temperatura desejada para a água pura;
- 10) Aguardar até a água atingir a temperatura especificada para o ensaio;
- 11) Retirar a tampa com termômetro e hastes torneiras e, colocar os corpos de prova, pendurando-os com auxílio do fio de nylon;
- 12) Tampar a cuba onde os corpos de prova estão pendurados;
- 13) Conectar a mangueira de silicone entre a haste curta e a torneira de saída do nitrogênio. Conectar a mangueira de silicone entre a haste longa e a câmara de entrada do medidor de concentração de oxigênio (O<sub>2</sub>);
- 14) Medir a concentração de oxigênio, no início do ensaio, utilizando-se o equipamento OBISPHERE da água pura através dos seguintes passos:
- a) Conectar uma mangueira à saída do medidor de oxigênio, e colocar sua outra extremidade no interior de uma proveta graduada de 100ml, com divisões de 10ml, onde a água a ser retirada da cuba será coletada;
- b) Abrir a torneira de saída do nitrogênio e a torneira da haste longa, permitindo a circulação da água através da haste, para a câmara de fluxo do medidor de oxigênio. Regular a abertura da torneira;

- c) Regular a vazão de água na câmara de fluxo do medidor de oxigênio, de forma a obter-se uma vazão na faixa de 120ml/mim a 180ml/mim. A vazão é controlada através da verificação do volume do fluido coletado na proveta graduada em um intervalo determinado;
- d) Quando a vazão estiver estabilizada, executar o registro da concentração na água;
- e) Manter a vazão de água pura até a completa retirada do excesso do fluido do interior da cuba, reduzindo a quantidade de água pura à execução do ensaio. O volume retirado vai sendo medido na proveta onde a água está sendo retirada da torneira;
- f) Fechar a torneira da haste longa, impedindo o fluxo de água pura;
- g) Conectar a mangueira de silicone entre a haste curta e a torneira de saída do nitrogênio. Conectar a mangueira de silicone entre a haste longa e a câmara de entrada do medidor de concentração de oxigênio (O<sub>2</sub>).
- 15) Continuar o ensaio pelo período de 7 dias, conforme especificado na norma ASTM G31-85, "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals";
- 16) Utilizar a água descartada pela saída da câmara de fluxo. Coletar 80 ml desta água em um béquer de vidro, a qual representa uma amostra de água pura, contida no interior da cuba, onde será

imerso o eletrodo do medidor de pH, para o registro do pH da água pura, no início do ensaio;

17) A temperatura de água pura é medida com o auxílio do termômetro instalado na tampa do recipiente de vidro, sendo a mesma monitorada continuamente ao longo do ensaio.

### **5.5 Procedimento da Finalização dos Ensaios**

Ao final do ensaio, realizaram-se novamente as medições de concentração de oxigênio e pH, antes de se retirarem os corpos de prova da cuba.

O procedimento para a realização dessas medições foi o seguinte:

1) Conectar a mangueira de silicone entre a haste curta e a torneira de saída do nitrogênio;

2) Conectar a mangueira de silicone entre a haste longa e a câmara de entrada do medidor de concentração de oxigênio para se medir a concentração de oxigênio da água pura, com o mesmo procedimento descrito em 14) do item 5.4;

3) Efetuar uma coleta de amostra de 80ml em um bôquer de vidro de 100ml para medir o pH da solução. Para efetuar a leitura do pH deve-se informar previamente ao aparelho a temperatura de amostra, para haver uma compensação da temperatura. Também adicionar 1ml de uma solução ativadora de força iônica, denominada "pHisa", na amostra, antes de efetuar a leitura;

- 4) Abrir a tampa e retirar os corpos de prova;
- 5) Observar visualmente a superfície dos corpos de prova, a fim de verificar o tipo de deposição superficial, a sua possível não uniformidade, coloração e eventual presença de pite na superfície dos corpos de prova;
- 6) Secar os corpos de prova com um lenço de papel e colocá-los no dessecador por 1 hora da forma em que foram retirados da solução;
- 7) Pesar os corpos de prova com o auxílio da balança analítica;
- 8) Retirar a camada superficial oxidada através de uma limpeza química. Essa limpeza é efetuada de acordo com a norma ASTM G1-81, "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Testing";
- 9) Imergir os corpos de prova em solução de ácido clorídrico de acordo com as seguintes condições:
- a) 500 ml de ácido clorídrico para análise (HCl, puro específico 1,19) + 500ml de água deionizada e destilada;
- b) À temperatura ambiente, 2 minutos de tempo de imersão;
- c) Lavar os corpos de prova com água destilada e deionizada e em seguida com álcool etílico para análise;
- d) Secar os corpos de prova com lenços de papel;
- e) Manter os corpos de prova em dessecador por 1 hora.
- 10) Pesar os corpos de prova novamente com o auxílio da balança analítica.

11) Calcular a taxa de corrosão do corpo de prova, utilizando-se a

diferença entre a pesagem que antecedeu o ensaio e a última

pesagem após a limpeza química. O cálculo da taxa de corrosão é

feita segundo a expressão retirada da norma:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{k \cdot W}{A \cdot t} \quad [\text{mg/cm}^2 \cdot \text{ano}]$$

onde: k é a constante de valor ( $8,76 \cdot 10^6$ );

W é a perda de massa em g (precisão: 0,01mg);

A é a área afetada pela corrosão em  $\text{cm}^2$  (precisão: 0,01 $\text{cm}^2$ );

t é o tempo de ensaio em hora (precisão: 0,01 hora).

## **5.6 Resultados Experimentais dos Ensaio**

### **5.6.1 Resultados Experimentais dos Ensaio de Tração**

Foram realizados ensaios de tração com o auxílio de uma máquina de tração localizada no IPEN e ensaios de corrosão com os corpos de prova de cobre deformados, visando analisar a influência da deformação do cobre sobre a taxa de corrosão do mesmo.

Os gráficos obtidos pelos ensaios de tração foram anexados. Através destes gráficos foi difícil obterem-se as deformações exatas dos corpos de prova, pois aconteceram escorregamentos dos corpos de prova das garras da máquina de tração. Então, obtiveram-se as porcentagens de deformação plástica através da medição dos alongamentos dos corpos de prova na área útil, utilizando-se um paquímetro. Os resultados obtidos através dos ensaios de tração são apresentados nas Tabelas 5.2 a 5.5.

Na Tabela 5.2 mostra-se que a deformação na carga máxima é 18,55% com a velocidade de 5 mm/min de tração. A deformação máxima atingiu 33,79% com a tensão máxima 27,881kgf/mm<sup>2</sup>. Determinou-se fazer ensaios de tração com os outros corpos de prova, diminuindo a velocidade de tração à 1mm/min e colocando os corpos de prova entre as garras da máquina com 40mm de distância. Primeiro, ensaiou-se com um corpo de prova enumerado de 2-2 até a deformação máxima atingir 10% de comprimento da área útil do corpo de prova. Fazendo ensaios de tração com a sequência mostrada na Tabela 5.3 (Sequência: 2-2 → 3 → 5 → 4 → 4-4 →

3-3 → 2), conseguiu-se aplicar 30% de deformação máxima nos corpos de prova. Na referida tabela mostram-se os dados obtidos através dos ensaios de tração.

**Tabela 5.2 Dados Obtidos pelo Ensaio de Tração com a Amostra do Corpo de Prova até a Ruptura**

Velocidade de Tração: 5 mm/min		Distância entre garras: 51,5 mm	
Corpo de Prova	Tensão na Carga	Deformação na	Deformação
Amostra	Máxima (kgf/mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (%)	Máxima (%)
	27,881	18,550	33,790

**Tabela 5.3 Dados Obtidos pelos Ensaio de Tração**

Velocidade de Tração: 1 mm/min		Distância entre garras: 40 mm	
No. do Corpo de Prova	Seq-üên-cia	Carga Máxima (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão Máxima (kgf/mm <sup>2</sup> )
		Alongamento Máximo (mm)	Alongamento Plástico (mm)
		Deforma-ção Máxima (%)	Deforma-ção Plástica (%)
2	7	2298	25,809
2-2	1	2396	27,011
3(*)	2	2396	26,909
3-3	6	2383	26,763
4(**)	4	2416	27,134
		2405	27,010
4-4	5	2408	27,044
5	3	2397	26,920
			10
			12
			8,6
			6,1
			25
			15,25

Observações: (\*) No início do ensaio de tração com este corpo de prova houve deslizamento entre garras e corpo de prova;

(\*\*) Foi designado fazer 25% de deformação máxima no início, mas não ocorrendo a ruptura na carga máxima aumentou até 30% de deformação máxima.



Observação: (\*) Este corpo de prova não foi usado no ensaio de corrosão pela razão de que não tem seu par para verificar diferença dos valores de taxa de corrosão entre os dois corpos de prova imersos na cuba conforme a norma ASTM.

No. do Corpo de Prova	Base(mm)	Largura(mm)	Espessura (mm)	Deformação Máxima Carregada (%)
2	44,80	27,90	3,13	10
2-2	44,80	27,90	3,13	10
3	47,00	26,70	3,00	20
3-3	47,00	26,70	3,00	20
4	49,10	25,80	2,80	30
4-4	49,10	25,80	2,80	30
5(*)	47,50	26,40	2,90	25

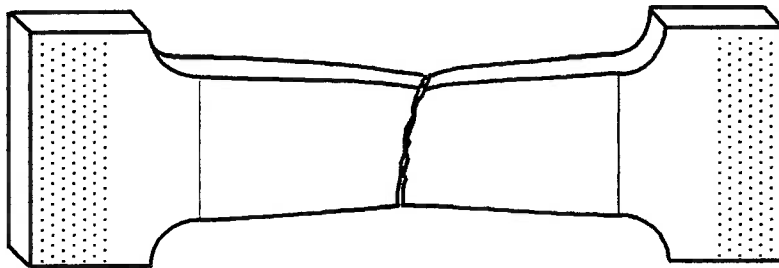
#### Ensaio de Tração

Tabela 5.4 Dimensões dos Corpos de Prova na Área Útil após os

dos corpos de prova da área útil, (Tabela 5.4).

Através dos ensaios de tração, obtiveram-se as seguintes dimensões

Figura 5.3 Corpo de Prova (Amostra) depois da Ruptura



deformação máxima dos corpos de prova.

Na Figura 5.3 apresenta-se esquematicamente o corpo de prova de amostra depois da ruptura, o qual foi utilizado para obter e determinar a

Após os ensaios de tração, confeccionaram-se os corpos de prova para obterem-se as dimensões adequadas para os ensaios de corrosão, as quais são apresentadas na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 Dimensões dos Corpos de Prova para os Ensaios de Corrosão**

No. do Corpo de Prova	Base (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Deformação Plástica (%)
1	49,40	25,50	3,15	0
1-1	49,65	25,75	3,15	0
2	44,65	27,85	3,10	2,75
2-2 (*)	44,60	27,80	3,10	3,25
3	47,00	26,60	2,95	11,25
3-3	47,00	26,60	2,95	12
4	49,70	25,70	2,70	21
4-4	49,80	25,60	2,70	21,5

Observação: (\*) Neste corpo de prova houve um defeito no furo por causa do erro do confeccionamento

## 5.6.2 Fotografias das Superfícies Obtidas pelo Método Metalográfico

Os corpos de prova usados nos ensaios de corrosão foram novamente lixados com o auxílio das lixas com granulometria 360 e 600 µm. Depois, poliam-se as superfícies dos corpos de prova com o pó fino de magnésia com pano bem macio. Atacada as superfícies dos corpos de prova por 30 segundos com a solução preparada (5g FeCl<sub>3</sub> + 15ml HCl + 100ml

etanol), obtiveram-se as fotografias por meio da reflexão microscópica da luz. As fotografias obtidas são apresentadas nas Figuras 5.4 e 5.5:

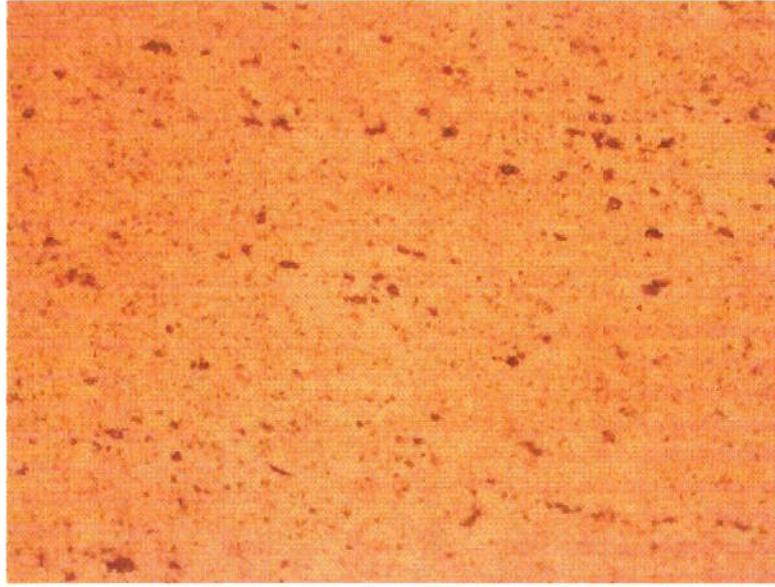


Figura 5.4 Fotografia da Superfície do Corpo de Prova Sem Deformação, Obtida pelo Método Metalográfico (Escala:200x)

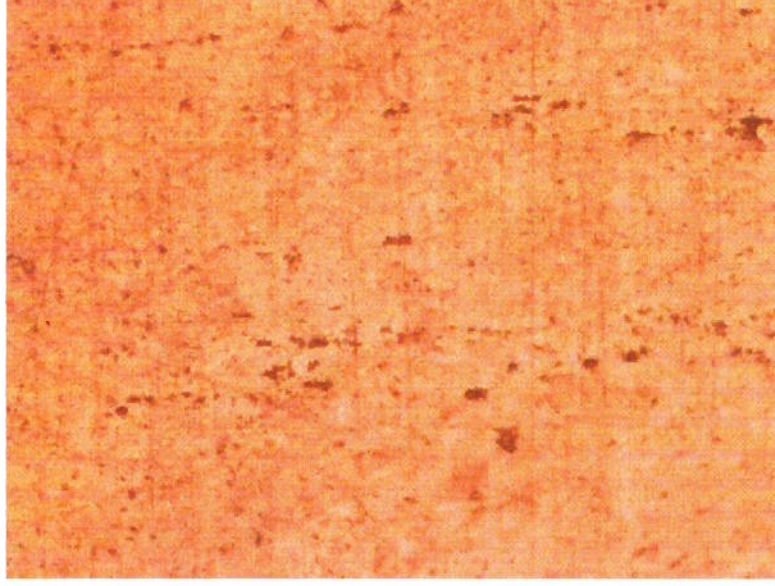


Figura 5.5 Fotografia da Superfície do Corpo de Prova com 2,75% de Deformação Plástica, Obtida pelo Método Metalográfico (Escala:200x)

### 5.6.3 Resultados Experimentais dos Ensaio de Corrosão

Realizaram-se ensaios experimentais de corrosão segundo os procedimentos estabelecidos por BASTOS (1997), com o intuito de se verificar qualitativamente a influência da deformação plástica na taxa de corrosão do Cobre em água pura. Entretanto, por causa da dificuldade de controle do pH e do teor de oxigênio na água pura, não se conseguiu em manter as mesmas condições da água pura para a comparação das taxas de corrosão dos corpos de prova deformados em cada cuba, pois o valor de pH da água pura varia com a temperatura e com o processo corrosivo do Cobre dentro da cuba durante os ensaios experimentais. Também foi difícil obter-se o teor de oxigênio desejado, pois ele é mais difícil controlar e altera seu valor durante o ensaio.

Por isso, procurou-se alterar alguns dos procedimentos estabelecidos por BASTOS (1997), colocando 8 corpos de prova (2 corpos de prova de deformação plástica de 0%, 2 de 3%, 2 de 12% e 2 de 21% aproximadamente) na mesma cuba, sem adicionar nada na cuba. Assim, realizaram-se 5 ensaios com as seguintes condições:

- 1) Temperatura ambiente (20°C); pH=6,3 ; teor de O<sub>2</sub>=835ppb
- 2) Temperatura = 40°C ; pH=6,4 ; teor de O<sub>2</sub>=960ppb
- 3) Temperatura = 50°C ; pH=6,7 ; teor de O<sub>2</sub>=1028ppb
- 4) Temperatura = 60°C ; pH=6,5 ; teor de O<sub>2</sub>=987ppb
- 5) Temperatura = 70°C ; pH=6,6 ; teor de O<sub>2</sub>=985ppb

Os resultados são apresentados nos gráficos mostrados nas Figuras

Figura 5.7 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 40°C, pH=6,4 e 960ppb de Oxigênio

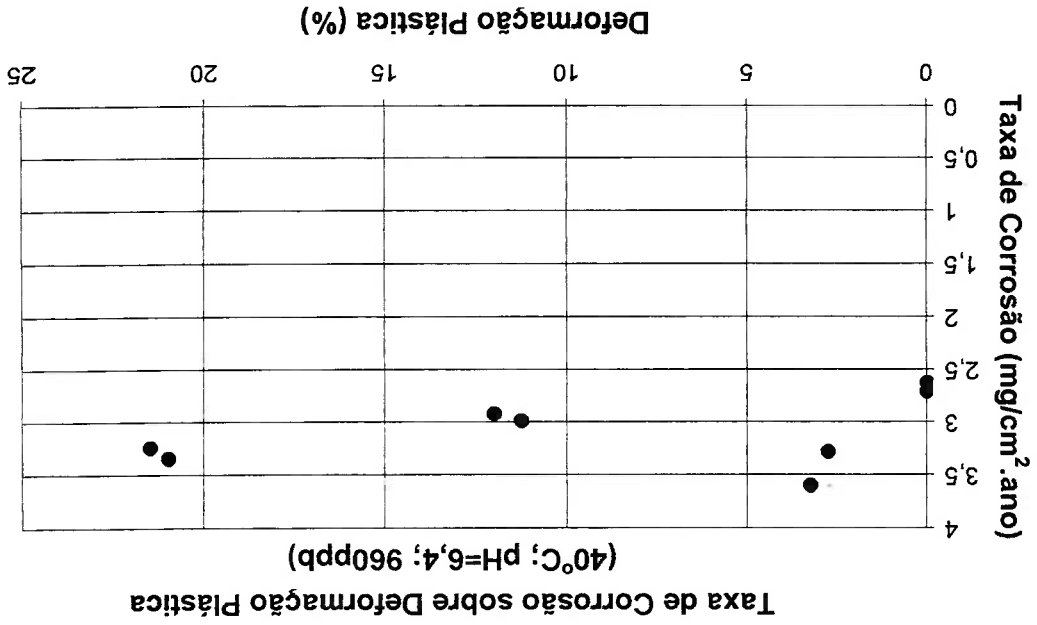
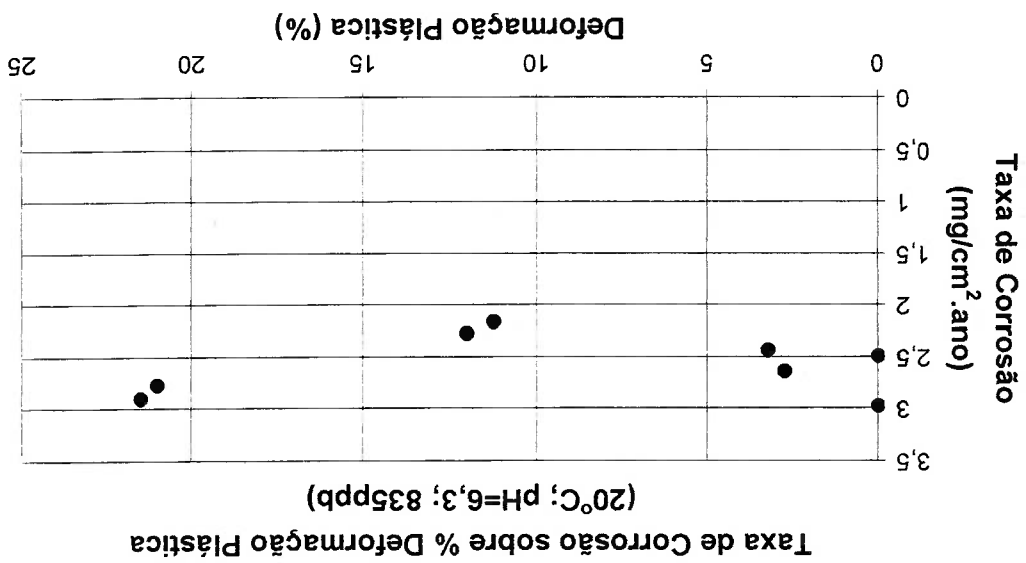


Figura 5.6 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 20°C, pH=6,3 e 835ppb de Oxigênio



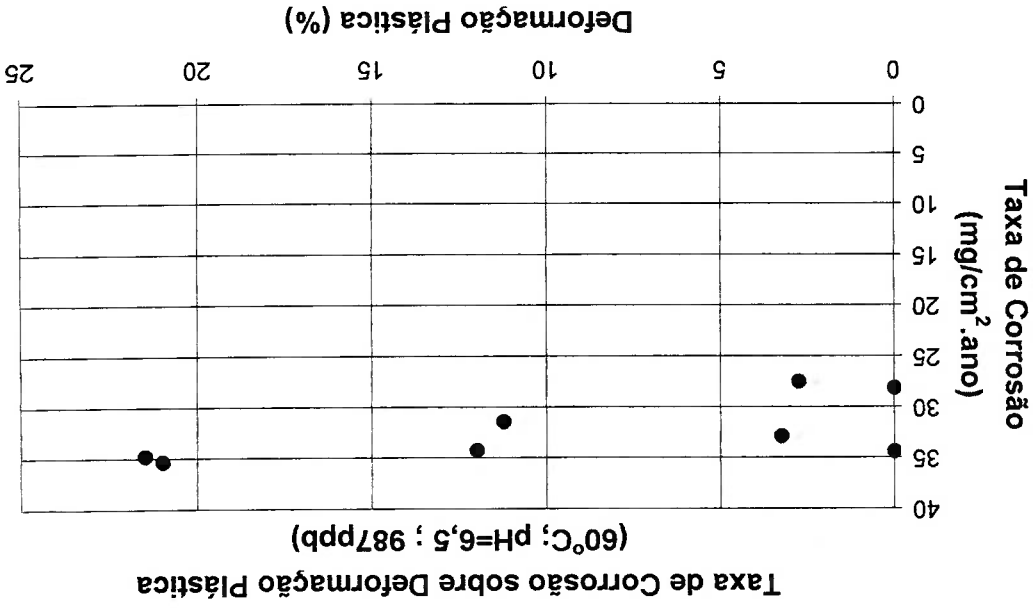


Figura 5.9 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 60°C, pH=6,5 e 987ppb do Teor de Oxigênio

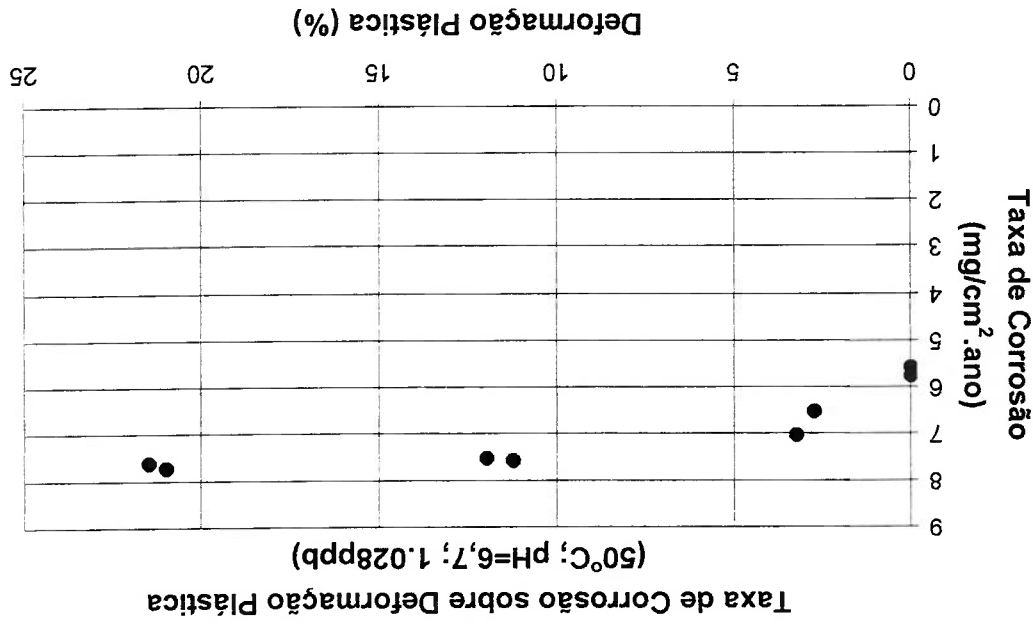


Figura 5.8 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 50°C, pH=6,7 e 1.028ppb do Teor de Oxigênio

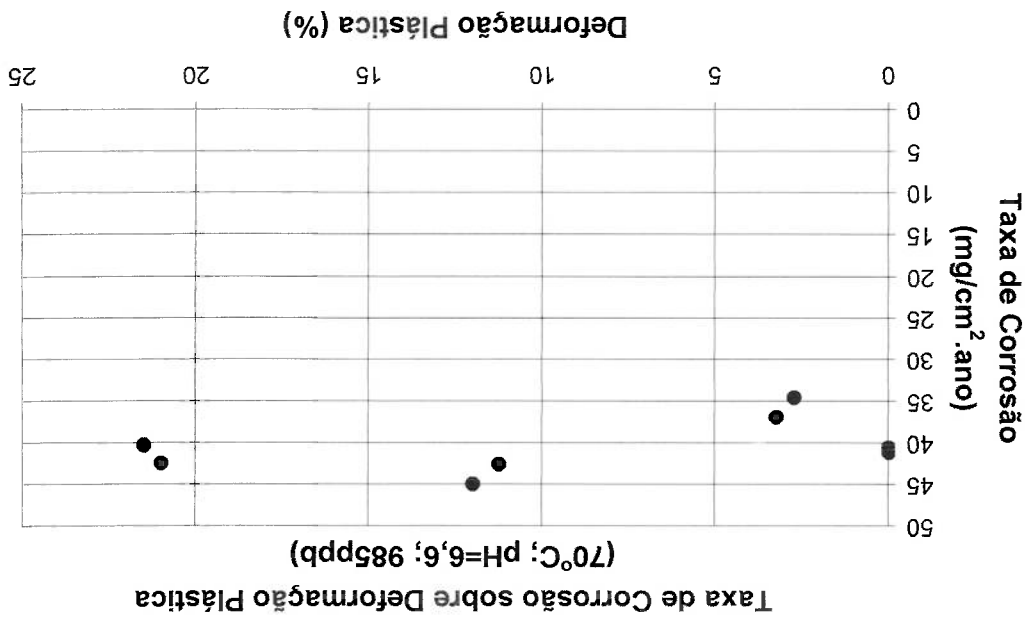


Figura 5.10 Variação da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 70°C, pH=6,6 e 985ppb do Teor de Oxigênio

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo apresentam-se as análises dos resultados obtidos.

Para uma melhor compreensão da influência de alguns dos parâmetros envolvidos sobre o fenômeno de corrosão, os dados são apresentados na

forma de gráficos.

### 6.1 *Análise dos Resultados dos Ensaios de Tração*

Os ensaios de tração foram realizados, visando a obtenção de corpos

de prova com determinadas deformações permanentes para a realização

dos ensaios de corrosão. Então, por não se testar de se obter as

propriedades dos mecânicos do Cobre, não houve a necessidade de utilizar-

se os corpos de prova normalizados. Realizaram-se os ensaios de tração

com os corpos de prova fora do padrão. Por isso, o limite de resistência

obtido através destes ensaios foi menor do que o limite que o fornecedor da

chapa de cobre informou na Tabela 5.1. Isto porque os corpos de prova

utilizados nestes ensaios foram influenciados pela concentração de tensão

na área útil e pela diminuição súbita da largura. No Apêndice I são

apresentadas as curvas geradas com a realização dos ensaios de tração.

### 6.2 *Análise dos Resultados dos Ensaios de Corrosão*

Com os resultados apresentados no item 5.6.3 do Capítulo 5, foram

construídos os gráficos da taxa de corrosão em função da deformação plástica. Os resultados obtidos e ajustados são mostrados em formas de

gráficos nas Figuras 6.1 a 6.5.



Figura 6.1 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 20°C, pH=6,3 e 835ppb de Oxigênio

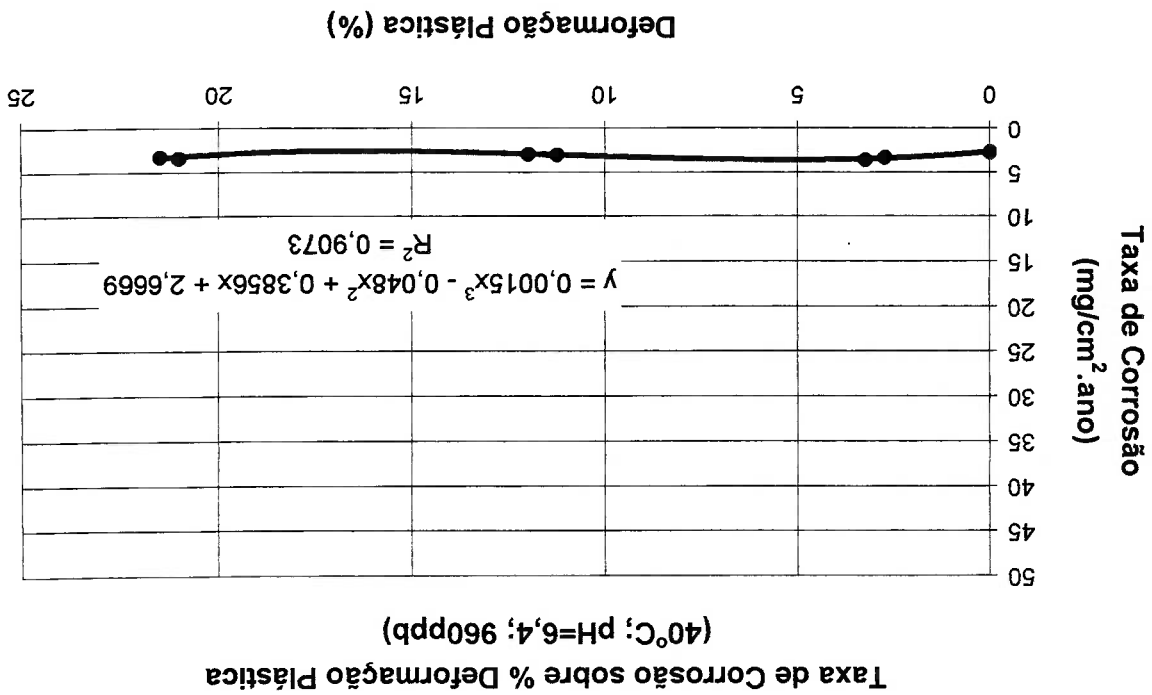


Figura 6.2 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 40°C, pH=6,4 e 960ppb de Oxigênio

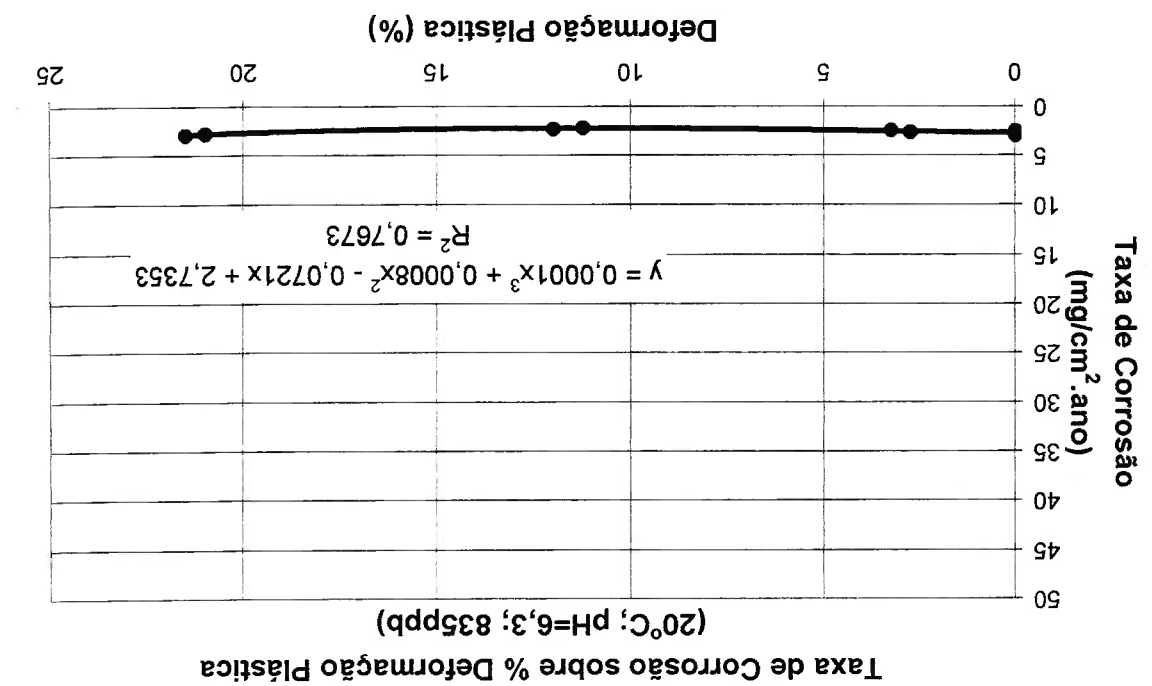


Figura 6.3 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 50°C, pH=6,7 e 1.028ppb do Teor de Oxigênio

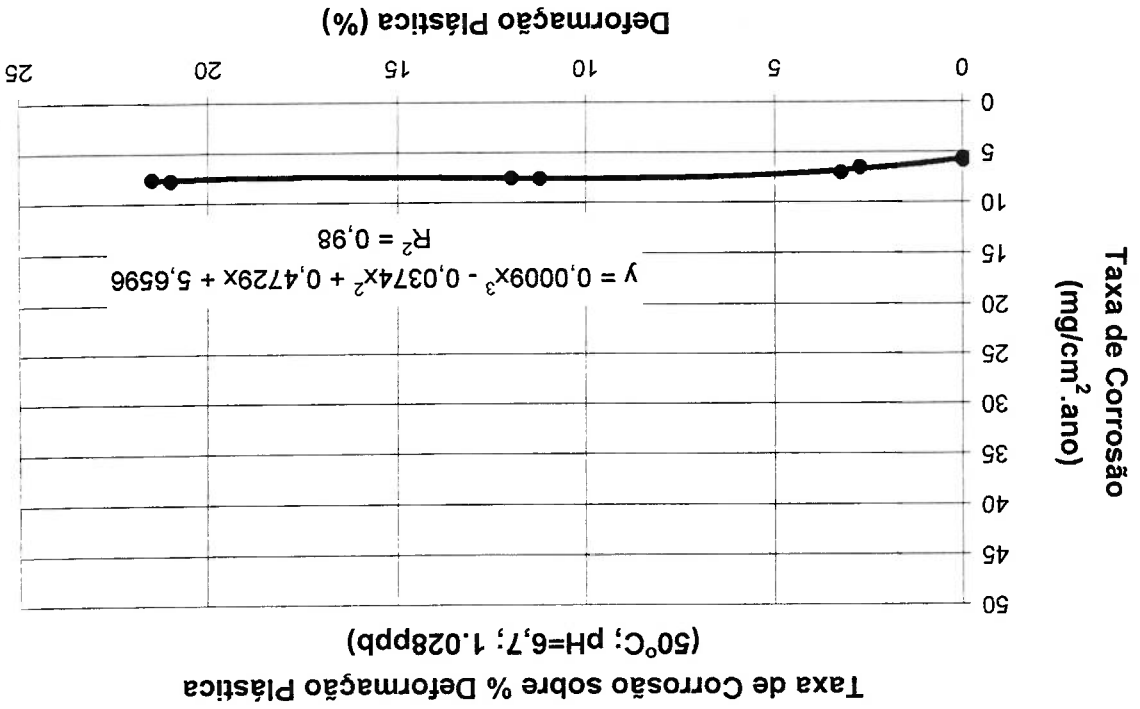
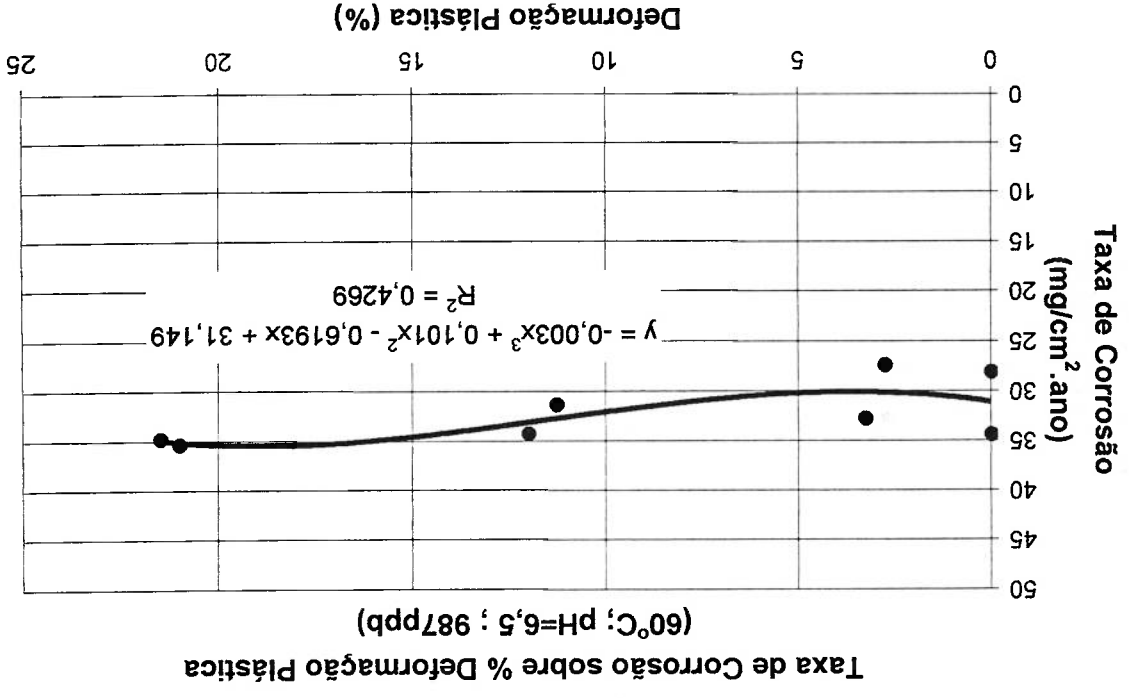
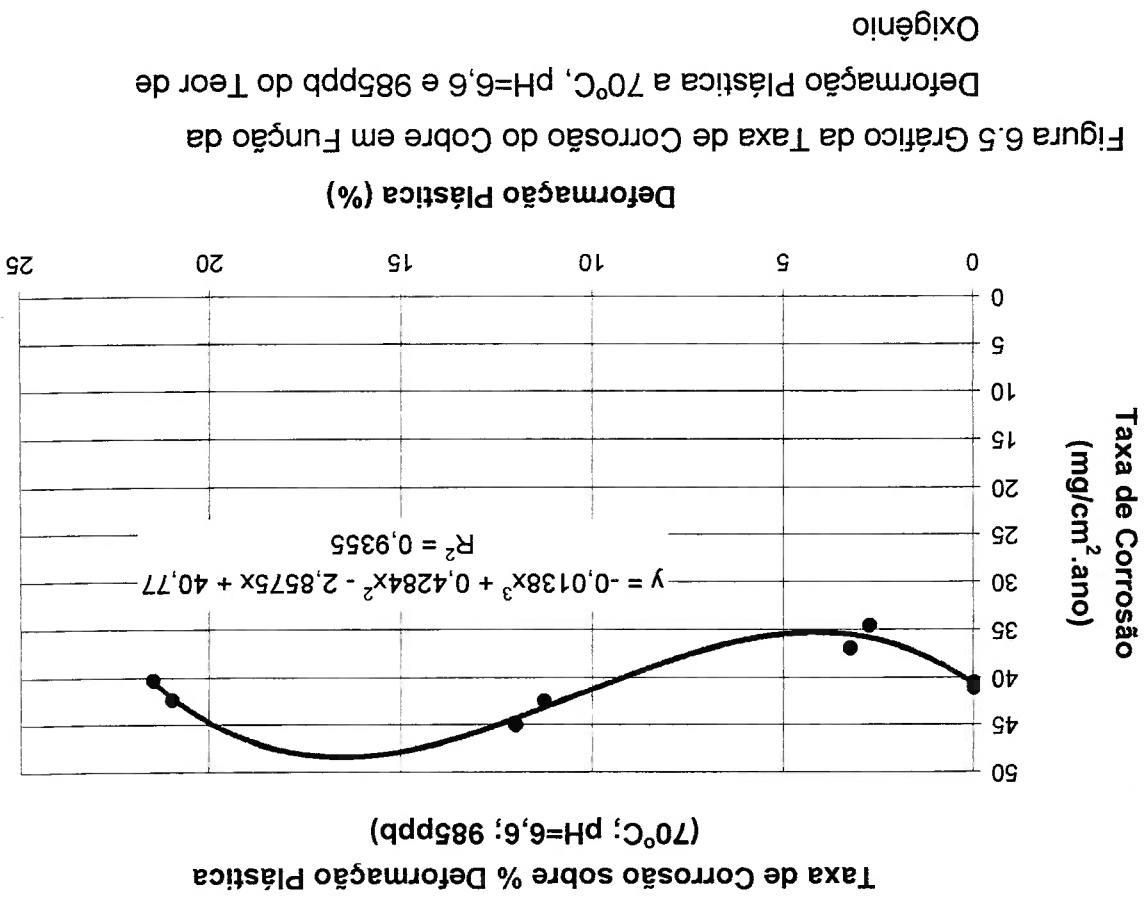


Figura 6.4 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica a 60°C, pH=6,5 e 987ppb do Teor de Oxigênio



As curvas construídas com os pontos obtidos nos ensaios experimentais de corrosão foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Cada curva apresenta o coeficiente de determinação, o qual indica a variação dos dados experimentais obtidos que são explicados pelo modelo teórico de regressão polinomial de 3º grau. As curvas com menores temperaturas, abaixo de 50°C, mostram que a influência da deformação plástica do corpo de prova sobre a taxa de corrosão do mesmo é imperceptível, formando as curvas achatadas que são quase paralelas ao eixo horizontal. As curvas com maiores temperaturas, acima de 60°C, também mostram que não há influência clara da deformação plástica sobre a



taxa de corrosão, oscilando-se com o aumento da porcentagem de deformação plástica dos corpos de prova.

Os gráficos das Figuras 6.1 a 6.5 mostram que não há tendência clara da deformação plástica sobre a taxa de corrosão do corpo de prova, demonstrando que, com o aumento da porcentagem de deformação plástica, as curvas ficam achatadas nas temperaturas baixas ou oscilando nas temperaturas altas. Na Figura 6.6 apresentam-se as curvas reunidas num único gráfico, visando a uma comparação das curvas com as diferentes temperaturas. Infelizmente, não foram encontrados resultados equivalentes na literatura especializada que possibilitassem uma comparação com os resultados deste estudo.

As Figuras 6.7 e 6.14 apresentam gráficos relacionando a taxa de corrosão com a temperatura na qual foram realizados os ensaios.

Através destes gráficos, verifica-se que a temperatura é a principal variável que influencia a taxa de corrosão do Cobre, independentemente da deformação plástica. Nas faixas de pH: 6,3 a 6,7 e teor de oxigênio: 835 a 1.028ppb, os gráficos construídos mostram que até 45°C de temperatura quase não há influência da mesma sobre taxa de corrosão e que houve um salto entre 50 e 60°C de temperatura. Acima de 60°C de temperatura, a influência da mesma sobre taxa de corrosão diminuiu.

### Taxa de Corrosão do Cobre sobre Deformação Plástica

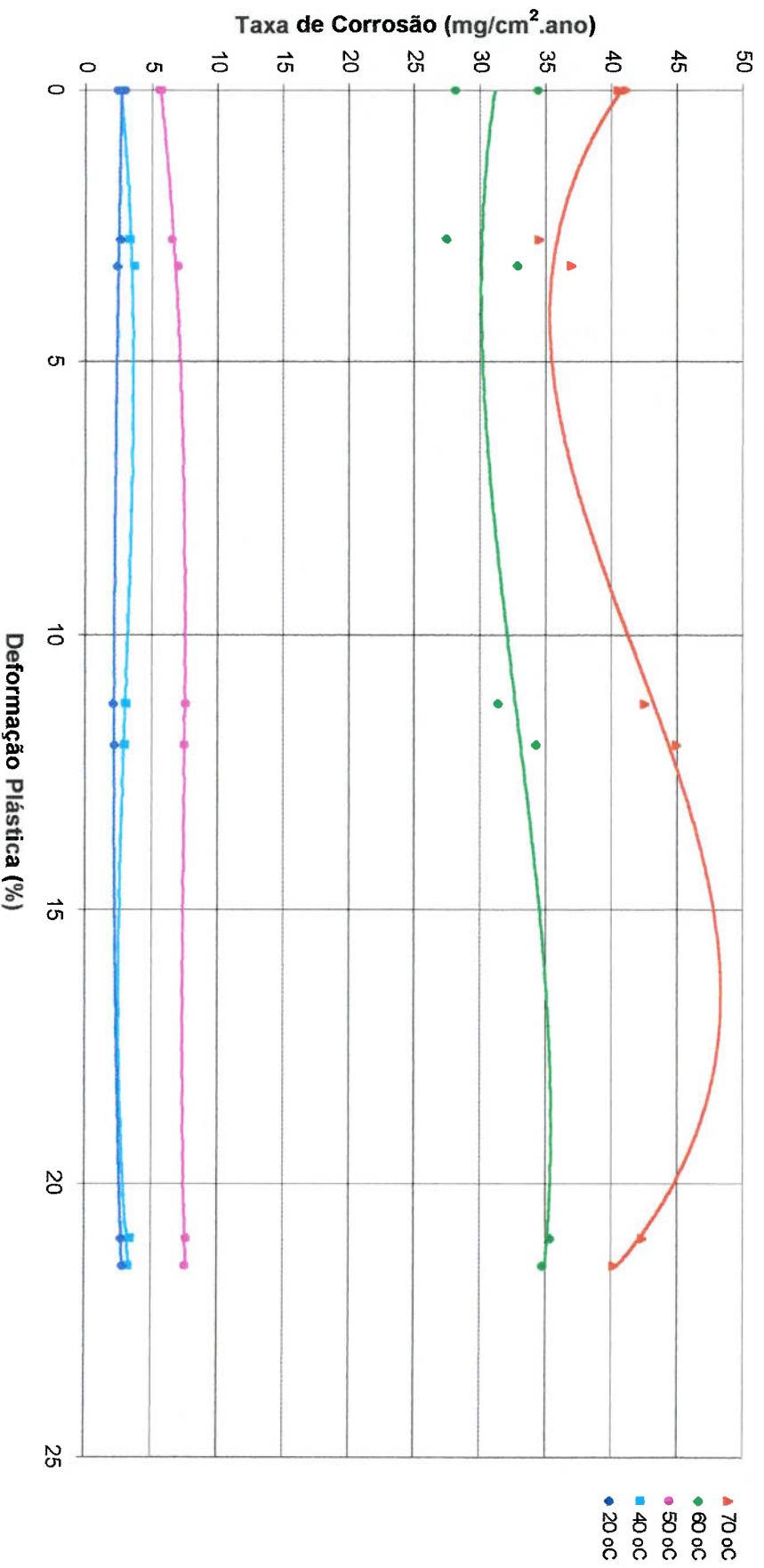


Figura 6.6 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Deformação Plástica em Vários Valores de Temperatura

Figura 6.8 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 0% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

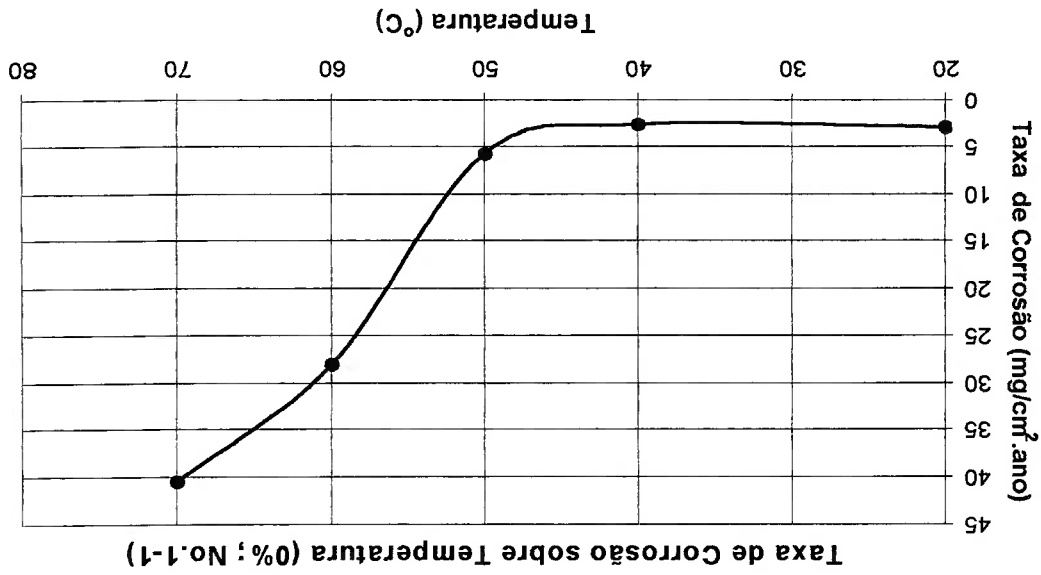


Figura 6.7 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 0% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

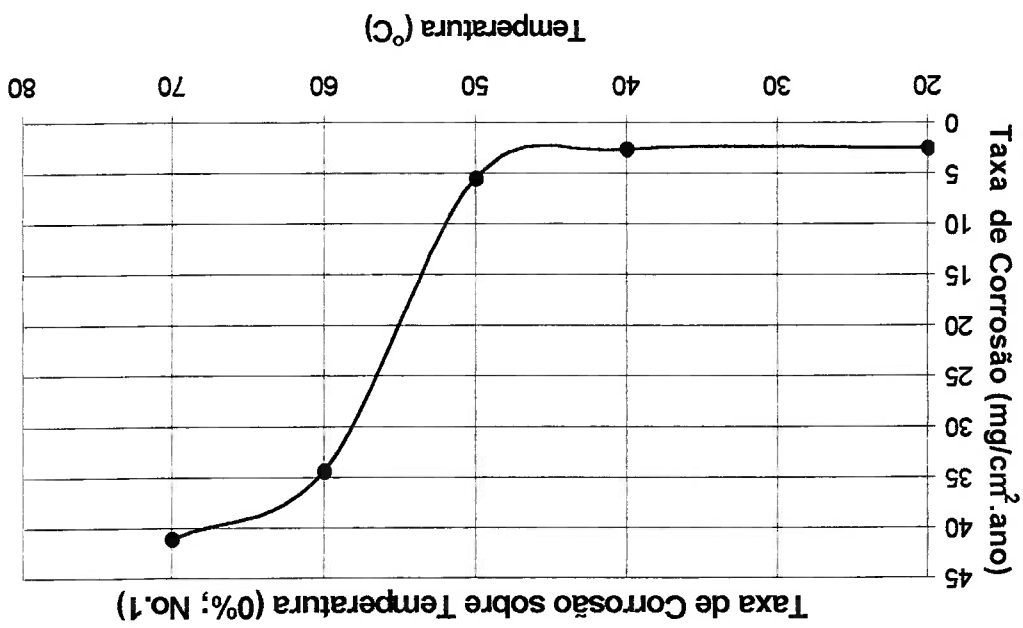


Figura 6.10 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 3,25% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

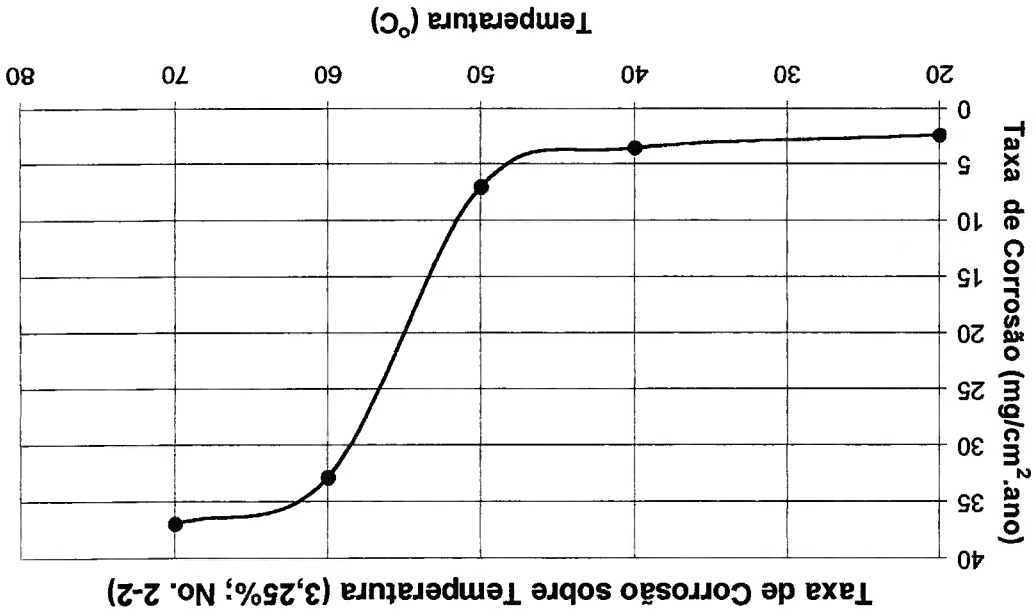
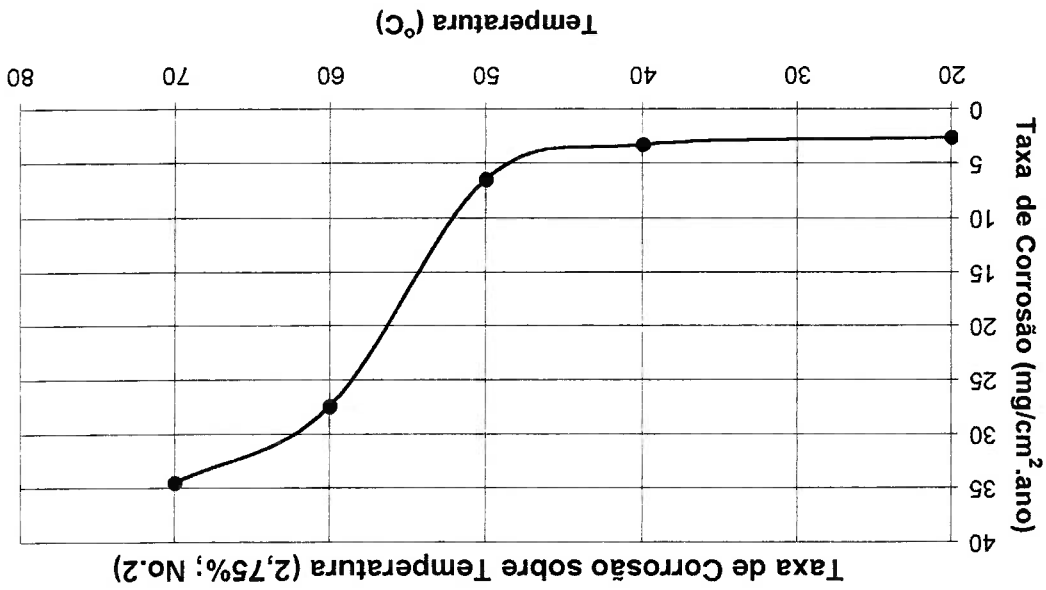
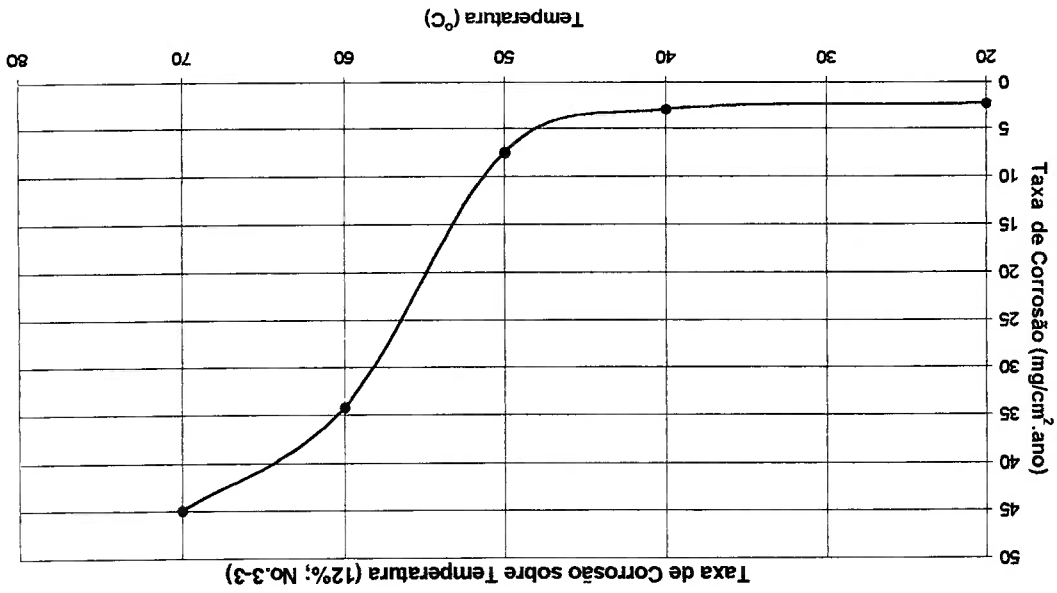


Figura 6.9 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 2,75% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio



Temperatura a 12% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

Figura 6.12 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da



835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio  
Temperatura a 11,25% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e

Figura 6.11 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da

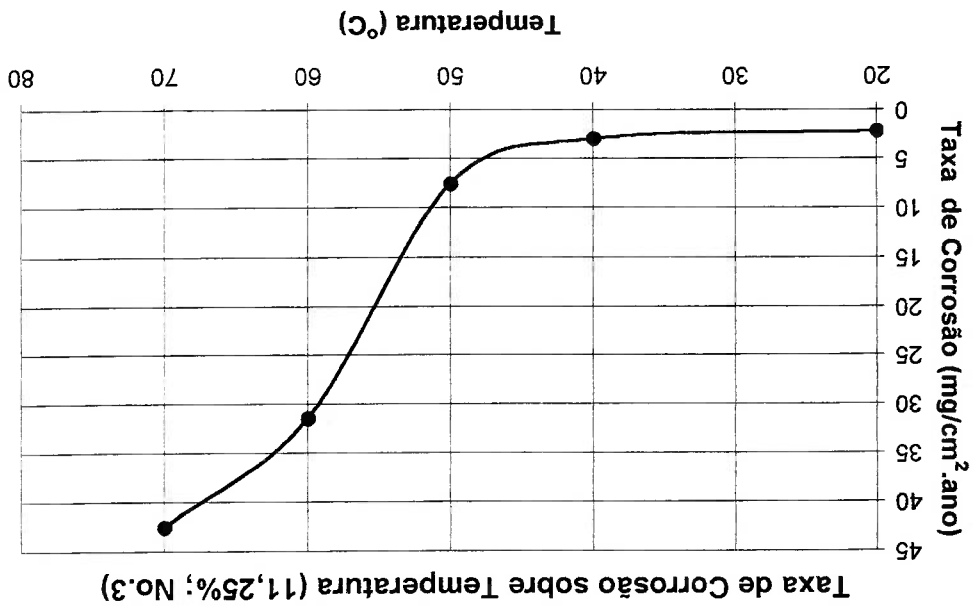




Figura 6.13 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 21% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

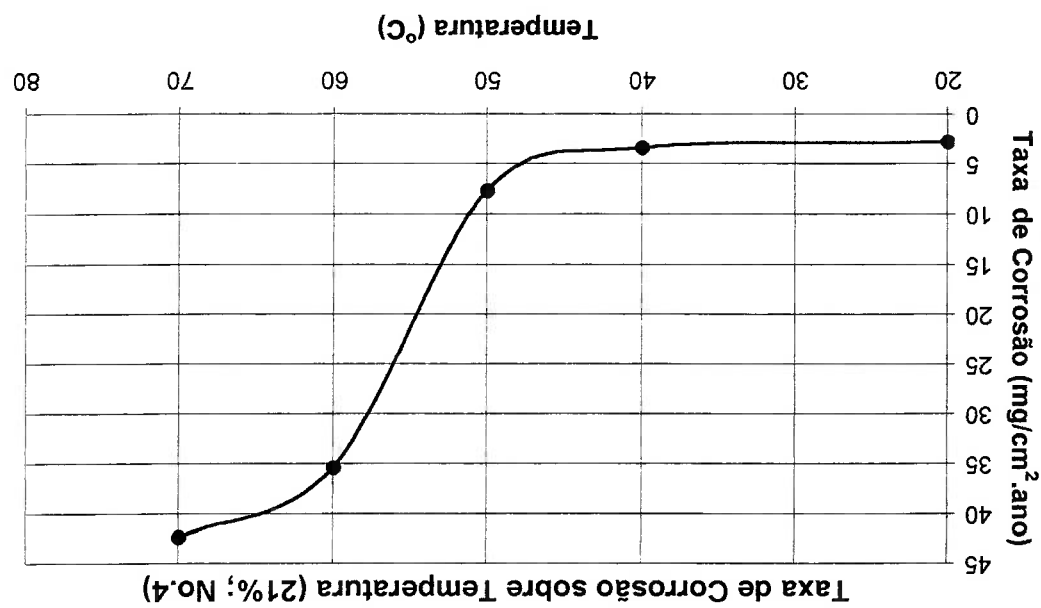
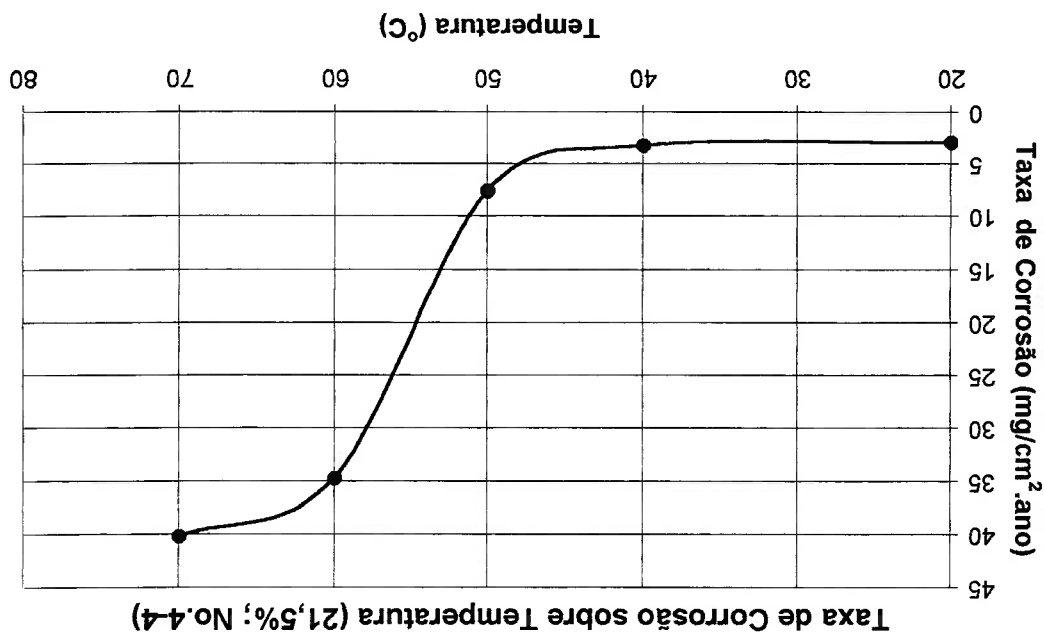


Figura 6.14 Gráfico da Taxa de Corrosão do Cobre em Função da Temperatura a 21,5% de Deformação Plástica, pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio



Na Figura 6.15 apresenta-se esquematicamente a curva construída

através destas análises.

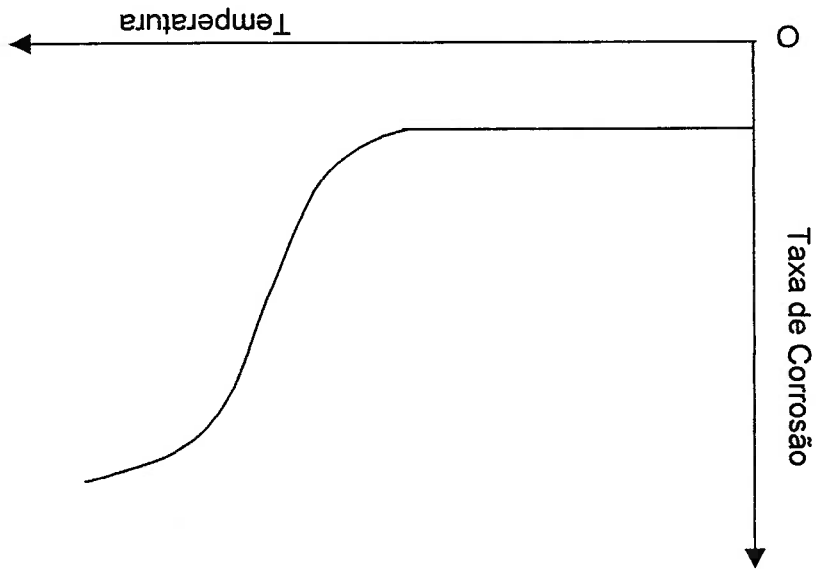


Figura 6.15 Esquema Qualitativo da Taxa de Corrosão sobre a Temperatura nas Condições: pH=6,3 a 6,7 e 835 a 1.028ppb do Teor de Oxigênio

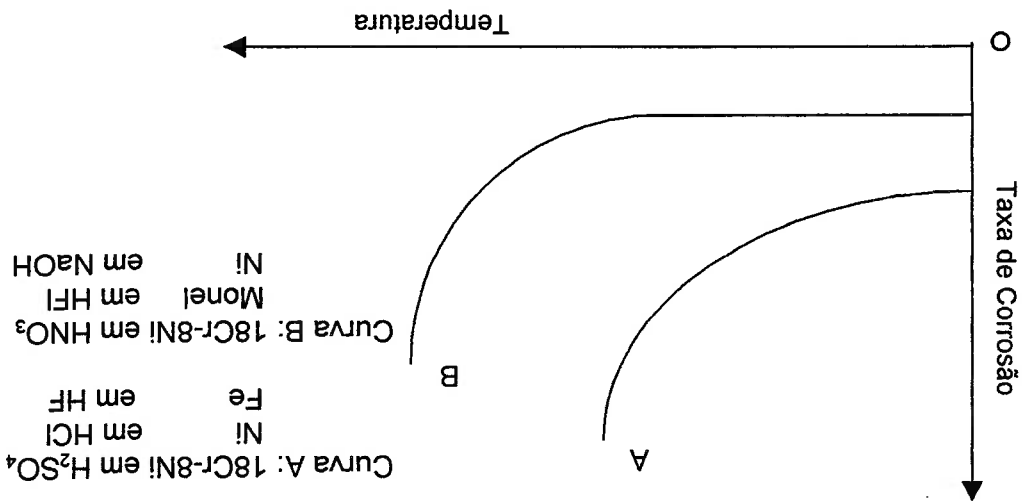
Estes resultados são diferentes dos de BASTO (1997), os quais foram ajustados com a regressão exponencial. Também não são coerentes com os esquemas mostrados por FONTANA (1986), os quais se apresentam na Figura 6.16. Assim, pode-se concluir que o comportamento do Cobre na faixa de 6,3 a 6,7 do valor de pH na água pura é diferente dos comportamentos dos outros metais. Para confirmar este fato, são necessários mais ensaios nas temperaturas entre 50 e 80°C com escala menor.

Nas fotografias não se conseguiu observar os contornos de grão do cobre. Entretanto, pode-se concluir que quase não há influência da deformação plástica na taxa de corrosão do cobre em água pura, pelo fato

este exame e análise, por não fazer do escopo principal de pesquisa. produtos por difratometria de raios-X. Neste trabalho, porém, não realizou cúbico, CuO. Para verificar este fato é preciso examinar e analisar os marron escura, os produtos corrosivos são considerados como óxido os produtos corrosivos do Cobre. Pela coloração dos produtos, que é pequenos precipitados em ambas superfícies. Estes precipitados podem ser deformação plástica e com 2,75% de deformação plástica, apresentando-se existem diferenças significativas entre a superfície do corpo de prova sem As fotografias obtidas pelo método metalográfico mostram que não

### 6.3 Análise das Fotografias Metalográficas

Figura 6.16 Efeito da Temperatura na Taxa de Corrosão, FONTANA, 1986



de que não há diferença nas superfícies dos corpos de prova mostradas nas

Figuras 5.4 e 5.5.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram realizados ensaios de corrosão destinados à avaliação da influência da deformação plástica sobre a taxa de corrosão do cobre em água pura.

### 7.1 Conclusões

As principais conclusões deste trabalho são:

1) Os resultados mostraram que a influência da deformação plástica dos corpos de prova retirados da chapa de cobre eletrolítico SAE CA110 é imperceptível sobre a taxa de corrosão do cobre em água pura;

2) Através dos gráficos obtidos, pode-se verificar que a deformação plástica não exerce uma influência clara sobre a taxa de corrosão. A curva que representa o comportamento fica achatada em temperaturas baixas e oscila em temperaturas altas, com o aumento da deformação plástica dos corpos de prova;

3) As análises feitas demonstraram que a temperatura da água pura é uma variável muito importante na taxa de corrosão. Quando a temperatura aumenta, a taxa de corrosão também aumenta, tendo um crescimento mais acentuado a partir de temperaturas mais elevadas. Através desses resultados, verificou-se que as altas temperaturas passam a ser mandatórias no processo corrosivo.

## **7.2 Recomendações**

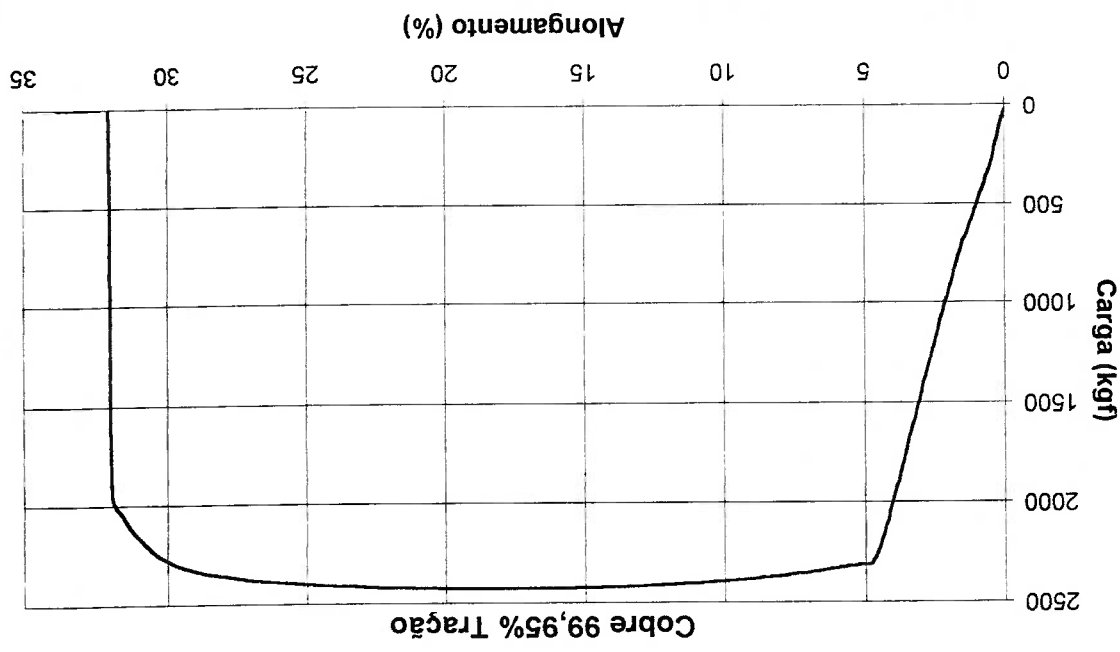
O fenômeno de corrosão do Cobre em presença de água pura é bastante complexo, sendo influenciado por muitas variáveis. Neste trabalho, com o intuito de se verificar qualitativamente a influência da deformação plástica sobre a taxa de corrosão do Cobre em água pura, realizaram-se os ensaios experimentais de tração utilizando-se de corpos de prova não normalizados. Em trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de corpos de prova padronizados de acordo com a norma ABNT MB-4 e com a utilização de extensômetros elétricos para uma maior avaliação das deformações plásticas.

Sugere-se que, para um melhor entendimento da influência da deformação plástica sobre a taxa de corrosão, um estudo estatístico com a utilização de um maior número de corpos de prova sob diferentes níveis de deformação plástica seja realizado.

Também, para a obtenção de um melhor conhecimento sobre o comportamento corrosivo do Cobre em água pura, recomendam-se os ensaios de corrosão em circuitos hidráulicos, estabelecendo um método da medição da perda de massa do condutor de Cobre.

## **RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO**

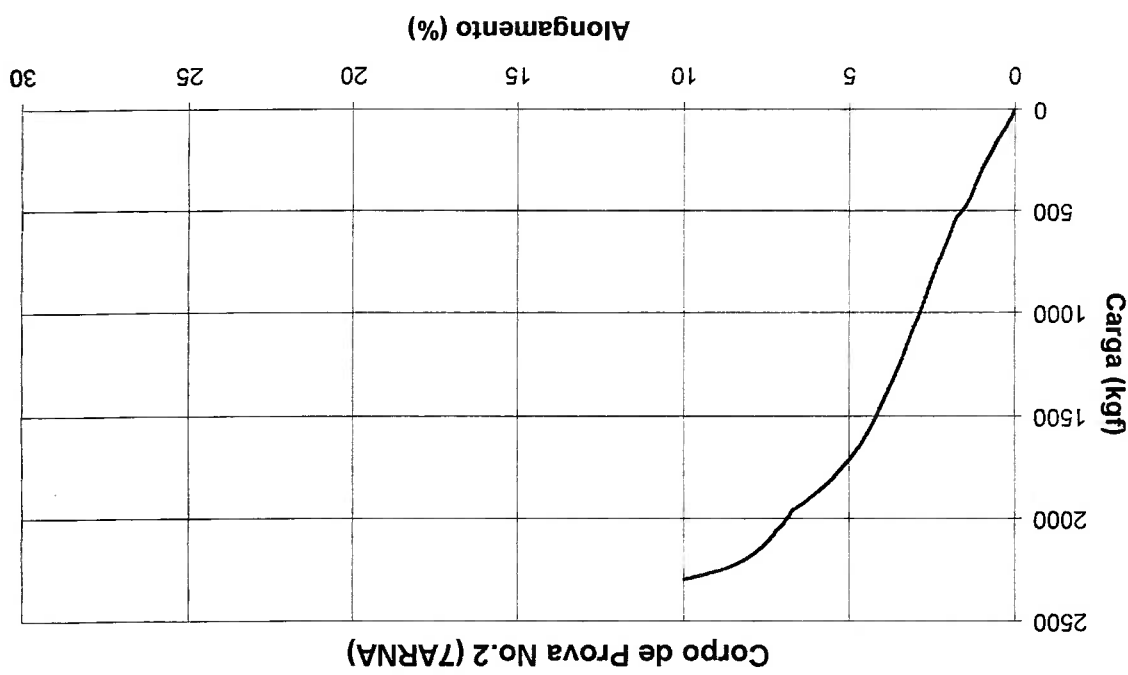
### **APÊNDICE I**



Stress at Max. Load	27.881	Stress at Max. Load	18.550	Stress at Ultimate	27.870
% Strain at Max. Load	18.550	Maximum Percent Strain	33.790	% Strain at Ultimate	17.290

Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: COBRE  
 Test Date: 01 August 00  
 Version Date: 15 April 98  
 Operator: ELIEL  
 Test Type: Tensile  
 Method: 18  
 Interface type: 4200  
 Unit Type: Metric  
 Geometry: Rectangular  
 Number of specimens: 1  
 # of channels: 2  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 3.33000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 5.000 mm/min  
 Specimen Number: 1  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 40.0000000 mm  
 Grip distance: 51.5000000 mm



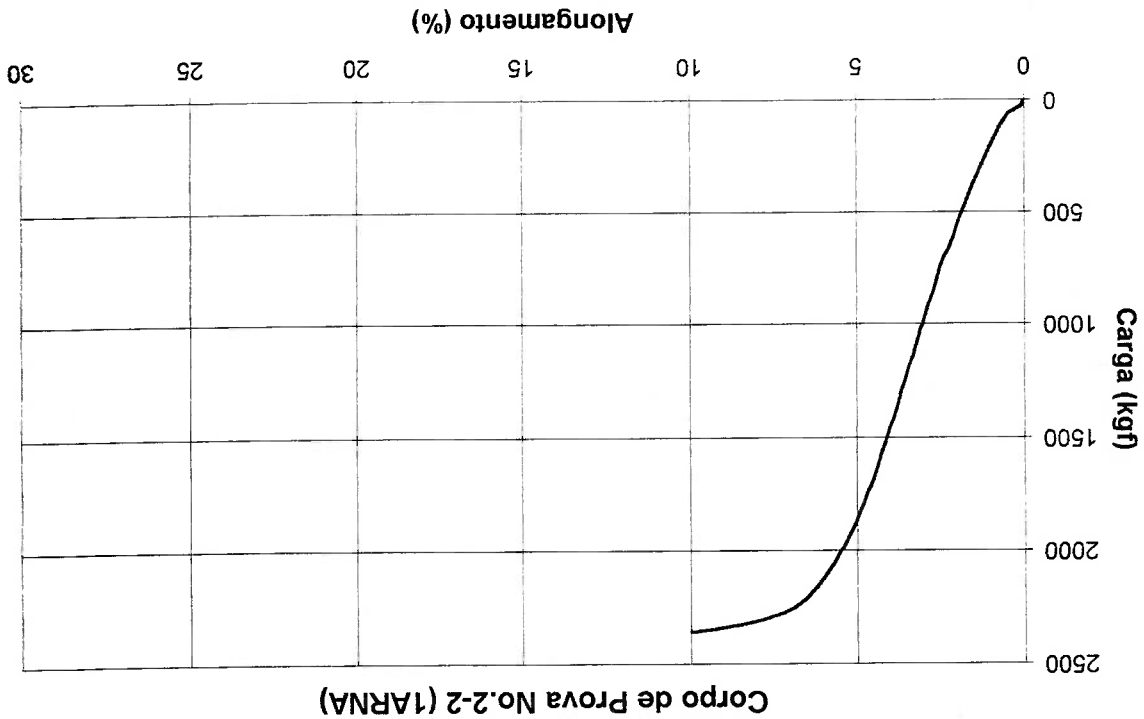


Corpo de Prova No.2 (7ARNA)

Displacement at Max. Load (mm)	4.000	Load at Max. Load (kgf)	2298.000	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	25.809	% Strain at Max. Load (%)	10.000	Maximum Displacement (mm)	4.000	Maximum Strain Percent (%)	10.000
--------------------------------	-------	-------------------------	----------	--	--------	---------------------------	--------	---------------------------	-------	----------------------------	--------

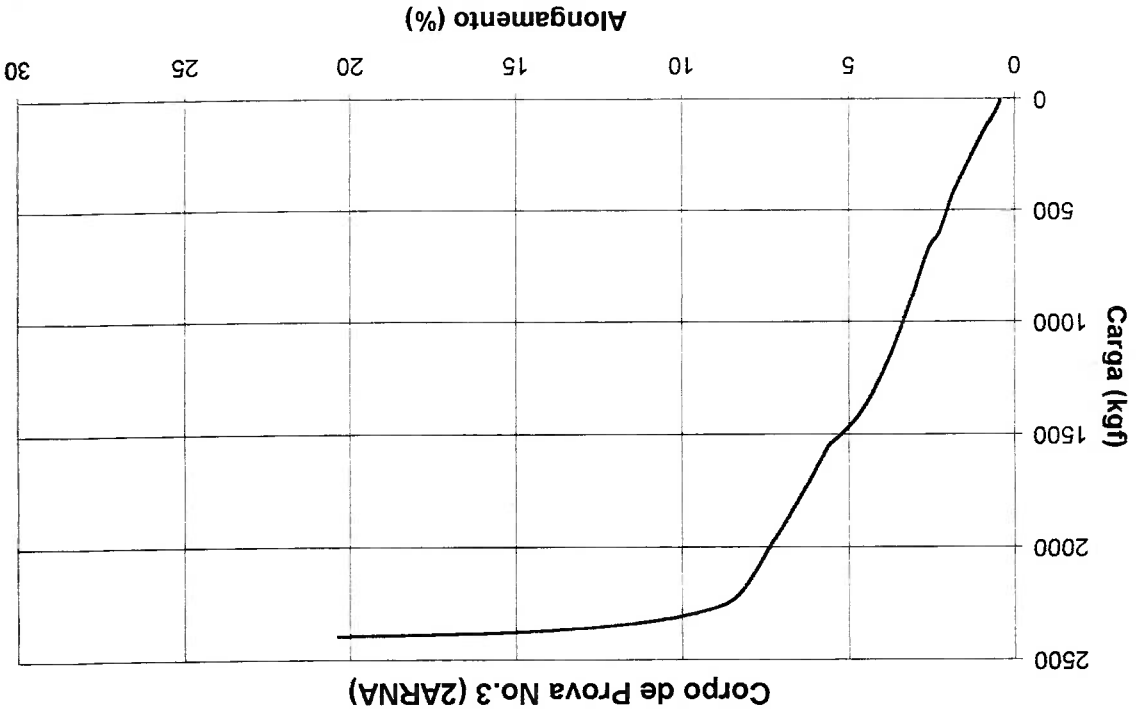
Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: 7ARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: ELIEL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 2  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 2  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

Version Date: 15 April 98  
 Test Date: 15 September 00  
 Method: 19  
 Interface type: 4200  
 Geometry: Rectangular  
 # of channels: 2  
 Extensometer: Disabled



4.000	2361.100	26.517	10.000	4.000	10.000
Displacement at Max. Load (mm)	Load at Max. Load (kgf)	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	% Strain at Max. Load (%)	Maximum Displacement (mm)	Maximum Percent Strain (%)

Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: IARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: ELIEL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 2-2  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 2-2  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm



Displacement at Max. Load (mm)	8.15	Load at Max. Load (kgf)	2396.000	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	26.909	% Strain at Max. Load (%)	20.375	Maximum Displacement (mm)	8.144	Maximum Strain Percent (%)	20.360
--------------------------------	------	-------------------------	----------	--	--------	---------------------------	--------	---------------------------	-------	----------------------------	--------

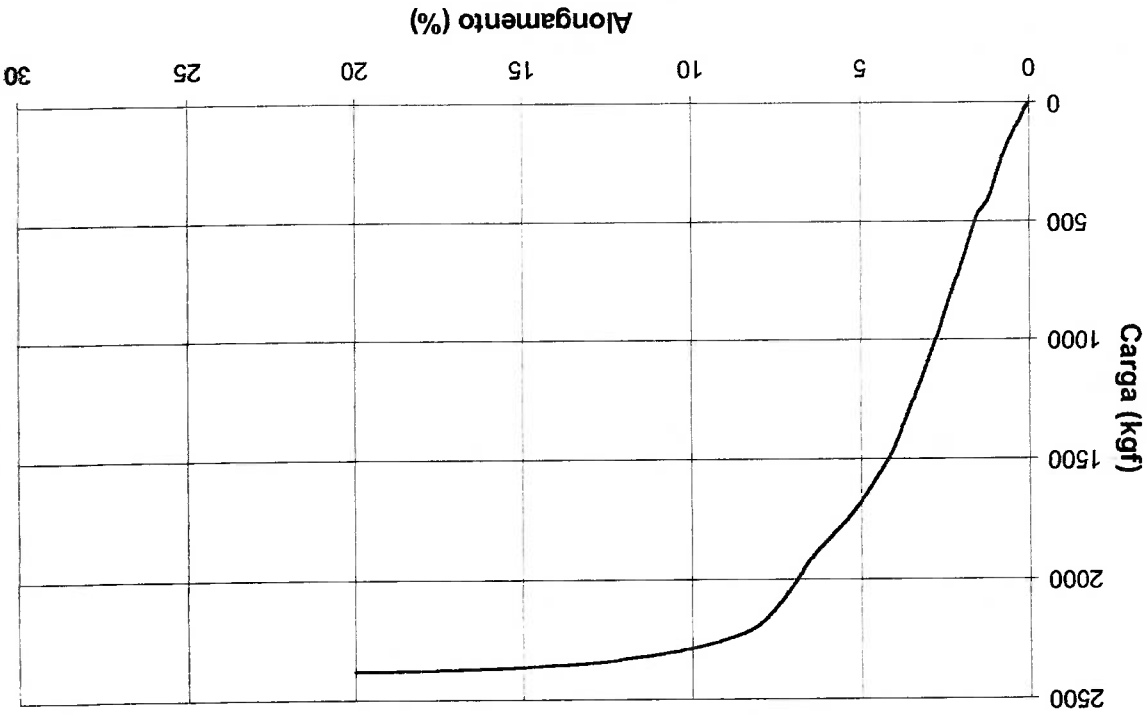
Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: ZARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: ELIEL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 3  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 3  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

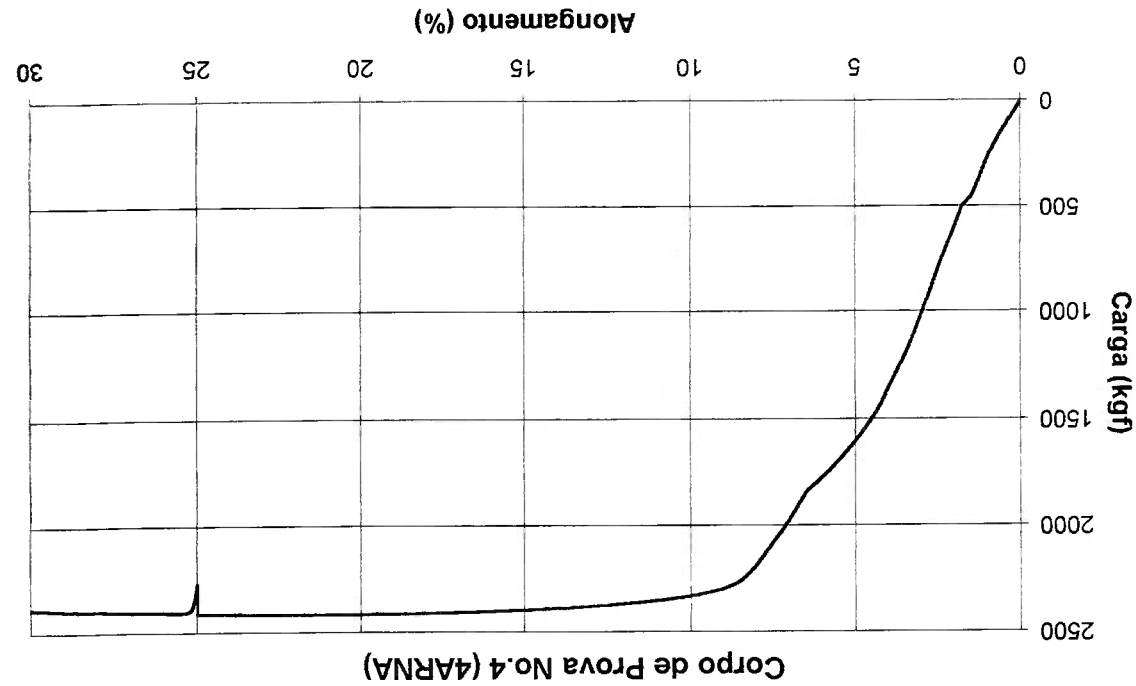
Version Date: 15 April 98  
 Test Date: 15 September 00  
 Method: 19  
 Interface type: 4200  
 Geometry: Rectangular  
 # of channels: 2

Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: 6ARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: ELIEL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 3-3  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 3-3  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

Displacement at Max. Load (mm)	Load at Max. Load (kgf)	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	Strain at Max. Load (%)	Maximum Displacement (mm)	Maximum Percent Strain (%)
8.000	2383.000	26.763	20.000	8.000	20.000

Corpo de Prova No.3-3 (6ARNA)





Displacement at Max. Load (mm)	Load at Max. Load (kgf)	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	% Strain at Max. Load (%)	Maximum Displacement (mm)	Maximum Strain Percent (%)
10.440	2405.000	27.010	26.100	12.000	30.000
9.150	2416.000	27.134	22.875	10.000	25.000

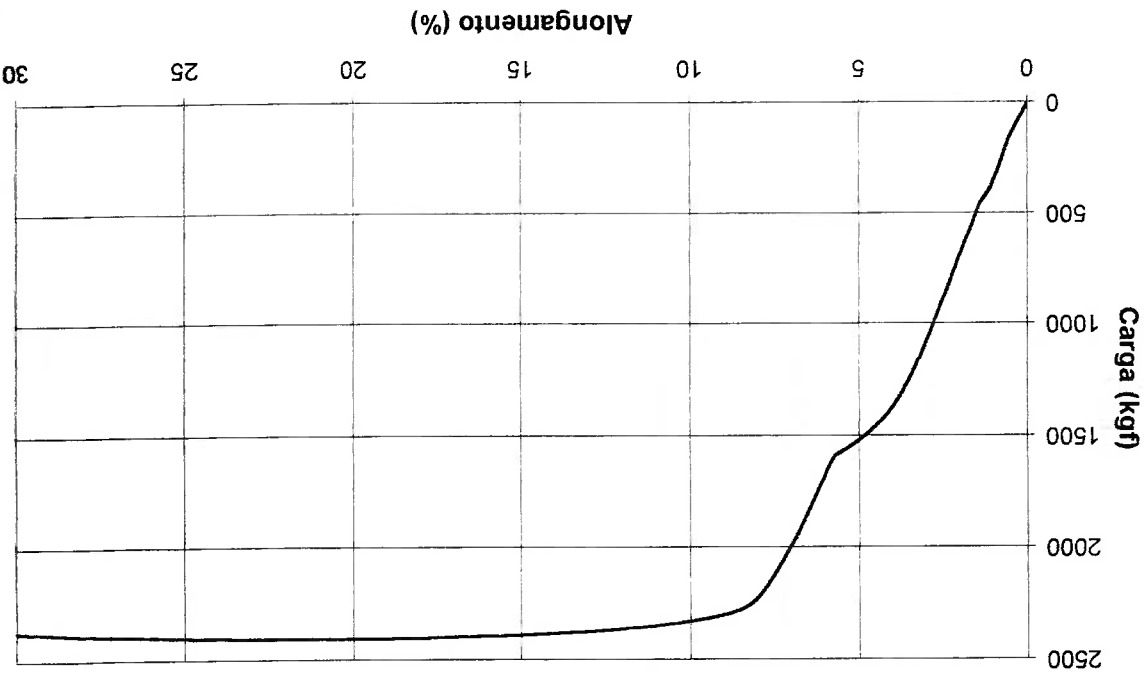
Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: 4ARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: EIRL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 4  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 4  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

Version Date: 15 April 98  
 Test Date: 15 September 00  
 Method: 19  
 Interface type: 4200  
 Geometry: Rectangular  
 # of channels: 2

Test Module Version: 75000  
 Sample I.D.: 5ARNA  
 Test Type: Tensile  
 Operator: ELIEL  
 Unit Type: Metric  
 Number of specimens: 4-4  
 Machine type: 42/43/4400  
 Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.00000 pts/sec  
 Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min  
 Specimen Number: 4-4  
 Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge Length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

Displacement at Max. Load (mm)	9.150
Load at Max. Load (kgf)	2408.000
Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	27.044
% Strain at Max. Load (%)	22.875
Maximum Displacement (mm)	12.000
Maximum Percent Strain (%)	30.000

Corpo de Prova No.4-4 (5ARNA)



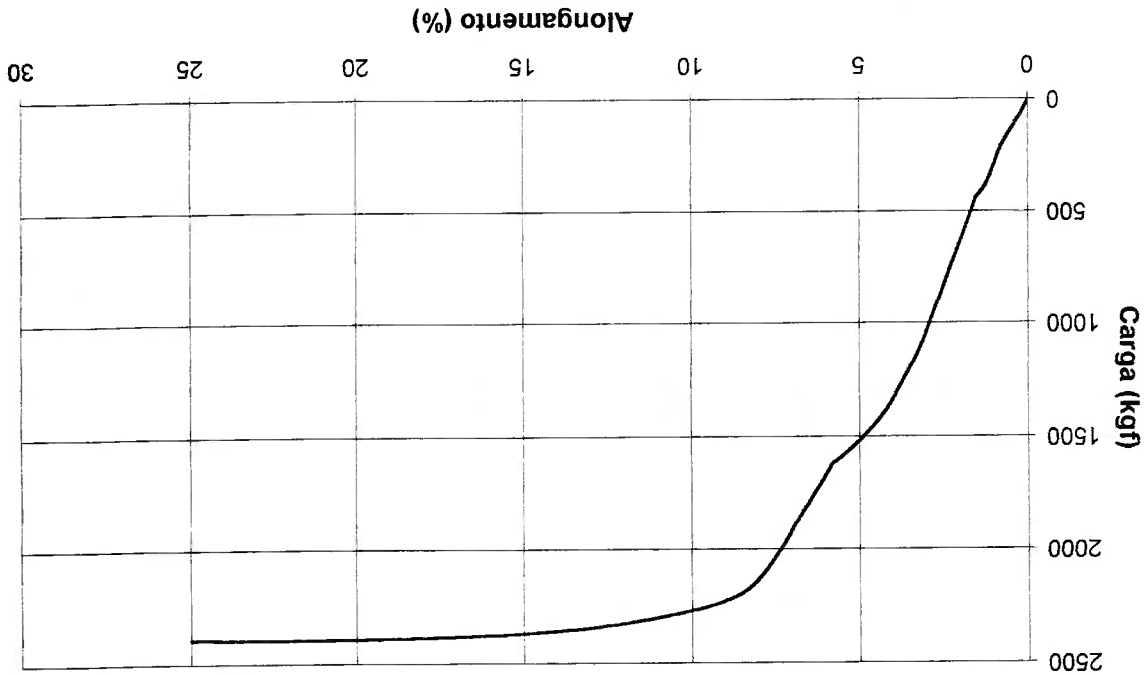
Test Module Version: 75000      Version Date: 15 April 98  
 Sample I.D.: 3ARNA      Test Date: 15 September 00  
 Test Type: Tensile      Method: 19  
 Operator: ELIEL      Interface type: 4200  
 Unit Type: Metric      Geometry: Rectangular  
 Number of specimens: 5      # of channels: 2  
 Machine type: 42/43/4400      Robot mode: No  
 Sample Rate: 5.000000 pts/sec      Extensometer: Disabled  
 Crosshead Speed: 1.000 mm/min

Specimen Number: 5

Width: 27.9999806 mm  
 Thickness: 3.1800002 mm  
 Spec. gauge length: 39.9999991 mm  
 Grip distance: 39.9999991 mm

Displacement at Max. Load (mm)	9.140	Load at Max. Load (kgf)	2397.000	Stress at Max. Load (kgf/mm <sup>2</sup> )	26.920	% Strain at Max. Load (%)	22.850	Maximum Displacement (mm)	10.000	Maximum Percent Strain (%)	25.000
--------------------------------	-------	-------------------------	----------	--	--------	---------------------------	--------	---------------------------	--------	----------------------------	--------

Corpo de Prova No.5 (3ARNA)



- [1] OZELAME, M. L. e FURMANN, J. C.: "Sistema de Resfriamento a Água Pura dos Geradores da Central Hidroelétrica de Itaipu", VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo I, Produção Hidráulica (GPH), São Paulo, 1986
- [2] Informe Técnico Itaipu Binacional: "Obstrução dos Condutores Ocos do Enrolamento do Estator" - 6210-50-15203-P-R1", Revisão 1, Janeiro/1992
- [3] BASTOS Jr., A. C.: "Análise da Taxa de Corrosão do Cobre Eletrolítico em Água Pura", Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1997
- [4] WULFHORST, A.: "Análise da Taxa de Corrosão do Cobre Eletrolítico Assistido por Fluxo", Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1997
- [5] BENÍTEZ, J. C. S.: "Análise da Taxa de Corrosão do Cobre Eletrolítico Energizado em Água Pura", Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1998
- [6] PHILLIPS, A.: "Metais e Ligas Não Ferrosos: Propriedades e Empregos", Trad. Santos, T. D. de S., EPUSP, São Paulo, 1945, pp. 9-17
- [7] GERHARTZ, W. et al.: "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", 5<sup>th</sup> ed., Vol. A7, VCH Verlagsgesellschaft, New York, 1986, pp. 470-573
- [8] BRESCIANI FILHO, E.: "Emprego do Cobre e Estanho e Suas Ligas", ABM, 1975, pp. 1-44
- [9] COTRELL, A. H.: "The Mechanical Properties of Matter", John Wiley & Sons Inc., New York, 1964, pp60-81, pp231-302
- [10] ASTM B 133M-92: "Standard Specification for Copper Rod, Bar, and Shape[Metrics]"
- [11] DIN 1787: "Copper, Semi-Finished Products"
- [12] BUTTS, A.: "Copper – The Science and Technology of the metal: Its Alloys and Compounds", Reinhold Publishing Corporation, New York, 1954

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- [13] WEAST, R. C.: "Handbook of Chemistry and Physics", 49th ed., The Chemical Rubber Co.(CRC), Ohio, Cleverland, 1968
- [14] SOUZA, S. A. de: "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos", 4ª ed., Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1979, pp. 3-58
- [15] SUBBARAO, E. C.; CHAKRAVORTY, D.; MERRIAM, M. F.; RAGHAVAN, V. e SINGHAL, L. K.: "Experiência de Ciência dos Materiais", Trad. SILVA, J. R. G. da; Ver. FERRÃO, L. P. C., Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1973, pp. 82-89
- [16] ABNT MB-4/92, "Materiais Metálicos – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração", ABNT, Out/1992
- [17] DOYLE L. E.; MORRIS J. L.; LEACHS J. L. e SCHRUDER J. F.: "Processo de Fabricação e Materiais para Engenheiros", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1962, pp. 194-197
- [18] PHILLIPS, A.: "Introduction to Plasticity", Ronald Press Company, New York, 1956, pp. 3-7
- [19] GENTIL, V.: "Corrosão", 3ª. Ed., LTC (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.), 1996
- [20] WOLYNEC, S.: "Técnicas Eletroquímicas em Corrosão – Cap.1 Noções Básicas de Eletroquímicas : Equilíbrio", Apostila de Pós-graduação, EPUSP, março, 1992
- [21] PANOSSIAN, Z.: "Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas", v.1, 1st ed., publicação IPT 2032, São Paulo, 1993
- [22] FENG, Y.; SLOW, K. S.; TEO, W. K.; TAN, K. L. e HSIEH, A. K.: "Corrosion Mechanisms and Products of Copper in Aqueous Solution at Various pH Values", NACE International, Corrosion, Vol. 53, No. 5, May/1997, pp. 389-398
- [23] BRUNO, G.; PERBONI, G.; ROCCHINI, G. e TRABANELLI, G.: "Behavior of Copper in High Purity Water", 11th Intern. Corrosion Congress, Florence, Italy, 1990

- [24] SCHLEITHOFF, K. e EMSCHOFF, H. W.: "Optimization of the Conditioning of Generator Cooling Water", VGB Kraftwerkstechnik, vol. 70, nov., 1990, pp. 677-681
- [25] MOLIERE, M.; VERDIER, Y. e LEYMONIE, C.: "Copper Oxidation of Pure Water at 70°C", C.R. Acad. Sci. Paris, t. 300, Série II, No 15, 1985, pp. 739-42
- [26] LEIDHEISER, H. : "The Corrosion of Copper, Tin and Their Alloys", John Wiley, New York, 1971
- [27] MATTISSON, E. e BOCKRIS, J. O. M. Trans. Faraday Soc. 55. 1586, 1959.
- [28] ZOUBOV, N.; VANLEUGENHAGHE, C. e POURBAIX, M.: "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", Bruxelles, 1966, pp384-392
- [29] ASTM G1-81: "Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", ASTM Standards, 1995, pp504-509
- [30] ASTM G31-72: "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", ASTM Standards, 1995, pp534-544
- [31] ORBISPHERE LABORATORIES: "2713 Series Dissolved Oxygen Analyser", 1991
- [32] ORION: "Laboratory Products Group Portable pH/SE Meters Instruction Manual + Model 230A, Model 250A, Model 290A", Orion Research Incorporated, 1991
- [33] FONTANA, M. G.: "Corrosion Engineering", McGraw-Hill Book Company, New York, 1984, p26