

ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DO COBRE  
ELETROLÍTICO ENERGIZADO EM ÁGUA PURA

JUAN CARLOS SILVERO BENÍTEZ

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

São Paulo  
1998

OK

1998

São Paulo

Edison Gonçalves

Orientador:

Engenharia Mecânica - Projeto e Fabricação

Área de Concentração:

de Mestre em Engenharia.

Universidade de São Paulo para obtenção do título

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da

# ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DO COBRE ELETROLÍTICO ENERGIZADO EM ÁGUA PURA

JUAN CARLOS SILVERO BENÍTEZ

de esforços e renúncias na vida familiar.  
pelo apoio e compreensão durante este período

A Bettyna e a minha filha Jazmin,

DEDALUS - Acervo - EPMN  
  
31600010180

DEDICATÓRIA

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Edison Gonçalves por sua orientação, sempre precisa e efetiva. Tive um exemplo de como levar adiante grandes empreendimentos.

A Universidade Nacional de Assunção, através da Faculdade de Engenharia, que fizeram possível a realização deste grau acadêmico.

As colaborações fundamentais, baseadas não só no profissional mas também na amizade, de, eng. Armaury C. Bastos Jr., eng. André Wulffhorst, prof. Dr. Gilberto F.M. de Souza, prof. Dr. Miguel A. Buelta, prof. Dr. George C. Kachan, eng. Luciana C. Penteado, Icimone Braga de Oliveira, Elaine Rosendo e Ailton Opsfelder.

A Itaipu Binacional pela contribuição financeira ao Projeto de Pesquisa, bem como ao seu corpo técnico na pessoa do eng. Luiz Francisco Giacometti, aos professores Drs. José Roberto Cardoso e Silvio I. Nabeta, e ao eng. Maurício Caldora do Depto. de Engenharia Elétrica da EPUSP, cujo apoio foi fundamental na especificação dos ensaios.

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

É conhecido o fenômeno de corrosão/obstrução que os tubos de cobre de sistemas de refrigeração sofrem com o transcorrer do tempo, o qual traz como consequências, paradas dos equipamentos para serviços de manutenção e diminuição da vida útil, resultando num custo bastante significativo.

No caso dos hidrogenadores, alguns estatores são refrigerados por circulação de água em tubos de cobre que compõem o barramento, os quais são altamente energizados, e portanto, o fenômeno da corrosão, possivelmente, é influenciado por variáveis energéticas.

A corrosão do cobre num meio pouco agressivo, como a água pura, é influenciada pelas características físicas e químicas desta água, especificamente, a temperatura, o pH e a concentração de oxigênio dissolvido. Com o objetivo de verificar a influência da energização sobre a corrosão do cobre, foram realizados ensaios utilizando duas variáveis energéticas, corrente elétrica alternada e campo eletromagnético, em combinação com as características da água citadas acima.

Ao final dos ensaios, determinou-se a taxa de corrosão do cobre através da medida da perda de massa dos corpos de prova. Os resultados mostraram que a influência da energização não é perceptível, mas, foi confirmado o efeito dominante da temperatura no processo de corrosão do cobre em água pura.

## RESUMO

It is well known the corrosion/obstruction phenomenon that copper tubes of cooling systems suffer along the time. The results of this phenomenon are equipment stops to maintenance services and a small life time of the equipment, all of this resulting an increase of cost.

In the case of hydrogenerators some stators are cooled with water. The water passes through the hollow conductors copper belonging to the stator's bars. The tubes have a lot of energy, and that's why the phenomenon can be influenced by some energy variables.

The corrosion of copper in a poorly aggressive medium such as pure water is influenced by the chemical and physical characteristics of the water like pH, temperature and dissolved oxygen concentration. Aiming check the effects of energizing on copper corrosion, some experiments were made considering with two different energy variables: alternating current and magnetic field. These variables interacted with the water characteristics.

At the end of experiments the corrosion rate was calculated through direct measurement of the specimens weight loss. The results indicate that an influence of energizing can not be noticed but the effects of temperature on the corrosion process of copper in pure water could be confirmed.

## ABSTRACT

# ÍNDICE

I	Dedicatória	
II	Agradecimentos	
III	Resumo	
IV	Abstract	
V	Índice	
VII	Lista de Figuras	
01	<b>1. INTRODUÇÃO</b>	
01	1.1 Considerações iniciais	
02	1.2 Objetivo do trabalho	
03	1.3 Escopo do trabalho	
05	<b>2. ANÁLISE DA CORROÇÃO DO COBRE</b>	
05	2.1 Fundamentos da corrosão	
11	2.2 Corrosão do cobre em meio aquoso	
17	2.3 Fatores que influenciam a corrosão do cobre em água pura	
23	<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	
23	3.1 Análise das variáveis energéticas para especificação dos ensaios	
24	3.1.1 Estimativa da Corrente Elétrica	
28	3.1.2 Estimativa da Indução Magnética	
30	3.2 Especificação dos ensaios	
32	3.2.1 Corpos de prova	
36	3.2.2 Aparelhagem experimental	
36	3.2.2.1 Aparelhagem básica	
39	3.2.2.2 Aparelhagem elétrica e magnética	
48	3.2.2.3 Equipamentos de apoio e medição	

98	7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
95	6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES
79	5.2 Ensaio de indução magnética
77	5.1 Ensaio de passagem de corrente elétrica
77	5. ANÁLISE DOS RESULTADOS
70	4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS
67	3.2.7 Procedimento de Finalização do Ensaio
65	3.2.6.2 Ensaio de Indução Magnética
65	3.2.6.1 Ensaio de Passagem de Corrente Elétrica
64	3.2.6 Procedimento de Energização e Execução do Ensaio
61	3.2.5 Procedimento de Início de Ensaio
60	3.2.4.2 Procedimento de Montagem dos Aparelhos Elétricos
57	3.2.4.1 Procedimento de preparação da água para ensaio
57	3.2.4 Procedimento de Preparação de Ensaio
53	3.2.3 Procedimento de Preparação dos Corpos de Prova



## LISTA DE FIGURAS

PÁGINA	FIGURA
08	2.1 Ilustração esquemática da dissolução de um metal imerso num eletrólito ácido. [10]
11	2.2 Curvas de polarização para as reações anódicas e catódicas. Corrente de corrosão $i_c$ . [7]
13	2.3 Curvas de polarização para o cobre em meio ácido desaerado e com a presença de oxigênio dissolvido em soluções básicas. [7]
16	2.4 Diagrama Potencial-pH para o sistema Cobre - Água a 25 °C. [11]
20	2.5 Efeito da temperatura sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5. [1] [2]
21	2.6 Efeito combinado do pH e a temperatura sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb. [1] [2]
22	2.7 Variação da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura em função do teor de O <sub>2</sub> dissolvido na água, com uma faixa de pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55°C. [1] [2]
24	3.1 Esquema simplificado de um gerador de corrente alternada. [13]
29	3.2 Seção transversal da barra estatórica de Itaipu.
34	3.3 Corpo de prova para o ensaio de passagem de corrente elétrica.
35	3.4 Corpo de prova para o ensaio de Indução Magnética.
39	3.5 Aparelhagem experimental básica.
41	3.6 Arranjo experimental do ensaio de passagem de corrente elétrica.
42	3.7 Ensaio de Passagem de Corrente Elétrica. Conjunto em operação.
43	3.8 Arranjo experimental do ensaio de Indução Magnética.
44	3.9 Bobina. Detalhe do entreferro com o corpo de prova.
45	3.10 Bobina. Desenho de fabricação do Núcleo de Ferro.
46	3.11 Bobina com núcleo de ferro.

47	3.12	Bobina revestida com composto vítreo impermeável.
73	4.1	Varição da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
74	4.2	Varição da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
75	4.3	Varição da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com teor de O <sub>2</sub> dissolvido maior a 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
76	4.4	Varição da taxa de corrosão do cobre em função da indução magnética e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
81	5.1	Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35 °C.
82	5.2	Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 45 °C.
83	5.3	Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55 °C.
84	5.4	Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 75 °C.
85	5.5	Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para todas as correntes, em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
86	5.6	Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para correntes de 8 e 11 A, em água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
87	5.7	Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para correntes de 4, 8 e 11 A, em água pura com teor de O <sub>2</sub> dissolvido maior a 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.
88	5.8	Gráfico comparativo das taxas de corrosão do cobre em função da temperatura, dos ensaios de corrosão convencional, [2], (o), e passagem de corrente elétrica (o) para I = 0 A.

- 5.9 Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para  $I = 8 \text{ A}$ . . . . . 89
- 5.10 Regressão linear dos valores da taxa de corrosão em função da temperatura, para  $I = 8 \text{ A}$ , com uma faixa de intervalo de confiança de 95%. . . . . 89
- 5.11 Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de  $\text{O}_2$  dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55 °C. . . . . 90
- 5.12 Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de  $\text{O}_2$  dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 45 °C. . . . . 91
- 5.13 Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de  $\text{O}_2$  dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35 °C. . . . . 92
- 5.14 Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da temperatura, para todas as induções magnéticas, em água pura com teor de  $\text{O}_2$  dissolvido entre 1200 e 2000 ppb e pH entre 8,0 e 8,5. . . . . 93
- 5.15 Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para  $B = 0 \text{ T}$ . . . . . 94
- 5.16 Regressão linear dos valores da taxa de corrosão em função da temperatura, para  $B = 0 \text{ T}$ , com uma faixa de intervalo de confiança de 95%. . . . . 94

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Muitos sistemas de refrigeração de equipamentos industriais, tais como, trocadores de calor, estatores de hidrogenadores e geradores em geral, são fabricados de tubos de cobre, principalmente, devido às excelentes condutividades térmica e elétrica, e a trabalhabilidade deste material. Além disso, o fluido refrigerante é geralmente a água, seja ela tratada ou não, pois é facilmente disponível e apresenta baixo custo. Por outro lado, é conhecido o fenômeno de corrosão/obstrução que os tubos sofrem com o transcorrer do tempo, o qual traz como consequências, paradas dos equipamentos para serviços de manutenção e diminuição da vida útil, resultando num custo bastante significativo.

No caso de algumas usinas hidroelétricas, especificamente Itaipu Binacional, por razões de espaço e alto aproveitamento energético, a dissipação de calor dos hidrogenadores para obter maior eficiência, é feita através da circulação forçada de água no interior de condutores ocios de cobre que compõem as barras do enrolamento do estator. A água contém características especiais relativas a sua pureza, a qual é controlada na preparação e operação através do monitoramento da temperatura, do pH, do teor de oxigênio dissolvido, e da condutividade, parâmetros estes, de conhecida influência no controle da corrosão, determinados em estudos precedentes, [1-2]. Mesmo assim, apresenta-se o fenômeno de corrosão e

Por sua própria natureza de operação, os condutores ocios do barramento estatístico são altamente energizados, e portanto, o fenômeno da corrosão torna-se mais complexo com o envolvimento de outras variáveis. A corrosão do cobre num meio pouco agressivo, como a água pura, é influenciada pelas características do sistema, especificamente, a temperatura, a concentração de oxigênio dissolvido na água, o pH e a velocidade da água, [5]. Este estudo tem como objetivo único avaliar a influência da energização do cobre sobre o processo de corrosão que sofre quando é imerso em água pura estática. A energização, como outro fator, intervem através da passagem de corrente elétrica, por um lado, e a aplicação de um campo magnético externo,

## 1.2 Objetivo do trabalho

de corrosão.

energéticas ou campos energéticos exteriores sobre processos degenerativos foi encontrada na literatura trabalhos relativos aos efeitos de variáveis os quais analisam a influência de variáveis envolvidas no processo, mas, não Tem se feito alguns estudos relativos a este fenômeno prejudicial, [3-4],

gerando grandes prejuízos econômicos.

frequentes paradas dos hidrogenadores para serviços de remoção de resíduos, cobre, que por sua vez produz o aquecimento da máquina. Isto leva a deposição dos produtos, ocasionando o entupimento dos condutores ocios de

O Capítulo 3, contém a descrição completa do procedimento experimental, que começa apresentando a metodologia utilizada para a estimação das variáveis energéticas aplicadas, corrente elétrica alternada e indução magnética, objetivando determinar os valores de referência a serem utilizados nos ensaios. Posteriormente, é apresentada a especificação detalhada do ensaio de corrosão energizado, contendo informações sobre a classificação dos ensaios a serem executados, os tipos de corpos de prova e os procedimentos de preparação dos mesmos. Em seguida, descreve-se a aparelhagem experimental utilizada nos ensaios, bem como os procedimentos de preparação da água pura, de preparação do ensaio, de montagem, de início, de energização, de execução e de finalização de ensaio. Além disto,

corrosão do cobre em meio aquoso.

Feita a apresentação do problema e a justificativa do trabalho, em seguida expõe-se uma análise físico e matemático dos fenômenos envolvidos no estudo. Assim, no Capítulo 2 faz-se a revisão bibliográfica dos conceitos de

### 1.3 Escopo do trabalho

Cabe ressaltar, que este trabalho constitui uma fase dentro de uma investigação tecnológica maior cujo objetivo é controlar o fenômeno descrito, visando ter períodos maiores para a manutenção das máquinas controladas.

por outro, enquanto as características da água citadas acima permanecem

inclui-se o método de cálculo da taxa de corrosão e as técnicas para monitoração do pH, da temperatura e teor de O<sub>2</sub> da água pura. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, e no Capítulo 5 é apresentada a análise desses resultados, através de gráficos, mostrando o comportamento da taxa de corrosão do cobre em água pura sob as condições de energização supracitadas. Finalmente, no Capítulo 6 resume-se as conclusões mais importantes deste trabalho.

## 2. ANÁLISE DA CORROSÃO DE COBRE

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. Apesar disto não se constitui no propósito deste texto, mas para melhor compreensão do que acontece com o cobre em soluções aquosas é feita uma breve revisão dos conceitos de corrosão.

### 2.1 Fundamentos da corrosão

A *corrosão* pode ser definida como a deterioração de um material causada pela interação físico-química entre o material e seu meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos, [6].

Os fenômenos de corrosão de metais apresentam uma grande variedade de mecanismos, os quais de um modo geral, podem ser reunidos em quatro grupos, [7]:

- Corrosão em meios aquosos
- Oxidação e corrosão quente
- Corrosão em meios orgânicos
- Corrosão por metais líquidos.

Dentre os mecanismos citados, a corrosão em meios aquosos é a mais comum, atingindo aproximadamente 90% dos casos conhecidos, isto é o

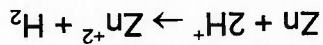


esperado, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, no qual a água é o principal solvente.

A corrosão em meios aquosos caracteriza-se por apresentar um processo eletroquímico de degradação. Entende-se como *reação eletroquímica* aquela reação química que estiver associada a uma passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica. Esta passagem de corrente envolve o movimento de partículas carregadas: íons, elétrons, ou ambos, [7]. Os íons se movimentam através do meio aquoso chamado *eletrólito*, enquanto os elétrons precisam de uma espécie química oxidante ( $H_2$ ,  $O_2$ , ou outro composto) para ser arrancados do metal.

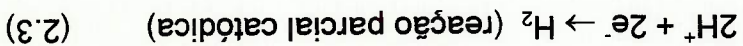
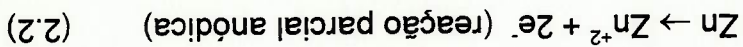
Todo processo eletroquímico envolve a formação de uma *pilha ou célula de corrosão* entre metais diferentes ou distribuídos em um mesmo metal. Por sua vez, a pilha está constituída de ânodos e cátodos. O *ânodo* é a região onde se produz a perda de elétrons (processo de oxidação) e consequentemente é a região onde ocorre a dissolução do metal. O *cátodo* é a região onde se produz o ganho de elétrons por uma espécie química (processo de redução). Não existe corrosão eletroquímica sem a presença conjunta dos três fatores: ânodo, cátodo e eletrólito, [8].

As reações de corrosão são diversas e complexas, dependendo do tipo de metal e eletrólito reagentes. Para ilustrar melhor o exposto acima, temos por exemplo que, a corrosão do zinco em meio ácido não aerado ocorre segundo a reação global, [9]:



(2.1)

A reação (2.1) é produto de duas reações parciais:



Assim, as duas reações parciais ocorrem simultaneamente graças à

passagem através do metal de corrente elétrica da região anódica para a

região catódica. A velocidade de corrosão depende da cinética das duas

reações parciais.

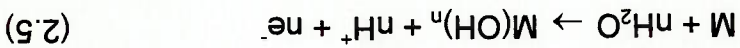
Em uma forma geral, podem-se listar as seguinte reações anódicas ou

reações de oxidação em meios aquosos:

a) Dissolução do metal para formar cátions:



b) Dissolução do metal para formar produtos de corrosão sólidos:



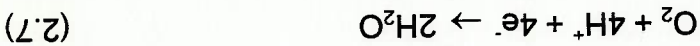
As reações catódicas mais comuns em meios aquosos são as

seguintes:

a) Evolução do hidrogênio (em soluções ácidas)



b) Redução do oxigênio (ocorre em soluções ácidas aeradas)



c) Redução do oxigênio (em soluções básicas ou neutras aeradas)



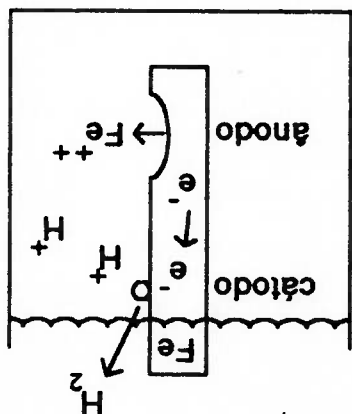
d) Deposição do metal



A medida do valor absoluto dessa diferença de potencial é inviável, pois qualquer que seja o sistema de medida adotado, o mesmo implicará na

(dissolução) ou da facilidade com que ions recebem elétrons (deposição). medida da facilidade com que os átomos do eletrodo metálico perdem elétrons eletrodo mostra a tendência de uma reação se passar no eletrodo, isto é, dá a *eletrodo* é a diferença de potencial entre o metal e o eletrólito. O potencial de Define-se *eletrodo* ao sistema formado pelo metal e eletrólito, e *potencial de* ions dentro da solução e com a permanência dos elétrons dentro do metal. espontaneamente uma diferença de potencial elétrico, devido à formação de Quando um metal é imerso numa solução eletrolítica estabelece-se

FIGURA 2.1 - Ilustração esquemática da dissolução de um metal imerso num eletrólito ácido. [10]



A figura 2.1 ilustra em forma esquemática a dissolução anódica do ferro mergulhado em uma solução ácida e a redução do hidrogênio no cátodo.

imersão dentro da solução de um terminal metálico que irá dar origem a um outro eletrodo. Na prática, o que se faz é medir uma diferença de potencial relativa com relação a um eletrodo de referência. Convencionou-se definir um *eletrodo de referência padrão*, de potencial "zero". A definição desse eletrodo padrão envolve uma série de condições químicas, tais como o tipo de solução, concentração, etc. e montagem de dispositivo, o qual não é considerado importante aprofundar nesta descrição.

Um desses eletrodos padrões mais conhecido é o *eletrodo padrão de hidrogênio*, com relação a qual consegue-se, através de artifícios, realizar as medidas de potencial de eletrodo padrões de todos os elementos imersos em suas próprias soluções iônicas de concentração padronizada.

Se a interação entre o metal e o eletrólito (eletrodo) é de uma única reação eletroquímica e se o eletrodo não estiver ligado a fonte elétrica externa, esta reação atingirá numa fração de segundo o *equilíbrio*, isto é, a velocidade desta reação nos dois sentidos (dissolução/deposição) será idêntica. Um eletrodo nessas condições estará em *equilíbrio* e o seu potencial de eletrodo é designado como *potencial de equilíbrio* ou *potencial reversível*. Na prática, são poucos os eletrodos capazes de estar em equilíbrio.

Em estado de equilíbrio, mede-se os potenciais de eletrodo padrão das diferentes reações eletroquímicas, cujo conjunto de valores constitui a *série eletroquímica*. Nesta, existem potenciais positivos e negativos colocados por cima e por baixo, respectivamente, do valor zero, correspondente ao eletrodo padrão de referência (no caso, o eletrodo de hidrogênio).

É bom ressaltar que, a análise de corrosão feita não leva em consideração as influências de: a concentração do eletrólito, a aplicação de um potencial elétrico externo ao eletrodo chamado de polarização e nem o fenômeno do transporte das espécies, em cujos casos a análise seria bem mais complexa. Para cada condição de concentração do eletrólito ou polarização externa, os eletrodos apresentam curvas que relacionam o potencial de eletrodo com a corrente elétrica desenvolvida nas reações anódicas e catódicas. A corrente de corrosão no eletrodo se dá na intercessão

sentido é o 2.

Segundo a convenção de sinais usada, se na equação (2.11) a fem resulta positiva, o sentido da reação é o 1 na relação (2.10), e se fosse negativa o onde,  $E_c$  é o potencial da reação catódica e  $E_a$  o potencial do ânodo.

$$fem = E_c - E_a \quad (2.11)$$

estado oxidado e reduzido, respectivamente. E matematicamente se tem:

onde Ox e Red representam, de forma genérica, os componentes da reação no



potencial entre os eletrodos. Ou seja, escrito em forma de reação:

espontaneidade ou sentido de uma reação com o sinal da diferença de

Finalmente, com a série eletroquímica pode-se relacionar a

também é conhecida como *série de força eletromotriz*.

A série eletroquímica dá a possibilidade de uma reação acontecer-se espontaneamente, sem a aplicação de um potencial externo, mas não diz nada em relação à velocidade da reação. Essencialmente, ela refere a existência de uma força eletromotriz (fem) entre os eletrodos da pilha eletroquímica, por isso

das curvas anódicas e catódicas. Em forma esquemática, a figura 2.2 ilustra o exposto.

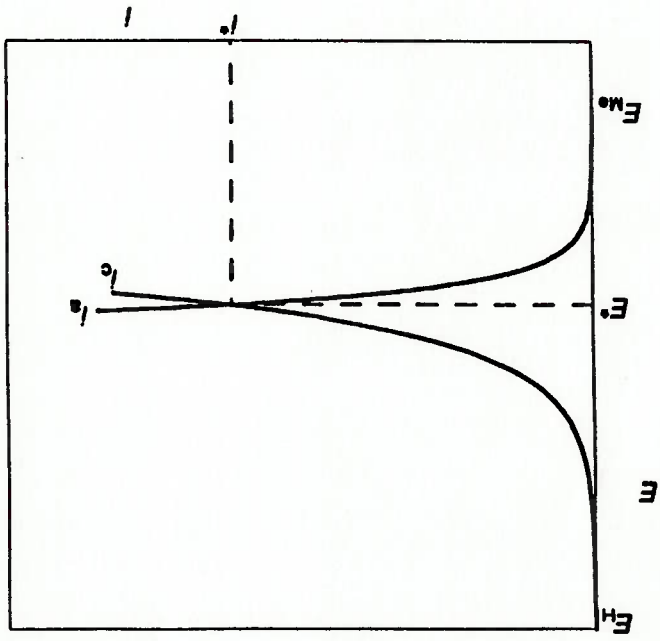


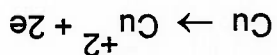
FIGURA 2.2 - Curvas de polarização para as reações anódicas e catódicas. Corrente de corrosão  $I_c$ . [7]

## 2.2 Corrosão do cobre em meio aquoso

O cobre caracteriza-se por apresentar boa resistência à corrosão em certos ambientes agressivos, mas também é atacado por outras espécies oxidantes, o qual será demonstrado a seguir.

Em soluções ácidas desaeradas, ou seja sem a presença do oxigênio, a possível reação de oxidação é:

(2.12)



onde, segundo a série eletroquímica, o potencial de equilíbrio de eletrodo para

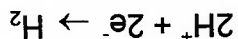
concentrações unitárias é:

(2.13)

$$E_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}}^{\circ} = + 0,35 \text{ V}$$

A provável reação catódica será a de evolução do hidrogênio,

(2.14)



cujo potencial de equilíbrio é o padrão de referência e igual a zero, ou seja:

(2.15)

$$E_{\text{H}^{+}/\text{H}_2}^{\circ} = 0 \text{ V}$$

Aplicando a equação (2.11) temos:

(2.16)

$$\text{fem} = 0 - (+ 0,35)$$

(2.17)

$$\text{fem} = - 0,35 \text{ V}$$

Consequentemente, a reação não se processa em forma espontânea no

sentido da dissolução, o quer dizer que não ocorre a oxidação (corrosão) do

cobre em presença do ion  $\text{H}^{+}$  (soluções ácidas desaeradas). É necessário,

então, a presença de outra espécie oxidante que pode ser o oxigênio.

Segundo o mesmo raciocínio anterior pode-se demonstrar que o  $\text{O}_2$

sustenta a corrosão do cobre, onde a reação de redução em soluções aquosas

básicas aeradas é a (2.8), sendo o potencial de equilíbrio, obtido da série

eletroquímica,  $E_{\text{O}_2/\text{OH}^{-}}^{\circ} = 0,4 \text{ V}$ , o que resulta numa fem =  $0,4 - 0,35 = 0,05 \text{ V}$ .

Cabe ressaltar que, mesmo sem a presença do  $\text{O}_2$  e com a presença de

outros ions complexantes pode haver corrosão do cobre. A Figura 2.3 ilustra

os processos analisados.

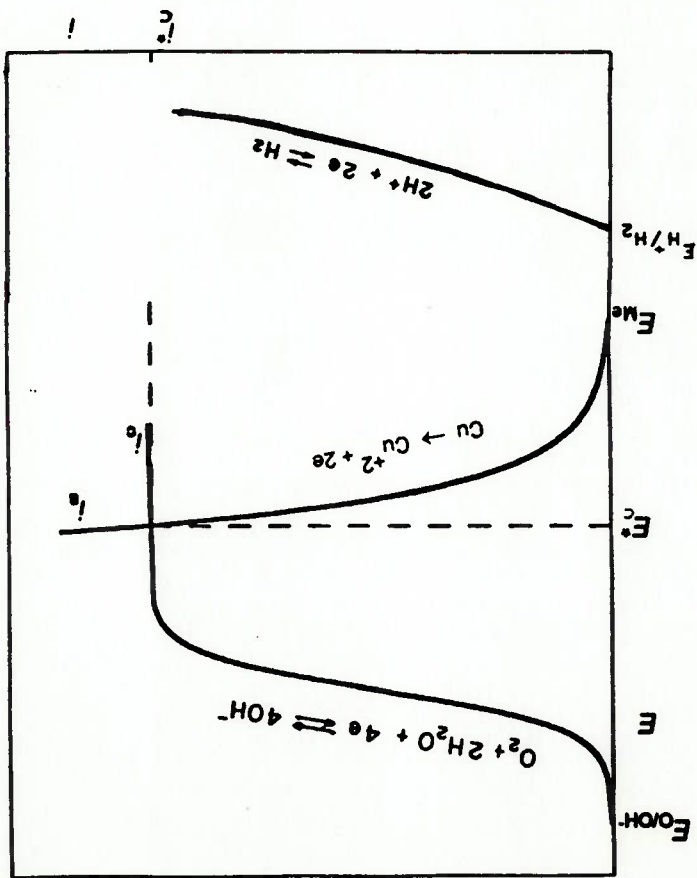
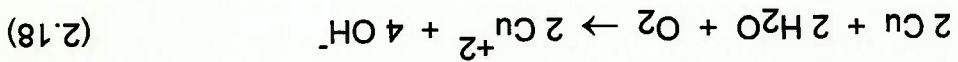


FIGURA 2.3 - Curvas de polarização para o cobre em meio ácido desaerado e com a presença de oxigênio dissolvido em soluções básicas. [7]

O comportamento do cobre em soluções básicas ou neutras aeradas,

objeto deste estudo, responde a seguinte reação global:



A reação parcial de oxidação ocorre em duas etapas:

- (2.19) a)  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{+1} + 1e$  (etapa rápida)
- (2.20) b)  $\text{Cu}^{+1} \rightarrow \text{Cu}^{+2} + 1e$  (etapa lenta)



Como a segunda etapa é a mais lenta, ela determina a cinética da

reação global de oxidação:



A reação parcial de redução do oxigênio é:



A reação de redução do oxigênio também ocorre em etapas, uma das

quais torna-se determinante da velocidade, [10]:

a) Transferência de oxigênio através da interface solução/atmosfera.

b) Transporte de oxigênio através da solução por convecção ou por difusão

para regiões na solução próximas à superfície metálica.

c) Transporte de oxigênio para a interface solução/metálica.

d) Transferência de carga na superfície do eletrodo.

Geralmente, a etapa (d) é determinante da velocidade quando o

suprimento de oxigênio para a superfície metálica é rápido, de outro modo a

difusão do oxigênio é determinante da velocidade.

Uma outra consequência das duas reações eletroquímicas básicas é a

precipitação do produto da corrosão. O cobre forma como residuo dois tipos de

óxidos:

- $\text{Cu}_2\text{O}$  (óxido cuproso)

- $\text{CuO}$  (óxido cúprico)

O  $\text{Cu}_2\text{O}$  apresenta uma coloração avermelhada, porém quando obtido

artificialmente pode ser amarelo, laranja, vermelho ou marrom escuro. O óxido

cúprico,  $\text{CuO}$ , tem a coloração preta.

A formação de filmes óxidos sobre a superfície do cobre, que são

aderentes em maior ou menor grau, atuam como protetores contra corrosão

demorando o processo degenerativo, por isso são conhecidos como *pellicula*

*passiva*.

O *Diagrama de Pourbaix* faz uma representação gráfica do Potencial

das reações de equilíbrio em função do pH. Para traçar tais diagramas é

necessário fixar a concentração das espécies dissolvidas. O diagrama

apresenta uma possibilidade para se prever as condições sob as quais pode-

se ter corrosão, imunidade ou passividade, ou seja, indica a estabilidade das

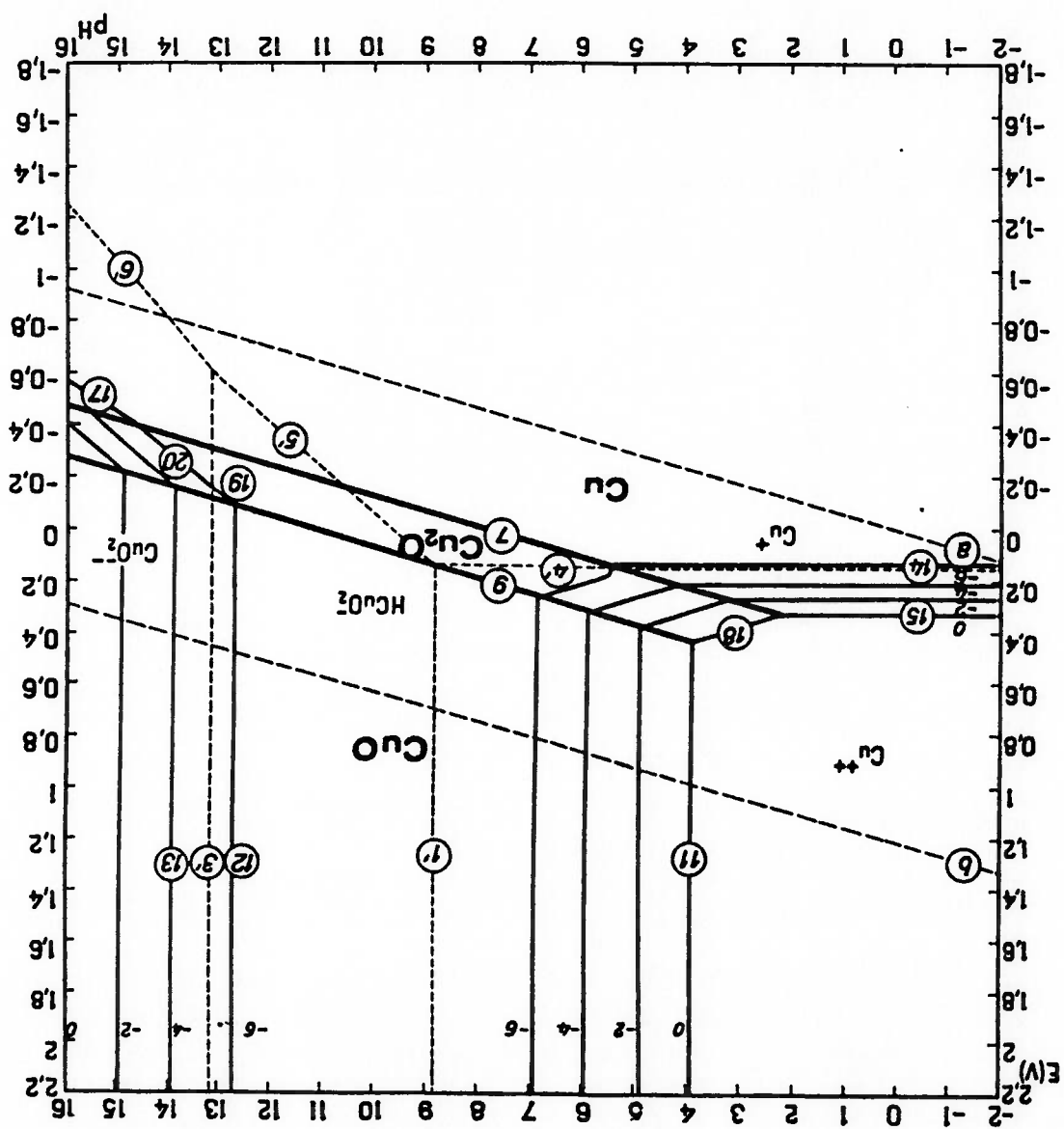
espécies. No Diagrama de Pourbaix para o cobre, Figura 2.4, verifica-se que

se forma, primeiro, o óxido cuproso,  $\text{Cu}_2\text{O}$  e em condições mais oxidantes

(valores mais positivos de potencial), com a presença de maior teor de

oxigênio, pode-se formar o óxido cúprico,  $\text{CuO}$ .

FIGURA 2.4 - Diagrama Potencial-pH para o sistema Cobre - Agua a 25 °C. [11]



## 2.3 Fatores que influenciam a corrosão do cobre em água pura

Tem-se feitos trabalhos sobre o comportamento do cobre em água pura,

especialmente, nas condições de circuitos experimentais objetivando solucionar o fenômeno de entupimento de tubos de cobre em sistemas de refrigeração de usinas termoeletricas. Por exemplo, Schleithoff e Emshof [3]

simularam diversas condições de operação, variando o teor de oxigênio para diferentes valores de pH, em um circuito experimental, à temperatura de 30 °C durante 10.000 horas. Os resultados mostraram que, com concentrações de O<sub>2</sub>

entre 200 e 300 ppb, a taxa de corrosão é máxima e com o aumento do pH, a influência do teor de O<sub>2</sub> dissolvido diminui. Este estudo também determinou que o pH da água pura diminui com a entrada de CO<sub>2</sub> no sistema, proveniente do ar, o qual tem influência na solubilidade dos óxidos formados, e que por sua

vez afeta a capacidade protetora (película passiva) dos próprios óxidos.

Em recentes estudos, [1-2], analisou-se a taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura estática sob a influência das condições químicas do meio (pH e teor de oxigênio dissolvido), e a temperatura do sistema. A seguir, apresenta-se as conclusões referidas às variáveis estudadas:

### i) Efeito da temperatura

Ensaio realizados entre as temperaturas de 35 °C e 80 °C demonstraram que, a medida em que a temperatura aumenta, a taxa de corrosão também aumenta, tendo um crescimento mais acentuado a partir de

O efeito da concentração do oxigênio dissolvido na água é apresentado na Figura 2.7, [1] [2]. Observa-se, que os valores do teor de  $O_2$  variaram desde cerca de 50 ppb até cerca de 1500 ppb e a temperatura de ensaio foi 55 °C. Os resultados confirmaram a tendência apresentada por Schleithoff, [3], que as taxas de corrosão são maiores para a faixa de concentração de oxigênio

### !!!) Efeito da concentração de $O_2$ dissolvido

casos.

O efeito combinado do pH e da temperatura é apresentado na Figura 2.6, onde pode-se observar curvas com a mesma tendência, porém, com inclinações diferentes, mostrando que a taxa de corrosão diminui quando o pH do meio passa de um valor levemente ácido para um pH básico. Este resultado confirma a tendência de que os filmes formados em meios ácidos não apresentam estabilidade e, portanto, a taxa de corrosão é maior para estes

### !!) Efeito do pH

apresenta alguns resultados.

temperaturas mais elevadas. Isto acontece para qualquer combinação de valores das outras variáveis envolvidas, o qual demonstra o caráter mandatório da temperatura no fenômeno. Como exemplo, a Figura 2.5

dissolvido na água entre 100 e 500 ppb, diminuindo para valores fora dessa faixa. Deve-se ressaltar que, enquanto Schleithoff fez ensaios com fluxo e a temperatura menor (35 °C), nos estudos [1] e [2], verificou-se que a maior temperatura, as taxas de corrosão tendem a nivelar-se, confirmando o efeito mandatório da temperatura.

Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 <= pH < 8,5) Teor de oxig. 500 - 1200 ppb

$$y = 0.799 * \exp(0.033 * x)$$

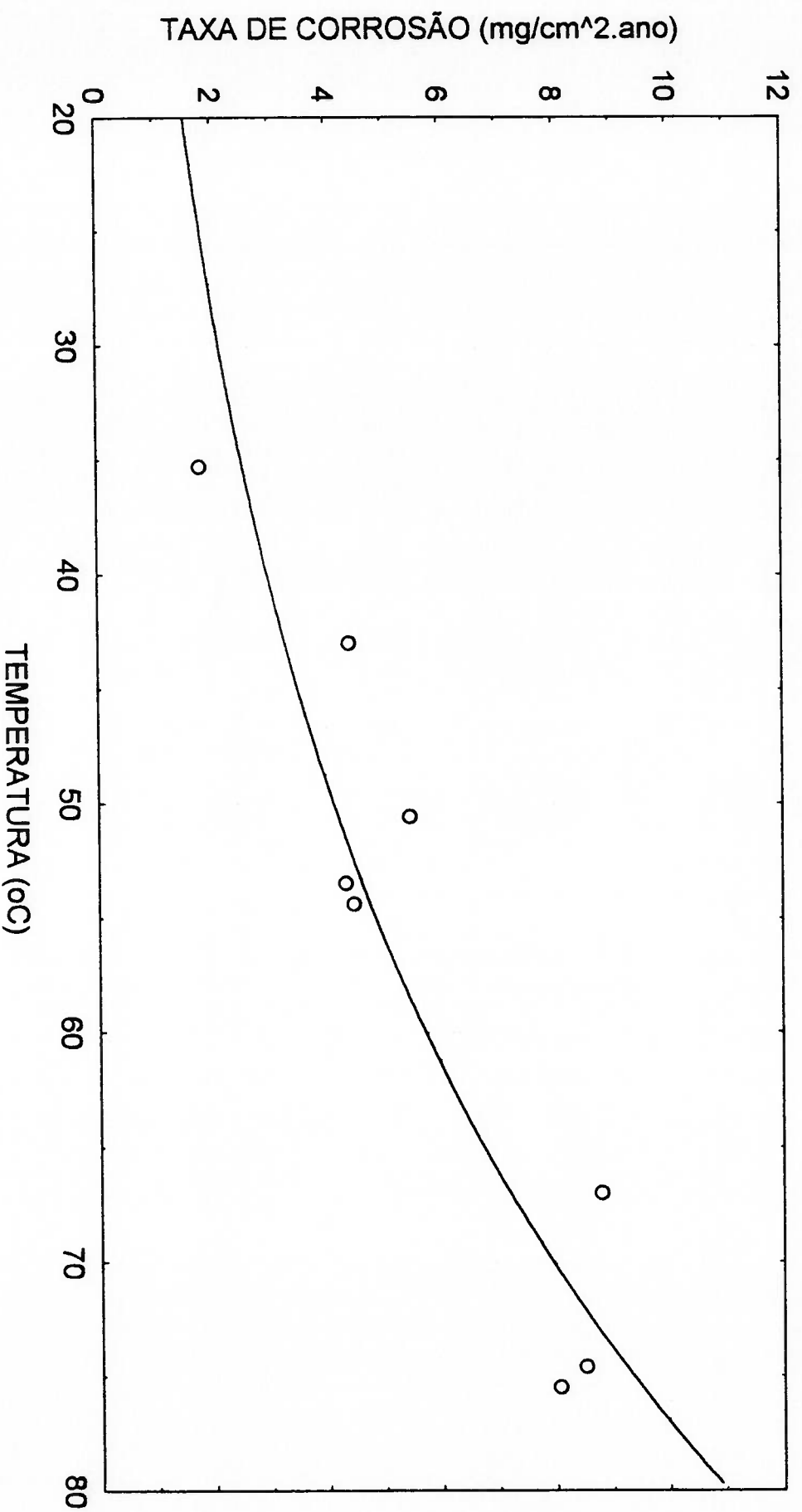
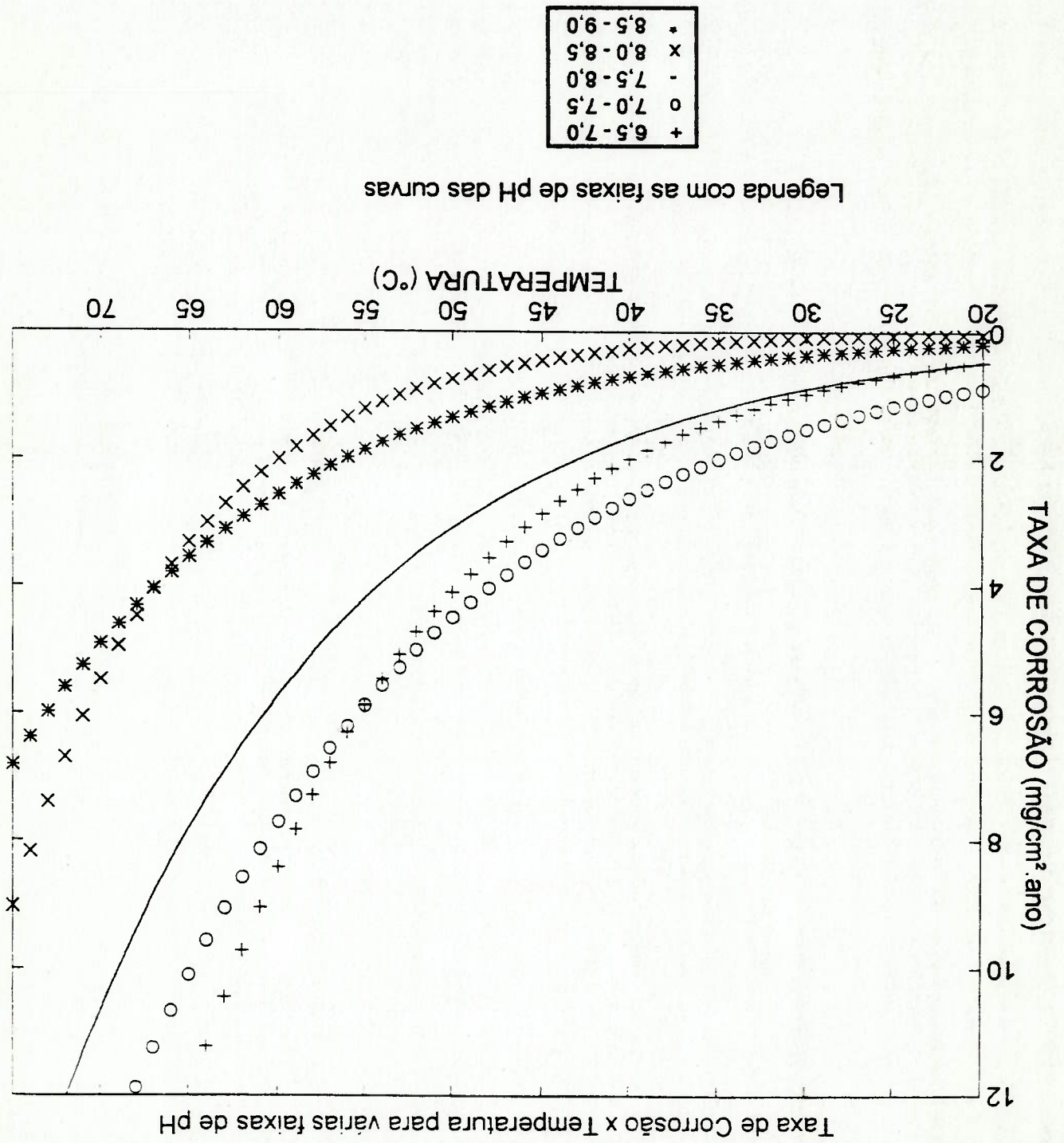


FIGURA 2.5 - Efeito da temperatura sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5. [1] [2]

FIGURA 2.6 - Efeito combinado do pH e a temperatura sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb. [1] [2]







### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Análise das variáveis energéticas para especificação dos ensaios

A geração de energia num hidrogenerador pode ser explicado, de forma

elementar, da seguinte maneira: a energia mecânica do fluxo de água proporciona, através de uma turbina hidráulica, um movimento rotacional ao

rotor, o qual fornece um campo magnético constante produzido por um

enrolamento alimentado independentemente com corrente contínua. A variação

no tempo do campo magnético que atravessa os circuitos do enrolamento do

estator induz nele uma força eletromotriz, a qual em circuito fechado gera uma

corrente elétrica no estator, tal como mostrado esquematicamente na Figura

3.1. Assim, os condutores do estator são percorridos por corrente elétrica

alternada e submetidos a um campo magnético, [12] [13].

Os ensaios para avaliar os efeitos da energização no processo de

corrosão dos condutores ocios foram subdivididos em dois tipos, caracterizados

pela utilização de duas variáveis, respectivamente, corrente elétrica alternada

(I) e indução magnética (B). Os valores de referência para serem usados nos

ensaios foram calculados a partir de valores nominais de operação de

geradores de Itaipu de 50 Hz, [14].

A seguir são apresentados os procedimentos usados para estimar a

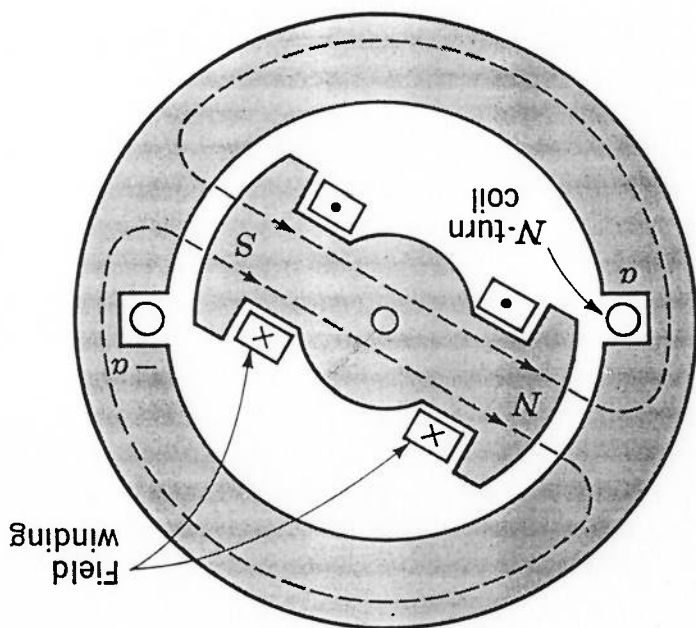
corrente elétrica alternada e a intensidade do campo magnético utilizadas nos

ensaios de corrosão.

A corrente elétrica aplicada é do tipo alternada senoidal, sendo a unidade de medida da intensidade o Ampère. Na prática, os dados da corrente alternada são em função de seus valores eficazes. Define-se *valor eficaz* de uma corrente alternada, como a intensidade de corrente constante que desenvolve a mesma quantidade de calor em qualquer resistência no mesmo intervalo de tempo considerado. Demonstra-se que o valor eficaz de uma corrente elétrica senoidal é igual a 0,707 vezes o valor máximo da corrente alternada, [12].

### 3.1.1 Estimativa da Corrente Elétrica I

FIGURA 3.1- Esquema simplificado de um gerador de corrente alternada. [13]



Para efeito de estimativa da corrente elétrica a ser utilizada nos ensaios experimentais, estabeleceu-se o critério da igualdade das Densidades de

Corrente Elétrica ( $J$ ), ou seja:

$$J_{\text{ENSAIO}} = J_{\text{HIDROGERADOR}} \quad (3.1)$$

sendo a Densidade de Corrente Elétrica a razão entre a intensidade de corrente

e a área do condutor, medida em Ampères/mm<sup>2</sup>, portanto,

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.2)$$

sendo  $I$  a corrente elétrica e  $A$  a área da seção transversal do condutor.

Para o caso do hidrogenador, cuja barra estatórica em seção transversal

é apresentada na figura 3.1, tem-se:

- Corrente Nominal em cada Barra,  $I = 4.403 \text{ A}$ , [14].

- Área da seção transversal da Barra,  $A = 798 \text{ mm}^2$ , portanto,

$$J_{\text{HIDROGERADOR}} = 5,5 \text{ A/mm}^2 \quad (3.3)$$

Combinando as equações 3.1 e 3.2, obtêm-se:

$$J_{\text{ENSAIO}} = J_{\text{HIDROGERADOR}} \times A_{\text{CORPO DE PROVA}} \quad (3.4)$$

Como será visto no item 3.2.1, o corpo de prova a ser submetido à

corrente elétrica será um fio de cobre de 2 mm<sup>2</sup> de área transversal. Portanto, a

corrente elétrica de ensaio é:

$$I_{\text{ENSAIO}} = 11 \text{ A} \quad (3.5)$$

Então, 11 Ampères constitui a intensidade de corrente elétrica de

referência no ensaio de Passagem de Corrente que reproduz a densidade de

corrente nominal das barras estatóricas dos hidrogenadores.

Um outro aspecto que merece ser analisado é o possível aquecimento da água pelo calor produzido pela passagem de corrente elétrica no fio. Se isso fosse acontecer, a hipótese é que a temperatura na superfície do fio não seria igual à temperatura medida na água, ou seja, teria-se um gradiente de temperatura no sistema.

A seguir, calcula-se a potência ou calor gerado pelo fio considerando-o como uma resistência elétrica pura.

A potência fornecida a um dispositivo em circuito de corrente alternada é dado por:

$$P = V \times I \cos \phi \quad (3.6)$$

Onde:  $V$  = Diferença de potencial entre os extremos do dispositivo.

$I$  = Intensidade de corrente no dispositivo.

$\phi$  = ângulo de defasagem entre  $V$  e  $I$ .

Para uma resistência pura,  $\phi = 0$ ,  $\cos \phi = 1$  e  $V = R \times I$ , [12], a equação

(3.6) fica:

$$P = R \times I^2 \quad (3.7)$$

sendo  $R$  a resistência elétrica do fio e dada pela seguinte relação:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.8)$$

Onde:  $\rho = 1,95 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , resistividade do cobre a  $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ , [12].

$L$  = Comprimento do fio.

$A$  = Área transversal do fio.

Conforme será explicado no item 3.2.1, a área lateral do fio deve ser igual a 2950 mm<sup>2</sup>, e para uma seção transversal de 2 mm<sup>2</sup> obtêm-se um comprimento de 580 mm. Portanto,

$$R = 5,61 \times 10^{-3} \Omega \quad (3.9)$$

Finalmente, aplicando a equação 3.7 para uma corrente elétrica de 11 A,

tem-se:

$$P = 0,68W \quad (3.10)$$

Então, para a densidade de corrente aplicada, a quantidade de calor gerada no fio é considerada muito baixa para elevar a temperatura na superfície do fio, sendo que está decaído e o calor é dissipado na água. Este fato foi comprovado através de um ensaio auxiliar para verificar o aquecimento da água na mesma condição experimental dos ensaios. Assim, estando o corpo de prova imerso em água a 22 °C, foi aplicado uma corrente elétrica que produz a densidade de corrente nominal (5,5 mm<sup>2</sup>); monitorando-se a temperatura da água com um termômetro por espaço de meia hora não verificou-se variação na mesma. Além de, com auxílio de um termopar, mediu-se a temperatura do fio fora da água a qual não experimentou mudança permanecendo a temperatura ambiente. Desta forma, testou-se também a temperaturas superiores, concluindo-se que é necessário fornecer energia externamente para que o sistema fio/água se mantivesse a uma mesma temperatura de ensaio.

### 3.1.2 Estimativa da Indução Magnética B

Existem um *campo magnético* num ponto onde se exerce uma força sobre uma carga elétrica móvel que passa por esse ponto. Um campo magnético pode representar-se por linhas chamadas *linhas de indução*, cuja direção em cada ponto é a do vetor *indução magnética (B)*. Por convenção, o número destas linhas por unidade de superfície perpendicular a sua direção se faz igual ao valor da indução. Uma linha de indução se expressa em *weber*, então a unidade de medida da indução magnética é o *webers por metro quadrado ou Tesla* ( $Wb/m^2 = T$ ). O número total de linhas de indução que atravessam uma superfície chama-se *fluxo magnético* através da superfície ( $\Phi$ ), por isso a indução magnética B é também denominada *densidade de fluxo magnético*, [12].

Para efeito de estimativa do valor da indução magnética a ser utilizado nos ensaios experimentais, determinou-se calcular o valor da indução magnética real nas barras do estator do hidrogenador. Com tal objetivo, foi desenvolvido um trabalho de modelagem pelo Método dos Elementos Finitos do gerador de Itaipu, [15], a partir dos dados nominais de operação dos geradores fornecidos na Referência [14]. A partir de dito estudo obteve-se os diferentes valores de B na seção transversal da barra, que variam desde o máximo de 0,2 Tesla até praticamente zero.

Com o objetivo de gerar um campo magnético de valor máximo  $B = 0,2 T$  e que atravessasse o corpo de prova, foi projetado um dispositivo gerador de fluxo magnético com núcleo de ferro que neste trabalho será denominado bobina, [16].

Portanto, 0,2 Tesla constitui o valor da indução magnética máxima de referência que foi utilizado nos ensaios para verificar os efeitos do campo magnético no processo de corrosão do cobre em água pura.

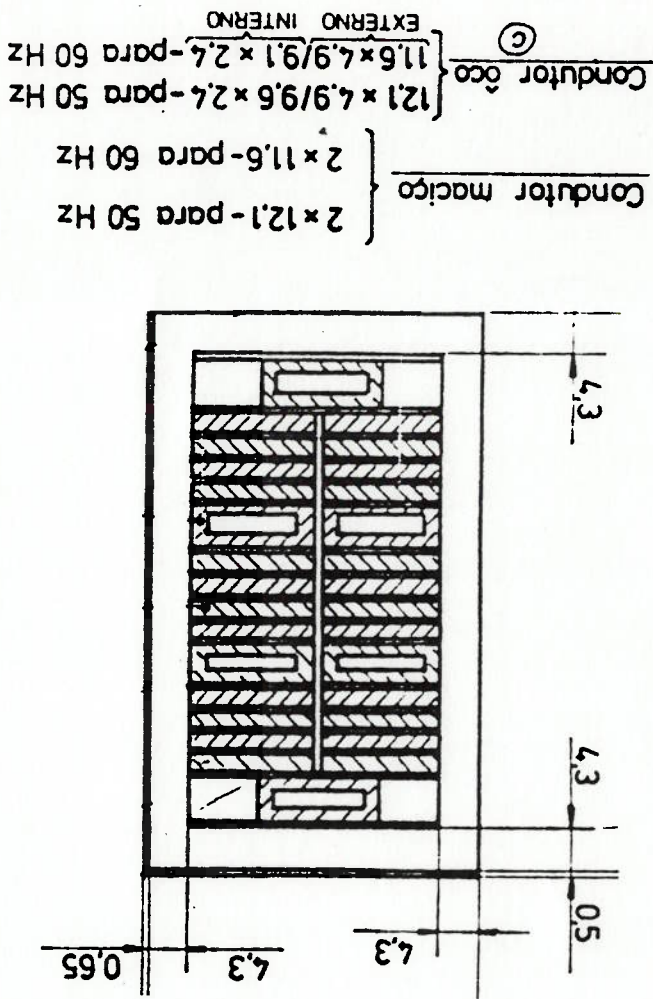


FIGURA 3.2 - Seção transversal da barra estática de Itaipu.



### 3.2 Especificação dos ensaios

Os ensaios têm como objetivo avaliar a influência da energização sobre o processo de corrosão do cobre imerso em água pura, na ausência de fluxo, através do estudo de duas variáveis energéticas analisadas em ensaios separados:

- i) Corrente elétrica alternada (I).
- ii) Indução Magnética (B).

As diferentes condições dos ensaios foram definidos segundo os valores adotados para os parâmetros característicos da água pura (temperatura, pH e teor de  $O_2$ ) e para os parâmetros energéticos (corrente elétrica e indução magnética), os quais foram monitorados ao longo dos ensaios.

Os ensaios foram executados sob o controle das características típicas da água pura: temperatura, pH e teor de oxigênio dissolvido. O valor destas variáveis foram preestabelecidas, conhecendo seus efeitos, já fornecidos pela Referência [1], e de maneira a tentar isolar a influência das variáveis energéticas. As temperaturas utilizadas variaram entre 35 °C e 75 °C, faixa esta similar à usual da água encontrada no circuito de refrigeração dos hidrogenadores da Usina Hidroelétrica de Itaipu. Os ensaios foram executados com água pura apresentando pH entre 8,0 e 8,5, valores estes que caracterizam uma faixa de pH básico, condição que conceitualmente vem

sendo utilizado na operação de hidro e turbogeradores. Com relação à concentração de oxigênio dissolvido na água, foram executados ensaios com água pura contendo teores de  $O_2$  variando de 100 a 3600 ppb, divididos em varias faixas, procurando-se, nesta fase, a realização de um maior número de ensaios para a faixa em torno de 1.200 ppb, pela maior facilidade de manter essa faixa durante os ensaios e já que o objetivo unico deste ensaio é avaliar o efeito da energização do cobre sobre o fenômeno de corrosão.

Como já foi mencionado, foram definidos dois tipos de ensaios caracterizados pela utilização de uma variável energética em cada um deles. Assim, no ensaio de passagem de corrente, foi analisada a influência de três valores de corrente:  $I = 4$ ,  $I = 8$  e  $I = 11$  Amperes, os quais para a área transversal adotada do corpo de prova ( $2 \text{ mm}^2$ ) produzem as densidades de corrente,  $J = 2$ ,  $J = 4$  e  $J = 5,5 \text{ A/mm}^2$  (valor nominal do hidrogenerador de 50 Hz). Enquanto no ensaio de indução magnética, foi verificado a influência de dois valores máximos de indução, 0,2 e 0,1 Tesla, aos quais são submetidas as barras estáticas, [15]. Além disto, o estado não energizado ( $I=0$  e  $B=0$ ), também foi avaliado nas mesmas condições da montagem do ensaio energizado (corpos de prova e equipamentos), de tal forma a ter-se uma referência de comparação isenta de possíveis efeitos de forma.

Para a quantificação da taxa de corrosão experimentada pelos corpos gravimétrico, baseado na norma ASTM G-31 "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", [17]

Neste item do trabalho, apresenta-se a especificação para execução do

ensaio de corrosão energizado, caracterizando os corpos de prova, a aparelhagem experimental utilizada, bem como os procedimentos de preparação dos corpos de prova. Detalha-se ainda, os procedimentos de preparação, energização, execução e finalização do ensaio.

### 3.2.1 Corpos de prova

Foram ensaiados corpos de prova de cobre retirados de duas fontes distintas, as quais são: fio de cobre de cabo elétrico, para o ensaio de passagem de corrente, e condutores maciços de uma barra estatória nova de hidrogenadores, para o ensaio de indução magnética.

Com o objetivo de usar valores de corrente elétrica controláveis (baixas)

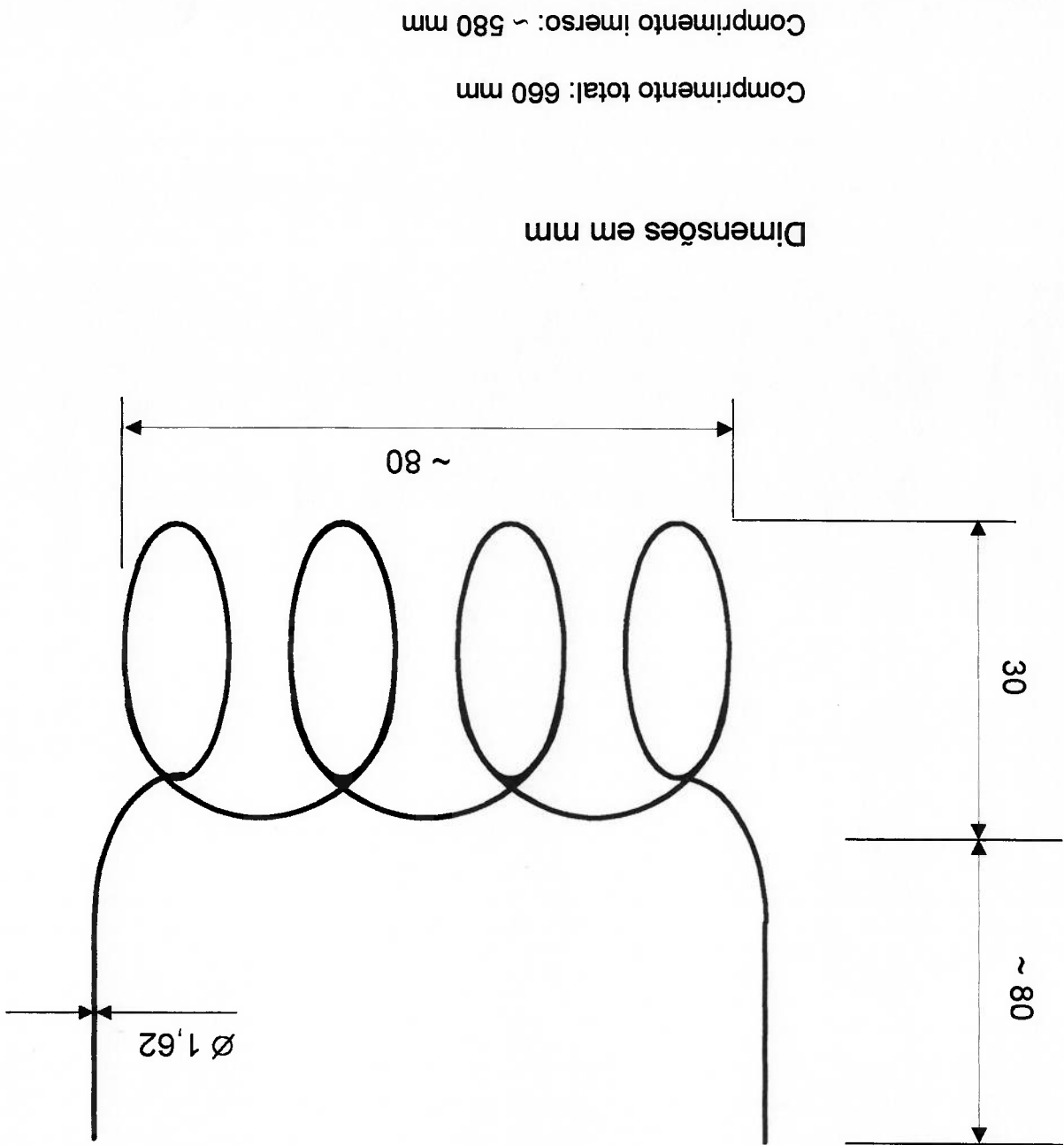
e sabendo que a simulação é fiel enquanto se mantiver a densidade de corrente, empregou-se para o ensaio de passagem de corrente um fio de cobre como corpo de prova. Seguindo as diretrizes da Norma ASTM G-31, [17], a área exposta ao meio deve ser igual a 2.950 mm<sup>2</sup>, e adotou-se uma área transversal de 2 mm<sup>2</sup> para limitar a ordem de grandeza da corrente. A Figura 3.3 mostra a forma e dimensões. A composição química deste material conforme a norma NBR 6187 é:

Cu = 99,9 % min.	As = 0,0005 % max.	Ag = 0,0025 % max.
Se = 0,0004 % max.	Sm = 0,001 % max.	O <sub>2</sub> = 0,045 % max.
Te = 0,0002 % max.	Pb = 0,0008 % max.	Sb = 0,0005 % max.
Bi = 0,0002 % max.	Ni = 0,001 % max.	S = 0,0025 % max.

No ensaio para avaliar a influência da indução magnética, empregou-se um corpo de prova de chapa de cobre como ilustrado na Figura 3.4. As dimensões menores especificadas correspondem à necessidade de inserir o corpo num entreferro de bobina muito estreito, de forma que a indução nele não sofra uma queda significativa. Os corpos de prova foram retirados de condutores de cobre maciços (DIN 1787 SE-Cu-F20) de uma barra estatórica nova para hidrogenadores, adotando-se a largura própria do condutor 12 mm, espessura 2 mm e comprimento 30 mm. O processo de obtenção dos corpos de prova envolvem a remoção de um segmento de barra estatórica, empregando-se uma serra manual. Posteriormente, removeu-se o isolamento do segmento de barra e separaram-se os diversos condutores ocios e maciços, que compunham este segmento. Os condutores maciços foram cortados ao longo de seu comprimento com o auxílio de uma guilhotina hidráulica. Cabe ressaltar que as dimensões especificadas para estes corpos de prova, retirados das barras estatóricas, não possuem a área superficial exposta à água pura segundo especificado na norma ASTM G-31 (2950 mm<sup>2</sup>), devido às limitações geométricas necessárias do aparelho de ensaio, e considerando que a norma não prevê as condições especiais de um ensaio energizado deste tipo. No entanto, este fato não compromete a validade do ensaio que tem este objetivo. Além disto, a quantidade de água pura em relação a área de cobre exposta é grande, conforme a norma busca garantir.

Deve-se destacar 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. Tais procedimentos são descritos mais

FIGURA 3.3 - Corpo de prova para o ensaio de passagem de corrente elétrica.



Dimensões em mm

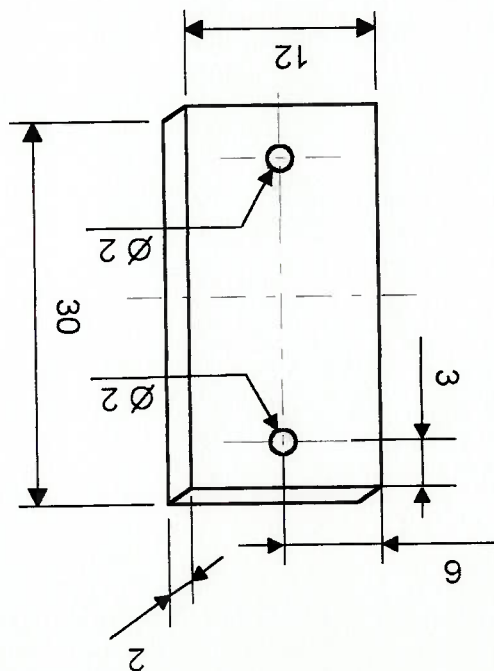
Comprimento total: 660 mm

Comprimento imerso:  $\sim 580$  mm

adiante.

FIGURA 3.4 - Corpo de prova para o ensaio de Indução Magnética.

Dimensões em mm



### 3.2.2 Aparelhagem Experimental

O ensaio de corrosão energizado foi realizado por imersão e energização do corpo de prova em um recipiente estéril de vidro (cuba), que contém água pura com características bem determinadas. Então, pode-se identificar dois sub-sistemas, um deles formado pela aparelhagem básica, ou seja, a cuba e seus acessórios, e outro, correspondente ao equipamento elétrico e magnético. Além disto, descreve-se na continuação os equipamentos de apoio e medição.

#### 3.2.2.1 Aparelhagem básica

A aparelhagem básica constitui um recipiente de vidro (cuba), com formato estéril e uma tampa especial, que garantiu a estanqueidade do sistema, dentro do qual foi imerso o corpo de prova de cobre. No interior do recipiente foi armazenado um volume de  $2500 \pm 25$  ml de água pura, com condições pré-definidas de pH, teor de  $O_2$  e condutividade, sendo injetado nitrogênio no interior da cuba, a uma pressão de aproximadamente 100 mbar, formando uma atmosfera protetora, que evitou a eventual contaminação do interior da cuba com ar atmosférico.

A cuba de vidro foi colocada no interior de uma manta térmica, a qual foi empregada para aquecer a água pura, mantendo-a sob níveis de temperatura pré-fixados durante a execução dos ensaios. O arranjo da cuba de ensaio é mostrado esquematicamente Figura 3.5.

iv) Dois outros orifícios foram usados para entrada e saída de fios de

evaporação;

!!!) Em um orifício foi instalado um condensador de bolas, que condensa a água que evapora do sistema, evitando assim, perdas por

empregado na monitoração da temperatura da água pura:  
mercurio, com escala de 0°C a 100°C, e precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , o qual foi  
ii) Um orifício foi utilizado para instalação de um termômetro de

mergulhada na água pura contida no recipiente;  
cuba. Uma das hastes é longa o suficiente para poder ser superior, as quais controlam a vazão de nitrogênio para o interior da instalados duas hastes de vidro, com torneiras na sua extremidade da cuba, e para controle da pressão interna. Nestes orifícios foram  
i) Dois orifícios foram empregados para injeção de nitrogênio no interior

especificado. Os orifícios periféricos foram utilizados da seguintes forma:  
foi utilizado para o ajuste do pH da água pura a um valor previamente corpos de prova no interior da cuba e para a injeção de gotas de NaOH, que fechado durante a execução dos ensaios, foi utilizado para colocação dos do orifício central, com diâmetro de 10 mm. O orifício central, que permaneceu diâmetro nominal de 40 mm, e seis orifícios periféricos, localizados em torno A tampa da cuba possui sete orifícios, sendo um orifício central, com



Pureza: N50 Emissão

Especificação:  $O_2 < 1$  ppm de contaminantes

THC  $> 0,5$  ppm

NOx  $> 0,1$  ppm

CO + CO<sub>2</sub>  $> 1$ ppm

pura, apresentando a seguinte especificação :

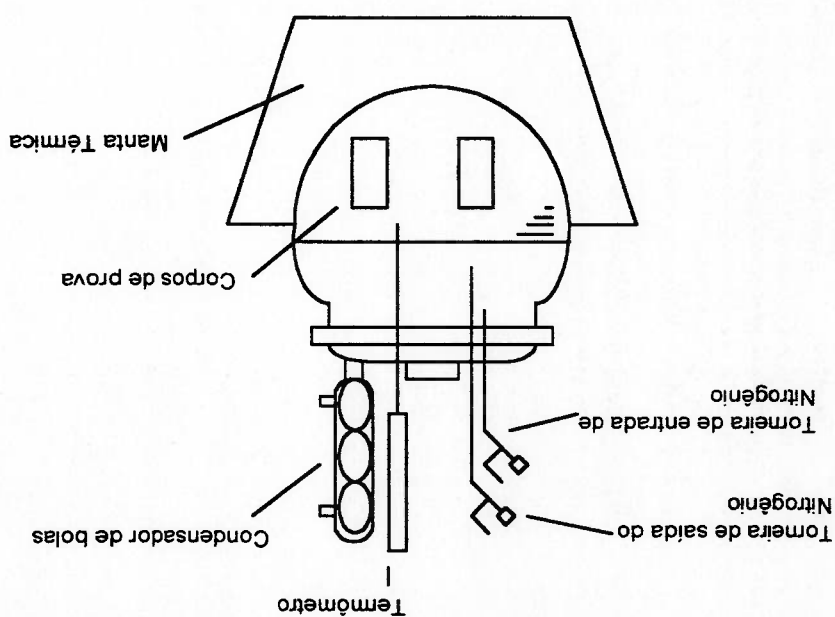
O nitrogênio empregado ao longo dos ensaios é de característica ultra manômetro.

haste mais longa e pela mangueira de silicone, atingindo o interior do Hg, dada a sua ligação com o recipiente, através da circulação de N<sub>2</sub> pela interior da cuba. A pressão interna foi, então, monitorada pelo manômetro de linha de nitrogênio do laboratório, que permitiu o acesso do nitrogênio ao ensaio. Já a haste mais curta, também inserida no recipiente, foi conectada à uma mangueira de silicone, à haste mais longa inserida no recipiente de extremidade superior. A outra extremidade do tubo foi acoplada, através de utilizou-se um manômetro de mercúrio, formado por um tubo em U aberto na pela atmosfera de nitrogênio, foi cuidadosamente controlada. Para tanto, Por questões de segurança, a pressão interna nos recipientes, gerada alimentação de corrente elétrica, devidamente selados.

Como esquematizado na Figura 3.6, a fonte de corrente elétrica alternada necessária é fornecida pela rede elétrica de baixa tensão existente no laboratório. No ensaio de passagem de corrente elétrica pelo corpo de prova, foi utilizado um autotransformador de potencial variável com capacidade de fornecer uma faixa de tensão entre 0 V e 140 V. Este alimenta um transformador de corrente de janela (TC) utilizado para manter a corrente aos níveis especificados, sendo eles de diferentes relações de transformação (50/1, 60/1, 80/1 e 100/1) e com capacidades em torno de 600 VA. O secundário do TC é o cabo de alimentação que forma uma espira em sua janela conjuntamente com o corpo de prova. A corrente no circuito é ajustada

### 3.2.2 Aparelhagem elétrica e magnética

FIGURA 3.5 - Aparelhagem experimental básica.



com auxílio de um amperímetro. A conexão elétrica do corpo de prova ao cabo de alimentação é com parafusos no interior da cuba. Na Figura 3.7 apresenta-se uma foto do conjunto em operação.

Já para o ensaio de verificação da influência da indução magnética, utilizou-se um circuito conforme mostrado na Figura 3.8, formado por um transformador de potencial variável e uma bobina com núcleo de ferro, submersa na água, que gera o fluxo magnético. O corpo de prova é colocado no entreferro de tal forma a ser submetido a todo o fluxo gerado, e com suas superfícies superior e inferior expostas à água por meio da utilização de suportes de teflón preparados especialmente para o caso. O detalhe da janela (entreferro) com o corpo de prova está esquematizado na Figura 3.9, enquanto as Figuras 3.10 e 3.11 mostram o desenho de fabricação da bobina com núcleo de ferro e o conjunto terminado, respectivamente.

A bobina foi totalmente revestida com um composto de estrutura vítrea mais silicato e adesivo (catalisador), para torná-la impermeável e não influir no sistema água/cobre, conforme mostrado na Figura 3.12.

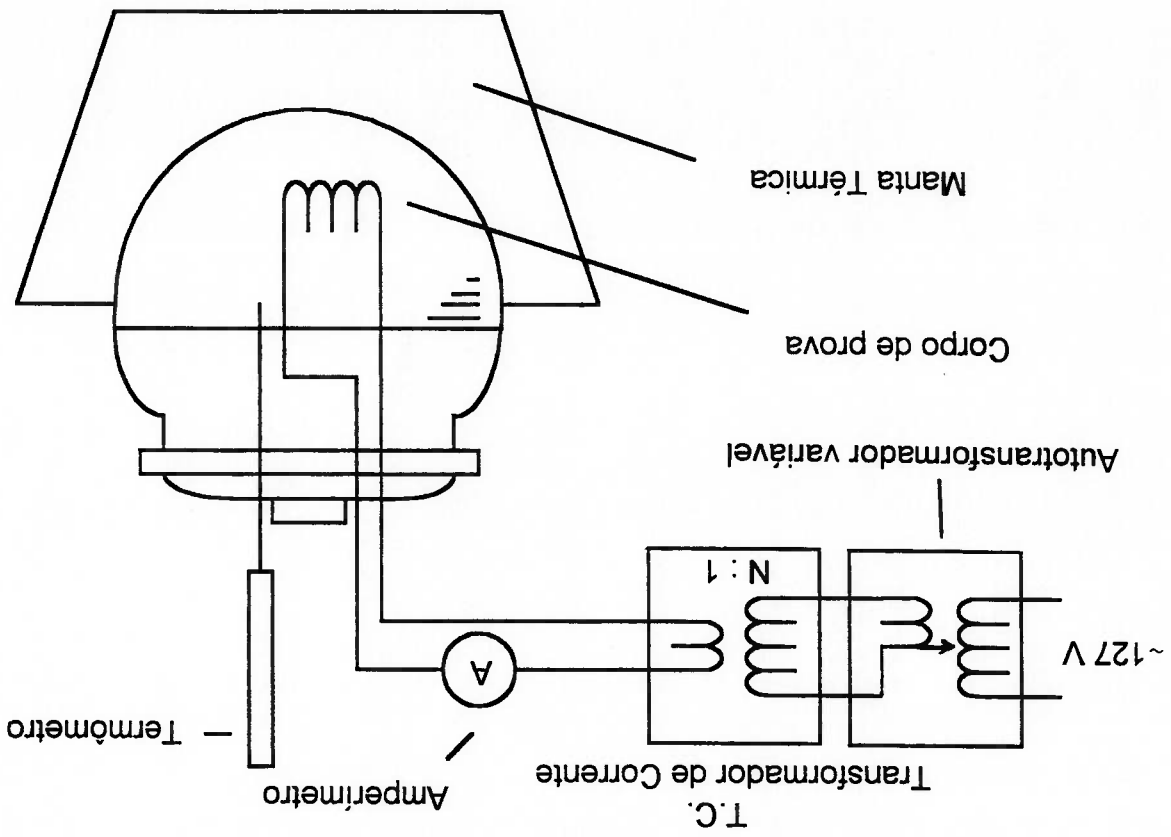


FIGURA 3.6 - Arranjo experimental do ensaio de passagem de corrente elétrica.

FIGURA 3.7 - Ensaio de Passagem de Corrente Elétrica. Conjunto em operação.



FIGURA 3.8 - Arranjo experimental do ensaio de Indução Magnética.

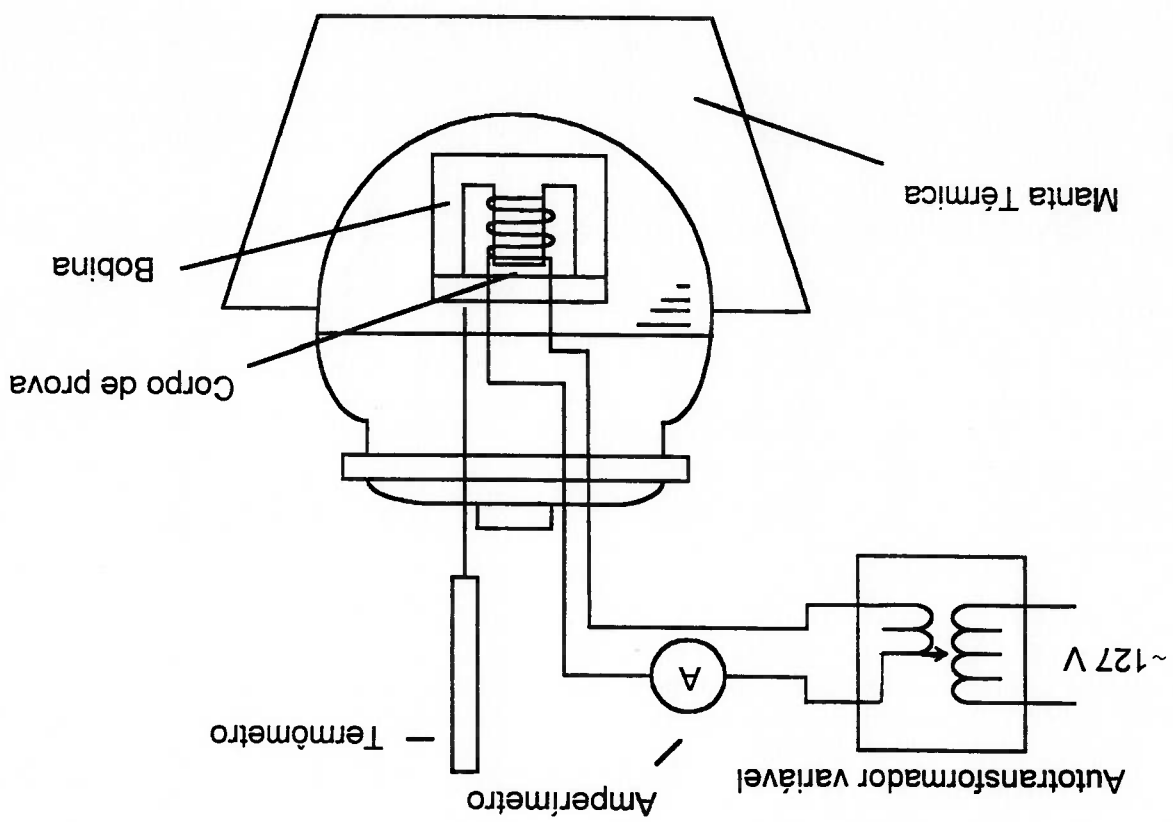


FIGURA 3.9 - Bobina. Detalhe do entreferro com o corpo de prova.

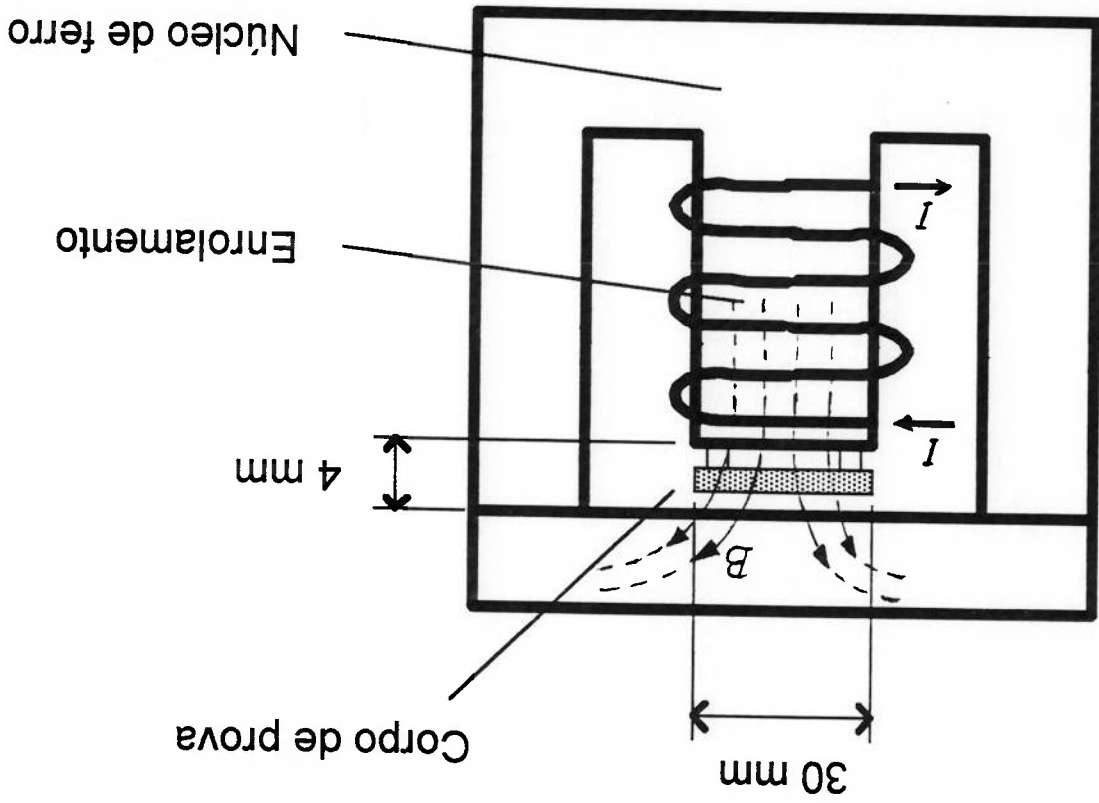


FIGURA 3.10 - Bobina. Desenho de fabricação do Núcleo de Ferro.

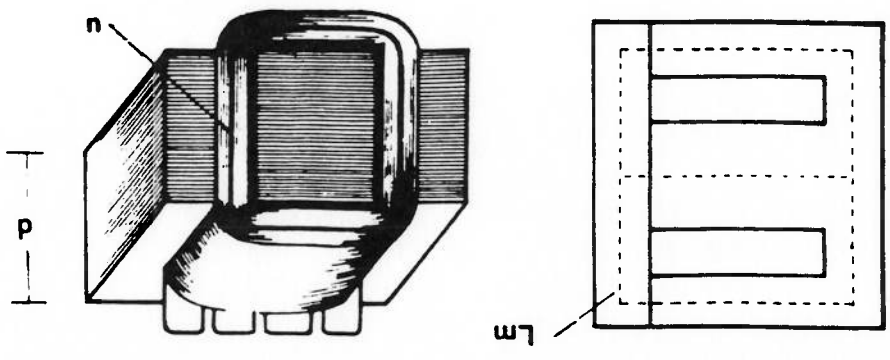
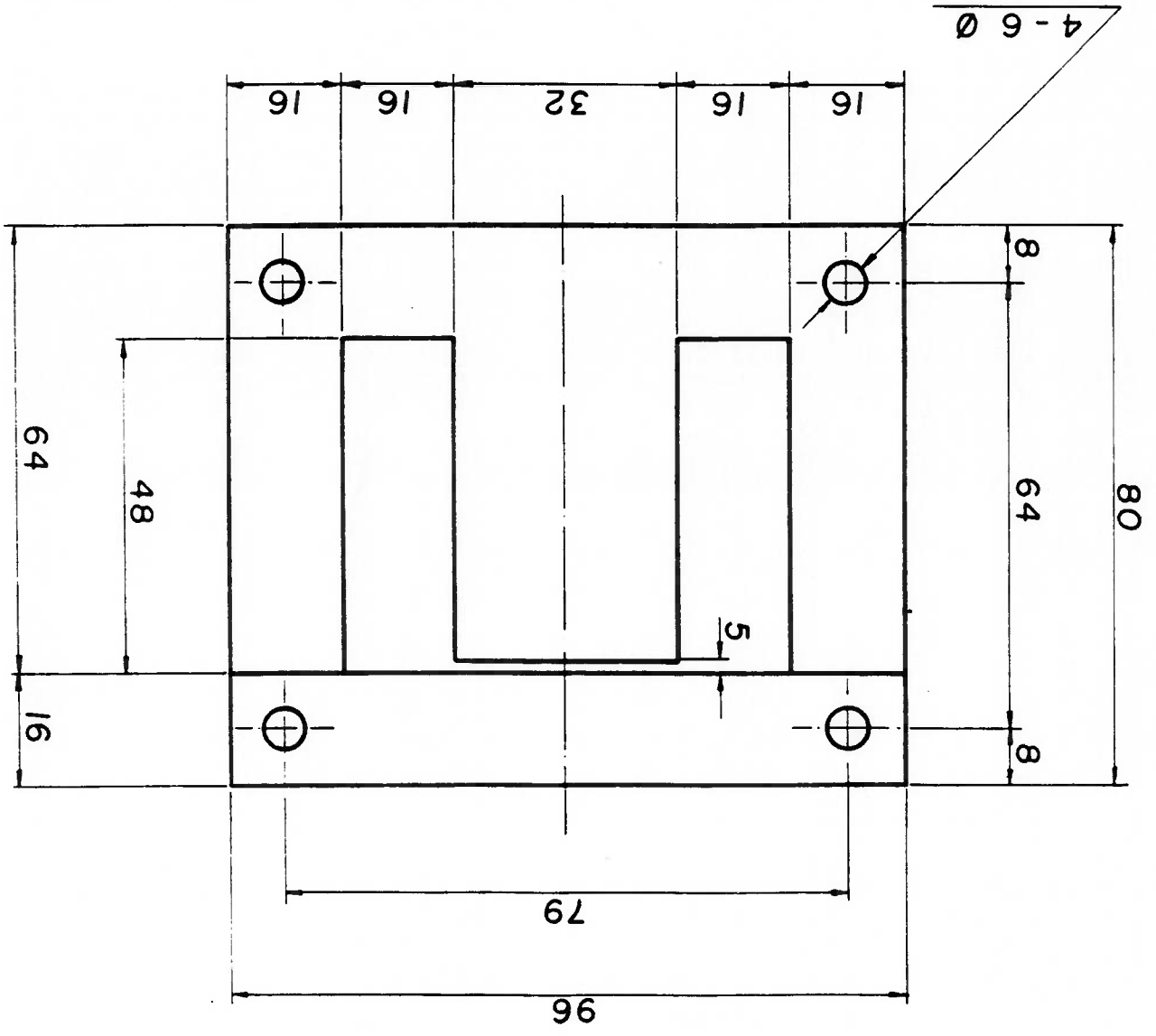




FIGURA 3.11 - Bobina com núcleo de ferro.

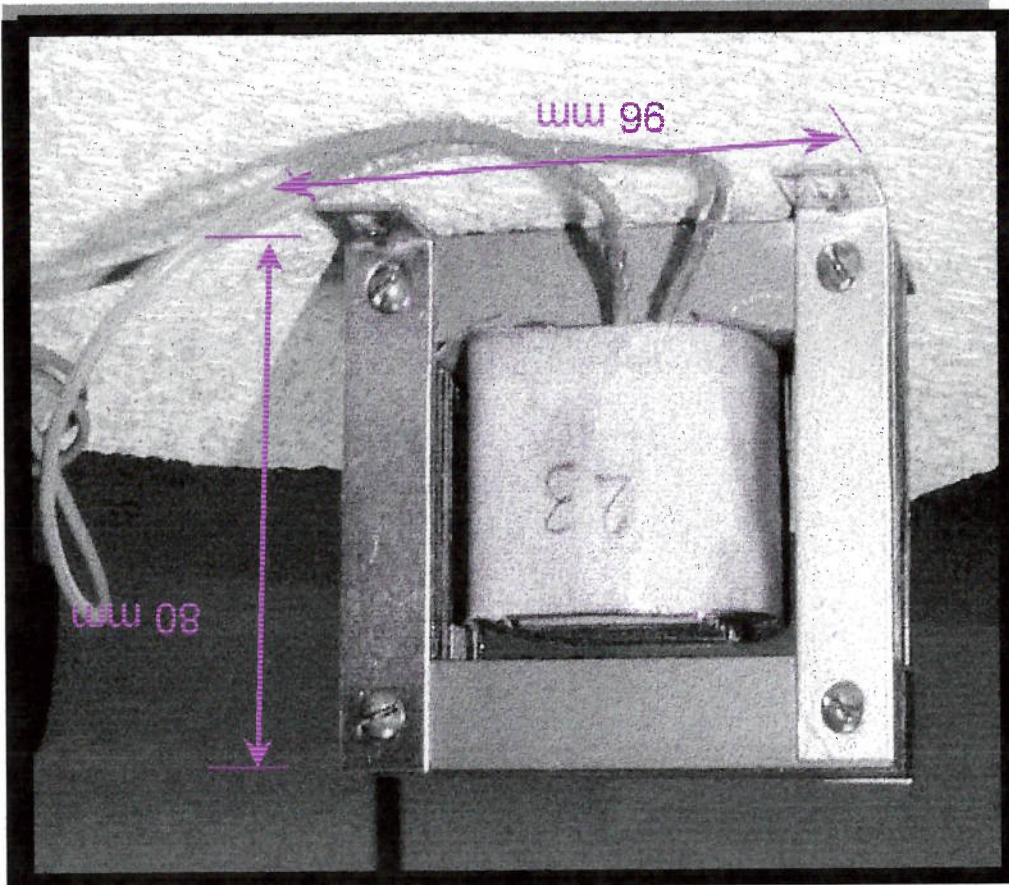


FIGURA 3.12 - Bobina revestida com composto vítreo impermeável.



### 3.2.2.3 Equipamentos de apoio e medição

Os instrumentos empregados para medição, os equipamentos de apoio e os materiais usados tem sua especificação apresentada a seguir:

i) **Medidor de Condutividade:** equipamento ORION Modelo 160,

[18], empregado para registro da condutividade da água pura. Este é constituído por um eletrodo e por um registrador/microprocessador. O eletrodo para registro da condutividade é mergulhado na água pura no interior do recipiente destinado à tomada de medida. A especificação básica do equipamento é a seguinte:

\* temperatura de operação: 0 a 90°C;

\* faixa de medição de condutividade: 0 a 2 S/cm, em seis

escalas;

\* resolução: 0,01 µS/cm;

\* compensação automática de temperatura;

\* sensor de condutividade, também registra temperatura do fluido;

\* calibração por fluidos padrão.

ii)

**Medidor de pH:** equipamento ORION Modelo 290A, [19], 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 padrão (pH 1,68; 4,01; 7,00; 10,01;

12,46);

!!!!

**Medidor de Concentração de Oxigênio:** equipamento

ORBISPHERE Modelo 26060, [20], 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 cuba flui com uma vazão entre 70 e 200 ml/min. A

especificação básica do equipamento é a seguinte:

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

\* temperatura de operação, com compensação automática: 0°C a 80°C

(acima de 80°C podem ocorrer desvios de compensação);

Além dos equipamentos já mencionados, que tem vinculação direta com a execução e monitoração dos ensaios, existem alguns equipamentos que foram empregados na preparação e avaliação destes ensaios, tais como Sistema de Produção de Água Pura, Dessorador de Corpos de Prova, Balança Analítica e Poltriz, sendo a especificação dos mesmos apresentadas abaixo:

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

i) Sistema de Produção de Água Pura: este sistema foi

empregado na produção da água deionizada utilizada nos ensaios de corrosão. O sistema é constituído por dois equipamentos básicos, os quais são: destilador e equipamento de troca iónica (desionizador).

O destilador, ligado a um filtro, produz uma água livre de elementos contaminantes. Esta água ainda apresenta condutividade elevada, superior a 20  $\mu\text{S/cm}$ , para poder ser caracterizada como água pura. A retirada de ions, com a finalidade de redução de condutividade, é executada com o auxílio de um equipamento de troca iónica, constituído por módulos de purificação que contêm carvão ativo para remoção de compostos orgânicos dissolvidos e resinas de troca iónica.

Segue-se a especificação básica destes sistemas:

- a) 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.

- b) Sistema de Troca Iônica ELGA Elgastat UHQ-PS
- Condutividade da água deionizada igual ou inferior a 0,5 µS/cm.
  - Reduzida pressão de entrada.
  - Capacidade: 3,3 litros/hora.
  - Cartuchos de troca iônica de fácil troca.
  - Recirculação da água tratada, para manutenção da sua qualidade.

A qualidade da água pura obtida é a seguinte:

- \* Resistividade 18,2 MΩ-cm a 25 °C
- \* Silicatos < 0,1 ppb
- \* Metais pesados < 0,1 ppb
- \* Microorganismos < 1 cfu/ml
- \* Partículas filtradas (0,22µm) < 1/ml

ii)

**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 houve 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.

iii)

**Balança Analítica:** o equipamento utilizado na medição da massa dos corpos de prova foi a balança analítica 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: 0 a 210 g.

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

52 g até 210 g ... 0,1 mg

\* auto-calibração.

\* compensação automática de vibrações.

Além dos equipamentos mencionados, foram empregados materiais básicos para um laboratório de química, tais como vidraria em geral (beckers, 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: hidróxido de sódio p.a. em lentilhas (para preparar uma solução de NaOH 0,1 M com o intuito de regular o pH da água pura), sabão neutro (para lavagem dos balões e vidraria dos ensaios), 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 ensaio de imersão. O aparelho utilizado foi uma poltriz metalográfica STRUERS DPU-10.

### 3.2.3 Procedimentos de Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova, quer sejam de fio de cobre ou retirados de condutores maciços, a serem ensaiados, são submetidos a um procedimento de limpeza superficial, antes de serem inseridos no interior do recipiente de ensaio. Este procedimento é executado com o objetivo de remover as impurezas da superfície, as quais poderiam influenciar no processo de corrosão do cobre, alterando os resultados experimentais.



O procedimento de limpeza abaixo descrito, foi desenvolvido em conformidade com as exigências da norma ASTM G1-81, "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", [21]. Cabe ressaltar, que os dois tipos de corpos de prova, fio e chapa de cobre, foram preparados de forma diferente devido a suas características próprias, mas respeitando a norma mencionada acima.

Para o fio de cobre do ensaio de passagem de corrente elétrica, a sequência de preparação e limpeza é a seguinte:

i) Cortar o fio no comprimento de 660 mm.

ii) Tirar o revestimento plástico.

iii) Marcar comprimentos de 80 mm a partir de cada extremidade, com fita de teflón.

iv) Enrolar o fio em forma de espiral sobre um cilindro ( $\varnothing \sim 30$  mm), deixando os extremos retos (80 mm).

vi) Tirar as marcas de fita de teflón.

vii) Limpeza química:

1- Imergir o corpo de prova em solução de ácido clorídrico de acordo com as seguintes condições:

a) 500 ml de ácido clorídrico p.a (HCl, puro específico 1,19);

b) 1000 ml de água destilada ou deionizada;

c) temperatura ambiente;

d) 1 minuto de imersão.

2- Lavar o corpo de prova com água destilada e deionizada e em seguida com álcool etílico.

3- Secar o corpo de prova com lenços de papel.

4- Manter o corpo de prova em dessecador por 1 hora.

viii) Pesagem e registro das dimensões do corpo de prova.

No que diz respeito ao corpo de prova de chapa de condutor maciço, para o ensaio de magnetização, a sequência de limpeza adotada é a seguinte:

i) Lixar o corpo de prova com lixa de água, empregando,

seqüencialmente, lixas com granulometria 180, 220, 400 e 600. Este

lixamento é executado com o auxílio da polítriz STRUERS, modelo

DPU -10. Deve-se ressaltar que todas as faces do corpo de prova

são cuidadosamente lixadas, evitando a formação de sulcos

superficiais, que poderiam afetar o fenômeno de corrosão.

ii) Lavar o corpo de prova com água destilada e deionizada.

iii) Lavar o corpo de prova com álcool etílico absoluto p.a. (para análise).

iv) Secar cuidadosamente o corpo de prova, empregando lenços de papel.

v) Repetir a operação de lavagem do corpo de prova com água destilada e deionizada.

vi) Secar o corpo de prova, utilizando lenços de papel.

vii) Manter o corpo de prova armazenados no interior do secador até o início do ensaio, sendo que esse período de armazenamento deve ser superior a 1 hora.

viii) Pesagem e registro das dimensões do corpo de prova.

### **3.2.4 Procedimento de Preparação do Ensaio**

A preparação dos ensaios exige a execução de uma série de atividades, tais como lavagem da aparelhagem experimental, preparação da água pura, manipulação das cubas e do sistema de gás, e montagem dos aparelhos elétricos; as quais devem ser realizadas numa certa sequência e conforme procedimentos preestabelecidos.

#### **3.2.4.1 Procedimento de preparação da água para ensaio**

I. Lavar o conjunto de vidraria a ser utilizado na montagem do ensaio, composto por cuba, tampa, termômetro, condensador de bolas e hastes com torneiras. A lavagem deve ser executada com água corrente e sabão neutro, sendo que é feito um primeiro enxágue com água corrente. Posteriormente são feitos mais três enxágues das peças, porém empregando-se água destilada e deionizada, a fim de remover impurezas que foram introduzidas pelo enxágue com água corrente.

II. A secagem das peças é feita em ar atmosférico, com a vidraria apoiada sobre uma mesa, forrada com papel toalha.

III. Montar o conjunto recipiente esférico + tampa + manta térmica. Todos os equipamentos que são montados na tampa já devem estar instalados nessa

fase de preparação do ensaio.

IV. Pesar o conjunto recipiente estéril + tampa + manta térmica em uma balança digital, com capacidade para 10 kg de carga. Anotar o valor.

V. Ligar uma mangueira de silicone na haste mais longa da cuba fazendo a ligação entre a rede N<sub>2</sub> e o recipiente de ensaio. Circular o nitrogênio no interior da cuba. Zerar a balança digital com o conjunto recipiente + tampa + manta posicionado sobre a mesma. Mantendo o nitrogênio circulando, adicionar água destilada e deionizada, recém produzida, através do orifício central da tampa. A adição é realizada até a balança marcar 3100 g, correspondendo a 3100 ml de água.

VI. Fechar o orifício central com a tampa apropriada. Fechar a torneira da haste que controla a entrada de nitrogênio, mantendo o sistema estanque. Desconectar a mangueira de silicone da haste.

VII. Utilizando-se a manta térmica como fonte de calor, a água pura armazenada no interior da cuba é aquecida até que seja atingida a temperatura de ebulição. Este procedimento de ferver a água tem como objetivo remover o oxigênio dissolvido na água pura. Dependendo do tempo em que a água pura permanece sob a temperatura de ebulição, haverá uma variação na quantidade de oxigênio removida, havendo uma maior redução no teor de O<sub>2</sub> quanto maior for esse tempo. Normalmente,

deve-se manter a água à temperatura de ebulição por 5 minutos e, durante a ebulição o orifício central da cuba deve permanecer aberto.

VIII. Após a água ser fervida, desliga-se a manta térmica, e o conjunto cuba + manta deve ser posicionado sobre a balança digital, já de forma a obter-se o peso, e consequentemente, o volume de água pura que se encontra no interior da cuba após a operação de aquecimento.

IX. Na sequência, a cuba é retirada da manta de aquecimento e transferida para uma outra manta na bancada de ensaios. O orifício central deve ser fechado, com o auxílio da tampa apropriada para esta função.

X. Conectar a extremidade de uma mangueira de silicone à haste mais curta da cuba e a outra extremidade da mesma à linha de nitrogênio. Utilizar uma outra mangueira de silicone para conectar a haste longa da cuba ao manômetro de mercúrio. Abrir a torneira da haste menor, aumentado a pressão de nitrogênio no interior cuba, até o valor de 100 mbar. Ligar a manta térmica com o nível de aquecimento adequado correspondente a uma dada temperatura desejada para a água pura.

XI. Aguardar a água pura atingir a temperatura especificada para o ensaio.

XII. Aumentar a vazão de nitrogênio no interior da cuba, e abrir a tampa do orifício central, permitindo a circulação de nitrogênio no interior da cuba.

XIII. Com o auxílio de uma bureta graduada de 50 ml, adicionar NaOH à água pura, através do orifício central da cuba. O NaOH é adicionado gota a gota, sendo que o número de gotas adicionado é função do pH desejado para a água pura. Normalmente, é adicionado 10 a 12 gotas de NaOH para atingir um pH entre 8,0 e 8,5.

### 3.2.4.2 Procedimento de montagem dos aparelhos elétricos

Para o ensaio de passagem de corrente elétrica tem-se a seguintes

etapas de montagem:

- i) O cabo de saída (0,5 mm<sup>2</sup>) do autotransformador de potencial variável conecta-se aos terminais de entrada (primário) do transformador de corrente (TC).

- ii) A saída do TC (secundário) é uma espira na janela que constitui o cabo de alimentação de corrente (4 mm<sup>2</sup>) ao corpo.

- iii) O cabo de alimentação é fixado na tampa da cuba, portando o TC, por meio de duas tampas plásticas pequenas e furadas, mas vedadas, para acessar ao interior da cuba. O comprimento do cabo dentro da cuba (150 mm.) é tal que o corpo fique submerso, deixando 40 mm de seus terminais fora da superfície da água.

i) Coloca-se o corpo de prova através da boca do balão tirando a tampa. Ao mesmo tempo deve-se aumentar a vazão de N<sub>2</sub>. Para o fio de cobre, ele deve ser parafusado firmemente ao cabo de alimentação. No ensaio de indução magnética, o corpo de prova possui dois furos de 2 mm de diâmetro, para inserção dos suportes que permitem às superfícies estarem totalmente em contato com a água. O corpo é inserido no entreferro da bobina fora da cuba, cuidando de colocar perfeitamente no centro para que seja atingido completamente pelo campo magnético. Após, com muito cuidado, o

se de acordo a seguinte sequência de atividades:

Com a água pronta nas cubas e com atmosfera de nitrogênio, procede-

### 3.2.5 Procedimento de Início de Ensaio

iv) A conexão do cabo de alimentação ao corpo de prova deve ser feito com terminais aparafusados no interior da cuba. No ensaio de indução magnética, a montagem é bem mais simples, pois o secundário do autotransformador variável conecta-se diretamente aos terminais da bobina; os quais saem ao exterior da cuba através das mesmas tampas plásticas furadas.



conjunto bobina/corpo de prova é colocado no interior da cuba,

apoiando-a no fundo e em posição vertical.

ii) Fechar a cuba e assegurar as vedações. Reduzir a vazão de nitrogênio. Fechar a torneira da haste longa bloqueando a passagem de nitrogênio para o manômetro. Desconectar a mangueira de silicone do manômetro.

iii) Imergir a haste longa na água pura e, após esta operação, conectar a mangueira de silicone entre a haste longa e a câmara de entrada do medidor de concentração de oxigênio.

iv) Medir a concentração de oxigênio, no início do ensaio, utilizando-se o equipamento Orbisphere 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 10 ml, onde a água a ser retirada da cuba será coletada;

b) Abrir a torneira da haste longa permitindo a circulação de água, através da haste, para a câmara de fluxo do medidor de oxigênio;

c) Regula-se a vazão de água na câmara de fluxo do medidor de oxigênio, de forma a obter-se uma vazão na faixa de 120 ml/min a 180 ml/min. A vazão é

controlada através da verificação do volume de fluido coletado na proveta

graduada em um intervalo de tempo conhecido;

d) Quando a vazão estiver estabilizada, executa-se o registro da concentração de oxigênio na água pura;

e) Manter a vazão de água pura até a completa retirada do excesso de fluido do interior da cuba, reduzindo a quantidade de água pura no interior desta, até ser atingido o volume de 2500 ml, valor este previsto para a execução do ensaio. O volume retirado vai sendo medido na proveta onde a água está sendo coletada;

f) Fechar a torneira da haste longa, impedindo o fluxo de água pura;

v) Desconectar a mangueira de silicone da entrada da câmara de fluxo do medidor de oxigênio e conectá-la ao manômetro de mercúrio.

vi) Levantar a haste longa, de forma a removê-la do interior da água pura.

Abrir a torneira da haste longa permitindo a passagem de nitrogênio

para o manômetro de mercúrio. Deixar o ensaio continuar pelo período

de tempo de 7 dias, conforme especificado na norma ASTM G31-85 -

"Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of

Metals", [17].

Utilizando-se a água descartada pela saída da câmara de fluxo, coleta-

se 80 ml desta água em um becker de vidro, a qual representa uma amostra de água pura, contida no interior da cuba, onde será imerso o eletrodo do condutivímetro, para o registro da condutividade da água pura, no início do ensaio.

Utilizando-se também a água descartada pela saída da câmara de fluxo, coleta-se 100 ml desta água em um becker de plástico, onde será imerso o eletrodo do medidor de pH, para registro do pH da água pura, no início do ensaio. A temperatura da água pura no interior da cuba é obtida com o auxílio do termômetro instalado na tampa do recipiente de vidro, sendo a mesma monitorada continuamente ao longo do ensaio.

Finalmente, registram-se os valores medidos na planilha de acompanhamento de ensaio.

### 3.2.6 Procedimento de Energização e Execução de Ensaio

Logo após a colocação do corpo de prova e a medição das características da água, procede-se à energização do corpo, o qual marca o início do ensaio propriamente dito.

O procedimento de ajuste dos aparelhos elétricos abrange os passos detalhados a seguir para cada tipo de ensaio.

### **3.2.6.1 Ensaio de passagem de corrente elétrica**

- i) Manter o autotransformador variável (Variac) desligado da rede e ajustado a tensão de saída zero. Para aumentar a tensão de saída o sentido de giro do controlador é horário.

- ii) Verificar a verticalidade dos cabos dentro da cuba.

- iii) Ligar o Variac à rede e ajustar a tensão de saída entre 0 e 10% da escala (não mais), medindo simultaneamente a corrente no primário do transformador de corrente a qual deve atingir no máximo 1,7 Ampères para não ultrapassar a capacidade do Variac. Utilizar o amperímetro alicate.

- iv) Ajustar a corrente no secundário do transformador de corrente (cabo de alimentação) ao valor especificado para o ensaio, e voltar a verificar a corrente no primário.

### **3.2.6.2 Ensaio de indução magnética**

- i) Manter o autotransformador variável (Variac) desligado da rede e ajustado a tensão de saída zero. O sentido de giro do controlador é horário para aumentar o potencial de saída.

!!) Realizar a conexão da saída do Variac (secundário) aos cabos terminais do enrolamento da bobina.

!!!) Ligar o Variac à rede e ajustar a tensão de saída, aproximadamente, ao 70% da escala.

iv) Ajustar a corrente na bobina ao valor especificado para o ensaio, ou seja, 0,9 Ampères para se obter 0,2 Tesla de indução magnética no entreferro. Considerando que a variação do fluxo com a corrente é linear para esses níveis de fluxo magnético, obtém-se 0,1 Tesla aplicando uma corrente de 0,45 A. O ajuste de corrente é feito com o amperímetro alicate.

Durante a execução dos ensaios, monitoram-se a temperatura da água e a pressão de N<sub>2</sub>, a fim de garantir uma sobrepressão nas cubas ao longo de todo ensaio. A temperatura é controlada através de um termômetro de mercúrio, cujo valor é registrado em uma planilha de acompanhamento de ensaio. Após o final do ensaio, calcula-se a temperatura média através da ponderação dos valores registrados ao longo do tempo.

### 3.2.7 Procedimento de Finalização de Ensaio

Ao final do ensaio, após 7 dias, realizam-se novamente as medições de concentração de O<sub>2</sub> e pH, antes de retirar os corpos de prova da cuba. Os procedimentos de manipulação de acessórios e instrumentos de medição são os mesmos descritos anteriormente.

Após efetuadas as leituras, tira-se o corpo de prova da cuba e executa-se a seguinte sequência de atividades para os dois tipos de ensaio:

i) Secar o corpo com lenço de papel.

ii) Para o ensaio de corrente elétrica, cortar com alicate os dois terminais do corpo (parte reta) nas marcas feitas pela corrosão, que distingue a parte submersa (escura) da parte fora da água (clara).

iii) Retirar a camada superficial oxidada através de uma limpeza química

da seguinte forma:

1. Imergir o corpo de prova em solução de ácido clorídrico de acordo

com as seguintes condições:

a) 500 ml de ácido clorídrico p.a. (HCl, puro específico 1,19).

b) 1000 ml de água deionizada ou destilada.

c) temperatura ambiente.

d) 2 minutos de tempo de imersão.

2. Lavar o corpo de prova com água destilada e deionizada e em seguida com álcool etílico p.a.

3. Secar o corpo de prova com lenços de papel.

4. Manter o corpo de prova em dessecador pelo menos 1 h.

Esse procedimento de limpeza está de acordo com a norma ASTM G1-81 "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion" [21].

iv) Pesagem do corpo de prova para o cálculo da perda de massa.

No caso do ensaio de corrente elétrica, a pesagem é feita da seguinte

forma:

i) Pesar as três partes, parte corroída e dois terminais em uma única pesagem. Isto tem como objetivo determinar a perda de massa devido à corrosão, calculando a diferença entre a pesagem antes do início do ensaio e esse último valor após a limpeza química.

ii) Pesagem da parte corroída apenas, para calcular exatamente a área exposta à água através do emprego da massa específica do cobre.

O cálculo da taxa de corrosão é feita segundo a expressão retirada da norma ASTM G-31 "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", [16]:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{k \cdot W}{A \cdot t} \text{ (mg/cm}^2 \cdot \text{ano)} \quad (3.11)$$

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

$W$  = perda de massa em g (precisão: 1 mg)

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

$t$  = tempo de ensaio em h (precisão: 0,01 h)



#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Visando obter uma ampla variedade de resultados que esclareçam o fenômeno de corrosão do cobre em água pura, em função da aplicação de variáveis energéticas, foram realizados uma grande quantidade de ensaios. Para as variáveis do ensaio, corrente elétrica e indução magnética, e as características da água pura, adotaram-se diferentes valores, fixos ou em faixas pré-determinadas, conforme mostrado a seguir:

##### i) Temperatura:

a) Ensaio de passagem de corrente elétrica: 35 °C (±2 °C);

45 °C (±2 °C); 55 °C (±2 °C); 65 °C (±2 °C); 75 °C (±2 °C).

b) Ensaio de indução magnética: 35 °C (±2 °C); 45 °C (±2 °C);

55 °C (±2 °C).

##### iii) pH:

8,0 ≤ pH < 8,5.

Como o objetivo único desta série de ensaios é verificar o efeito da energização, o pH foi fixado nessa faixa de forma a controlar esta variável do ensaio, e sabendo que é uma faixa de pH básico com influência conhecida, [1]. A largura de 0,5 pH foi escolhida em função da precisão do equipamento de medição, bem como da hipótese de que a taxa de corrosão é pouco influenciada por uma variação de pH dentro da ordem de magnitude dessa faixa.

!!!) Concentração de Oxigênio Dissolvido na Água:

a) Ensaio de passagem de corrente elétrica

500 < teor de O<sub>2</sub> ≤ 1.200 ppb

b) Ensaio de indução magnética

1200 < teor de O<sub>2</sub> ≤ 2.000 ppb

Estas faixas foram definidas com o mesmo critério empregado na determinação da faixa de pH, isto é, a verificação do efeito da energização ser o objetivo único destes ensaios. Além disto, estas faixas apresentaram um comportamento mais estável durante o ensaio, embora tenham sido obtidas e analisadas outras faixas.

Como já foi mencionado no Capítulo 4, as correntes elétricas ensaiadas

compreendem 3 valores fixos: I = 4, I = 8 e I = 11 Ampères, os quais para a

área transversal adotada do corpo de prova (2 mm<sup>2</sup>) produzem as densidades

de corrente, J = 2, J = 4 e J = 5,5 A/mm<sup>2</sup>. Além disto, foram feitos ensaios com

corrente nula.

No ensaio de indução magnética, foi verificado a influência de dois

valores máximos de indução, 0,2 e 0,1 Tesla. O estado não energizado (B=0)

também foi avaliado nas mesmas condições.

Dentre os 55 ensaios de passagem de corrente elétrica realizados,

selecionaram-se 45 ensaios considerados válidos, mas alguns destes não

foram usados porque a suas condições estavam fora das faixas em estudo. Já

para o ensaio de indução magnética, de 17 ensaios realizados 12 foram

considerados válidos. Os ensaios eliminados, o foram por um dos motivos

citados a seguir:

i) Descontrole durante o ensaio, com relação à manutenção da atmosfera de nitrogênio dentro da cuba.

ii) Descontrole nos primeiros ensaios, por exemplo, conexões dos corpos não parafusadas que retinham umidade.

iii) Variação entre os valores de pH inicial e final maior que 0,5.

iv) Valores de concentração de oxigênio inicial e final pertencentes a faixas distintas.

v) Erro na pesagem dos corpos de prova devido à vibração natural dos fios quando não fossem bem apoiados.

vi) Valores de oxigênio fora das faixas estudadas.

vii) Perda de água por excesso de pressão de  $N_2$ .

Os ensaios considerados válidos forneceram dados para a construção dos gráficos apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4. Cabe ressaltar, que os dados apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 constituem um conjunto de resultados considerados válidos, mas que não correspondem às faixas de variáveis de interesse do estudo, e portanto, são incompletos. Embora foram resgatados para ser analisados desde outro enfoque, além de servir para estudos posteriores.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 <= pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb

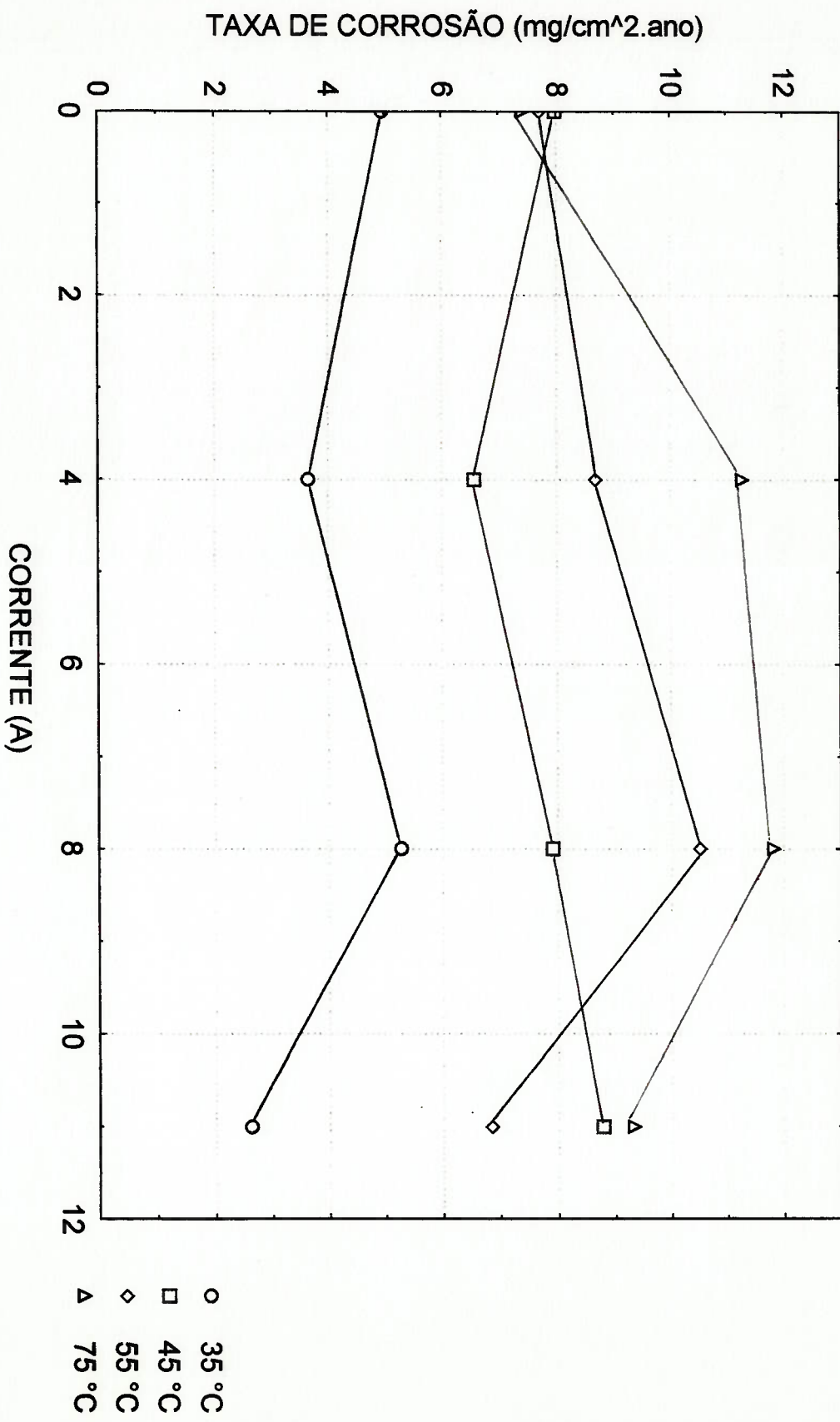


FIGURA 4.1 - Variação da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

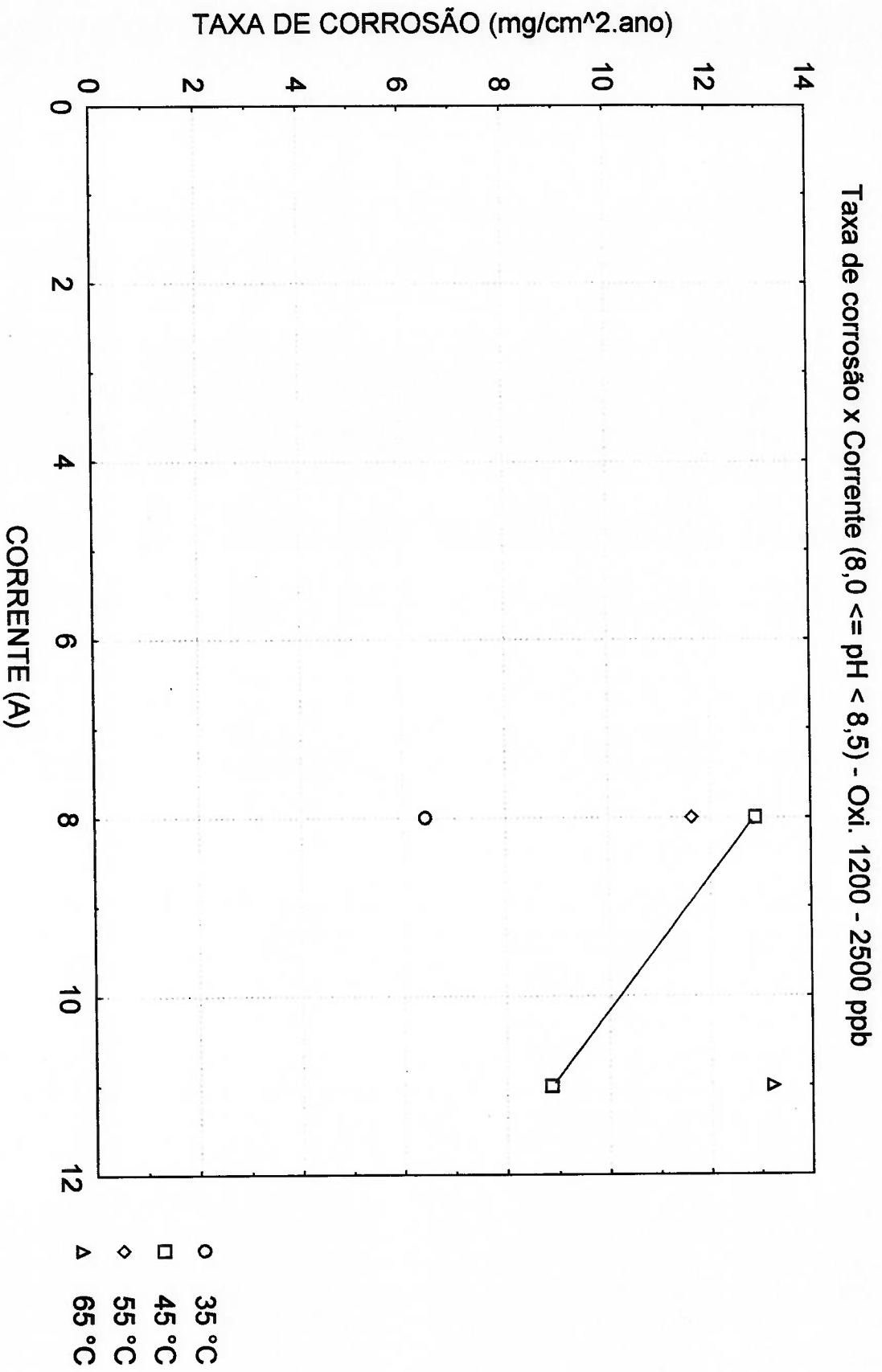


FIGURA 4.2 - Variação da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 <= pH < 8,5) - Oxi. >2500 ppb

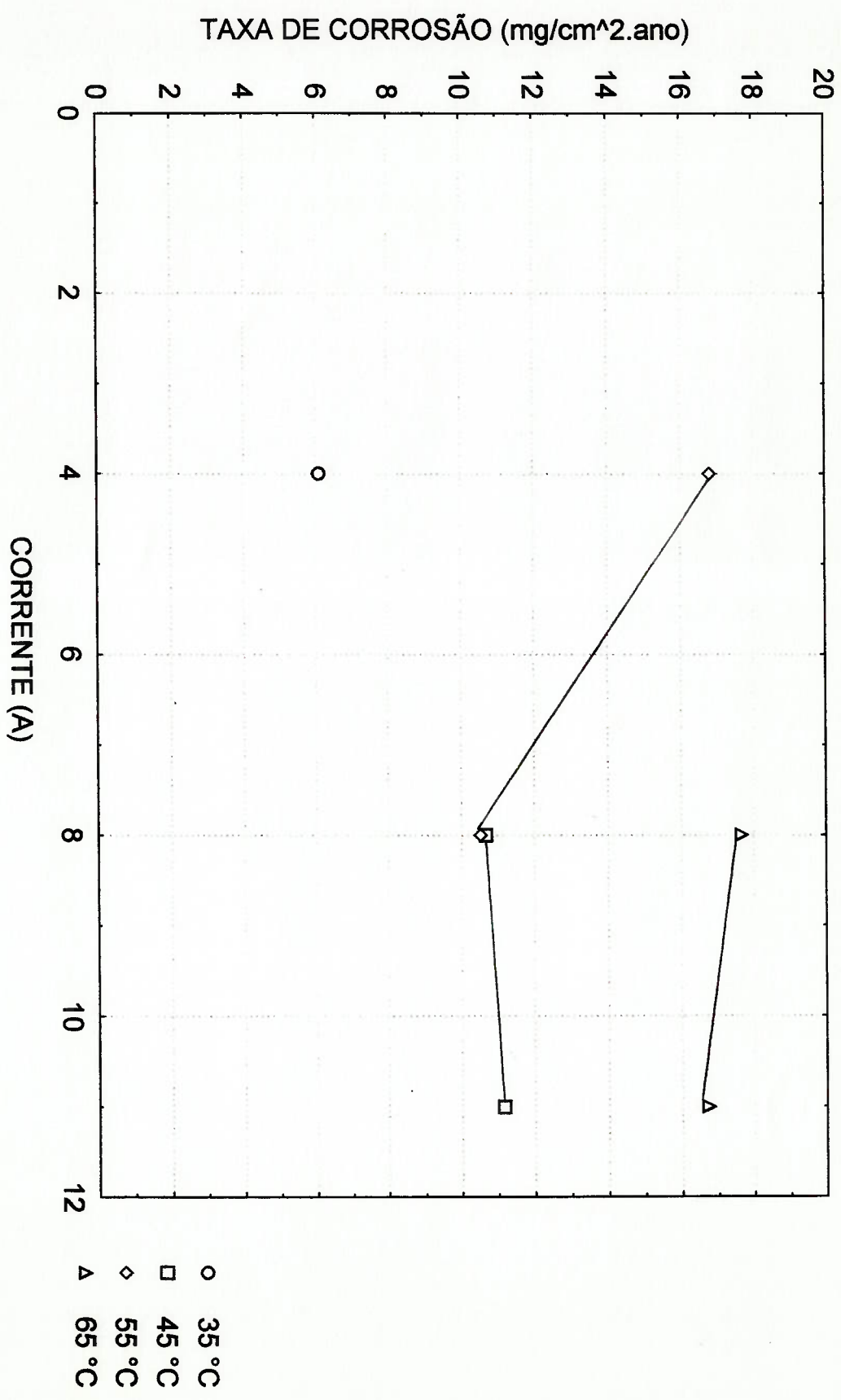


FIGURA 4.3 - Variação da taxa de corrosão do cobre em função da corrente elétrica e temperatura em água pura com teor de O<sub>2</sub> dissolvido maior a 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

Taxa de corrosão x Ind. Mag. (8,0 ≤ pH < 8,5)-Oxi. 1200 - 2000 ppb

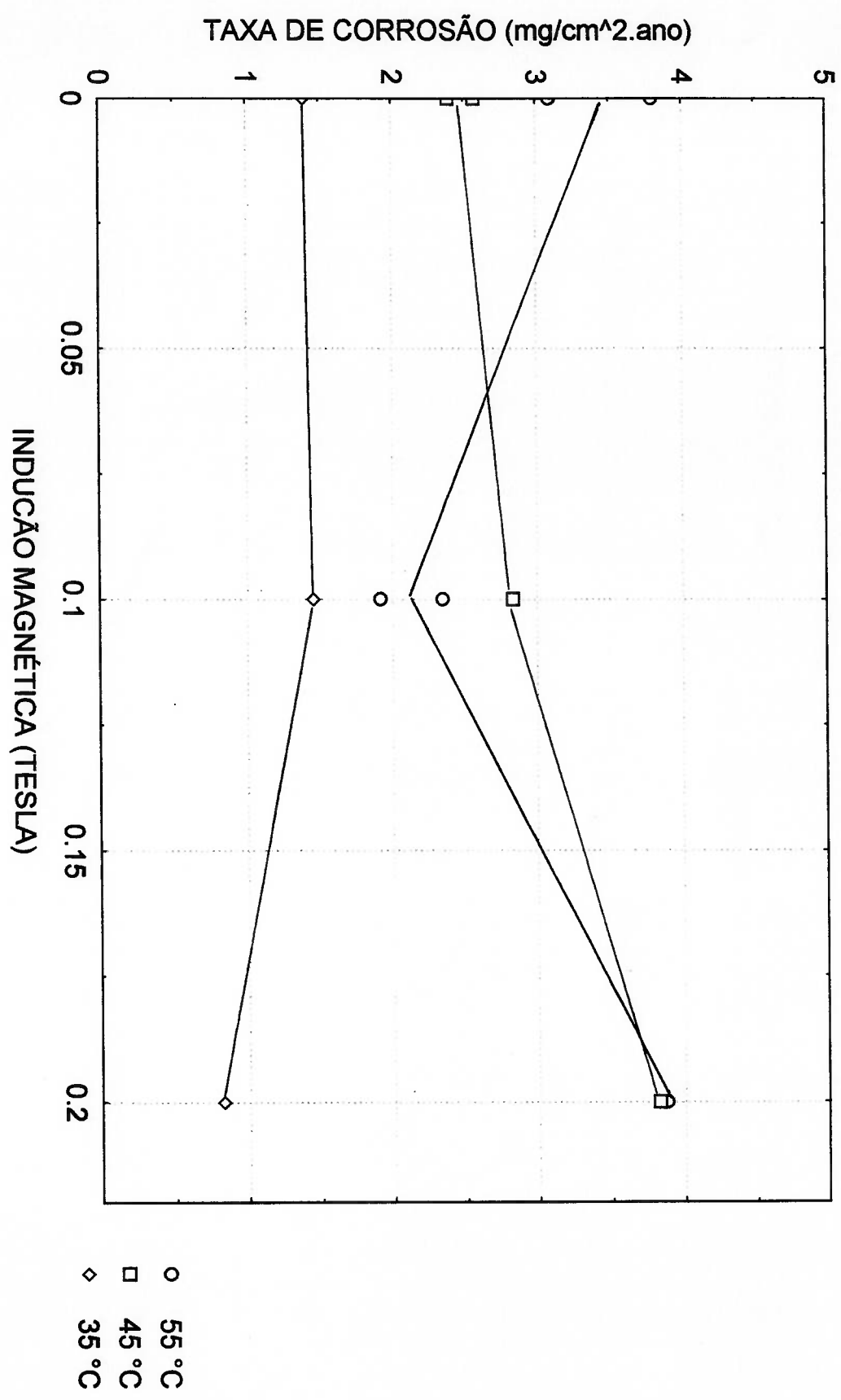


FIGURA 4.4 - Variação da taxa de corrosão do cobre em função da indução magnética e temperatura em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nos pontos experimentais obtidos e apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4, foram construídas curvas de ajuste que visam relacionar a taxa de corrosão com as variáveis energéticas nas condições do meio, relativas às temperaturas e às faixas de pH e concentração de oxigênio dissolvido. A fim de melhor compreender o comportamento dos dados experimentais utilizou-se recursos de análise de regressão linear para o ajuste de curvas e estimativa da dispersão dos dados. As análises desses resultados para caracterizar os efeitos da corrente elétrica e o campo magnético são apresentadas a seguir.

### 5.1 Ensaio de passagem de corrente elétrica

Os gráficos das Figuras 5.1 a 5.4 mostram a influência da corrente elétrica sobre a taxa de corrosão do cobre para água pura com pH de 8,0 a 8,5, concentração de oxigênio de 500 a 1200 ppb e a diferentes temperaturas fixadas para cada caso. A curvas dessas figuras apresentam tendências diferentes. Enquanto as curvas das Figuras 5.2 e 5.4 apresentam valores crescentes da taxa de corrosão com a corrente, a curva da Figura 5.3 se mantém constante e da Figura 5.1 decresce. Desta forma, verifica-se, que não há uma tendência clara de que a taxa de corrosão seja influenciada pela variação da corrente elétrica, devido a que aumentos e diminuições da corrente elétrica não implicam,



necessariamente, em significativos aumentos ou diminuições da taxa de corrosão. Agrupando-se esses resultados de outra forma, construíram-se gráficos da taxa de corrosão em função da temperatura, para todos os valores de corrente, visando dar um enfoque complementar à análise. Desta forma, nas Figuras 5.5 a 5.7, para diferentes concentrações de oxigênio, observa-se o aumento da taxa de corrosão com o aumento da temperatura, independentemente do valor da corrente. Para maiores concentrações de  $O_2$ , verificam-se também, maiores taxas de corrosão. Para níveis de corrente iguais a zero, foram obtidas taxas de corrosão maiores que às dos ensaios de corrosão convencional, [2], conforme pode ser verificado na Figura 5.8. Este fato pode ser justificado considerando as condições diferentes dos ensaios. Por exemplo, no presente estudo foi utilizado fios de cobre com consideráveis níveis de trabalho mecânico como corpos de prova, se opoendo às chapas planas de 3 mm de espessura utilizadas no trabalho da Referência [2].

Do exposto, se deduz não só que o efeito da temperatura é dominante no fenômeno, como, novamente, a não existência de qualquer tendência de corrente elétrica influir no processo. Pontos correspondentes a correntes elétricas maiores ou menores, indistintamente, estão acima ou abaixo das curvas que são obtidas. Análises de regressão linear mostraram dispersões de dados relativamente altos em alguns casos e, na maioria, uma excelente correlação, demonstrados com o cálculo do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), o qual indica o grau em que a curva explica a relação entre as variáveis. Assim, foram obtidos valores de  $r^2$  variando a 0,3 a 0,86, para regressões lineares da taxa de corrosão em função da

temperatura para cada valor da corrente elétrica e para o conjunto. A dispersão de resultados para dois casos, a pesar de serem relativamente elevada ( $r^2 = 0,3$  e  $r^2 = 0,53$ ), pode ser justificada pelo fato da largura da faixa da concentração de oxigênio adotada (500 a 1200 ppb) estar muito perto da área de transição da taxa de corrosão em função do teor de oxigênio, [2]. A Figura 5.10, apresenta a análise de regressão linear com intervalo de confiança de 95% da Figura 5.9, cujo valor de  $r^2$  expressa a excelência do ajuste efetuado para esse caso.

## 5.2 Ensaio de indução magnética

A influência da indução magnética foi analisada com os dados fornecidos pela Figura 4.4. Fixando-se o pH entre 8,0 e 8,5, a faixa de concentração de oxigênio entre 1200 a 2500 ppb e a temperatura em 55 °C, foi construído o gráfico da Figura 5.11 (taxa de corrosão versus indução magnética). Observa-se que a curva possui um comportamento linear e aproximadamente paralelo ao eixo da abscissa.

Do mesmo modo, foram construídos os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 para as temperaturas 45 °C e 35 °C, nos quais percebe-se pequenas tendências da taxa aumentar e diminuir, respectivamente. Como no caso da corrente elétrica, não há relação entre aumentos e diminuições da indução magnética com os aumentos ou diminuições da taxa de corrosão, portanto, não se percebe claramente a influência da indução magnética na taxa de corrosão do cobre.

Agrupando os dados de outra forma, construiu-se o gráfico da Figura 5.14, onde pode-se verificar, novamente, o aumento da taxa de corrosão com o aumento da temperatura, independentemente do valor da indução magnética aplicada.

Finalmente, análises de regressão linear da taxa de corrosão em função da temperatura para cada valor da indução magnética, mostraram uma alta dispersão dos resultados para  $B = 0,1 \text{ T}$ , ( $r^2 = 0,20$ ), enquanto que para  $B = 0 \text{ T}$  e  $B = 0,2 \text{ T}$  uma excelente correlação das variáveis ( $r^2 = 0,90$ ;  $r^2 = 0,94$ ). A alta dispersão observada num caso, pode ser justificada também pela largura da faixa da concentração de  $O_2$ , como já foi explicado no item 5.1. A Figura 5.16, apresenta a análise de regressão linear com intervalo de confiança de 95% da Figura 5.15, cujo valor de  $r^2$  expressa uma boa explicação do modelo ajuste efetuado.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb e T = 35 °C  
 $y = 4.897 - 0.135 * x$

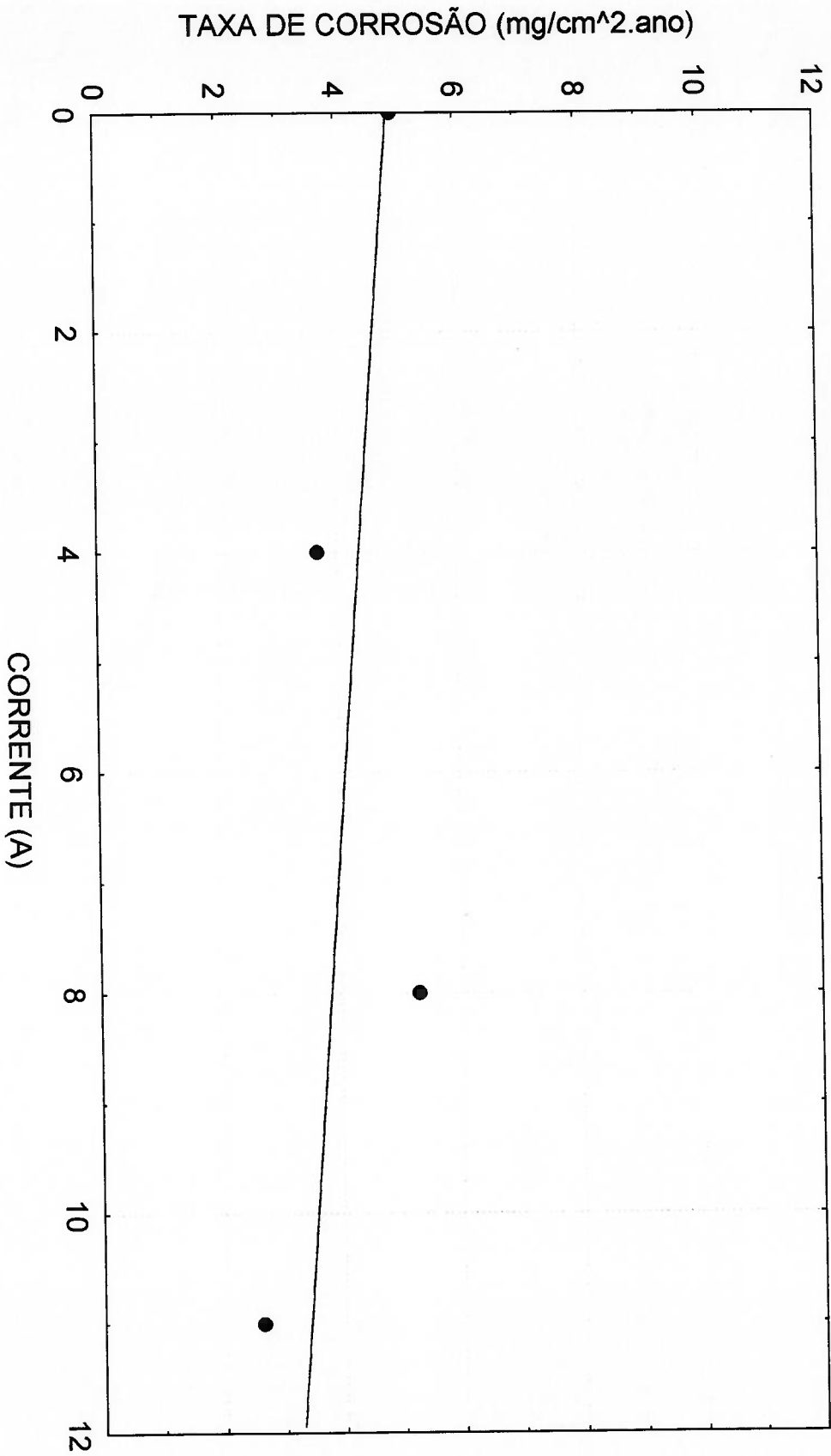


FIGURA 5.1 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35 °C.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb e T = 45 °C  
 $y = 7.267 + 0.094 * x$

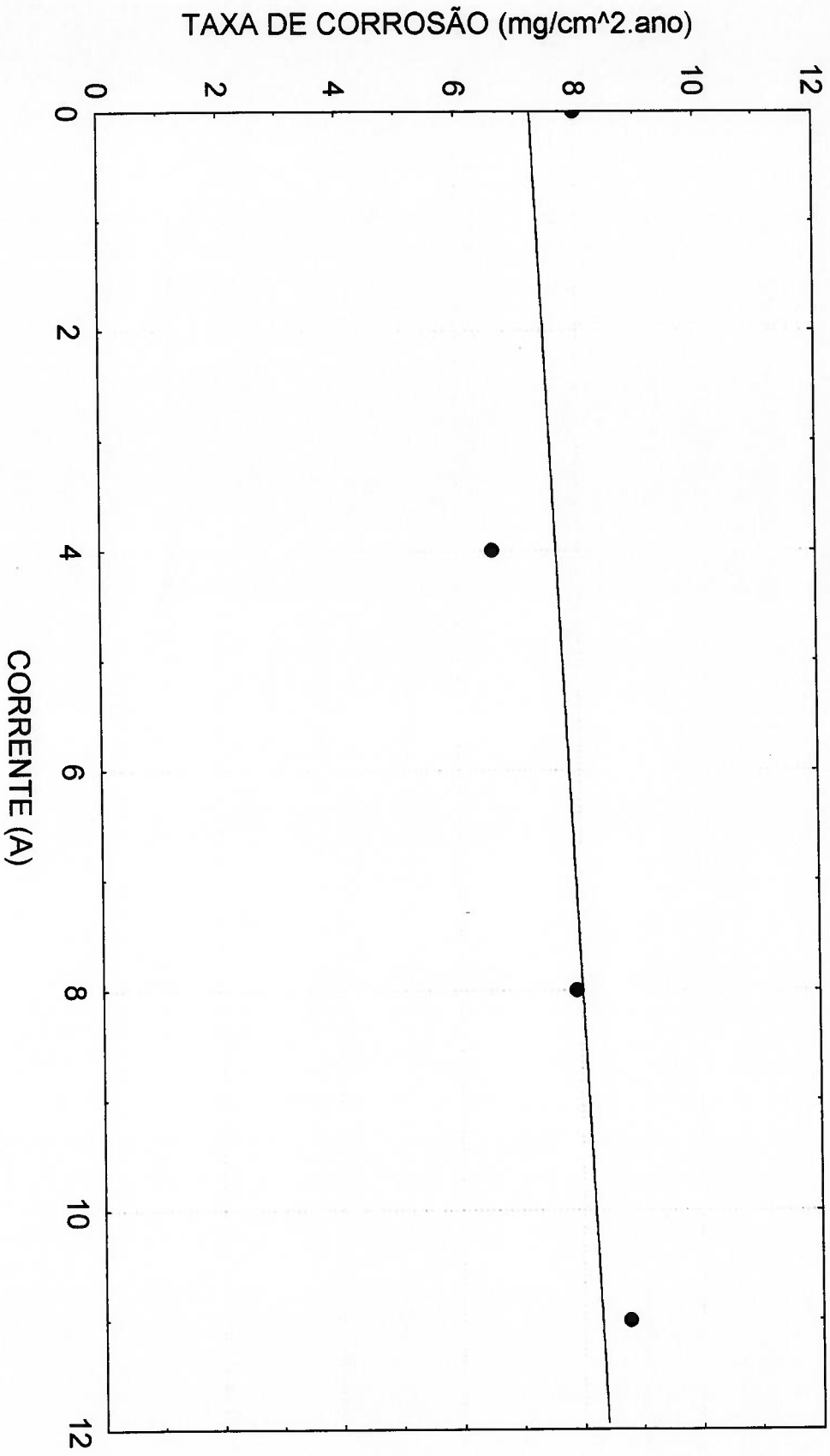


FIGURA 5.2 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 45 °C.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb e T = 55 °C  
 $y = 8.42 + 0.001 * x$

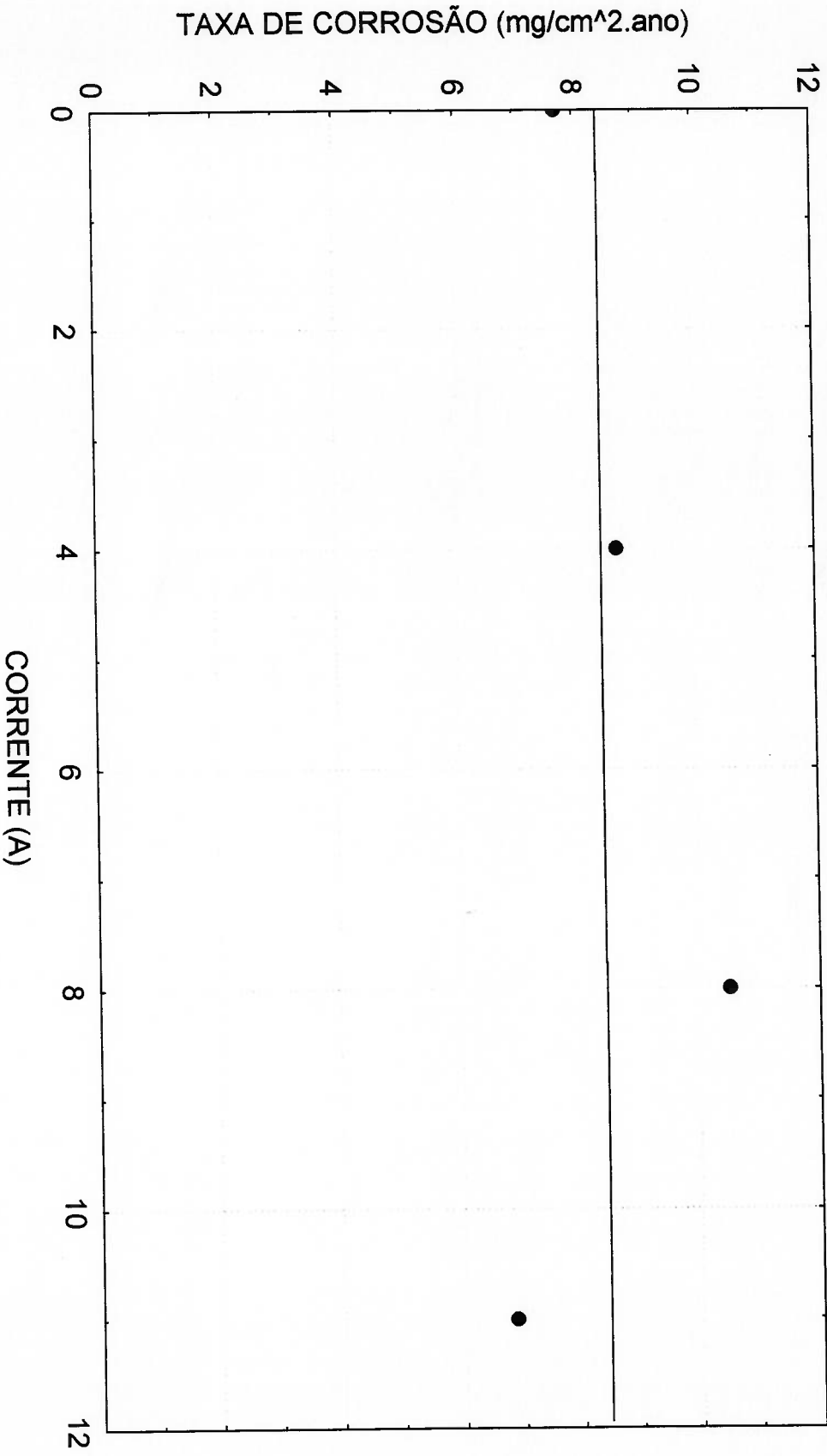


FIGURA 5.3 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55 °C.

Taxa de corrosão x Corrente (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb e T = 75 °C  
 $y = 8.863 + 0.191 \cdot x$

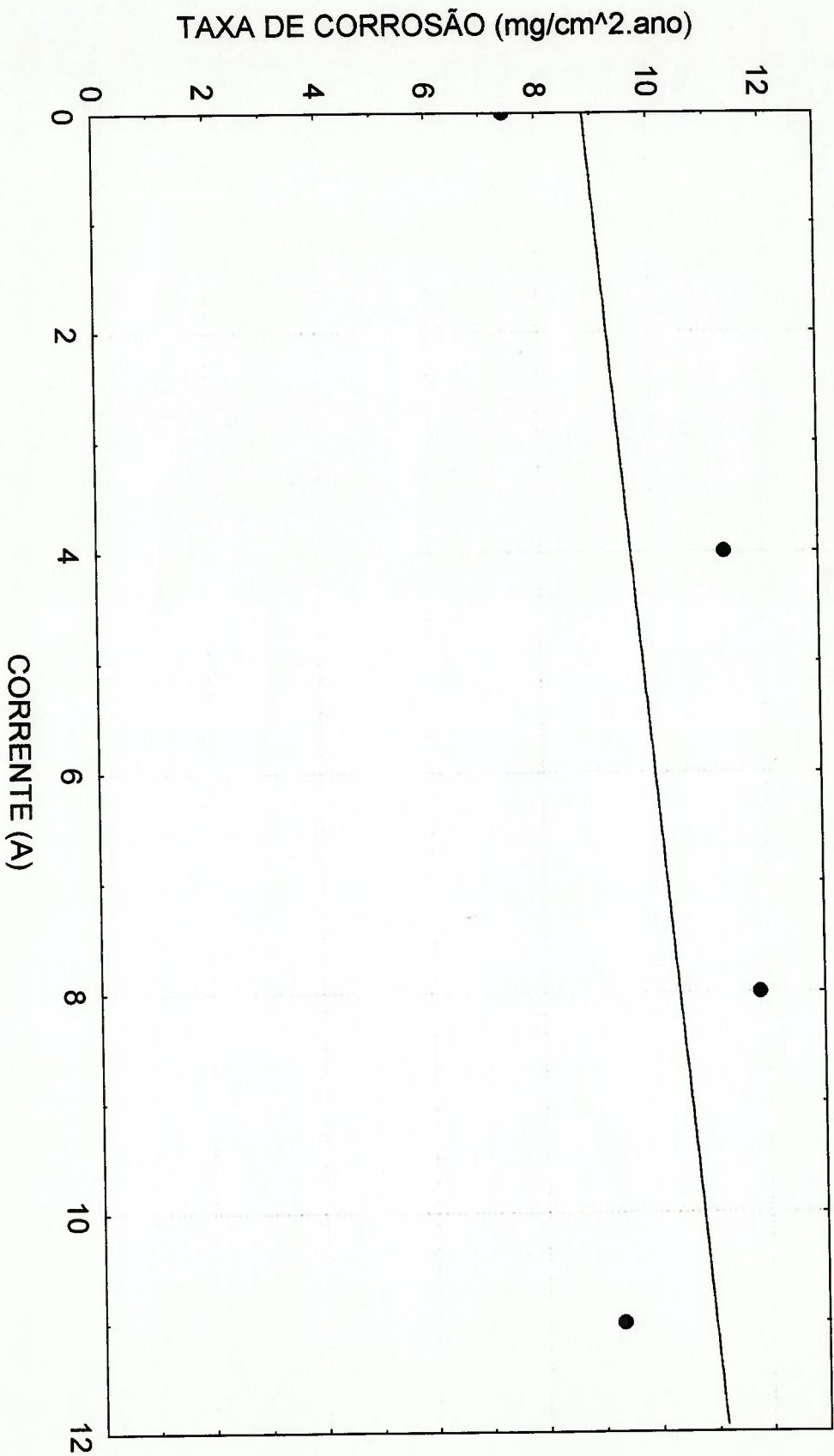


FIGURA 5.4 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da corrente elétrica em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 75 °C.

Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 500 - 1200 ppb

$$y = 2.447 \cdot \exp(0.021 \cdot x)$$

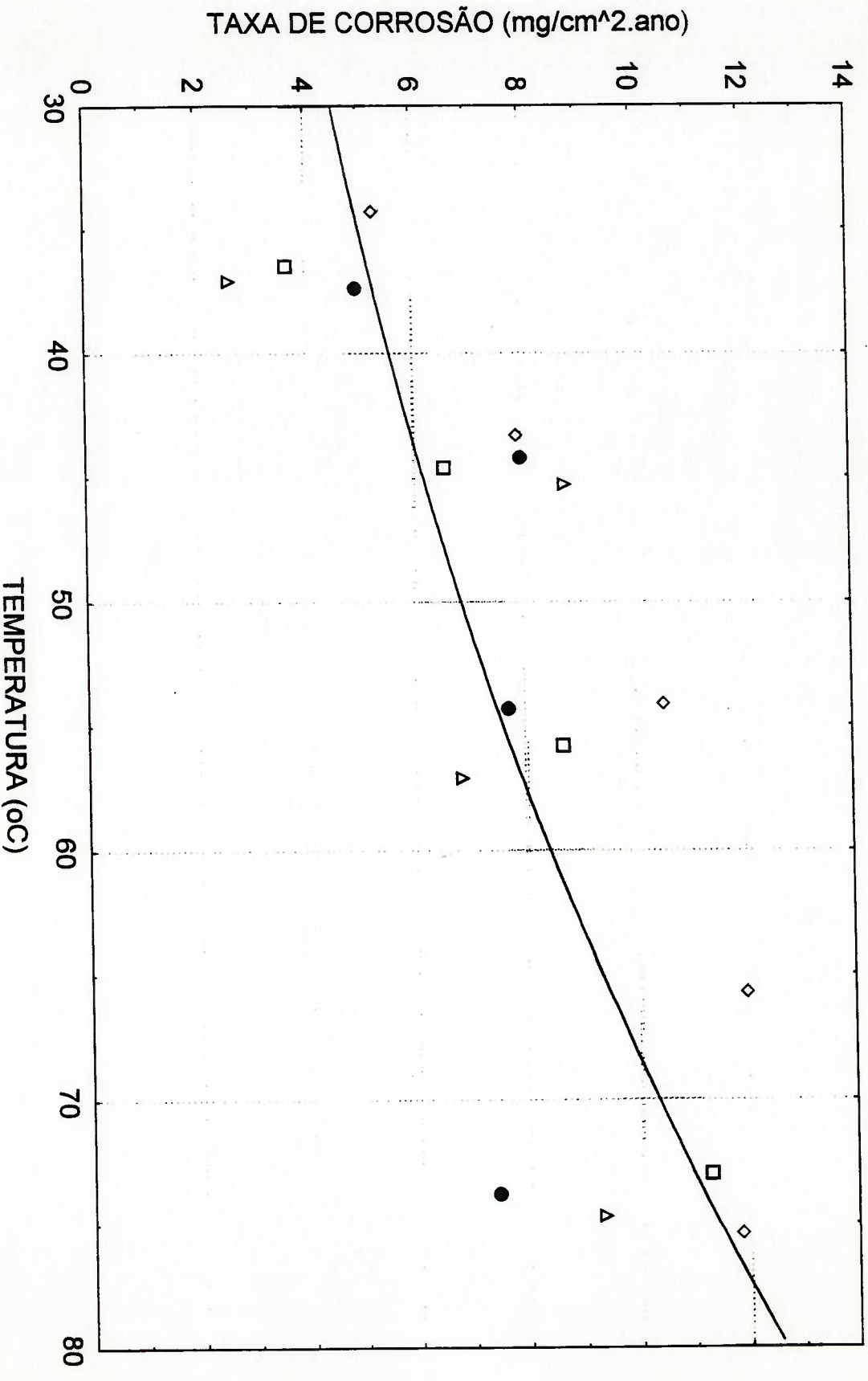
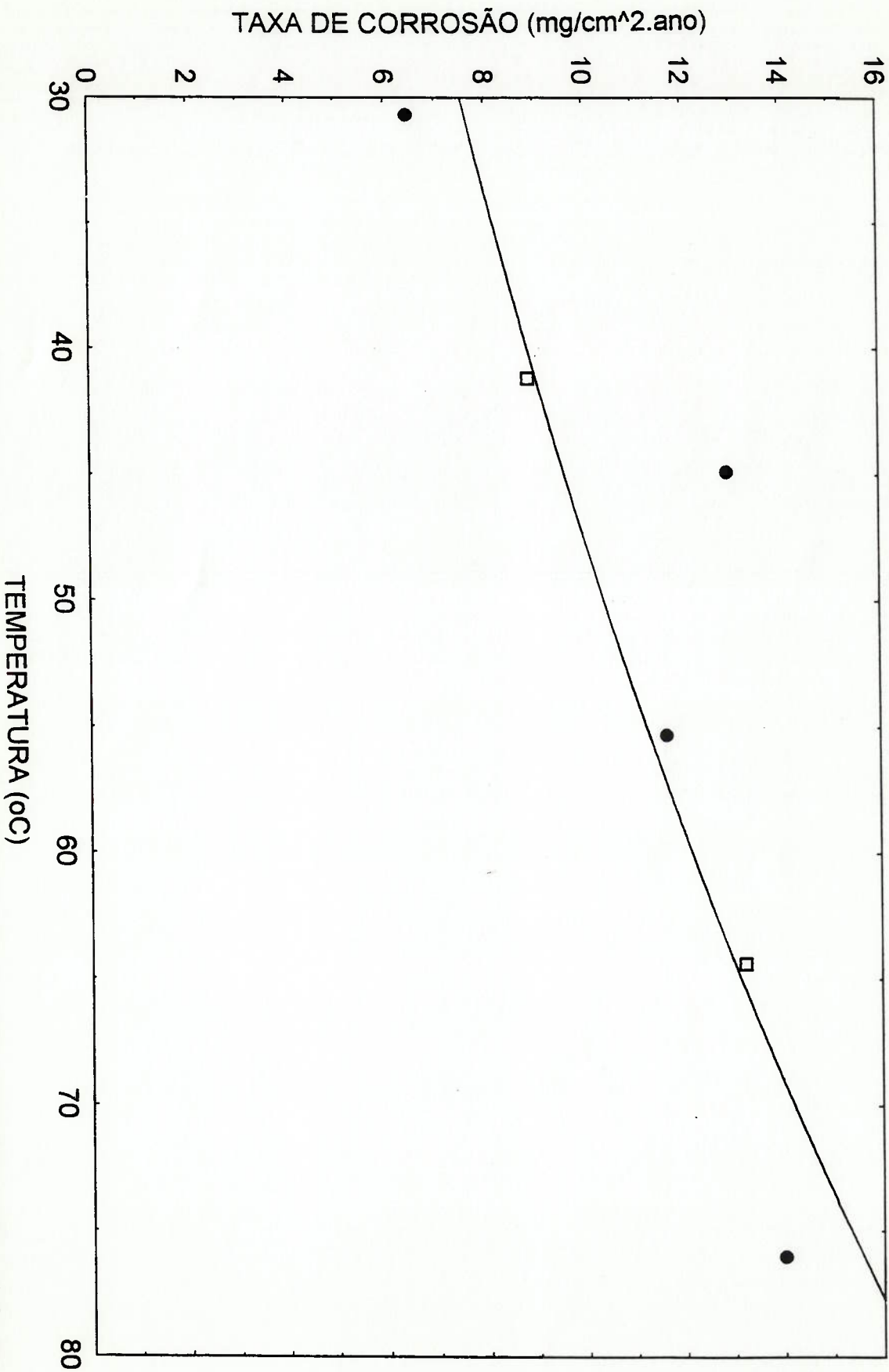


FIGURA 5.5 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para todas as correntes, em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.



Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 <= pH < 8,5) - Oxi. 1200 - 2500 ppb

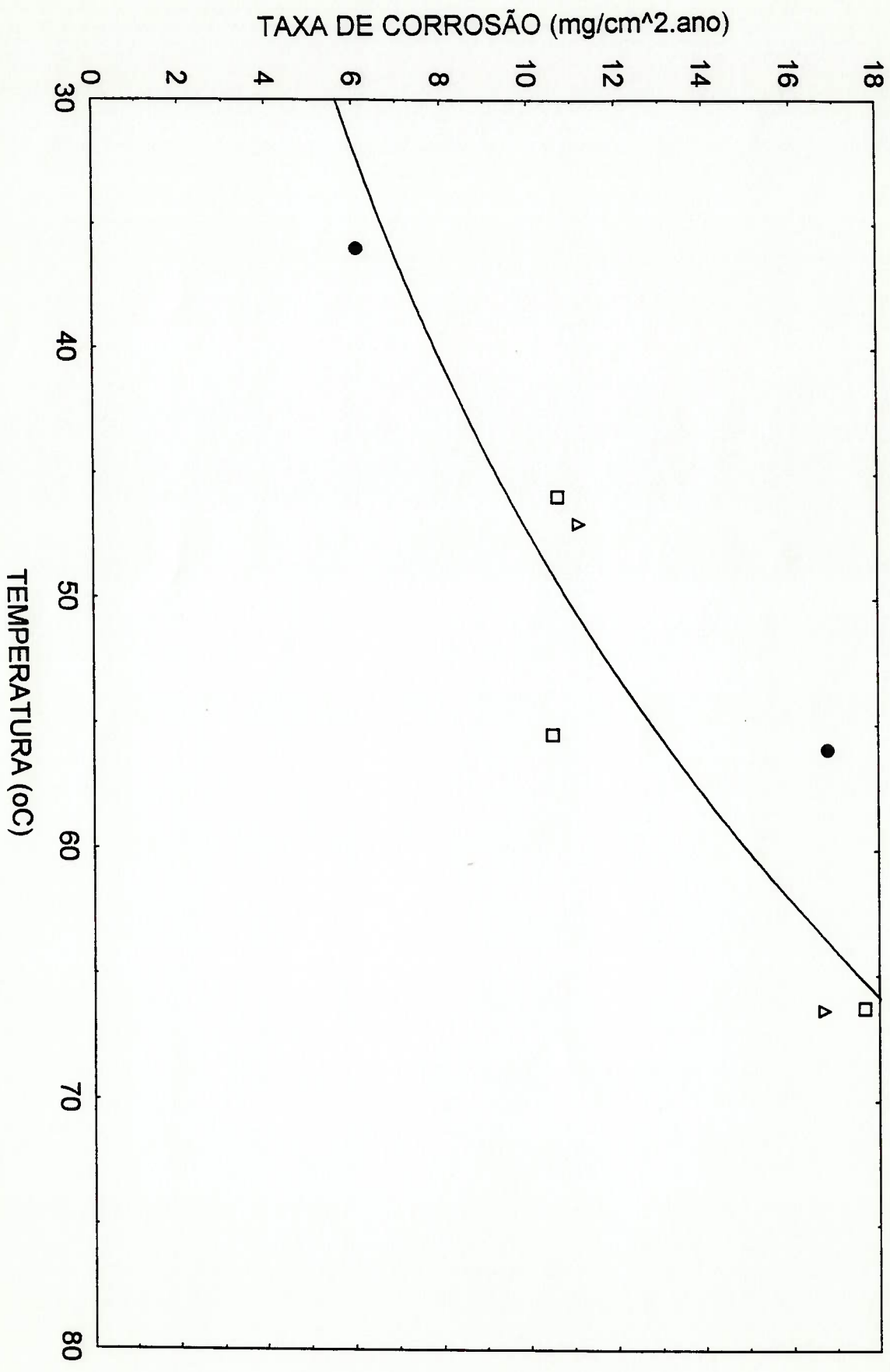
$$y = 4.859 \cdot \exp(0.015 \cdot x)$$



● 8 A  
□ 11 A

FIGURA 5.6 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para correntes de 8 e 11 A, em água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. > 2500 ppb  
 $y = 2.323 \cdot \exp(0.031 \cdot x)$



- 4 A
- 8 A
- △ 11 A

FIGURA 5.7 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para correntes de 4, 8 e 11 A, em água pura com teor de O<sub>2</sub> dissolvido maior a 2500 ppb e pH entre 8,0 e 8,5.

Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 <= pH < 8,5) Teor de oxig. 500 - 1200 ppb  
 $y = 0.799 * \exp(0.033 * x)$

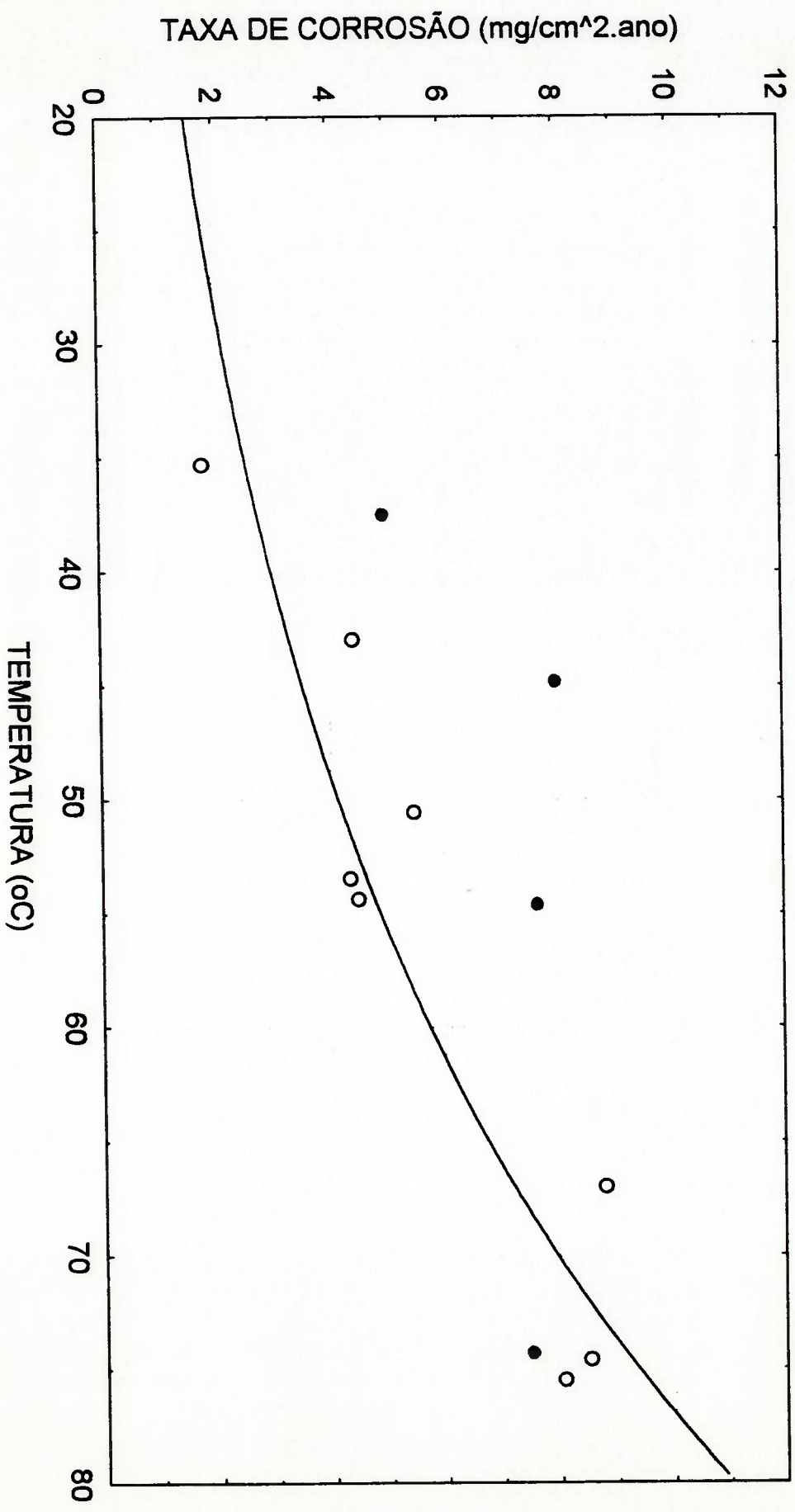


FIGURA 5.8 - Gráfico comparativo das taxas de corrosão do cobre em função da temperatura, dos ensaios de corrosão convencional, [2], (o), e passagem de corrente elétrica (●) para I = 0 A.

FIGURA 5.10 - Regressão linear dos valores da taxa de corrosão em função da temperatura, para  $I = 8 \text{ A}$ , com uma faixa de intervalo de confiança de 95%.

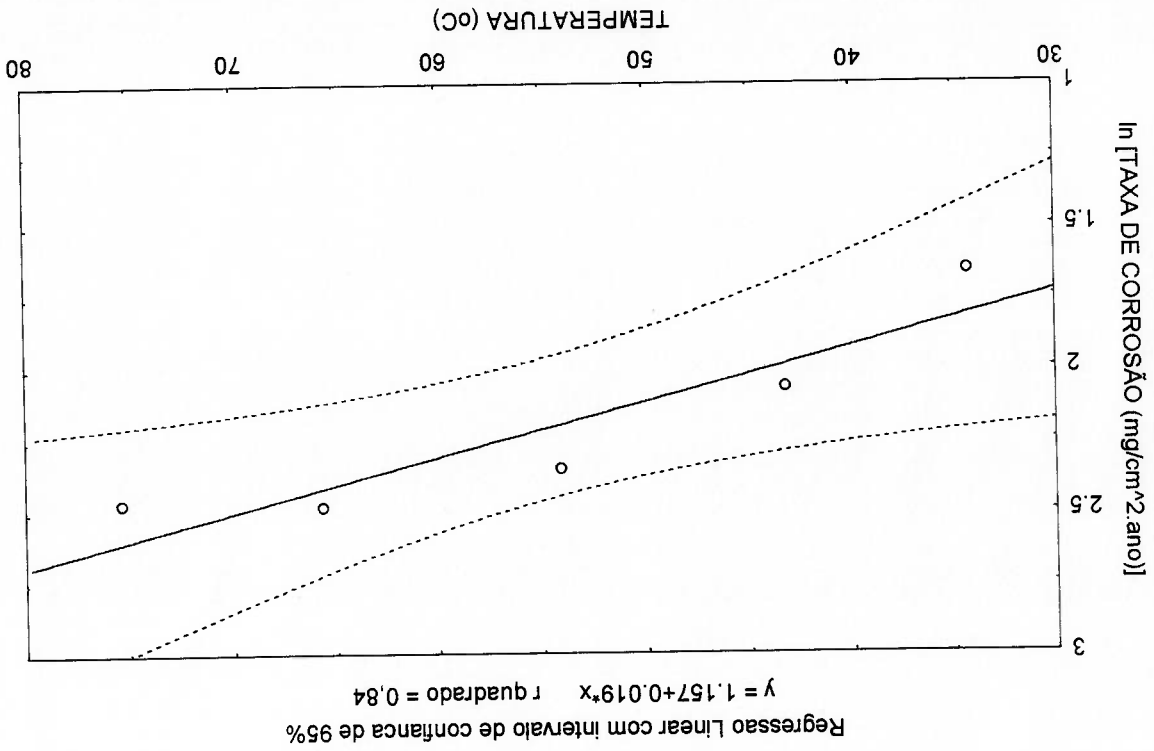
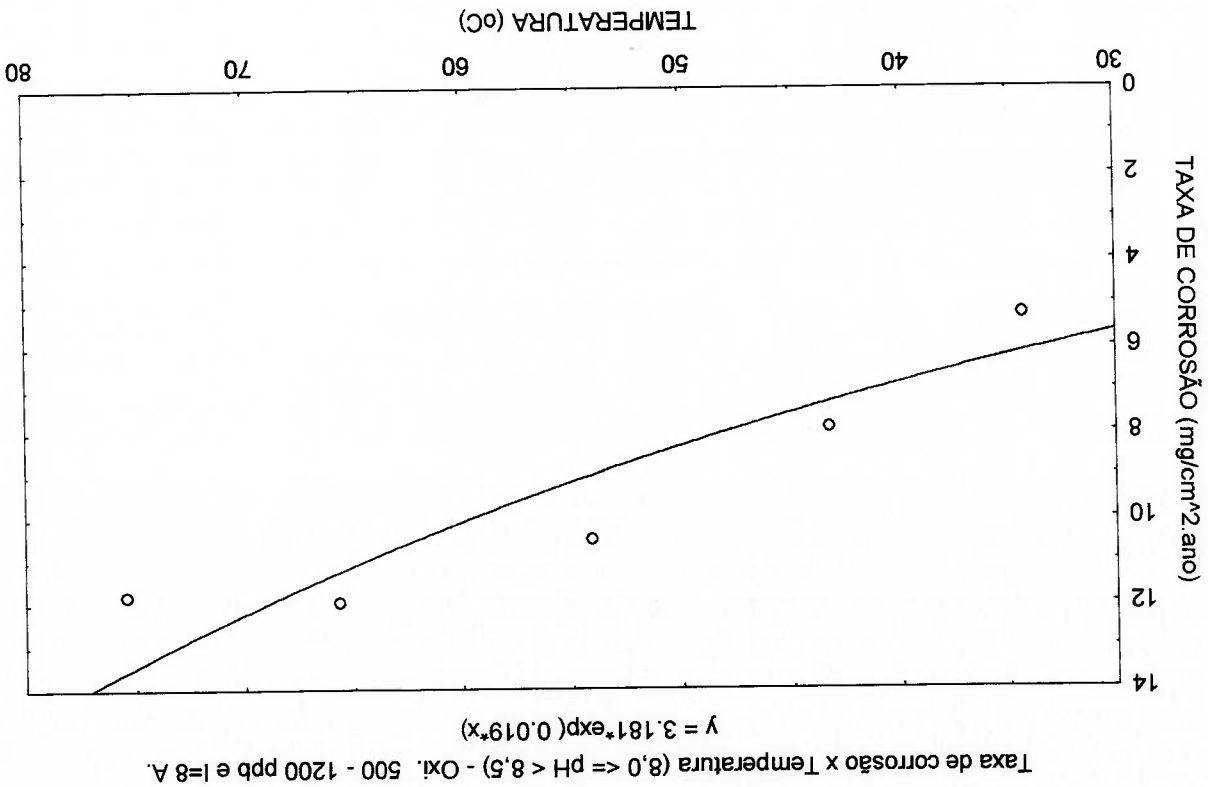


FIGURA 5.9 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para  $I = 8 \text{ A}$ .



Taxa de corrosão x Ind. Mag. (8,0 ≤ pH < 8,5)-Oxi. 1200 - 2000 ppb e Temp. 55 °C  
 $y = 3.003 - 0.036 * x$

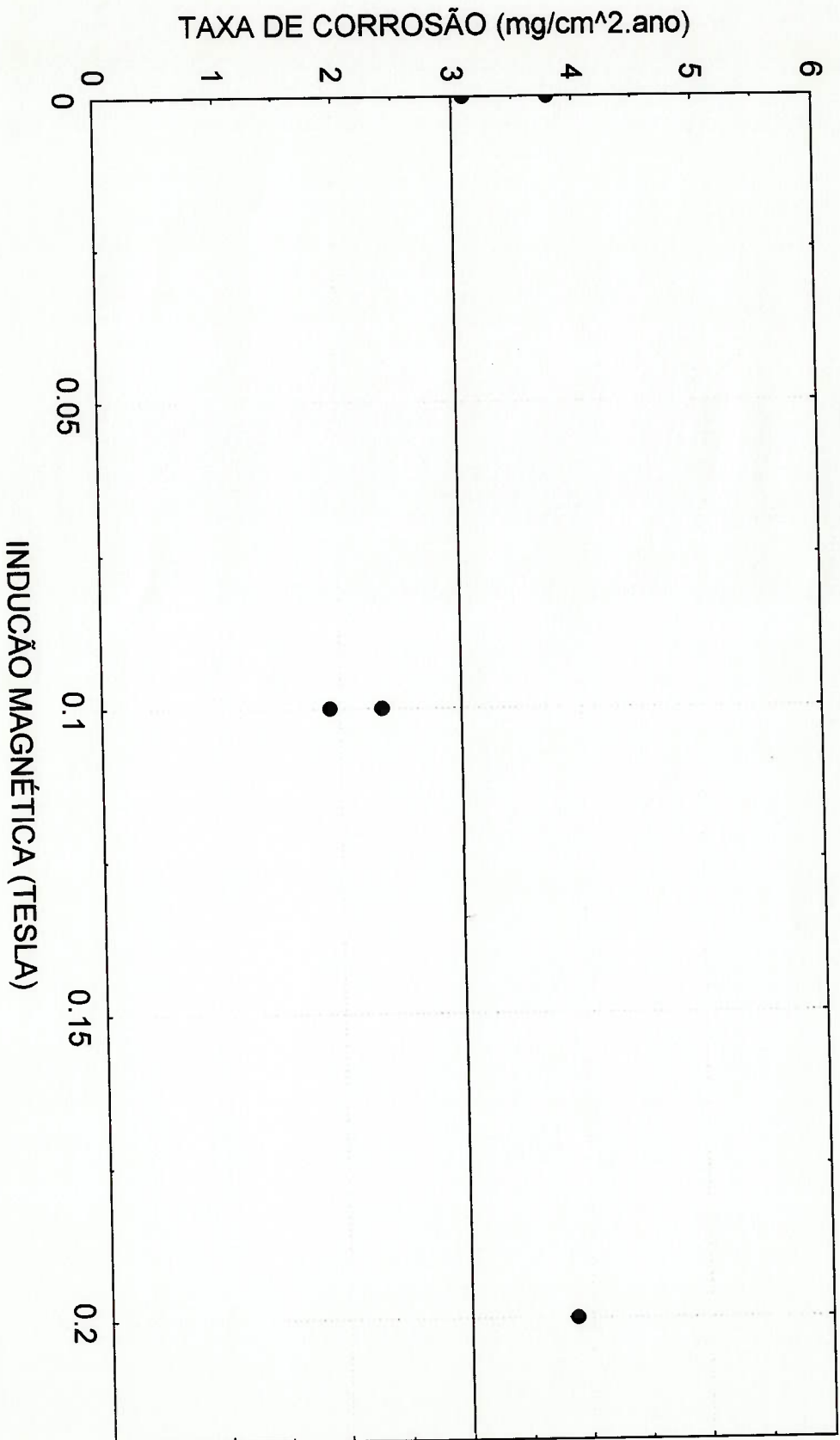


FIGURA 5.11 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55 °C.

Taxa de corrosão x Ind. Mag. (8,0 ≤ pH < 8,5)-Oxi. 1200 - 2000 ppb e Temp. 45 °C  
 $y = 2.422 + 6.409 \cdot x$

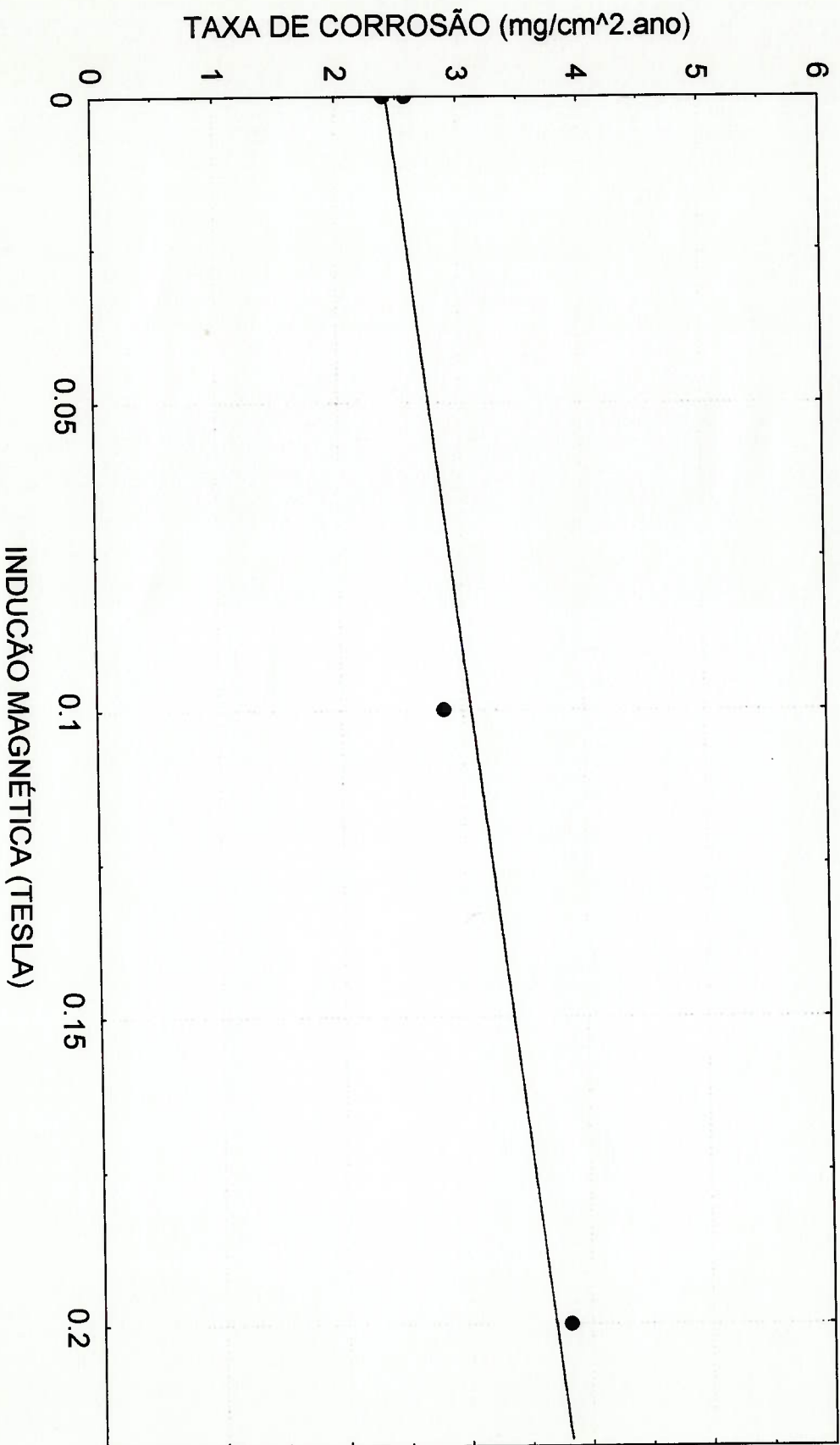


FIGURA 5.12 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 45 °C.

Taxa de corrosão x Ind. Mag. (8,0 <= pH < 8,5)-Oxi. 1200 - 2000 ppb e Temp. 35 °C  
 $y = 1.505 - 2.85^*x$

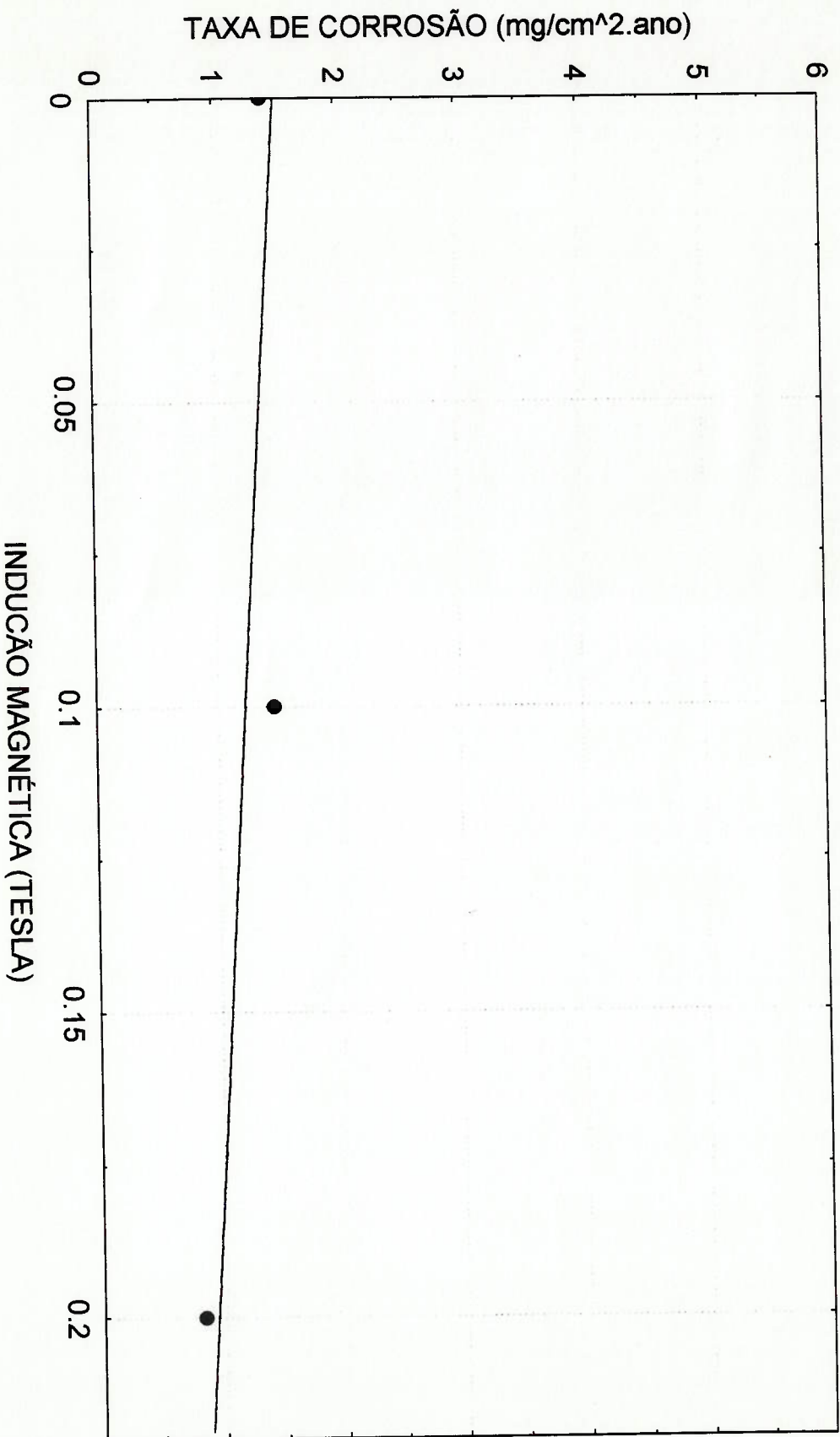


FIGURA 5.13 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da indução magnética em água pura com faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35 °C.

Taxa de corrosão x Temperatura (8,0 ≤ pH < 8,5) - Oxi. 1200 - 2000 ppb  
 $y = 0.284 * \exp(0.044 * x)$

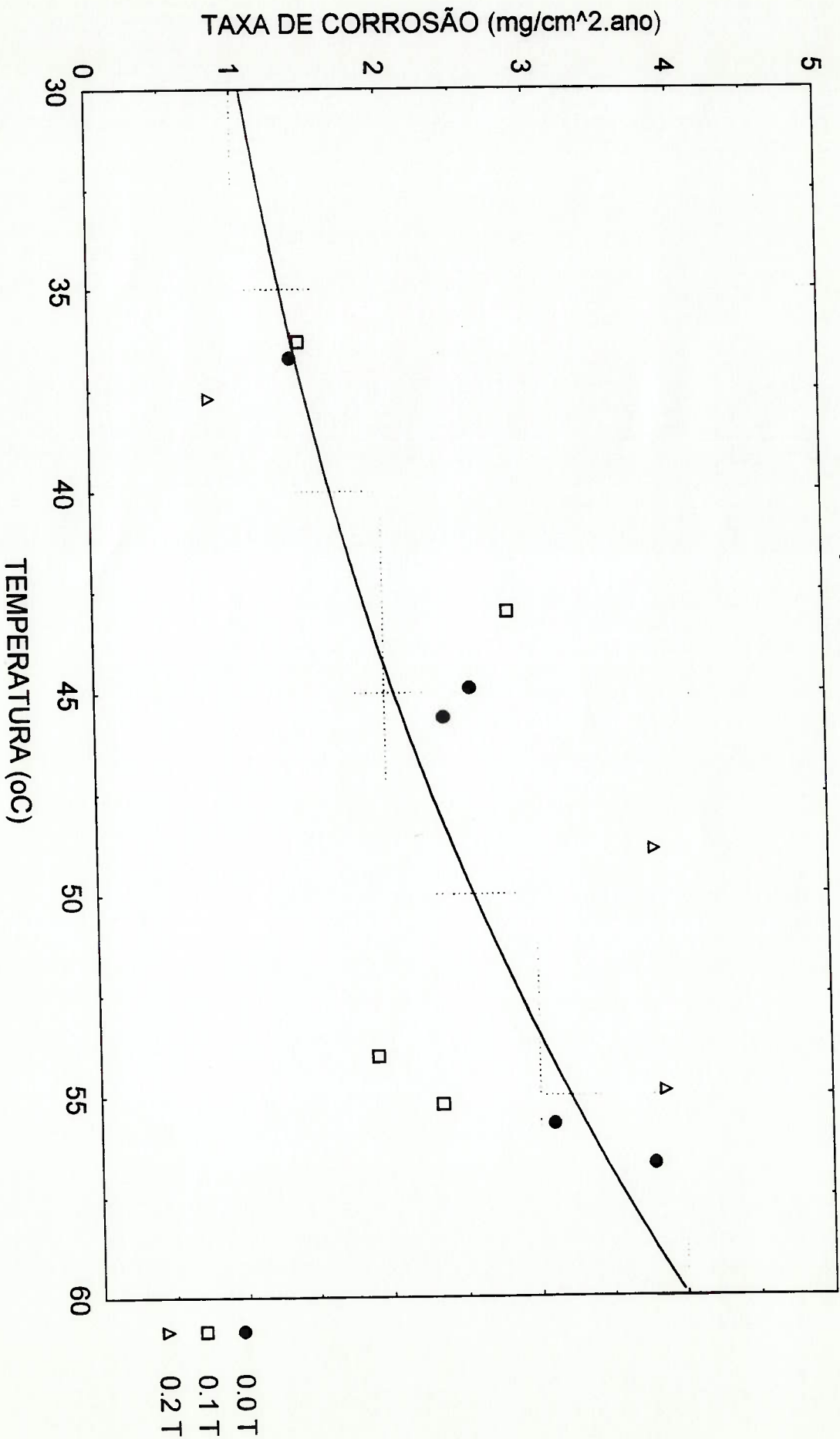


FIGURA 5.14 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em função da temperatura, para todas as induções magnéticas, em água pura com teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2000 ppb e pH entre 8.0 e 8.5.



FIGURA 5.16 - Regressão linear dos valores da taxa de corrosão em função da temperatura, para  $B = 0 T$ , com uma faixa de intervalo de confiança de 95%.

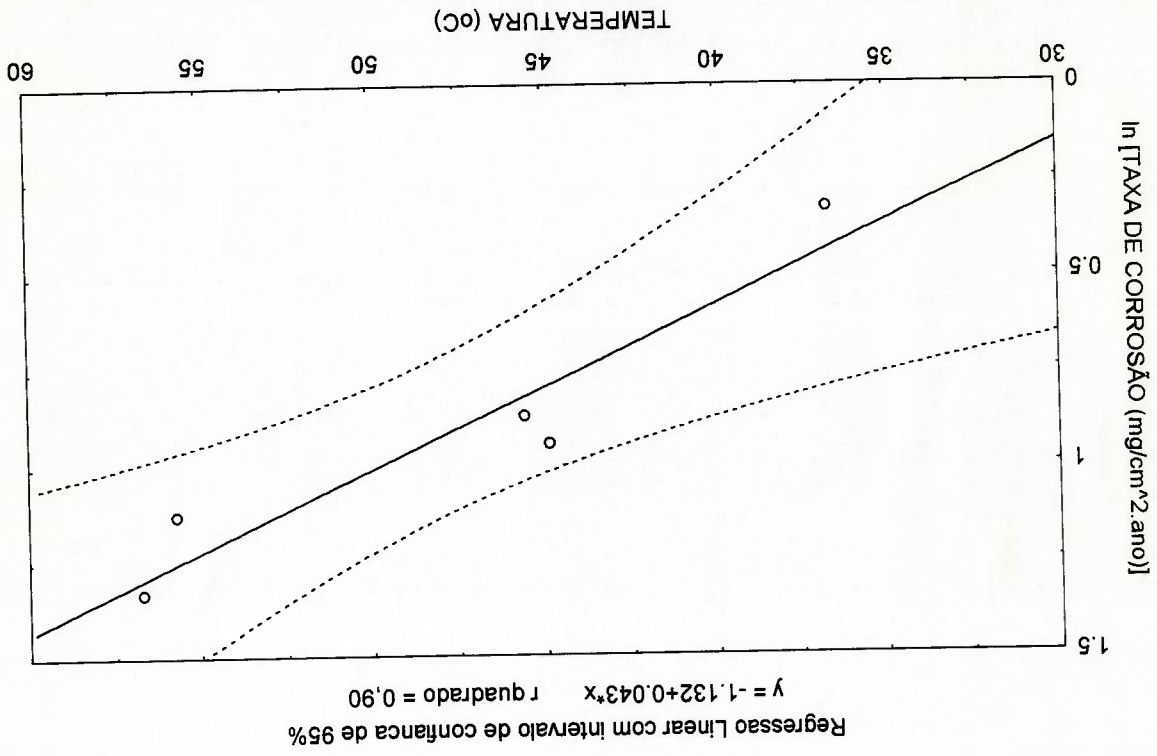
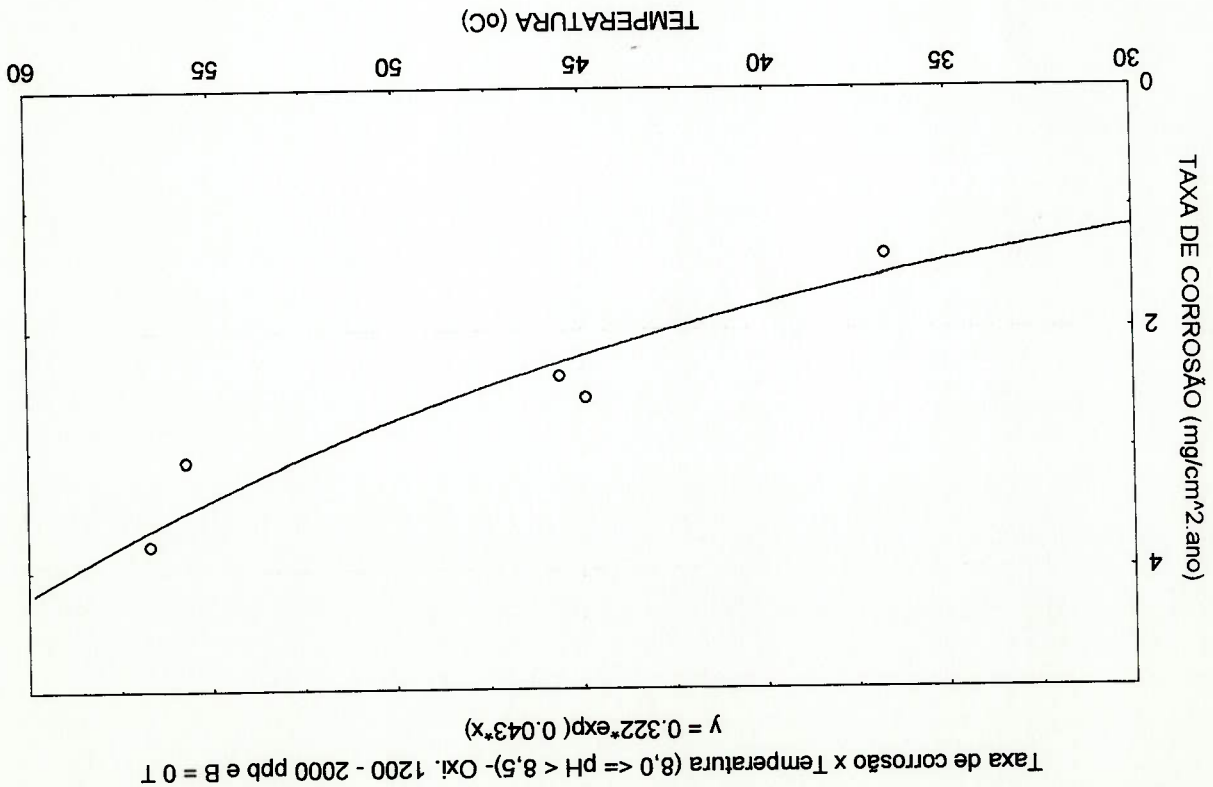


FIGURA 5.15 - Gráfico da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, para  $B = 0 T$ .



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram realizados ensaios de corrosão destinados à avaliação da influência da energização sobre a taxa de corrosão do cobre em água pura, permitindo a verificação do efeito de dois fatores: corrente elétrica e campo magnético.

As principais conclusões deste trabalho são:

- i) As aparelhagens experimentais desenvolvidas para os ensaios de corrosão energizados, modelaram as características principais do gerador, as quais são: a densidade de corrente elétrica e a indução magnética nas barras. Desta forma, juntamente com o procedimento adotado nos ensaios, obtiveram-se subsídios para classificar a influência das variáveis energéticas citadas acima, enquanto as características físicas e químicas da água pura, tais como temperatura, pH e concentração de oxigênio, permaneciam controladas.

Os resultados mostraram que a densidade de corrente elétrica alternada é uma variável energética cuja influência não é perceptível no processo corrosivo do cobre em água pura. A medida em que a corrente elétrica aumenta, desde zero até o valor que fornece a densidade de corrente nominal do hidrogênio, obtêm-se taxas de corrosão

Primeiramente, recomenda-se a avaliação da influência de outras formas de aplicação de energia. Por exemplo, a aplicação de um potencial variável sobre um corpo de prova no extremo de um circuito aberto, submerso nas mesmas condições dos ensaios aqui executados e, verificar o comportamento do corpo de

continuidade deste estudo.  
A finalização deste trabalho permitiu um maior conhecimento da influência de duas variáveis energéticas sobre o fenômeno de corrosão do cobre em água pura. Isto permite agora apresentar algumas recomendações no sentido de

cobre em água pura.  
iv) As análises feitas demonstram, novamente, que a temperatura é uma variável muito influente, observando-se que a altas temperaturas a taxa de corrosão do cobre é notoriamente maior, comprovando-se assim, mais uma vez, que esta variável é dominante no processo corrosivo do

em água pura.  
iii) Os resultados dos ensaios com indução magnética mostram que, para nenhum efeito que seja significativo sobre a taxa de corrosão do cobre da ordem daqueles que atinge os condutores ocios, não verifica-se diferentes valores de indução magnética aplicada aos corpos de prova,

oscilantes, sem tendência clara de aumentarem ou diminuírem, correspondentes às da temperatura do ensaio.

prova submerso quando esta desconectado do circuito elétrico e sobre influência de um campo elétrico variável. Também, poderia ser estudado os efeitos de uma corrente contínua através de um corpo de prova submetido às mesmas condições dos presentes ensaios.

Um outro aspecto que se recomenda abordar é o efeito do diferencial de concentração das espécies oxidantes e reduzidas que ocorre junto à região do entreferro da bobina. Este problema poderia ser analisado com a utilização de bobinas com dimensões de entreferro maiores.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Relatório Técnico CENO nº 04/311 - "Ensaio Convencionais para a Avaliação do Processo de Corrosão do Cobre", CENO / USP, Setembro de 1997.
- [2] Bastos Jr., A. - "Análise da taxa de corrosão do cobre eletrolítico em água pura", Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1997.
- [3] Schleithoff, K. e Emshoff, H-W - "Optimization of the Conditioning of Generator Cooling Water", VGB Kraftwerkstechnik, 70, 1990, n.9, pp 677-681.
- [4] Bourchacourt, M. - "Flow Assisted Corrosion in Power Plant- Part I - The EDF Research Program", IAEA- Specialist Meeting on Corrosion and Erosion Aspects in Pressure Boundary Components in LWR, Viena, 1988.
- [5] Wulfhorst, A. - "Análise da taxa de corrosão do cobre eletrolítico sob fluxo de água pura", Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1997.
- [6] Gentil, V. - "Corrosão", Editora L.T.C, 3ª edição, 1996.
- [7] Wolynec, S. - "Mecanismos de Corrosão e Oxidação de metais", Apostila pós-graduação da EPUSP, 1992.
- [8] Rauchle, F. - "Corrosion, Descripción y Posibilidades de Prevención", Apostila curso de especialização, Universidade Católica, Asunción, 1987.
- [9] Alonso-Falleiros, N. - "Mecanismos de Corrosão de Materiais Metálicos", Apostila pós-graduação da EPUSP, 1996.
- [10] Ramanathan, L.V. - "Corrosão e seu controle", São Paulo, ed. Hemus.
- [11] Poubairx, M. - "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", pp385-392, Bruxelas, 1966.

- [12] Sears, F.W. - "Electricidad y Magnetismo - Fundamentos de Física". Editora Aguilar.
- [13] Fitzgerald, A.E., Kingsley Jr., C., Kusko, A. - "Electric Machinery". Editora Mc Graw-Hill, 1983.
- [14] Itaipu. "Características Eléctricas dos Geradores (50 Hz)". Documento interno remitido ao CENQ/USP.
- [15] Cardoso, J.R., Nabeta, S.I. e Caldora, M. - "Estudo Magnético pelo Método de Elementos Finitos do Gerador de Itaipu de 50 Hz Operando em Vazio e em Carga Nominal", LMAg (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado), Departamento de Energia e Automação Elétrica, EPUSP. Fevereiro 1998.
- [16] Cardoso, J.R., Nabeta, S.I. e Caldora, M. - "Projeto de Bobina para Dispositivo de Ensaio", LMAg (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado), Departamento de Energia e Automação Elétrica, EPUSP. Setembro de 1997.
- [17] American Society for Testing Materials - ASTM G31-85 "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", ASTM Standards.
- [18] ORION, "Model 160 Conductivity Meter Instruction Manual", 1990.
- [19] ORION, "Model 290 A Portable pH/ISE Instruction Manual", 1991.
- [20] ORBISPHERE LABORATORIES, "2713 Series Dissolved Oxygen Analyser", 1991.
- [21] American Society for Testing Materials - ASTM G1-81 "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", ASTM Standards.