

ANDRÉ WULFHORST

ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DO COBRE ELETROLÍTICO  
SOB FLUXO DE ÁGUA PURA

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

São Paulo

1997

**ANDRÉ WULFHORST**

**ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DO COBRE ELETROLÍTICO  
SOB FLUXO DE ÁGUA PURA**

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

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica - Projeto e Fabricação**

**Orientador:  
Edison Gonçalves**

**São Paulo**

**1997**

**DEDALUS - Acervo - EPMN**



31600010148

**"O único lugar onde o sucesso vem antes do  
trabalho é no dicionário".**

**(Albert Einstein)**

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais,  
amigos incentivadores, que proporcionaram todo apoio necessário para  
minhas realizações pessoais. Considero-os um exemplo em minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Edison Gonçalves por sua orientação, motivação e apoio. Pessoa empreendedora, que ampliou minha visão sobre o que significa "fazer ciência".

Às colaborações dos amigos eng. Amaury C. Bastos Jr., eng. Juan Carlos Silvero, prof.Dr. Gilberto F.M. de Souza, prof.Dr. George C. Kachan, prof.Dr. Wolfgang K. Reick, prof.Dr. Miguel A. Buelta e prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Sonia B. Faldini, companheiros sempre presentes em todos os passos desse trabalho. Agradeço ao suporte da eng<sup>a</sup>. Luciana C. Penteado, Elaine Rosendo e Icimone Braga de Oliveira, Ailton Opssfelder e eng. César Flores, cujo apoio foi fundamental para a execução dos ensaios.

À Itaipu Binacional pela contribuição financeira ao Projeto de Pesquisa, bem como ao seu corpo técnico, que colaborou na obtenção e análise dos resultados.

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

## RESUMO

O cobre é empregado nas mais diversas aplicações da engenharia, sendo especificado em projetos devido às suas características favoráveis à transmissão de calor e à condução de energia elétrica. Entretanto, nas condições de operação de máquinas envolvendo este material, geralmente, tem-se um fluxo de um fluido atuando sobre o mesmo, gerando corrosão e desgaste, como é o caso em trocadores de calor e estatores de hidrogeradores, por exemplo.

Com a finalidade de estudar os efeitos da interação água/cobre, foi analisado o comportamento do cobre eletrolítico em água pura sob a presença de um fluxo, caracterizado como corrosão assistida por fluxo. Para tal, foi projetado e construído um aparato experimental, que gerou um fluxo controlado sobre o cobre.

Verificou-se a influência da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico, em condições conhecidas de pH, temperatura e teor de oxigênio da água pura. Gerando velocidades relativas entre o material e o meio de até 3 m/s, foi possível obter gráficos que demonstram a variação da taxa de corrosão em função do aumento da velocidade.

Os resultados obtidos foram comparados com dados de outros autores, confirmando as tendências apresentadas por eles, com relação à influência da velocidade do fluxo de água sobre a taxa de corrosão do cobre. Demonstrou-se, que para temperaturas mais elevadas a taxa de corrosão é maior. Obteve-se, porém, um aumento mais acentuado da taxa de corrosão em função da velocidade para temperaturas de ensaio mais baixas. De qualquer maneira, a influência da velocidade de fluxo foi constatada em todas as faixas de temperatura analisadas.



## ABSTRACT

Copper is been used in the most varied applications of engineering. It is specified in projects, because of its favorable characteristics of heat transfer and electric energy conduction. Thus, in field operations, equipments which utilize copper, usually, have a flow over it, and that causes corrosion and wastage, like it happens in heat exchangers and hidrogenerator stators, for example.

With the goal to understand the effects of the water/copper interaction, a analysis of the behavior of electrolytic copper in pure water was made, characterizing a flow assisted corrosion. That for, a special experimental aparatus was projected and constructed, which generated a controled flow over the copper.

The influence of the flow velocity over the corrosion rate of electrolytic copper was verified, at known conditions of pH, temperature and dissolved oxygen in pure water. Obtaining relative velocities between the material and the solution up to 3,0 m/s, it was possible to plot curves which demonstrate the variation of the corrosion rate as a function of the increase of velocity.

The obtained results were compared with data from other authors, confirming the presented tendencies related to the influence of the water flow velocity over the corrosion rate of copper. It was demonstrated, that for higher temperatures the corrosion rate is greater, but it was also obtained a major increase of the corrosion rate as a function of velocity at low test temperatures. But anyhow, the influence of flow velocity occures at all analyzed temperatures.

## SUMÁRIO

Dedicatória . . . . .	I
Agradecimentos . . . . .	II
Resumo . . . . .	III
Abstract . . . . .	IV
Sumário . . . . .	V
Lista de Figuras . . . . .	VII
Lista de Símbolos . . . . .	IX
<b>1. INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>01</b>
1.1 Considerações iniciais . . . . .	01
1.2 Objetivos . . . . .	02
1.3 Escopo do Trabalho . . . . .	03
<b>2. ASPECTOS DA CORROSÃO ASSISTIDA POR FLUXO . . . . .</b>	<b>05</b>
2.1 Corrosão em Meios Aquosos . . . . .	05
2.2 Aspectos Gerais da Corrosão Assistida por Fluxo . . . . .	07
<b>3. DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL. . . . .</b>	<b>18</b>
3.1 Modelagem do Escoamento em Discos Rotativos . . . . .	18
3.1.1 Fluxo em Discos Rotativos . . . . .	19
3.1.2 Obtenção do Regime de Fluxo: . . . . .	22
a) Condutores Ocos . . . . .	22
b) Sistema Rotativo . . . . .	23
3.2 Corpos de Prova Rotativos . . . . .	25
3.3 Aparelhagem Experimental . . . . .	29
3.4 Procedimento de Preparação dos Corpos de Prova . . . . .	36
3.5 Procedimento de Preparação de Ensaio . . . . .	38
3.6 Procedimento de Execução do Ensaio . . . . .	48
3.7 Procedimento de Finalização do Ensaio . . . . .	48



<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>54</b>
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>56</b>
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>69</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>

<b>APÊNDICE I</b>	<b>SISTEMA ROTATIVO DO ENSAIO DE CORROSÃO ASSISTIDA POR FLUXO (DESENHOS TÉCNICOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E DETALHES CONSTRUTIVOS DO CONJUNTO)</b>
-------------------	---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
2.1 Representação esquemática do mecanismo de CAF para determinados metais, [5]	08
2.2 Efeitos da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão, [10]	
09	
2.3 Variação do desprendimento instantâneo das taxas de cobre em função do tempo; $r_s$ = partículas de óxidos de cobre suspensos; $r_i$ = Cu dissolvido: (a) condutor oco limpo, água deaerada (< 35 ppb de $O_2$ ); (b) condutor oco sem limpeza, água deaerada (< 35 ppb de $O_2$ ); (c) condutor oco limpo, água aerada (aprox. 3000 ppb); (d) condutor oco sem limpeza, água aerada (aprox. 3000 ppb), [14]	13
2.4 Taxa de corrosão do cobre em função da velocidade de fluxo, [23]	14
2.5 Esquema do sistema com cilindros rotativos, [22]	16
2.6 Gráficos da variação da taxa de corrosão em função da velocidade de fluxo (a) e do número de Reynolds (b), [22]	17
3.1 Linhas de fluxo em um disco rotativo imerso em um meio amplo, [25].	19
3.2 Fluxo previsto na operação de dois discos rotativos coaxiais girando em sentidos opostos	21
3.3 Fluxo de água por um condutor oco retangular	22
3.4 Esquema da fixação do corpo de prova de cobre ao disco suporte de Teflon	26
3.5 Dimensões do corpo de prova do ensaio rotativo	27

3.6	Esquema do arranjo experimental, apresentando os motores de acionamento, o sistema de transmissão, os dois discos que giram em sentido contrário, a cuba de ensaio e a manta térmica	32
3.7	Desenho de montagem do sistema de transmissão do conjunto rotativo	40
3.8	Sistema rotativo montado na cuba de ensaio suportada pela manta térmica. Pode-se ver a alimentação de N <sub>2</sub> , o acoplamento do sistema de transmissão e mais ao fundo, o manômetro de Hg.	47
5.1	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35°C)	60
5.2	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 9,0 e 9,5 e temperatura de 55°C)	61
5.3	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma 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)	62
5.4	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 65°C)	63
5.5	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,5 e 9,0 e temperatura de 65°C)	64
5.6	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O <sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb, pH entre 7,5 e 8,0 e temperatura de 75°C).	65
5.7	Variação qualitativa da taxa de corrosão em função da velocidade, para diferentes temperaturas e a mesmas condições de pH e teor de oxigênio	59
5.8	Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com teor de O <sub>2</sub> dissolvido superior a 2500 ppb, pH entre 6,5 e 7,0 e temperatura de 35°C)	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

## SÍMBOLO

$V_m$	:	velocidade média de fluxo
$d_h$	:	diâmetro hidráulico
$Re$	:	Número de Reynolds
$\nu$	:	viscosidade dinâmica
$\omega$	:	velocidade angular
$A$	:	área
$R, r$	:	raio
$d$	:	diâmetro
$W$	:	perda de massa
$t$	:	tempo
$\Delta m$	:	variação da massa
$TC$	:	taxa de corrosão

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

O cobre é extensivamente utilizado em sistemas industriais por apresentar excelentes propriedades de condução de calor e de eletricidade, além de características favoráveis quanto à trabalhabilidade. Estes fatores favorecem o uso do cobre na construção de trocadores de calor e de geradores de energia elétrica. Este é o caso dos 18 hidrogeradores da usina de Itaipu, cujos enrolamentos dos estatores são constituídos de cobre eletrolítico.

Visando uma maior eficiência, a dissipação de calor destes hidrogeradores é feita através da circulação de água no interior de condutores ocos de cobre que compõem as barras estatóricas do enrolamento do estator. A água deste sistema possui características especiais, apresentando alta pureza e, portanto, um reduzido nível de contaminantes e baixa condutividade elétrica ( $<4\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Esta segunda característica é fundamental para o funcionamento do equipamento, por outro lado, o controle das características, desta denominada *água pura*, é de importância para o controle da corrosão interna dos condutores ocos.

O domínio do controle da corrosão, que assola o sistema de refrigeração do estator dos hidrogeradores tornou-se vital, pois ao longo dos últimos anos registrou-se uma série de paradas devido ao fenômeno de

corrosão/obstrução dos condutores e dos hidrogenadores, gerando graves prejuízos econômicos. Neste processo degradativo ocorre deposição de material proveniente da corrosão do cobre nas câmaras de entrada e saída de água das barras que constituem o barramento do enrolamento do estator, causando o entupimento do sistema de circulação de água.

## **1.2 Objetivos**

Com o objetivo de caracterizar o fenômeno da corrosão assistida por fluxo do cobre eletrolítico em água pura, foram realizados ensaios experimentais que visaram determinar a influência da velocidade de fluxo na corrosão do cobre a determinadas condições do meio.

Os ensaios foram executados sob condições pré-determinadas de pH, teor de oxigênio dissolvido, temperatura e a uma dada velocidade de fluxo relativa entre o cobre e o meio. Isto foi obtido construindo-se uma aparelhagem experimental específica para a realização de ensaios de corrosão assistida por fluxo. Assim, determinando a influência da velocidade de fluxo na corrosão do cobre eletrolítico, tem-se subsídios para avaliar sua importância no fenômeno de corrosão/obstrução de hidrogenadores.



### **1.3 Escopo do Trabalho**

Após breve introdução ao tema, apresenta-se no Capítulo 2, uma introdução teórica ilustrando, de uma forma geral, o fenômeno da corrosão assistida por fluxo. Em seguida, uma revisão bibliográfica sobre o tema é realizada.

No Capítulo 3 deste trabalho apresenta-se um estudo do escoamento de um fluido sobre discos rotativos, introduzindo-se os conceitos básicos utilizados para definir o dispositivo de ensaio. Os corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de corrosão são descritos a seguir. Na sequência, uma apresentação geral da aparelhagem experimental é realizada. É apresentada, ainda, a especificação detalhada dos ensaios de corrosão assistida por fluxo, contendo informações sobre os procedimentos de preparação dos corpos de prova, de preparação da água pura, bem como os procedimentos de montagem, execução, acompanhamento e finalização dos ensaios, incluindo o processo de cálculo da taxa de corrosão e as técnicas para monitoração do pH, da temperatura, do teor de  $O_2$  da água pura e da velocidade de fluxo. Apresenta-se, também, a sistemática utilizada para agrupar os dados gerados pelos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e no Capítulo 5 é realizada a análise dos mesmos, através de gráficos, mostrando a influência da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão a determinadas condições de ensaio. Compara-se alguns resultados com os extraídos da literatura e avalia-se a metodologia utilizada.

O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões geradas a partir dos resultados obtidos em laboratório, fazendo-se também recomendações para futura continuidade do programa de ensaios.

## **2. ASPECTOS DA CORROSÃO ASSISTIDA POR FLUXO**

### **2.1 Corrosão em Meios Aquosos**

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica pelo meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos, [1]. Esta deterioração induz alterações na durabilidade e desempenho de equipamentos e estruturas, gerando custos e a necessidade de manutenções não previstas.

Os fenômenos de corrosão de metais envolvem uma grande variedade de mecanismos, que podem ser reunidos em 4 grupos, [2]: a) corrosão em meios aquosos; b) oxidação e corrosão a quente; c) corrosão em meios orgânicos e d) corrosão por metais líquidos. Segundo WOLYNEC, [2], a corrosão em meios aquosos corresponde a aproximadamente 90% dos casos encontrados, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, no qual a água é o principal solvente.

A corrosão aquosa ocorre por meio de um processo eletroquímico, no qual é estabelecida uma diferença de potencial elétrico entre dois metais ou entre diferentes partes de um mesmo metal. Este processo apresenta necessariamente reações anódicas e catódicas.

As reações anódicas, ou reações de oxidação, ocorrem no ânodo da célula eletroquímica, isto é, no metal ou região do metal que corrói. Nesta

superfície a corrente deixa o metal. As principais reações anódicas encontradas são:

1) Dissolução do metal para formar cátions:

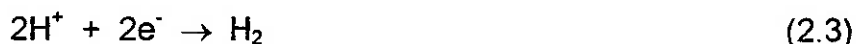


2) Dissolução do metal para formar produtos de corrosão sólidos:



As reações catódicas, ou reações de redução, ocorrem no cátodo da célula eletroquímica, isto é, no metal ou região do metal para onde a corrente se dirige. As principais reações catódicas encontradas são:

1) Evolução do hidrogênio (importante em soluções ácidas):



2) Redução do oxigênio (em soluções ácidas, *aeradas*):



3) Redução do oxigênio (em soluções básicas ou neutras, *aeradas*):



4) Redução de íons metálicos oxidantes:



5) Deposição de metal:



A ocorrência de mais de uma reação catódica ou anódica simultaneamente é um fato comumente observado na corrosão dos metais.

## **2.2 Aspectos Gerais da Corrosão Assistida por Fluxo**

O conceito de corrosão assistida por fluxo (CAF) caracteriza o efeito sinérgico entre o fluxo e a corrosão de um material metálico, sendo denominado, também, pelo termo corrosão-erosão por muitos autores, [3-5]. Esta ação erosiva de um fluido, contendo ou não partículas sólidas, sobre a corrosão foi classificada de diversas formas, considerando o grau de influência de um efeito sobre o outro, [6-8].

A CAF é influenciada, basicamente, por três grupos de fatores: taxa de fluxo (hidrodinâmica), material envolvido (composição) e meio (em geral, a química da água), [5]. Um esquema do mecanismo de CAF está ilustrado na Figura 2.1. Nele observa-se, como o metal reage com a água, formando uma camada superficial de óxido. Este, dissolve-se na água, e a taxa de remoção de metal é controlado pela taxa de difusão de metal dissolvido através da camada limite de água próximo à superfície. Esta difusão (ou transporte de massa) depende diretamente da concentração de partículas de metal solúvel na superfície do óxido e é inversamente proporcional à espessura da camada protetora. Assim, a diminuição da camada superficial, devido ao aumento da velocidade de fluxo ou por ocasião de turbulências locais, causa um incremento da taxa de corrosão.

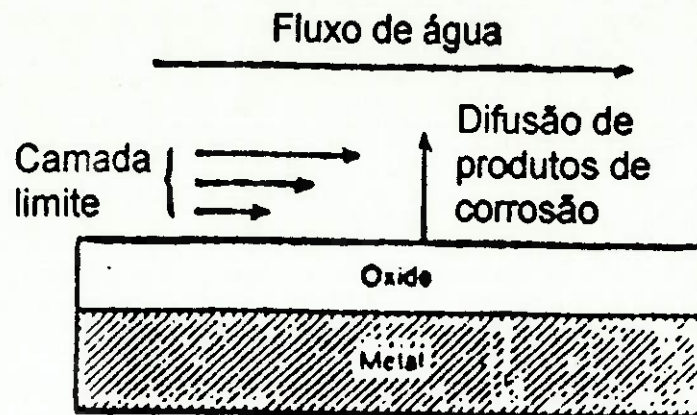


Figura 2.1 - Representação esquemática do mecanismo de CAF para determinados metais, [5].

A maioria dos metais e ligas são susceptíveis a danos por corrosão-erosão. Metais que são resistentes à corrosão, como aços inoxidáveis, ligas de alumínio e outras ligas que dependem de uma película superficial para sua proteção, também podem apresentar corrosão-erosão, quando a película é danificada ou gasta nos meios em escoamento. Uma vez que a corrosão está presente neste processo, fatores tais como disponibilidade de oxigênio, dissolução do metal, formação de produtos de corrosão sólidos e envolvidos neste fenômeno, também exercem uma influência similar quando da ocorrência combinada da corrosão assistida por fluxo, [9].

O efeito da velocidade sob a corrosão de um material depende de suas características e do meio em que ele se encontra. Três comportamentos básicos são observados quando um material é submetido à ação de um fluxo, [10], como pode ser observado na Figura 2.2



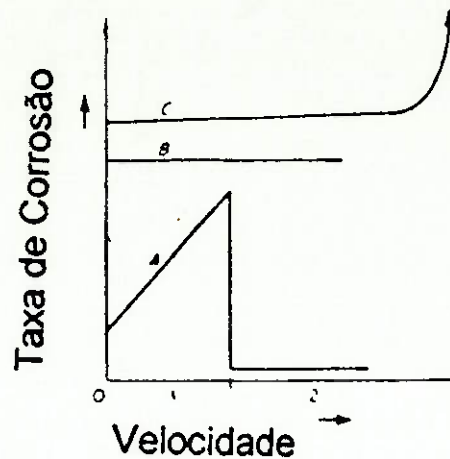


Figura 2.2 - Efeitos da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão: *Curva A* (seção 1) - processo com difusão catódica, onde ocorre aumento da taxa de corrosão com o aumento da velocidade; (seção 1,2) - processo com controle por difusão do metal, onde ocorre passivação a partir de uma certa velocidade; *curva B* - processo inerte à variação da velocidade de fluxo; *curva C* - processo com ataque intensivo após arrancamento de película protetora a determinada velocidade, [10].

Em processos controlados por polarização de ativação, a agitação e a velocidade de fluxo não tem efeito significativo, comportamento este esquematizado na curva B da Figura 2.2.

Por outro lado, quando a corrosão está submetida a um processo de difusão catódica, o aumento da velocidade gera um aumento da taxa de corrosão, como demonstrado na curva A, seção 1 (Figura 2.2). Este efeito ocorre, geralmente, quando um oxidante em pequena quantidade está presente, como no caso de oxigênio dissolvido em ácidos ou água.

Se o processo está sob controle da difusão e o metal é facilmente passivado, então o comportamento correspondente à curva A, seções 1 e 2 (Figura 2.2), será observado, pois com o aumento da agitação o metal se

submeterá de uma situação ativa para uma passiva. Materiais facilmente passiváveis, como o aço inoxidável e o titânio, freqüentemente possuem maior resistência à corrosão quando submetidos a uma velocidade alta do meio.

Um outro tipo de comportamento, sob condições críticas e para determinados materiais, pode apresentar a influência da velocidade como demonstrado na curva C (Figura 2.2). Nestes casos, há a formação de um filme passivo, que é arrancado a partir de uma dada velocidade.

O fenômeno de transferência de massa associado à corrosão assistida por fluxo (CAF) está ocorrendo em várias plantas de geração de energia, ocasionando falhas funcionais em hidrogenadores e reatores nucleares, [11-15]. O mesmo problema foi encontrado em trocadores de calor de cobre, [16,17], onde a ação de um fluxo de água gerou corrosão e deterioração dos equipamentos.

A CAF depende do material em estudo e das características do meio em que ele se encontra. As principais variáveis envolvidas são o pH e o teor de  $O_2$  dissolvido na água, além da temperatura de trabalho e da velocidade e geometria do fluxo, [3,4,11,18]. Tendo em vista este grande universo de variáveis, é simples perceber a característica empírica que apresenta o estudo da CAF.

HEITZ, [19], correlaciona a corrosão induzida por fluxo a quatro fenômenos de controle: o transporte de massa, o transporte de fase, a erosão e a cavitação. No caso da CAF do cobre em um meio desprovido de partículas e sob um fluxo monofásico, o fenômeno encontrado é a corrosão controlada por transporte de massa. Nela, basicamente, os íons e moléculas atingem a

superfície do metal por difusão molecular como resultado de um gradiente de concentração. Como o coeficiente de difusão em líquidos é baixo, a reação resultante em soluções estagnadas é muito reduzida. Quando os reagentes são transportados por convecção (devido a fluxo laminar ou turbulento), a quantidade de matéria que chega à superfície é significativamente aumentada e a taxa de reação cresce consideravelmente.

Em seus estudos junto à estatal francesa EDF, REMY e BOUCHACOURT. [4], apontam os principais fatores que influenciam a CAF. Em uma análise teórica sobre a CAF em aços carbono, os autores demonstram a influência do pH, a partir do diagrama de potenciais. Eles apresentam, também, a taxa de concentração de oxigênio dissolvido no meio como sendo influente, porém com dados de natureza empírica. Outros fatores descritos no trabalho foram a importância da temperatura, da composição do material e a influência da transferência de massa. Neste último fator, indicou-se o número adimensional de Sherwood como sendo o número característico da transferência de massa.

MOLIÈRE, VERDIER e LEYMONIE realizaram diversas pesquisas com cobre em água pura, [14,18]. Em um estudo aplicando técnicas eletroquímicas, [18], os autores avaliaram a influência do pH e do teor de oxigênio dissolvido na água sobre a corrosão do cobre em água pura. Eles apresentam a faixa de pH de 9 a 9,5 como sendo mais apropriada para minimizar a taxa de corrosão. Em ensaios com assistência de fluxo verificou-se a formação de uma camada protetora de óxido de cobre após 100 horas de ensaio, que se demonstrou completamente formada após 200 h. Em outro

trabalho, MOLIÈRE et al., [14] estudaram o comportamento do cobre empregado na construção de um turbo gerador resfriado a água. Eles afirmam, que “Os conhecimentos gerais do comportamento de cobre em água pura são muito limitados e não proporcionam a compreensão do mecanismo envolvido na obstrução parcial dos condutores ociosos do enrolamento do estator”. Realizou-se, portanto, um conjunto de ensaios verificando a taxa de consumo de cobre. Mediu-se o cobre iônico, acrescentando o cobre das partículas (óxidos) suspensas na água e retidas no filtro do sistema de ensaios. Juntamente com o cobre que forma a película passiva sobre o metal da barra, obteve-se a taxa total consumida ao longo do tempo. Os gráficos da Figura 2.3 demonstram alguns resultados dos ensaios da referência, [14].

Os experimentos foram realizados em condições muito similares às utilizadas no circuito de refrigeração de Itaipu (a 70°C, pHs básicos, teores de O<sub>2</sub> entre 20 e 3000 ppb e com velocidade de fluxo sobre o cobre de 1,1 m/s). Através destes ensaios os autores concluíram que em água deaerada a formação de partículas de cobre ligado é maior que em água aerada.

Em um fluxo monofásico, os danos mecânicos são geralmente restringidos à camada superficial e não há danos no metal base, [19]. Aderência, coesão e dureza das camadas superficiais determinam a estabilidade mecânica. Assim, a natureza e as propriedades da película passiva influenciam até certo ponto a velocidade de ataque, [8]. Uma película compacta, densa, aderente e contínua, por exemplo, fornece melhor proteção que uma que é facilmente removida por meios mecânicos.

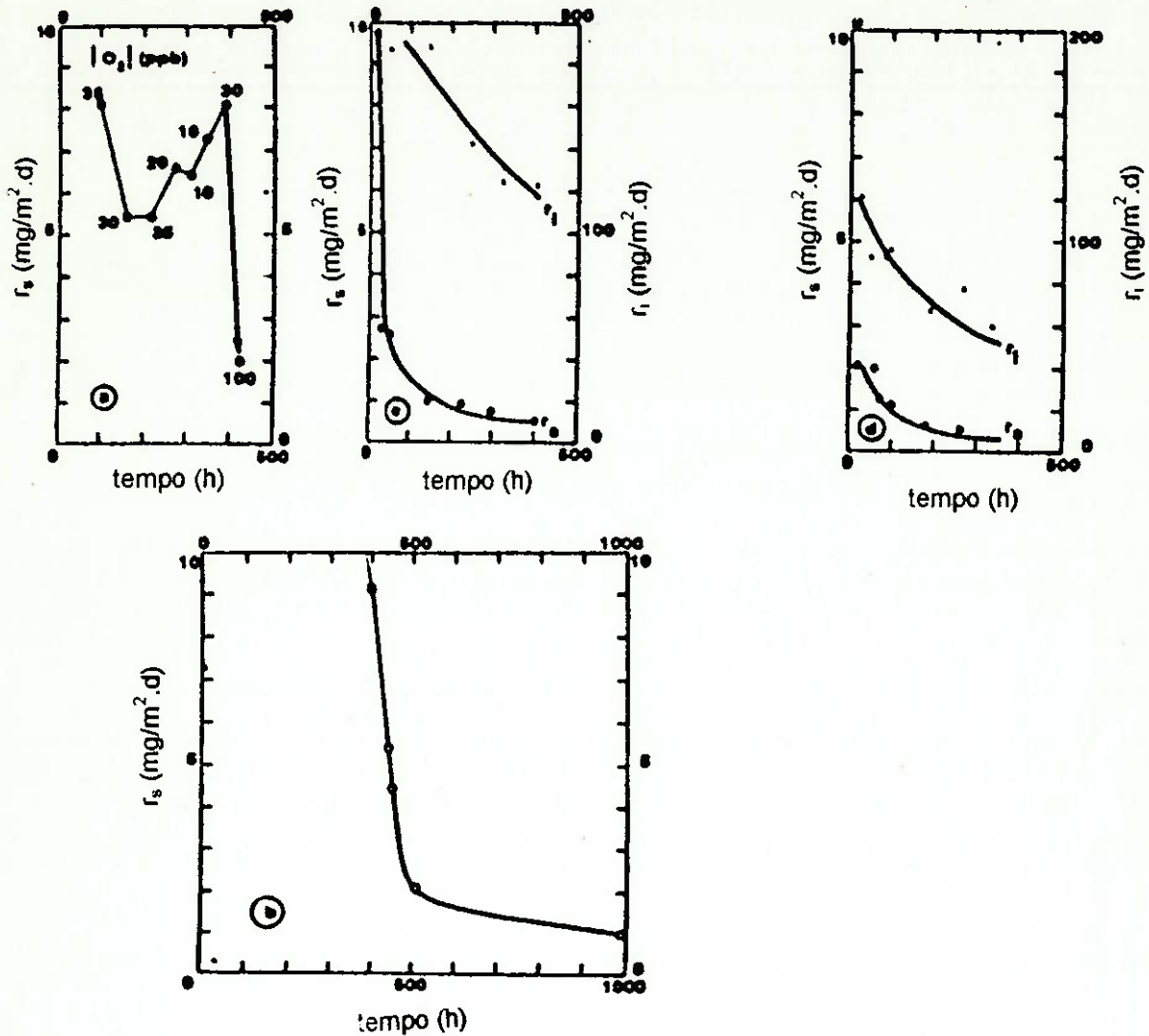


Figura 2.3 - Variação do desprendimento instantâneo das taxas de cobre em função do tempo;  $r_s$  = partículas de óxidos de cobre suspensos;  $r_i$  = Cu dissolvido: (a) condutor oco limpo, água deaerada (< 35 ppb de  $O_2$ ); (b) condutor oco sem limpeza, água deaerada (< 35 ppb de  $O_2$ ); (c) condutor oco limpo, água aerada (aprox. 3000 ppb); (d) condutor oco sem limpeza, água aerada (aprox. 3000 ppb), [14].

Foram desenvolvidos diversos sistemas para simular e estudar o fenômeno de CAF, [3,18,20-22]. Nestas análises, reproduziu-se as características do meio e as condições de operação dos equipamentos que estavam submetidos à CAF. O tipo de sistema que melhor reproduz os circuitos de refrigeração de reatores e hidrogeradores são os denominados "circuitos em *loop*", [3,11,12]. Nestes aparatos experimentais tem-se em geral



um circuito fechado, onde uma bomba gera a circulação do fluido pelos corpos de prova.

Por mais de 10 anos, ensaios em circuito experimental foram realizados pela *Brown Boveri*, onde condições similares às estudadas no presente trabalho foram utilizadas, [23,24]. SEIPP apresenta dados levantados durante estes experimentos, mostrando a influência do fluxo sobre a corrosão do cobre. Em uma água de baixa condutividade ( $K < 0,2 \mu\text{S/cm}$ ), com um pH ligeiramente básico (7-8), a uma temperatura oscilando entre  $40^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$  e um teor de oxigênio dissolvido entre 1 e 20 ppb, foram obtidos os pontos para plotar o gráfico da Figura 2.4. O autor mostra que para um aumento da velocidade de fluxo de 1,5 m/s para 5 m/s a taxa de corrosão tem um incremento de fator 3. Ele aponta, que mesmo com baixos teores de  $\text{O}_2$  na água, uma provável camada de  $\text{Cu}_2\text{O}$  se forma e é arrancada em velocidades altas.

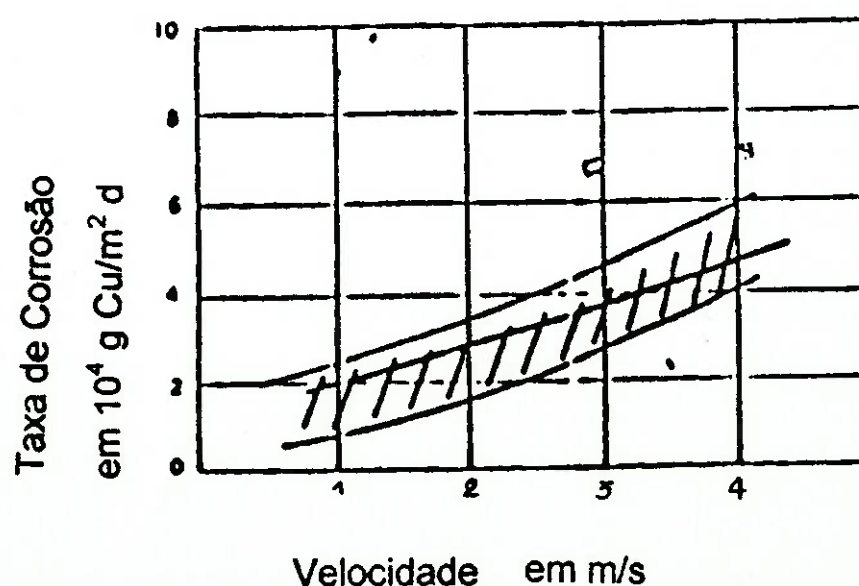


Figura 2.4 - Taxa de corrosão do cobre em função da velocidade de fluxo, [23].



Por outro lado, estes circuitos em loop são de construção onerosa e geralmente são utilizados para ensaios de longa duração. Portanto, desenvolveu-se outros métodos para simular o fluxo sobre um determinado material, como é o caso dos corpos de prova rotativos, [13,20]. Apesar de não simularem com a mesma perfeição, como é o caso dos circuitos em loop o que ocorre na realidade, estes aparelhos rotativos apresentam-se capazes de caracterizar qualitativamente o fenômeno da CAF, [20].

Em seu trabalho, SCHMITT et al, [20], comparam os resultados experimentais de ensaios realizados em circuitos tipo loop com ensaios onde se utilizou corpos de prova rotativos. Eles apontam que apesar do método de ensaio em loop aparentemente simular melhor o fluxo em sistemas tubulares, a aparelhagem é muito sofisticada e os ensaios consomem muito tempo e são muito onerosos. Por outro lado, os ensaios rotativos, necessitam de menores investimentos e são facilmente reproduzidos. Eles são comparavelmente simples de serem conduzidos. Porém, a intensidade de fluxo pode apresentar-se maior que nos circuitos em loop. Os autores afirmam, que a comparação dos resultados dos dois ensaios não pode ser realizada diretamente.

Os pesquisadores CHEN, MOCARRI e MACDONALD realizaram uma série de ensaios em circuito experimental, [22], analisando o fenômeno de CAF em corpos de prova tubulares e anulares. Simultaneamente foram efetuados ensaios em um sistema rotativo de ensaio, onde corpos de prova tubulares indicaram a taxa de corrosão quando rotacionados em água. Um esquema ilustrando a aparelhagem de ensaio utilizada encontra-se na Figura 2.5.

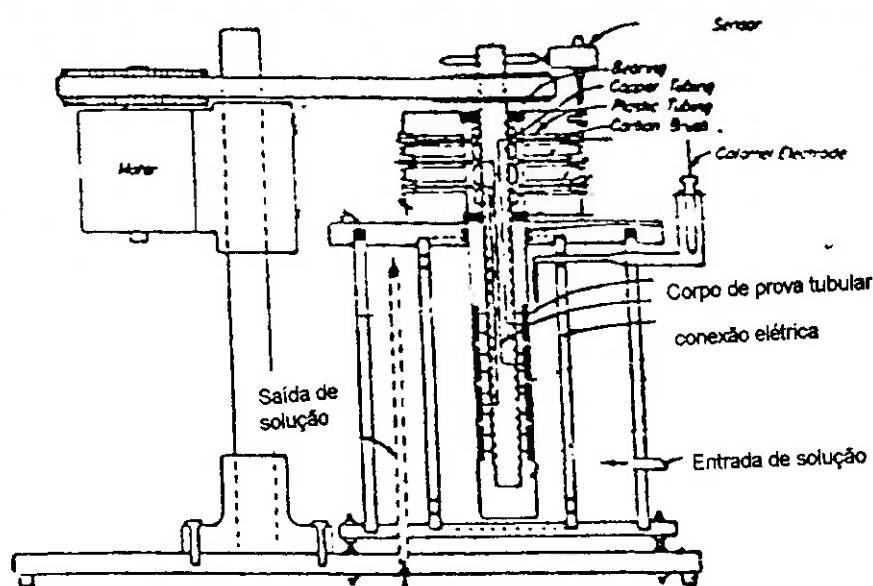


Figura 2.5 - Esquema do sistema com cilindros rotativos, [22].

O material analisado pelos autores foi uma liga com 90% de cobre e, portanto, apresentava características similares ao do cobre eletrolítico. A obtenção da taxa de corrosão a partir do ensaio rotativo foi realizada por técnicas eletroquímicas e através de ensaios gravimétricos (registrando perda de massa). As duas técnicas apresentaram coerência, já que os resultados obtidos pelas técnicas eletroquímicas não variaram muito em relação aos resultados medidos pela técnica gravimétrica. CHEN et al. demonstram que no início do ensaio há um pico de corrosão (nas primeiras 15h aproximadamente),

o qual deve ser considerado na comparação das obtenções das taxas de corrosão pelas diferentes metodologias.

Em gráficos de taxa de corrosão versus velocidade, os autores, [22], apresentam o comportamento da CAF em função da velocidade de fluxo e do regime de fluxo. Na Figura 2.6 estão reproduzidos os resultados dos ensaios supracitados, mostrando o comportamento da taxa de corrosão para corpos de prova anulares e tubulares em circuito em loop e para corpos de prova do ensaio rotativo. Os pontos demonstram uma influência da velocidade de fluxo crescente e similar para os três casos.

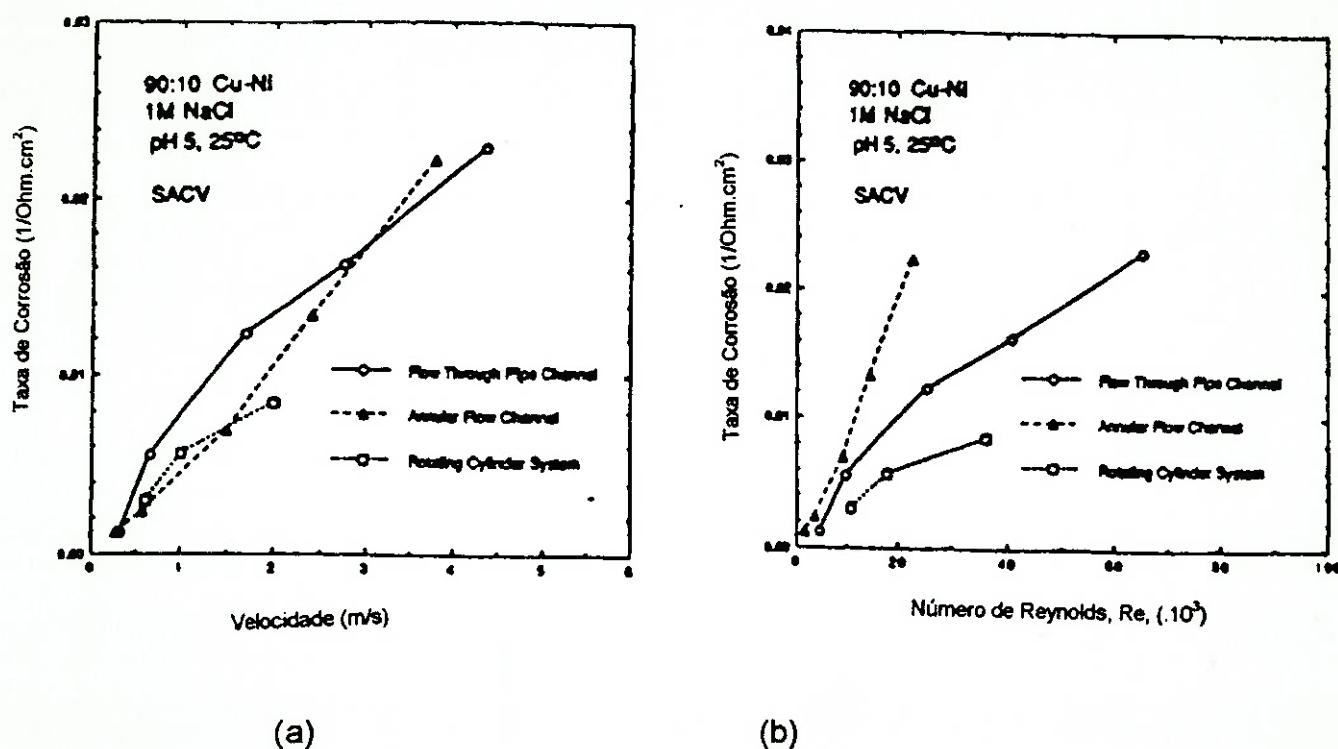


Figura 2.6 - Gráficos da variação da taxa de corrosão em função da velocidade de fluxo (a) e do número de Reynolds (b), [22].

### **3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Para realizar os ensaios experimentais de corrosão assistida por fluxo, desenvolveu-se uma aparelhagem experimental que simulou as condições de fluxo nos condutores ocios de seção retangular dos estatores dos hidrogeradores de Itaipu. Para desenvolver um equipamento específico para este fim, estudou-se primeiramente uma modelagem proposta para tal simulação.

#### **3.1 Modelagem do Escoamento em Discos Rotativos**

Propôs-se criar um fluxo de água sobre o cobre eletrolítico a partir de dois discos rotativos paralelos, que giravam em sentidos opostos. Estudou-se, então, o tipo de fluxo que ocorre em discos rotativos, obtendo-se em seguida o regime de fluxo dos mesmos, comparando-o ao regime apresentado pelo fluxo que atravessa um condutor de seção retangular.

### 3.1.1 Fluxo em Discos Rotativos

Camadas limites oblíquas e fluxos secundários aparecem em corpos rotativos devido ao cisalhamento na superfície em movimento e à força centrífuga associada à camada limite rotativa, [25].

De acordo com DAILY e HARLEMAN, [25], o fluxo em torno de um disco rotativo, em um meio amplo, é o caso tridimensional de camadas limites oblíquas com simetria axial. O fluido próximo ao disco sofre um movimento de rotação devido ao atrito, sendo, simultaneamente, lançado para a extremidade do disco por ação centrífuga. Continuidade é garantida por um fluxo axial, que repõem o fluido ejetado radialmente. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o fluxo de um fluido sobre um disco rotativo.

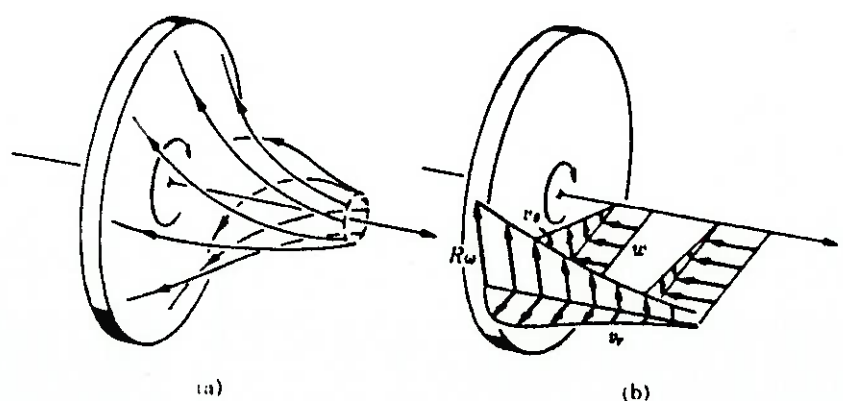


Figura 3.1 - Linhas de fluxo em um disco rotativo imerso em um meio amplo (a) e componentes da velocidade (b), [25].

Na Figura 3.1 (b) observa-se o perfil de velocidades, que é gerado em um disco rotativo. Com exceção da região próxima à borda, a velocidade pontual aumenta proporcionalmente ao distanciamento do eixo de rotação, apresentando-se tangencial à direção de rotação.

Em uma situação onde 2 discos rotativos coaxiais paralelos giram em sentidos opostos e a uma determinada distância, obtém-se um regime de fluxo como demonstrado na Figura 3.2. Esta situação de operação proposta visa simular em uma cuba de dimensões reduzidas o fluxo de água em um tubo de seção retangular. Desta forma, distanciando os discos em um valor próximo às dimensões encontradas nos condutores ocos, tem-se, a uma determinada distância do centro dos discos rotativos, uma faixa que apresenta uma velocidade de fluxo similar à encontrada nos mesmos. Assim, obtém-se um fluxo que assemelha-se ao fluxo encontrado nas superfícies superior e inferior do condutor oco de cobre (ver Figura 3.3 para visualizar esta comparação).

Uma distância mínima entre a extremidade do disco rotativo e a parede da cuba deve ser mantida, para evitar turbulências excessivas sobre a superfície dos discos. Além disto, deve-se inserir o material estudado (corpo de prova) no disco a uma certa distância da borda, evitando-se o efeito de borda. Desta forma, o fluxo sobre o corpo de prova de cobre, que ocupa uma pequena faixa radial do disco rotativo, é constante e homogêneo.



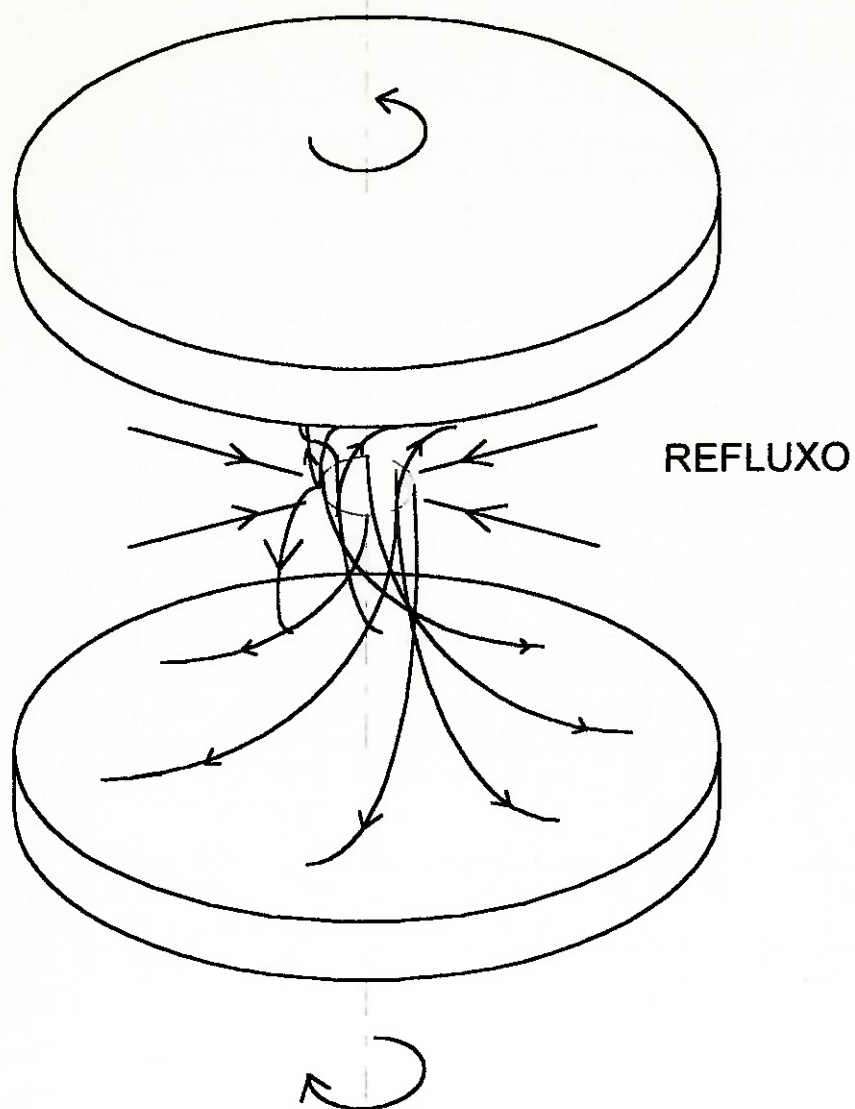


Figura 3.2 - Fluxo previsto na operação de dois discos rotativos coaxiais girando em sentidos opostos.

### 3.1.2 Obtenção do Regime de Fluxo em: Condutores Ocos e Sistema Rotativo

#### a) Regime de Fluxo em Condutores Ocos Retangulares

Para determinar as condições de fluxo em **condutores de seção retangular** utilizou-se as formulações determinadas no manual de engenharia "Hütte", [26]. A Figura 3.3 mostra esquematicamente o fluxo de água por um condutor oco retangular e visa facilitar a visualização do fenômeno.

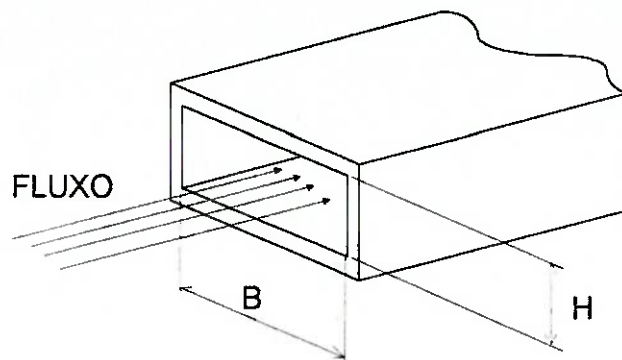


Figura 3.3 - Fluxo de água por um condutor oco retangular.

A partir da obtenção do adimensional de Reynolds ( $Re$ ) e do diâmetro hidráulico equivalente ( $d_h$ ) utilizou-se as seguintes formulações retiradas da referência, [26]:

$$Re = \frac{V_m \cdot d_h}{\nu} \quad (3.1)$$

$$d_h = \frac{2 \cdot H}{(1 + \mu_b)} \quad (3.2)$$

Sabendo-se que as dimensões internas do condutor são:

$$B = 9 \text{ mm}^* \quad \text{e} \quad H = 2,4 \text{ mm}^*,$$

e assumindo que a viscosidade dinâmica da água para as temperaturas de operação está em torno de, [26]:

$$\nu = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

e que a velocidade de fluxo de projeto no sistema de refrigeração dos hidrogeradores é aproximada:

$$V_m = 2,1 \text{ m/s}^*$$

Obteve-se, portanto, o seguinte valor:

$$Re = 9,95 \cdot 10^4$$

Este valor caracteriza o fluxo como sendo turbulento, de acordo com a referência, [26], na qual se aponta regimes turbulentos para sistemas tubulares com  $Re > 0,3 \cdot 10^4$ .

(\*valores obtidos junto ao corpo técnico da usina de Itaipu)

#### b) Regime de Fluxo nos Discos do Sistema Rotativo

Por outro lado, a formulação para determinar o número de Reynolds e o referente regime de fluxo em **discos rotativos** foi obtida junto à referência, [25].

De [25] temos:

$$\text{Re} = \frac{R^2 \cdot \omega}{\nu} \quad (3.3)$$

Assim, utilizando os valores do raio de referência do sistema rotativo e as velocidades angulares ( $\omega$ ) relativos às velocidades de fluxo no corpo de prova calculadas no item 3.2, obteve-se os seguintes valores aproximados do número de Reynolds:

$$\text{Re} = 21 \cdot 10^4 \quad (\text{para } 3 \text{ m/s})$$

$$14 \cdot 10^4 \quad (\text{para } 2 \text{ m/s})$$

$$7 \cdot 10^4 \quad (\text{para } 1 \text{ m/s})$$

Obteve-se, a partir destes procedimentos de cálculo, que um regime turbulento ocorre nos discos rotativos. Tal constatação pode ser verificada observando-se os valores do adimensional de Reynolds obtidos, que juntamente com a análise do perfil de velocidades apresentado configuram um regime de fluxo similar entre os discos rotativos e os condutores ociosos retangulares.

Isto vem a consolidar a possibilidade de se obter resultados conclusivos a partir dos dados obtidos nos ensaios rotativos, relacionando-os ao funcionamento dos condutores de seção retangular dos hidrogeradores de Itaipu.

### 3.2 Corpos de Prova Rotativos

Foram ensaiados corpos de prova de cobre eletrolítico SAE CA110, retirados de uma chapa de  $\frac{1}{8}$ " , cujas especificações, como limite de resistência, dureza, composição química e outros, constam na Tabela 3.1. Trata-se de corpos de prova de forma anelar com dimensões nominais de 112,0 mm e 93,8 mm de diâmetro externo e interno respectivamente. Este formato vem de acordo com a modelagem proposta e discutida no item 3.1, pois proporciona um perfil de velocidades sobre o corpo de prova com pouca variação, tendo-se velocidades de valor próximo entre as encontradas perto da dimensão interna e da dimensão externa do anel.

Tabela 3.1 Especificação do cobre eletrolítico utilizado nos ensaios e composição química do mesmo.

material	lim. resistência	escoamento	dureza	condutividade
SAE CA 110	32 Kgf/mm <sup>2</sup>	27 Kgf/mm <sup>2</sup>	90 HB	98% IACS

Composição Química Nominal (%)								
Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Al	Si	P	Cu
0,01	0,005	0,01	0,0044	0,0079	0,0026	0,0003	0,0055	99,95

Baseou-se o ensaio de corrosão assistida por fluxo nos quesitos da norma técnica ASTM G31, [27], que prevê, basicamente, ensaios de corrosão por imersão e obtenção da taxa de corrosão pelo método gravimétrico. Nesta metodologia, registra-se a perda de massa em um determinado período de tempo, relacionando-a à área superficial envolvida. Este procedimento foi seguido na obtenção dos corpos de prova, respeitando-se a área de cobre

exposta ao meio ( $5900 \text{ mm}^2$  em 2500 ml de solução) indicado na norma.

Os corpos de prova são fixados ao sistema de transmissão com o auxílio de discos suportes de Teflon, nos quais são embutidos os anéis de cobre. O conjunto é fixado em discos de aço inox, que por sua vez são presos ao sistema de transmissão. Detalhes operacionais e construtivos do sistema rotativo como um todo são descritos no item 3.3 e no *Apêndice I* desta dissertação.

A fixação dos corpos de prova no suporte de Teflon é garantida por interferência e em alguns casos reforçada pelo uso de fita Teflon. O suporte é fixado ao disco rotativo por 3 parafusos, também de aço inox. Com este procedimento, tem-se apenas uma superfície do anel de cobre exposta ao fluxo, como mostra a Figura 3.4.

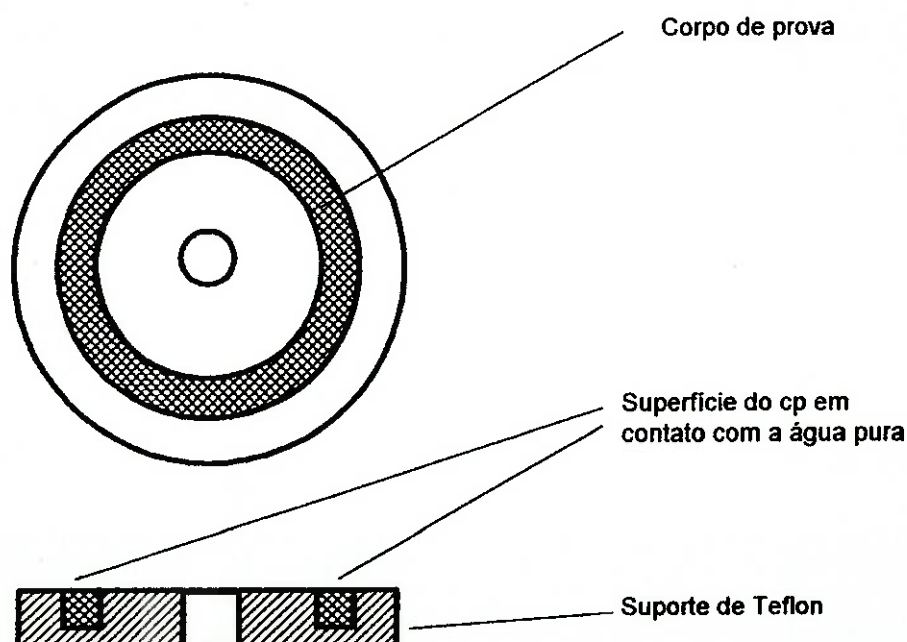


Figura 3.4 - Esquema da fixação do corpo de prova de cobre ao disco suporte de Teflon.



O **cálculo da velocidade** equivalente no disco do sistema rotativo é realizado, com o intuito de se relacionar uma velocidade média ( $v_m$ ) à velocidade angular ( $\omega$ ) do corpo de prova anular de cobre. Desta forma, associa-se esta velocidade média de fluxo à taxa de corrosão obtida.

Obtém-se a velocidade média, ponderando a velocidade local ( $v$ ) em função do incremento de área relativo, dividindo-a pela área total de cobre exposta. Este cálculo está representado na seguinte integral:

$$v_m = \frac{\int v \cdot dA}{A} \quad (3.4)$$

O corpo de prova anelar esquematizado na Figura 3.5 mostra as dimensões do mesmo, bem como, visa facilitar a compreensão dos cálculos apresentados.

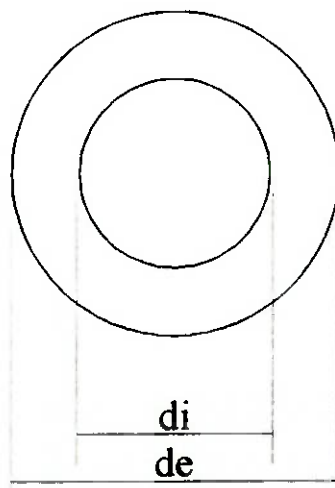


Figura 3.5 - Dimensões do corpo de prova do ensaio rotativo.

Assim, a partir das seguintes relações:

$$r = d/2 \quad (3.5)$$

$$dA = 2.\pi.r.dr \quad (3.6)$$

$$v = \omega.r \quad (3.7)$$

Calcula-se a velocidade média do ensaio:

$$v_m = \frac{\int_{r_i}^{r_e} \omega.r.2.\pi.r.dr}{A}$$

$$v_m = \frac{2.\pi.\omega}{A} \int_{r_i}^{r_e} r^2 dr$$

$$v_m = \frac{2.\pi.\omega}{A} \left( \frac{r_e^3 - r_i^3}{3} \right)$$

e, sendo a área do anel:

$$A = \pi.(r_e^2 - r_i^2) \quad (3.8)$$

Obtém-se finalmente a relação desejada:

$$\boxed{v_m = \frac{2.\omega}{3} \left( \frac{r_e^3 - r_i^3}{r_e^2 - r_i^2} \right)} \quad (3.9)$$

Desta forma, a partir das dimensões  $r_e$  e  $r_i$  do corpo de prova e medindo-se a rotação do eixo do sistema de transmissão (ver item 3.3), obtém-se a velocidade instantânea média entre o cobre e a água.

### 3.3 Aparelhagem Experimental

Para execução do ensaio de corrosão assistida por fluxo (CAF), utiliza-se, fundamentalmente, um sistema de transmissão que fornece uma velocidade angular aos corpos de prova, uma estrutura metálica que suporta este sistema, além de um recipiente de vidro (cuba), com formato esférico, que possuindo uma tampa especial garante a estanqueidade do sistema.

A parte da aparelhagem experimental denominada conjunto rotativo tem como função básica criar um movimento relativo entre os corpos de prova de ensaio e o meio em que eles se encontram, gerando-se desta forma um fluxo sobre o cobre em estudo. O **conjunto rotativo** é composto basicamente dos seguintes subsistemas:

- i) **estrutura**: É uma estrutura metálica constituída de perfis em "L" aparafusados, apresentando duas chapas laterais para fixação dos motores elétricos e três bandejas de suporte do sistema de transmissão. O esquema de montagem e as principais dimensões da estrutura constam no *Apêndice I*.

- ii) **motores elétricos:** São motores trifásicos de 220 V, que possuem uma potência nominal de 0,16 cv a 820 rpm, sendo confeccionados conforme a norma NBR 7094. Os dois motores são afixados em chapas laterais da estrutura e em sua ponta de eixo são acopladas polias, que a partir de uma correia transmitem rotação e torque ao sistema de transmissão. Os tamanhos das polias são variados, podendo transmitir velocidades angulares diferenciadas.
- iii) **transmissão:** O sistema que transmite a rotação desejada aos corpos de prova é composto por um eixo e um tubo coaxiais, ambos possuem uma polia que está ligada a um dos motores e dois mancais, que fixam o conjunto às bandejas de suporte do sistema. Na extremidade inferior do eixo e do tubo, imersos na cuba, encontram-se os disco de aço inox, nos quais são afixados os suportes de corpo de prova. Desenhos técnicos detalhados da transmissão encontram-se no *Apêndice I*.

No interior do recipiente de vidro, ou **cuba**, é armazenado um volume de 2500 ml de água pura, com condições pré-definidas de pH, teor de O<sub>2</sub> e condutividade, sendo injetado nitrogênio no interior da cuba, a uma sobrepressão de aproximadamente 4 KPa (aproximadamente 0,04 bar), formando uma atmosfera protetora, que evita a eventual contaminação do interior da cuba com ar atmosférico. A cuba de vidro é colocada no interior de

uma manta térmica, a qual é empregada para aquecer a água pura, mantendo-a sob níveis de temperatura pré-fixados durante a execução dos ensaios.

A **tampa da cuba** possui sete orifícios, sendo um orifício central, com diâmetro nominal de 40 mm, e seis orifícios periféricos, localizados em torno do orifício central, com diâmetro de 10 mm. Através do orifício central o conjunto de transmissão é inserido na cuba. Um mancal vedador dotado de dois retentores de silicone garante a estanquidade da cuba. Os orifícios periféricos são utilizados da seguintes forma:

- i) Dois orifícios são empregados para injeção de nitrogênio no interior da cuba. Nestes orifícios são instalados duas hastes de vidro, com torneiras na sua extremidade superior, as quais controlam a vazão de nitrogênio para o interior da cuba. Uma das hastes é longa o suficiente para poder ser mergulhada na água pura contida no recipiente;
- ii) Um orifício é utilizado para instalação de um termômetro de mercúrio, com escala 0 °C a 100 °C, e precisão de  $\pm 1$  °C, o qual é empregado na monitoração da temperatura da água pura;
- iii) Em um orifício é instalado um condensador de bolas;
- iv) Dois outros orifícios permanecem fechados, sendo considerados como elementos auxiliares, para o caso de necessidade de utilização

de qualquer outro equipamento de controle no interior da cuba.

Durante a operação do ensaio uma das hastes de vidro com torneira do tipo "stop and flow", é acoplada à rede de nitrogênio, enquanto a outra é ligada a um manômetro de mercúrio. As ligações são feitas com mangueiras de silicone.

Uma melhor visualização do equipamento de ensaio pode ser encontrado no esquema da Figura 3.6, onde se observa os motores elétricos que estão acoplados ao sistema de transmissão, além dos dois discos que giram em sentido contrário, imersos na cuba de ensaio, suportada pela manta térmica.

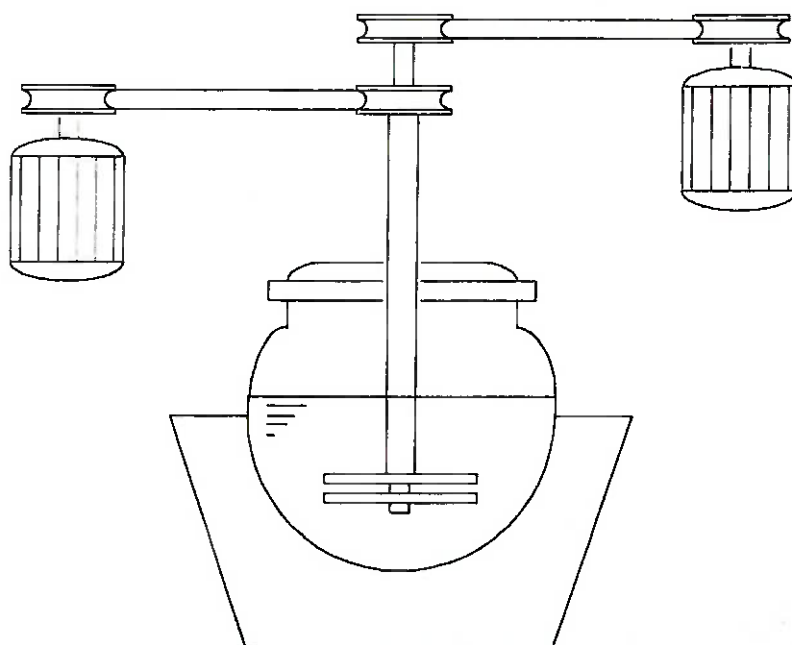


Figura 3.6 - Esquema do arranjo experimental, apresentando os motores de acionamento, o sistema de transmissão, os dois discos que giram em sentido contrário, a cuba de ensaio e a manta térmica.



Para monitorar a velocidade aplicada ao corpo de prova, mede-se durante os ensaios a rotação do eixo, utilizando um tacômetro digital da marca *Takotron*, modelo TD-100.

Os demais equipamentos empregados para medição, como o medidor de pH da água pura, [28], e o da concentração de oxigênio dissolvido, [29], são descritos brevemente a seguir:

- ii) **Medidor de pH:** equipamento ORION Modelo 290A, [26], 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, ou com pouca concentração iônica, gerando uma baixa atividade, 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);

- iii) **Medidor de Concentração de Oxigênio:** equipamento ORBISPHERE Modelo 26060, [29], para registro da concentração de  $O_2$  dissolvido na água pura. Este é basicamente constituído por um sensor e por um registrador/processador. No caso dos ensaios de corrosão assistida por fluxo realizados, 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  $O_2$ : 0,1 ppb a 20 ppm;
  - \* temperatura de operação, com compensação automática:  $0^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$   
(acima de  $80^{\circ}C$  podem ocorrer desvios de compensação);
  - \* fluxo mínimo na membrana: 70 ml/min.

Além dos equipamentos já mencionados, que tem vinculação direta com a execução e monitoração dos ensaios de CAF, existem alguns equipamentos que foram empregados na preparação e avaliação destes ensaios, tais como Sistema de Produção de Água Pura, Dessecador de Corpos de Prova, Balança Analítica e Politriz.

O **Sistema de Produção de Água Pura** foi empregado na produção da água deionizada utilizada nos ensaios de corrosão. O sistema é constituído de uma seqüência de preparação, onde um destilador (FISATOM Modelo 525), ligado a um filtro, produz uma água livre de elementos contaminantes. Esta

água ainda apresenta condutividade elevada, superior a 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para poder ser caracterizada como água pura. Assim, ocorre a retirada de íons, com a finalidade de redução de condutividade, através de um deionizador (Sistema de Troca Iônica ELGA Elgastat UHQ-PS), constituído por módulos de purificação que contém carvão ativo para remoção de compostos orgânicos dissolvidos e resinas de troca iônica.

Uma **Balança Analítica** foi utilizada na medição da massa dos corpos de prova (balança analítica OHAUS Modelo AP250-D), antes e após a execução do ensaio de CAF. 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. As especificações básicas deste equipamento são:

\* faixa de medição: 0 a 210 g.

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

de 52 g até 210 g ... 0,1 mg

\* auto-calibração.

\* compensação automática de vibrações.

Adicionalmente aos 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 corrosão assistida por fluxo. O aparelho utilizado foi uma politriz metalográfica STRUERS DPU-10.

### **3.4 Procedimentos de Preparação dos Corpos de Prova**

Os corpos de prova anulares de cobre eletrolítico descritos no capítulo 3 são obtidos por torneamento e devem ser submetidos por um procedimento de limpeza superficial, antes de serem ensaiados.

Este procedimento tem como objetivo a remoção de impurezas e irregularidades da superfície dos corpos de prova, as quais poderiam influenciar o 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", [30]. A seqüência de limpeza adotada é a seguinte:

- i) Lixar os corpos de prova com lixa d'água, empregando,

sequencialmente, lixas com granulometria 180, 220, 400 e 600  $\mu\text{m}$ . Este lixamento é executado com o auxílio da politriz STRUERS, modelo DPU - 10, descrita anteriormente. Deve-se ressaltar que apenas as faces superior e inferior dos corpos de prova são polidas, devido à dificuldade de polimento de superfícies curvas, que é o caso da borda interna e externa do anel de cobre em questão.

- ii) Lavar os corpos de prova com água destilada e deionizada.
  
- iii) Efetuar limpeza química (para garantir a limpeza das bordas que não foram lixadas), imergindo os corpos de prova em solução de ácido clorídrico de acordo com as seguintes condições:
  - a) 500 ml de ácido clorídrico p.a. (HCl, peso específico 1,19 );
  - b) 1000 ml de água deionizada ou destilada.
  - c) temperatura ambiente.
  - d) 2 minutos de tempo de imersão.
  
- iv) Lavar os corpos de prova com água pura e álcool etílico absoluto p.a. (para análise).
  
- v) Secar cuidadosamente os corpos de prova, empregando lenços de papel.

- vi) Estocar os corpos por aproximadamente 1h em dessecador.
  
- vii) Medir os corpos de prova, registrando seus diâmetros internos, os diâmetros externos e suas respectivas massas.
  
- viii) Embutir os anéis de cobre nos suportes de Teflon. Este procedimento requer muito cuidado para que não se danifique ou contamine o corpo de prova e, simultaneamente, deve-se garantir a total fixação do mesmo. Em algumas situações é recomendada a utilização de fita Teflon na colocação dos corpos.
  
- ix) Fixação dos suportes nos discos de aço inox.

Observação: Os itens vii, viii e ix devem ser executados apenas momentos antes do ensaio, evitando a exposição prolongada do corpo de prova ao meio ambiente.

### **3.5 Procedimentos de Preparação do Ensaio**

A preparação do ensaio de corrosão assistida por fluxo, exige a execução de uma série de atividades, tais como lavagem da aparelhagem experimental, preparação da água pura, medição de grandezas relacionadas à caracterização da água pura, preparação do sistema de transmissão, etc, as



quais devem ser realizadas de acordo com uma seqüência e conforme procedimentos pré-estabelecidos. Neste item apresenta-se a seqüência de preparação destes ensaios, lembrando que alguns procedimentos de preparação podem ser efetuados simultaneamente.

A montagem e **preparação do conjunto de transmissão** deve ser efetuado objetivando a não contaminação do meio e garantindo o ótimo funcionamento do sistema durante o ensaio. Para tal, utiliza-se a seguinte seqüência de preparação (a Figura 3.7 visa facilitar a compreensão da montagem):

- a. Limpar todas as peças da transmissão, eliminando resquícios de graxa com papel toalha e limpando as peças de contato com a água de ensaio com álcool etílico.
- b. Montar o tubo (peça 2) com seus mancais (peça 5) e sua polia (peça 6), encaixando o mancal vedador devidamente lubrificado com graxa de silicone (lubrificante inerte ao meio, não influenciando a corrosão numa eventual contaminação).
- c. Montar o eixo (peça 1) com seus mancais (peça 3) e sua polia (peça 4).
- d. Engraxar com graxa de silicone os O-rings de Viton (peça 10) embutidos no tubo. Este é o único ponto de contato entre o tubo e o eixo. A lubrificação correta é essencial para o bom funcionamento do sistema dinâmico.

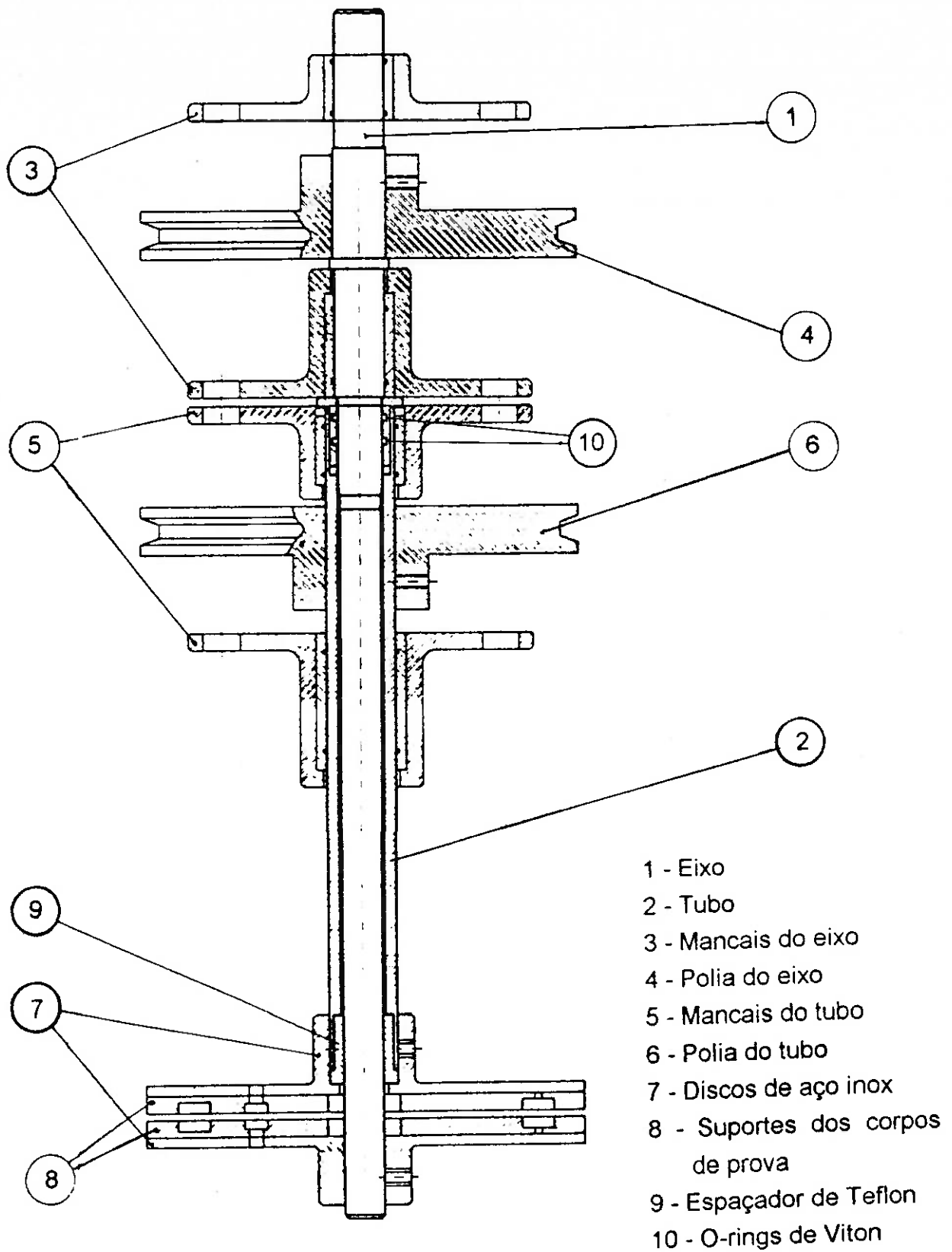


Figura 3.8 - Desenho de montagem do sistema de transmissão do conjunto rotativo.

- e. Encaixar o eixo no tubo, retirando eventuais excessos de graxa de silicone.
- f. Fixar o espaçador de Teflon (peça 9) na ponta do conjunto eixo-tubo e efetuar a última limpeza com álcool etílico nas peças que terão contato com o meio de ensaio.
- g. Fixar a tampa do ensaio, com todos os equipamentos encaixados, no mancal vedador.
- h. Fixar os discos de aço inox (peça 7) com os corpos de prova superior e inferior, no tubo e no eixo respectivamente.

Para a **obtenção da água pura** e preparação do meio em que ocorrerá o ensaio, utiliza-se a seguinte seqüência:

- 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 enxágüe com água corrente. Posteriormente são feitos mais três enxágües das peças, porém empregando-se água destilada e deionizada, a fim de remover impurezas que foram introduzidas pelo enxágüe 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. Neste caso, utiliza-se uma tampa sobressalente para montar o conjunto, pois a tampa que servirá o ensaio é fixada no tubo da transmissão através do mancal vedador. Todos os equipamentos que são montados na tampa de ensaio já devem ser instalados nessa fase de preparação do ensaio. A tampa sobressalente tem todos os orifícios tampados, com exceção de um, onde se encontra instalado um termômetro.
  
- IV. Pesar o conjunto recipiente esférico + tampa sobressalente + manta térmica em uma balança digital, com capacidade para 10 kg de carga. Anotar o valor.
  
- V. Zerar a balança digital com o conjunto recipiente + tampa sobressalente + manta posicionado sobre a mesma. Adicionar água filtrada, destilada e deionizada (obtida a partir dos equipamentos descritos no item 3.3, página 34), recém produzida, através do orifício central da tampa. A adição é realizada até a balança marcar 3200 g, correspondendo a 3200 ml de água.
  
- VI. Fechar o orifício lateral com a sua tampa.

- VII. Transferir o conjunto cuba+manta para a bancada de ensaios.
- VIII. Conectar a manta térmica à rede elétrica, iniciando o processo de aquecimento da água.
- IX. Aguardar a água pura atingir a temperatura especificada para o ensaio.
- X. Com o auxílio de uma bureta graduada de 50 ml, adicionar solução de NaOH 0,1 M à água pura, através do orifício central da tampa. A solução de NaOH é adicionado gota a gota, sendo que o número de gotas adicionado é função do pH desejado para a água pura.
- XI. Inserir o conjunto de transmissão + tampa do ensaio + corpos de prova na cuba, fixando os mancais e alinhando o sistema.
- XII. Conectar o manômetro à haste mais comprida e a mangueira de silicone da rede de N<sub>2</sub> à haste menor, regulando a pressão da atmosfera protetora.
- XIII. Interligar os motores com a transmissão através das correias de seção circular.
- XIV. Ligar o sistema rotativo, caracterizando o início do ensaio.

XV. Após aproximadamente 10 minutos de funcionamento, fechar a torneira da haste longa bloqueando a passagem de nitrogênio para o manômetro. Desconectar a mangueira de silicone do manômetro.

XVI. Imergir a haste longa na água pura, conectando a mangueira de silicone entre a haste longa e a câmara de entrada do medidor de concentração do oxigênio.

XVII. Medir a concentração de oxigênio, no início do ensaio, utilizando-se o equipamento Orbisphere apresentado na referência [29], 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 1000ml, 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. Regula-se a abertura da torneira.
- 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 100 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.

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

XVII. 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.

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.

Da mesma maneira, utiliza-se a água descartada pela saída da câmara de fluxo para registrar o pH da água pura no início do ensaio. Coleta-se 100 ml desta em um becker de plástico, onde é imerso o eletrodo medidor de pH.

O conjunto rotativo montado na cuba e com todas as suas ligações efetuadas pode ser observado na foto da Figura 3.8.

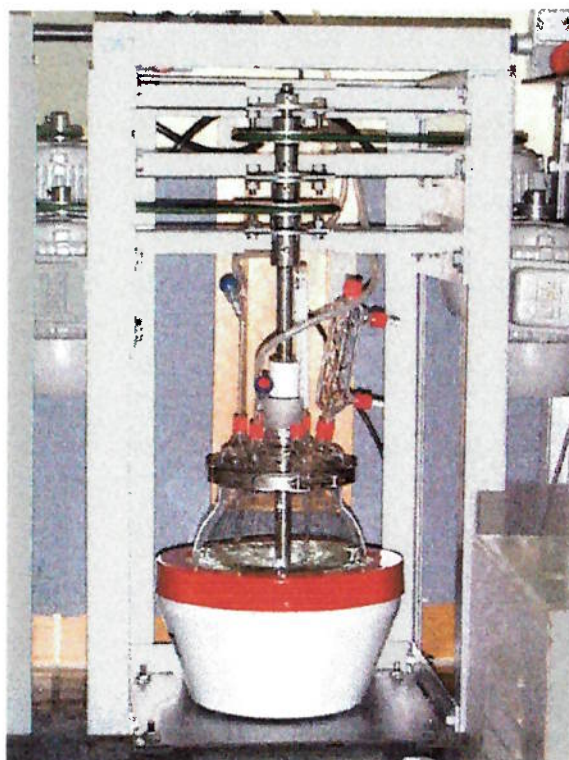


Figura 3.8 - Sistema rotativo montado na cuba de ensaio suportada pela manta térmica. Pode-se ver a alimentação de  $N_2$ , o acoplamento do sistema de transmissão e, mais ao fundo, o manômetro de Hg.

### **3.6 Procedimento de Execução dos Ensaios**

Durante os ensaios, monitoram-se a temperatura da água, a rotação do conjunto de transmissão 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.

A rotação do ensaio é monitorada com a mesma frequência da temperatura, sendo medida com um tacômetro conforme descrito no item 3.3, página 33. Com estas medições, obtém-se um valor médio de velocidade relativa entre o cobre do corpo de prova e o meio. O cálculo deste valor foi descrito no capítulo 3 do presente trabalho.

O nível do volume de água é acompanhado, observando-se perdas por evaporação menores que 1%, mesmo em ensaios com temperaturas elevadas. Além disso, realizam-se análises visuais da solução, com o intuito de notar possíveis presenças de precipitados (óxidos) no fundo do recipiente de ensaio ou contaminações de qualquer espécie.

### **3.7 Procedimento de Finalização dos Ensaios**

Ao final do ensaio, realizam-se novamente as medições de

concentração de O<sub>2</sub>, pH, condutividade da solução, antes de retirar os corpos de prova da cuba. O final do ensaio é caracterizado pelo desligamento dos motores elétricos, realizando-se, portanto, as medições supracitadas com o sistema parado.

Após desligar o sistema rotativo e desconectar as correias por motivos de segurança, fecha-se a torneira de saída do N<sub>2</sub> da cuba, que está ligada, através de uma mangueira de silicone, ao manômetro de mercúrio. Acopla-se, então, à essa torneira uma mangueira de silicone curta, que fará a união da cuba à câmara de fluxo, para se medir a concentração de O<sub>2</sub> da água pura, com o mesmo procedimento descrito em XVII do item 3.5. Efetuam-se, aqui também, uma coleta de amostra de 100 ml em um becker de plástico de 150 ml para efetuar a leitura de pH. Esta é realizada com um equipamento, especificado em, [28]. Para efetuá-la, deve-se informar previamente ao equipamento a temperatura da amostra, para haver uma compensação da temperatura e o equipamento fornecer uma leitura referenciada a 25 °C.

Após efetuadas as leituras, fecha-se a válvula de inox da linha de N<sub>2</sub>, cortando a entrada do gás na cuba. O sistema de transmissão é, então, desaparafusado das bandejas e, abrindo-se a tampa, o conjunto de transmissão + tampa + corpos de prova é retirado da cuba. Os discos de aço inox são desacoplados da transmissão e os corpos de prova retirados do disco suporte.

Em todos os ensaios os corpos de prova foram analisados visualmente, a fim de verificar o tipo de deposição superficial, a sua possível não uniformidade, coloração, eventual presença de pite, abrasão ou qualquer outra

observação que possa ser utilizada na análise do resultado do ensaio. A condição da água de ensaio e a eventual presença de partículas de qualquer natureza é verificada com o mesmo rigor.

Os corpos de prova são secados com um lenço de papel e colocados no dessecador por 1 h, da forma em que foram retirados da solução. Pesam-se, então, os corpos de prova em uma balança analítica, com fundo de escala de 0,01mg, fornecendo a massa do corpo com os óxidos aderidos na superfície. Em seguida, retira-se a camada superficial oxidada, através de uma limpeza química. Essa limpeza é efetuada da seguinte forma:

1. Imergir os corpos de prova em solução de ácido clorídrico, suspensos por um fio de Teflon, de acordo com as seguintes condições:
  - a) 500 ml de ácido clorídrico p.a. (HCl, peso específico 1,19 ).
  - b) 1000ml de água deionizada ou destilada.
  - c) temperatura ambiente.
  - d) 2 minutos de tempo de imersão.
2. Lavar os corpos de prova com água destilada e deionizada e em seguida com álcool etílico p.a..
3. Secar os corpos de prova com lenços de papel.
4. Manter os corpos de prova em dessecador por 1 h.

Após a realização desse procedimento, uma nova pesagem é realizada. Finalmente, tendo a variação da massa registrada, efetua-se o cálculo da taxa de corrosão, que é feita segundo a expressão retirada da norma, [27]:

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{k \cdot W}{A \cdot t} (\text{mg/cm}^2 \cdot \text{ano}) \quad (3.10)$$

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).

Tendo obtido os valores da taxa de corrosão e os parâmetros dos ensaios, destacando-se a quantidade de oxigênio dissolvido, o pH, a temperatura e a velocidade de fluxo, agrupou-se os dados em faixas de valores pré-determinadas.

As faixas de temperatura analisadas foram divididas em 5, sendo elas: 35°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), 45°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), 55°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), 65°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) e 75°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ).

Os valores de pH, por sua vez variaram entre 6,5 e 9,5, caracterizando três faixas principais analisadas, sendo elas:  $6,5 \leq \text{pH} < 7,0$ ;  $8,0 \leq \text{pH} < 8,5$ ; e  $8,5 \leq \text{pH} < 9,0$ . A largura de cada faixa, de 0,5 pH, foi escolhida em função da precisão do equipamento de medição de pH, como um todo, bem como da hipótese de que a taxa de corrosão é pouco influenciada por uma variação de



pH, dentro da ordem de magnitude dessas faixas.

As faixas de concentração de oxigênio dissolvido na água pura, que caracterizaram os ensaios de CAF foram:

- 1)  $100 < \text{teor de } O_2 \leq 500 \text{ ppb}$
- 2)  $500 < \text{teor de } O_2 \leq 1.200 \text{ ppb}$
- 3)  $1200 \text{ ppb} < \text{teor de } O_2 \leq 2500 \text{ ppb}$
- 4)  $\text{teor de } O_2 > 2500 \text{ ppb}$  (totalmente aerado)

As velocidades de fluxo ensaiadas compreendem basicamente 4 valores fixos, determinados pelas características construtivas do sistema rotativo. Além de realizar-se ensaios a 1, 2 e 3 m/s, com variação máxima de 0,1 m/s, efetuou-se experimentos com velocidade nula, utilizando o mesmo equipamento, porém em situação estática. Este procedimento possibilitou uma avaliação da metodologia de ensaio, direcionando a análise dos resultados experimentais.

As faixas de pH e teor de oxigênio dissolvido foram definidas a partir da análise da curva de variação da taxa de corrosão do cobre em função da temperatura, como descrito no Relatório Técnico No. 04/311 do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da USP, [31]. Este trabalho serviu como base para a realização dos ensaios rotativos, fornecendo os valores das taxas de corrosão para o cobre eletrolítico sem assistência de fluxo.

Dentre os ensaios realizados, alguns foram eliminados por um dos motivos abaixo citados:

- i) Descontrole durante o ensaio, com relação à manutenção da atmosfera de nitrogênio dentro da cuba.
- ii) Diferença dos valores de taxa de corrosão entre os dois corpos de prova imersos na cuba ser maior que 10% em relação à média, segundo norma ASTM G31-96, [27].
- iii) Variação entre os valores de pH inicial e final maior que 0,5.
- iv) Análise visual dos corpos de prova após o ensaio, registrando eventuais evidências de contato físico entre os corpos de prova durante os ensaios, caracterizando abrasão.
- v) Desprendimento dos corpos de prova do disco de Teflon.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Realizou-se um número de ensaios que produziram uma variedade de resultados, a fim de se esclarecer o comportamento do fenômeno de corrosão assistida por fluxo do cobre em função da variação da velocidade de fluxo a condições específicas da água pura. Para tal, optou-se pela variação destes parâmetros de controle da água por faixas pré-determinadas de temperatura, pH e concentração de oxigênio, como descrito no capítulo anterior.

Os dados obtidos foram agrupados em 4 tabelas conforme a faixa de  $O_2$  dissolvido apresentada. Nas Tabelas 4.1 a 4.4 estão reproduzidos os resultados dos ensaios considerados válidos, os quais foram utilizados para obtenção dos gráficos do capítulo seguinte. Nelas encontra-se o pH, a temperatura de ensaio e a velocidade de fluxo, além da taxa de corrosão calculada conforme descrito no capítulo 3.

Tabela 4.1 - Dados dos ensaios rotativos com teor de oxigênio dissolvido entre 500 e 1200 ppb.

Ensaio	pH	Temperatura (°C)	velocidade (m/s)	Taxa Corr. (mg/cm <sup>2</sup> .ano)
39	8,2	56,7	3,04	<b>8,4</b>
47	8,4	53,4	1,00	<b>15,6</b>
19	8,4	54,8	0,00	<b>13,2</b>
22	8,6	64,0	2,00	<b>7,1</b>

Tabela 4.2 - Dados dos ensaios rotativos com teor de oxigênio dissolvido entre 1200 e 2500 ppb.

Ensaio	pH	Temperatura (°C)	velocidade (m/s)	Taxa Corr. (mg/cm <sup>2</sup> .ano)
27	7,9	75,0	1,03	<b>43,2</b>
15	8,2	46,1	2,01	<b>10,2</b>

Tabela 4.3 - Dados dos ensaios rotativos com teor de oxigênio dissolvido entre 100 e 500 ppb.

Ensaio	pH	Temperatura (°C)	velocidade (m/s)	Taxa Corr. (mg/cm <sup>2</sup> .ano)
25	8,2	64,4	3,01	<b>14,9</b>
13	8,2	39,9	2,99	<b>13,3</b>
12	8,2	39,7	2,02	<b>10,3</b>
10	8,3	35,7	0,00	<b>9,7</b>
43	8,4	65,6	3,05	<b>15,5</b>
11	8,4	38,7	1,01	<b>6,4</b>
24	8,5	65,5	1,03	<b>19,1</b>
22	8,6	64,0	2,00	<b>7,1</b>
33	8,6	53,7	0,00	<b>10,2</b>
46	8,7	64,7	1,97	<b>15,2</b>
14	8,7	44,3	0,00	<b>9,8</b>
8	8,9	52,2	0,00	<b>11,8</b>
42	9,0	54,3	2,50	<b>4,2</b>
44	9,0	52,5	2,02	<b>2,9</b>
18	9,1	54,0	2,00	<b>3,6</b>

Tabela 4.4 - Dados dos ensaios rotativos com teor de oxigênio dissolvido superior a 2500 ppb (sistema aerado).

Ensaio	pH	Temperatura (°C)	velocidade (m/s)	Taxa Corr. (mg/cm <sup>2</sup> .ano)
1	6,7	35,8	2,99	<b>14,2</b>
3	6,7	33,9	2,00	<b>16,0</b>
4	6,7	34,9	0,98	<b>13,0</b>
5	6,7	32,9	0,00	<b>11,1</b>
32	6,8	44,1	0,99	<b>30,0</b>
31	7,6	45,3	2,01	<b>22,1</b>
16	8,1	44,9	1,02	<b>18,2</b>
7	8,2	54,1	1,01	<b>17,8</b>

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como em alguns casos a infiltração de água por entre as superfícies do corpo de prova embutido e o suporte de Teflon foi inevitável, foi necessário fazer-se um ajuste da taxa de corrosão obtida. Este ajuste mostrou-se válido para os ensaios com teores de oxigênio dissolvido inferior a 2000 ppb (água parcialmente aerada) e foi comprovado a partir da análise dos ensaio de velocidade nula. A formulação de ajuste está mostrada a seguir.

Assumindo que a perda de massa medida no ensaio ( $\Delta m_t$ ) é resultado da soma da transferência de massa da superfície exposta ( $\Delta m_e$ ) e da superfície não exposta ( $\Delta m_n$ ), pode-se escrever a seguinte equação:

$$\Delta m_t = \Delta m_e + \Delta m_n \quad (5.1)$$

Dividindo-se, então, a equação pelo tempo de ensaio ( $t = 7$  dias) e pela área exposta ( $A_e = 2950 \text{ mm}^2$ ), obtém-se:

$$\frac{\Delta m_t}{A_e \cdot t} = \frac{\Delta m_e}{A_e \cdot t} + \frac{\Delta m_n}{A_n \cdot t} \times \left( \frac{A_n}{A_e} \right) \quad (5.2)$$

$$TC_t = TC_e + \frac{\Delta m_n}{A_n \cdot t} \times \left( \frac{A_n}{A_e} \right) \quad (5.3)$$

onde:  $TC_t$  - taxa de corrosão total (resultado do ensaio)

$TC_e$  - taxa de corrosão da área exposta (procurada)

$A_n$  - área não exposta

Chamando ainda,  $TC_n = \Delta m_n / A_n \cdot t$ , como a taxa de corrosão da área não exposta, vem:

$$TC_t = TC_e + TC_n \times \left( \frac{A_n}{A_e} \right) \quad (5.4)$$

Assim, assumindo-se que a corrosão da superfície não exposta ( $TC_n$ ) é do tipo convencional, ou seja, não há influência do fluxo, substitui-se essa taxa, pela taxa de corrosão convencional ( $TC_c$ ) correspondente. Sabendo-se, ainda, que a relação da área não exposta pela área exposta ( $A_n/A_e$ ) é 1,7, obtém-se, finalmente:

$$TC_e = TC_t - 1,7 \cdot TC_c \quad (5.5)$$

A Tabela 5.1 apresenta os dados dos ensaios de velocidade nula com os respectivos ajustes da taxa de corrosão.

Tabela 5.1 - Conjunto de dados com velocidade nula, apresentando a taxa de corrosão obtida no ensaio ( $TC_t$ ), a taxa de corrosão do ensaio convencional respectivo ( $TC_c$ ) e a taxa de corrosão ajustada para a área exposta, conforme equação 5.5 ( $TC_e$ ).

ensaio	pH	Temp. (°C)	oxigênio (ppb)	$TC_t$ (mg/cm <sup>2</sup> .a)	$TC_c$ (mg/cm <sup>2</sup> .a)	$TC_e$ (mg/cm <sup>2</sup> .a)
8	8.9	55	235	11,8	4,3	4,5
14	8.7	45	110	9,8	3,0	4,7
19	8.4	55	840	13,2	4,9	4,9
33	8.6	55	250	10,2	4,3	2,9

Como é possível observar na Tabela 5.1, os valores da taxa de corrosão ajustada ( $TC_e$ ) são coerentes com os obtidos dos ensaios convencionais ( $TC_c$ ), [1].

Assim, utilizando a metodologia acima descrita, construíram-se os gráficos das Figuras 5.1 a 5.6, mostrando a influência da velocidade de fluxo na taxa de corrosão do cobre ( $TC_e$ ), para as faixas selecionadas. As curvas com apenas poucos pontos demonstram uma tendência, não sendo porém, uma comprovação com embasamento estatístico.

Referindo-se às Figuras 6.1 a 6.6, verifica-se que a taxa de corrosão para todas as condições de ensaio aumenta praticamente de forma linear, com o aumento da velocidade. Nos gráficos utilizou-se o método dos mínimos quadrados para obter as curvas e para tal um *soft wear* chamado STATISTICA foi empregado.

Nota-se que para temperaturas mais elevadas, a partir de aproximadamente 55 °C, as taxas de corrosão apresentam uma menor variação, isto é, o aumento da taxa de corrosão é menor para um mesmo incremento na velocidade em uma temperatura mais alta. Portanto, também



aqui, para altas temperaturas, estas passaram a ser mandatórias sobre o fenômeno de corrosão. Qualitativamente, essas conclusões são apresentadas na Figura 5.7.

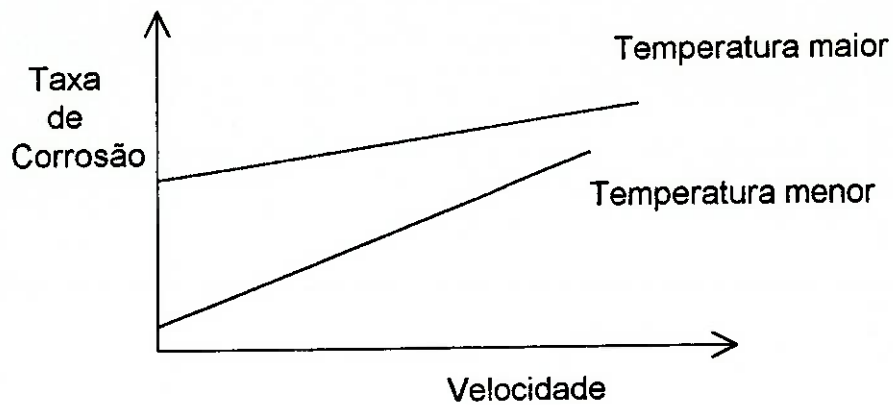


Figura 5.7 - Variação qualitativa da taxa de corrosão em função da velocidade, para diferentes temperaturas e a mesmas condições de pH e teor de oxigênio.

Taxa de Corrosão (8,0 < pH < 8,5; teor de O<sub>2</sub> entre 100-500ppb; T=35oC)

$$y = 1.24 + 3.09 * x$$

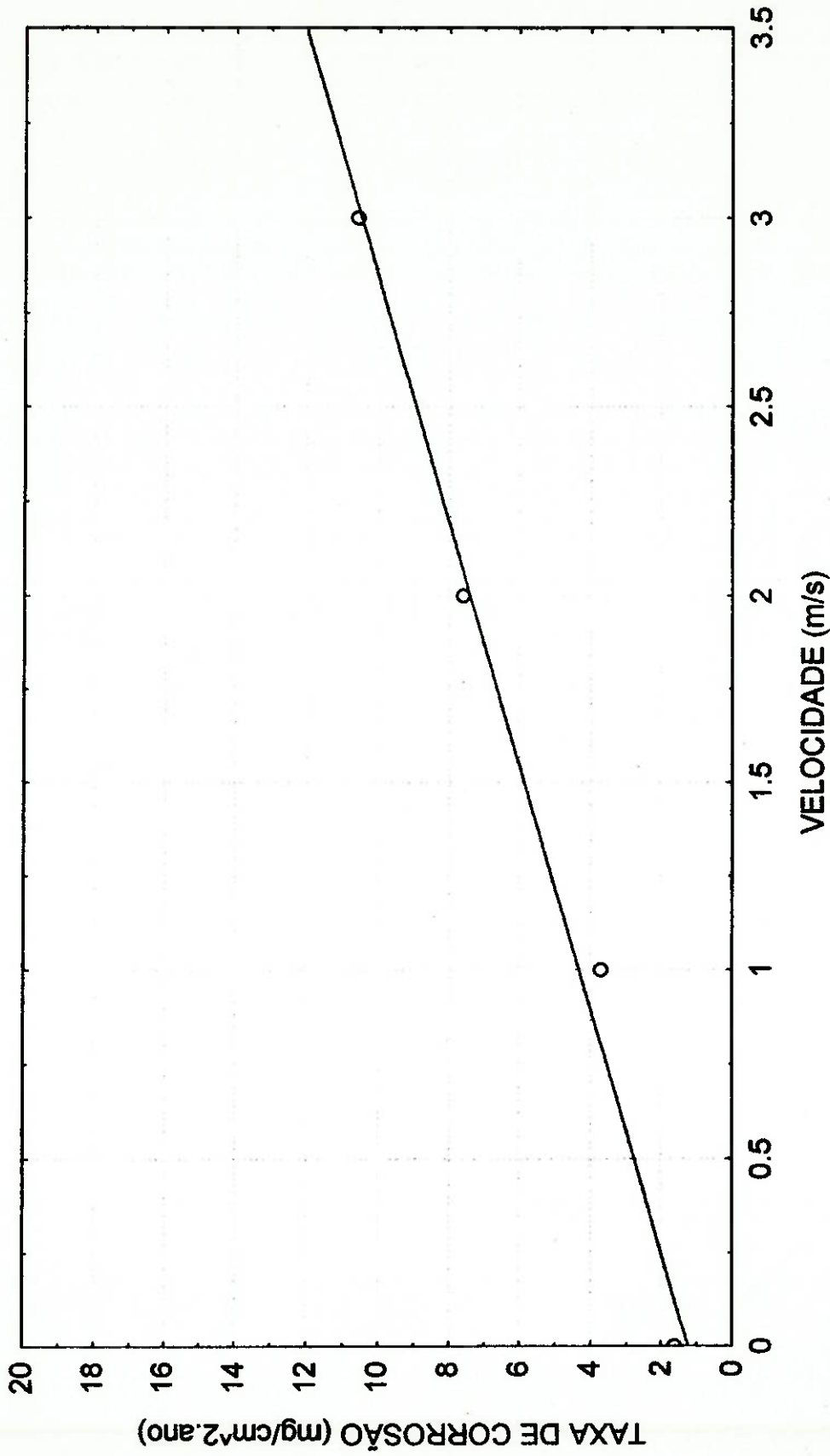


FIGURA 5.1 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 35°C)

Taxa de Corrosão (9,0<pH<9,5; teor de O2 entre 100-500ppb; T=55oC)

$$y = 3.095 + 0.232 * x$$

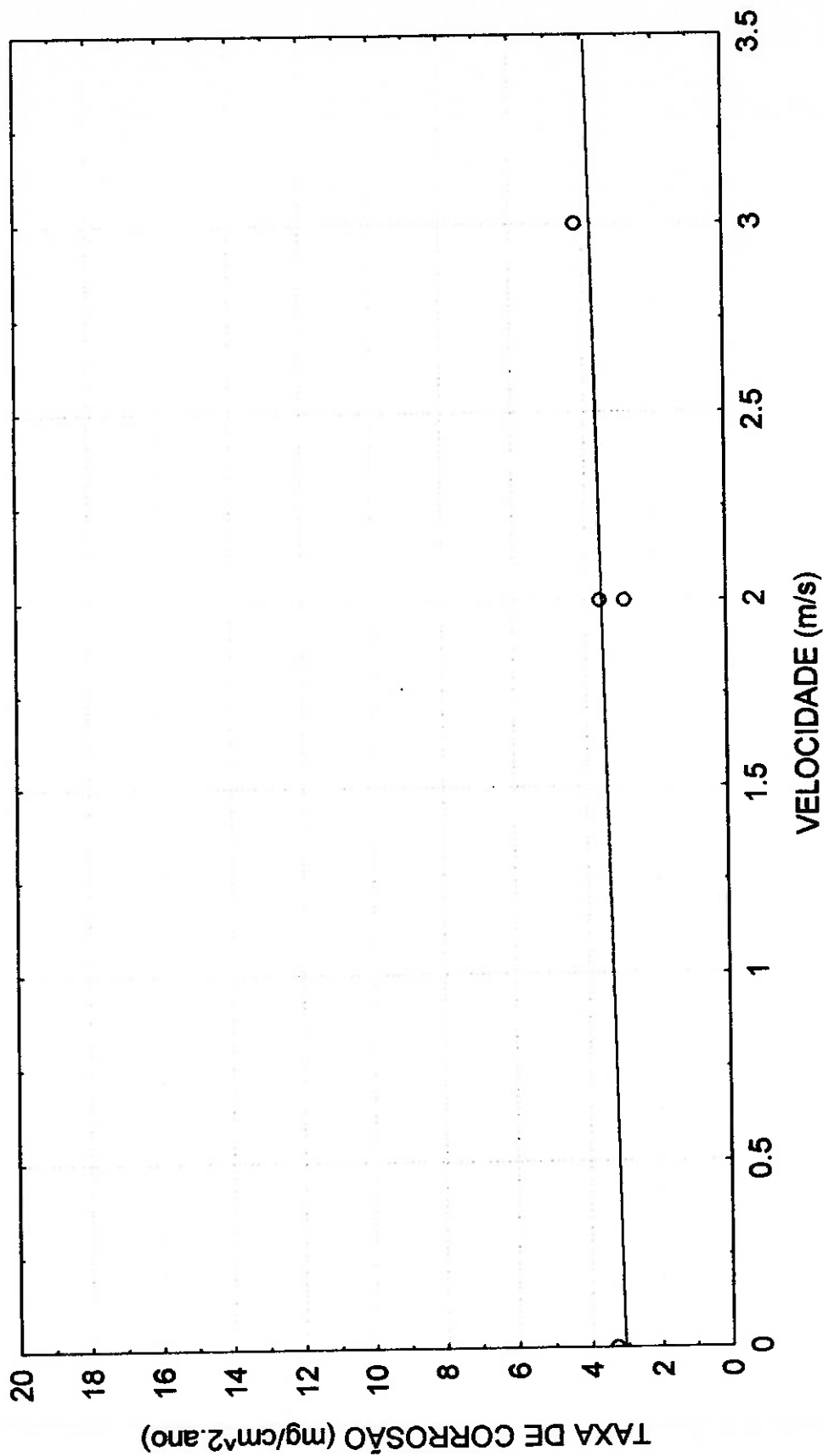


FIGURA 5.2 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 9,0 e 9,5 e temperatura de 55°C)

Taxa de Corrosão (8,0 < pH < 8,5; teor de O<sub>2</sub> entre 500-1200 ppb; T=55oC)

$$y = 6.286 + 0.736 * x$$

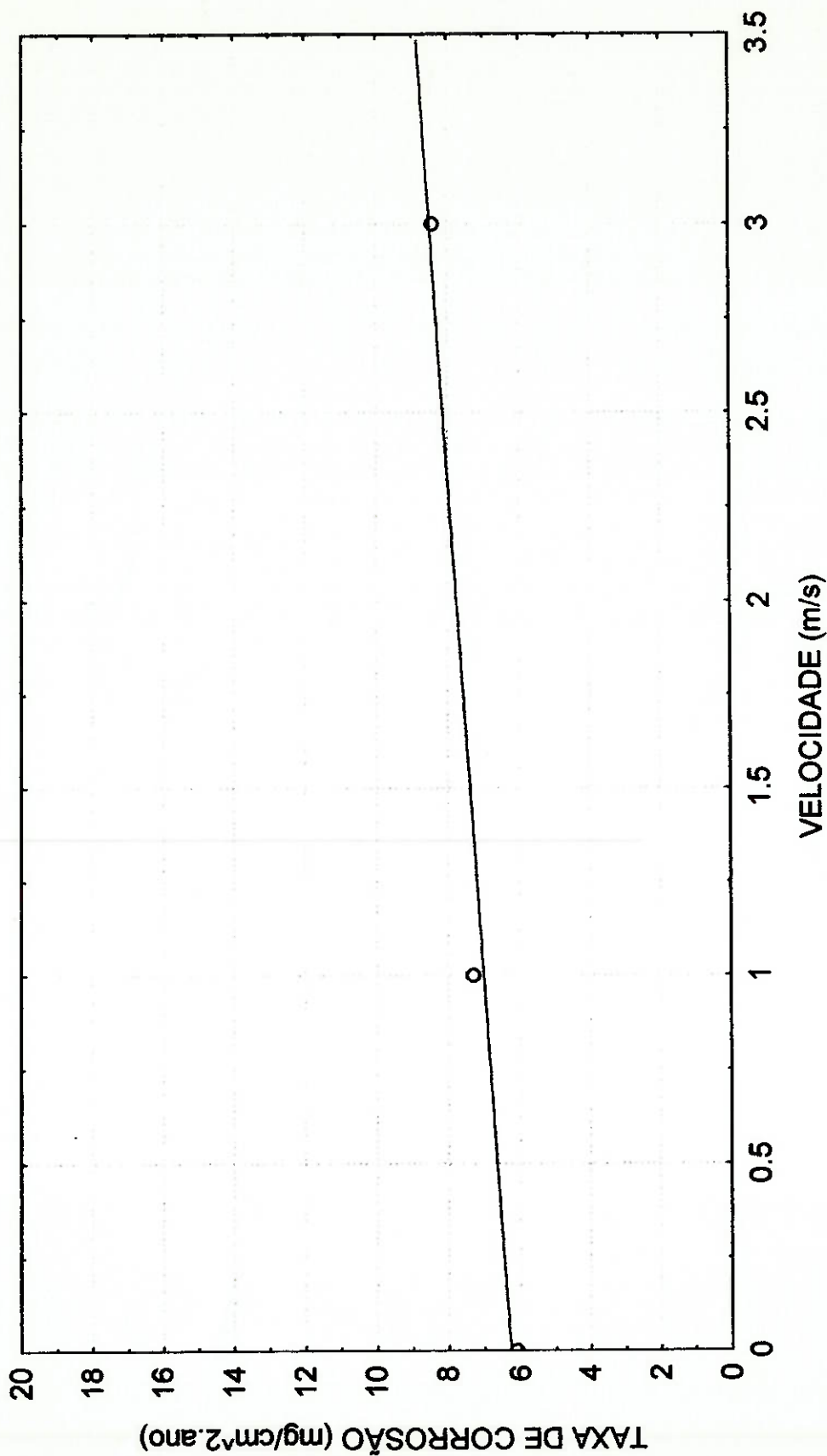


FIGURA 5.3 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 500 e 1200 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 55°C)

Taxa de Corrosão (8,0 < pH < 8,5; teor de O<sub>2</sub> entre 100-500ppb; T=65oC)

$$y = 7.2 + 2.667 * x$$

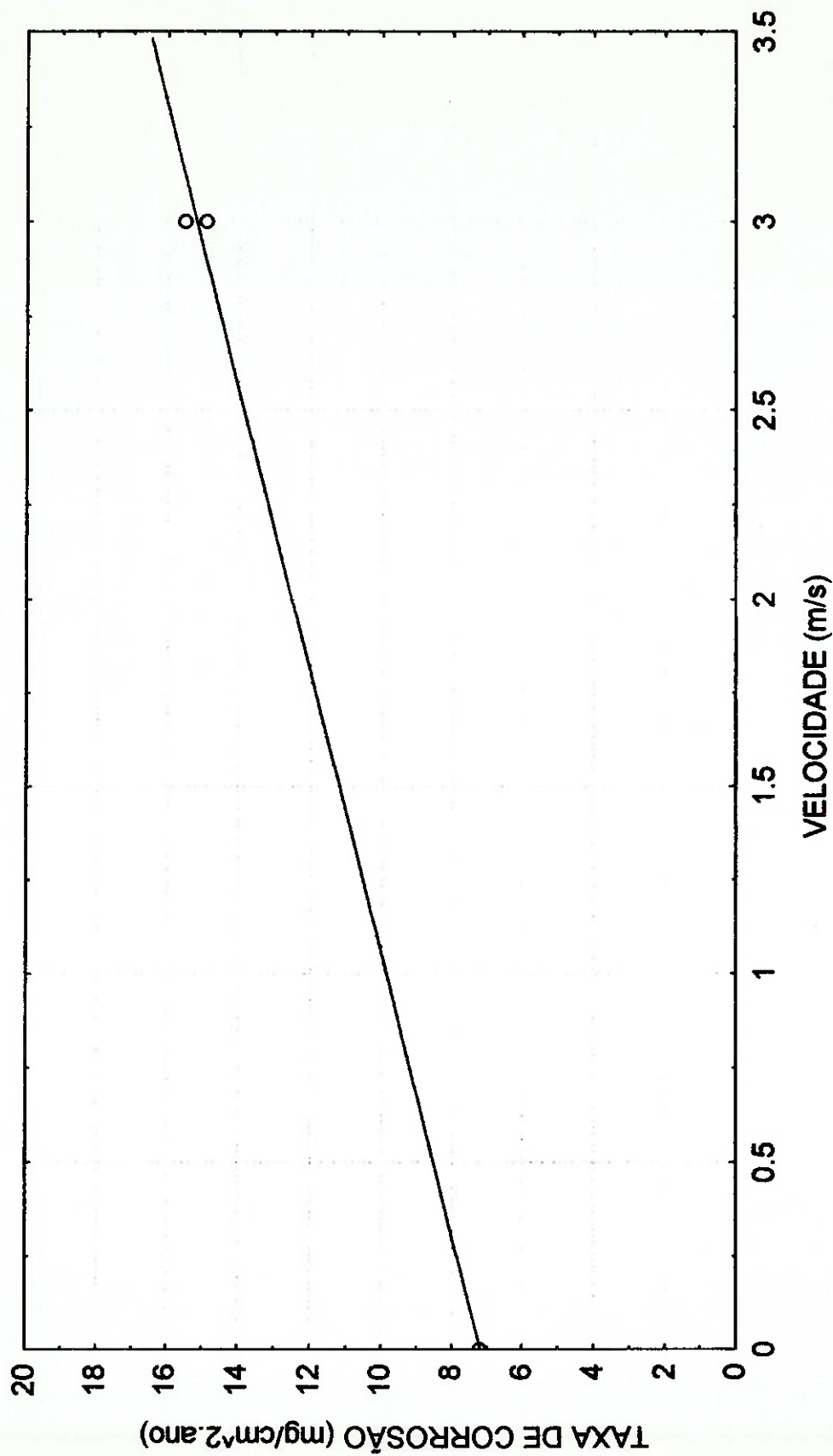


FIGURA 5.4 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 8,0 e 8,5 e temperatura de 65°C)

Taxa de Corrosão (8,5 < pH < 9,0; teor de O<sub>2</sub> entre 100-500ppb; T=65oC)

$$y = 6.782 + 0.555 * x$$

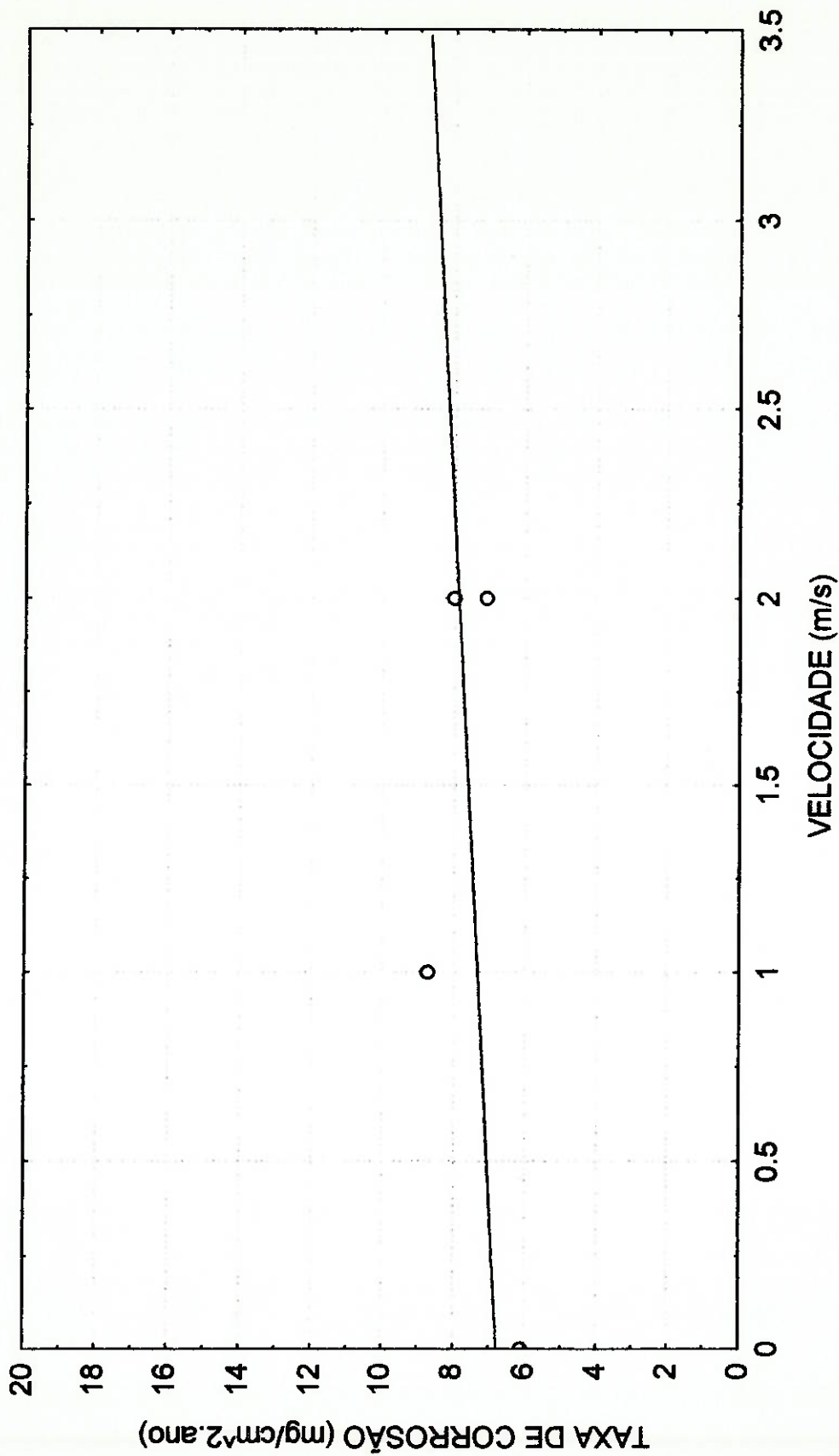


FIGURA 5.5 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 100 e 500 ppb, pH entre 8,5 e 9,0 e temperatura de 65°C)

Taxa de Corrosão (7,5 < pH < 8,0; teor de O<sub>2</sub> entre 1200-2500 ppb; T=75oC)

$$y = 15.6 + 1.1 \cdot x$$

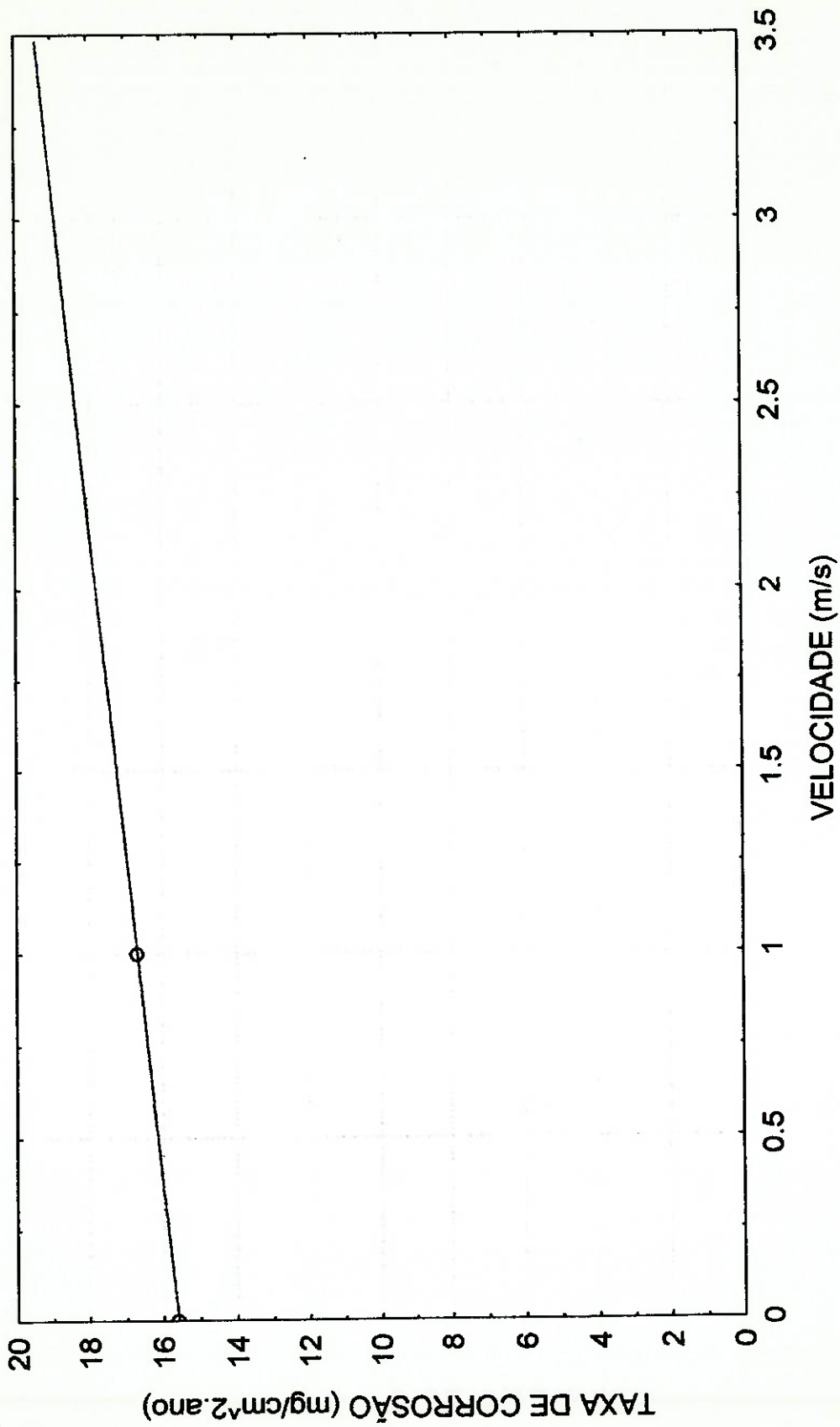


FIGURA 5.6 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com uma faixa de teor de O<sub>2</sub> dissolvido entre 1200 e 2500 ppb, pH entre 7,5 e 8,0 e temperatura de 75°C)



Os resultados experimentais com teores de oxigênio acima de 2000 ppb, ou seja, em condições aeradas tiveram um outro tipo de ajuste em suas análises. Explica-se este fato pela possível ocorrência de uma corrosão por *aeração diferencial*, onde uma diferente concentração de O<sub>2</sub> em pontos distintos de um mesmo material aumenta a capacidade reativa do material, aumentando a corrosão, [1]. Este diferencial de oxigênio ocorre, pois a camada de fluido entre o corpo de prova e o Teflon tem seu oxigênio consumido, enquanto o meio está totalmente aerado. A condição aerada proporciona, também, a passivação do material, ou seja, a formação de uma película de óxido protetora, que implica em uma velocidade de corrosão acentuada por um determinado período de tempo.

A modelagem proposta para analisar os dados experimentais da corrosão em níveis aerados lançou mão de um fator de correção K, que ajustou os dados levando em conta os fenômenos supracitados. A formulação final foi a seguinte:

$$TC_e = TC_t - 1,7 \cdot K \cdot TC_c \quad (5.6)$$

Dos ensaios convencionais, tem-se o valor de TC<sub>c</sub> para a condição aerada, a 35°C e pH entre 6,5 e 7,0. Nestes ensaios, obteve-se o valor de TC<sub>t</sub> para velocidade nula. Utilizando a equação 6.5, impondo que TC<sub>e</sub> = TC<sub>c</sub>, obtém-se o fator de correção K procurado neste caso (K = 4,5).

Desta forma obteve-se o gráfico da Figura 5.8, no qual se demonstra a influência da velocidade de fluxo em meios aerados, ligeiramente ácidos a 35°C. Nesta análise confirmou-se a tendência de uma influência linear da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão, demonstrando que para toda gama de valores de pH, teores de oxigênio e temperaturas a variação da taxa de corrosão tem esse comportamento.

Os resultados do presente trabalho confirmaram análises preliminares do comportamento do cobre eletrolítico em água pura e da influência da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão deste material, que foram realizadas em estudos precedentes, [32] e [33].

As observações e resultados condizem também com a bibliografia apresentada no presente trabalho, demonstrando um comportamento como descrito por FONTANA, [10] para metais com corrosão controlado por difusão catódica (Figura 2.2).

Da mesma maneira, o comportamento de todas as curvas condiz com o apresentado por SEIPP, [23]. Na Figura 2.4, o comportamento do cobre demonstra a mesma tendência linear aqui apontada, e a variação da taxa de corrosão em função da velocidade ocorre com o mesmo incremento em ordem de grandeza.

Taxa de Corrosão (6,5<pH<7,0; teor de O2 > 2500 ppb; T=35oC)

$$y = 1.429 + 2.506 * x$$

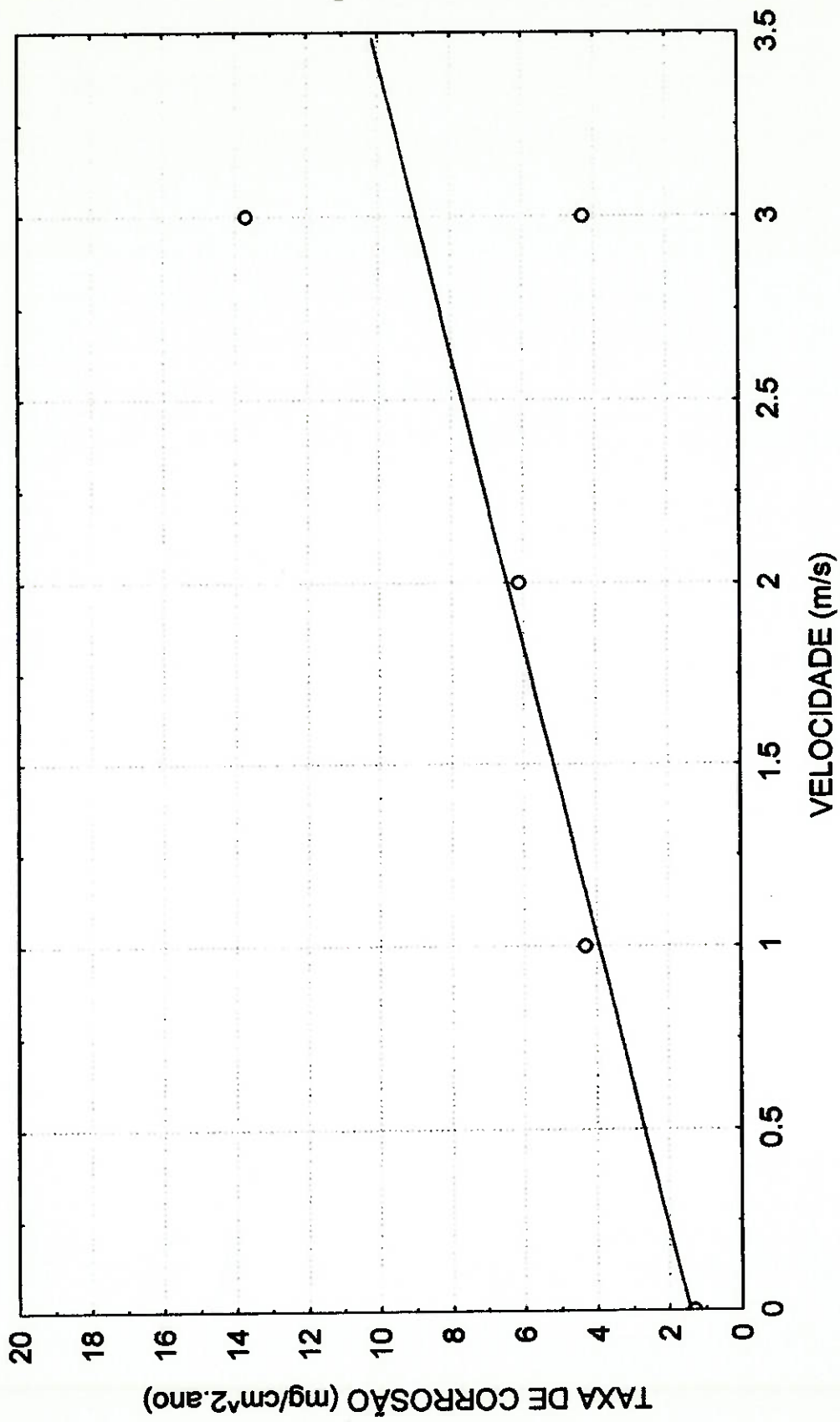


FIGURA 5.8 - Variação da taxa de corrosão em função da variação da velocidade de fluxo (água pura com teor de O<sub>2</sub> dissolvido superior a 2500 ppb, pH entre 6,5 e 7,0 e temperatura de 35°C)

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ensaio de corrosão assistida por fluxo foram realizados, permitindo a verificação da influência da velocidade de fluxo sobre o processo de corrosão do cobre em água pura, associando-a às principais variáveis do meio, visando o esclarecimento do fenômeno de corrosão dos condutores ociosos de cobre que compõem as barras estatóricas dos hidrogeradores.

As principais conclusões deste trabalho são:

- i) O procedimento adotado nos ensaios propiciou subsídios para classificar a influência da velocidade de fluxo, associada às características físicas e químicas da água pura, tais como temperatura, pH e concentração de oxigênio, sobre o processo de corrosão do cobre.
- ii) Os resultados mostraram que a velocidade é uma variável bastante influente no processo corrosivo do cobre, para todas as temperaturas, faixas de pH e concentração de oxigênio dissolvido na água analisada. A medida em que a velocidade aumenta, a taxa de corrosão também aumenta, tendo um crescimento aparentemente linear para a faixa de velocidades analisada.

- iii) As curvas que apresentam a influência da temperatura, [31], tem um comportamento mais acentuado (exponencial), que as que demonstram a influência da velocidade, indicando uma importância maior do aumento da temperatura (de 40°C a 70°C), que do aumento da velocidade de fluxo (de 0 a 3 m/s).
  
- iv) Em água com condições de pH mais básicas ( $9,0 < \text{pH} < 9,5$ ), os resultados indicam uma menor influência do aumento da velocidade de fluxo sobre a taxa de corrosão do cobre eletrolítico.
  
- v) A geometria construtiva da aparelhagem experimental propiciou a geração de fluxos com regimes de escoamento similar aos encontrados nos condutores ocos de estatores de hidrogeradores. Tal característica possibilita avaliar a influência da velocidade de fluxo na taxa de corrosão em equipamentos desta natureza.
  
- vi) As velocidades de fluxo estudadas e analisadas proporcionaram um melhor direcionamento dos ensaios a serem realizados nos circuitos experimentais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GENTIL, V., "Corrosão", Editora LTC, 1996.
- [2] WOLYNEC, S., "Mecanismos de Corrosão e Oxidação de Metais", Apostila da EPUSP, 1992.
- [3] BOURCHACOURT, M., "Flow Assisted Corrosion in Power Plants - Part I: The EDF Research Programme". *Specialist Meeting on Corrosion and Erosion Aspects in Pressure Boundary Components in LWR*, Viena, 1988.
- [4] REMY, F. N.; BOUCHACOURT, M., "Flow-Assisted Corrosion: A Method to Avoid Damage", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 133, 1992.
- [5] CUBICCIOTTI, D., "Flow-Assisted Corrosion of Steel and the Influence of Cr and Cu Additions", *Journal of Nuclear Materials*, No. 152, 1988.
- [6] STACK, M.M.; LEKATOS, S.; STOTT, F. H., "Erosion-Corrosion Regimes: Number, Nomenclature and Justification", *Tribology International*, vol. 28 No. 7, novembro, 1995.
- [7] STACK, M.M.; ZHOU, S.; NEWMAN, R.C., "Identification of Transitions in Erosion-Corrosion Regimes in Aqueous Environments", *Wear*, 186-187, 1995.
- [8] ZHOU, S.; STACK, M.M.; NEWMANN, R.C., "Characterization of Synergistic Effects Between Erosion and Corrosion in Aqueous

- Environment Using Electrochemical Techniques", Corrosion Science, vol. 52, No. 12, 1996.**
- [9] RAMANATHAN, L.V., **"Corrosão e Seu Controle"**, Hemus editora Limitada.
- [10] FONTANA, M.G., **"Corrosion Engineering"**, Ed. Mc. Graw-Hill, 1986.
- [11] BRUNO, G.; PERBONI, G.; ROCCHINI, G.; TRABANELLI, G., **"Behavior of Copper in High Purity Water"**, 11<sup>th</sup> International Corrosion Congress, Florence, Italy, 1990.
- [12] SCHLEITHOFF, K.; EMSCHOFF, H. W., **"Optimization of the Conditioning of Generator Cooling Water"**, VGB Kraftwerkstechnik, vol. 70, novembro, 1990.
- [13] NINHAM, A. J. et al., **"Temperature Gradient Effects in Erosion-Corrosion"**, Corrosion-Erosion-Wear of Materials at Elevated Temperatures, N.A.C.E., 1991.
- [14] MOLIÈRE, M.; VERDIÈR, Y.; LEYMONIE, C., **"Oxidation of Copper in High Purity Water at 70°C: Application to Electric Generator Operation"**, Corrosion Science, vol. 30, 1990.
- [15] KIM, W. B.; YI, C. U.; JEONG, J.; PARK, B. G.; HWANG, I. S., **"The Effects of Water Chemistry on Flow Degradation in Water Cooled Stator Winding of Large Turbogenerators"**, NACE, 1995.
- [16] OHBA, M.;KAJILMOTO, Z.P., **"Corrosão em Tubos de Cobre de Água Quente e Fria"**, C. T. - IPT, São Paulo, 1992.



- [17] ALONSO, N. et al., "**Corrosão em Trocadores de Calor de Cobre e suas Ligas**", C. T. - IPT. São Paulo, 1992.
- [18] MOLIÈRE, M.; VERDIER, Y.; LEYMONIE, C., "**Contribution à l'Etude de l'Oxidation du Cuivre dans l'Eau Très Pure à 70°C**", *C. R. Acad Sc. Paris*, t. 300, Série II, No. 15, 1985.
- [19] HEITZ, E., "**Chemo-Mechanical Effects of Flow on Corrosion**", *Corrosion Engineering*, vol. 47, No. 2, 1991.
- [20] SCHMITT, G. A.; BRUCKHOFF, W.; FAESSLER, K; BLUMMEL, G., "**Flow Loop Versus Rotating Probes - Experimental Results and Service Applications**". MP, fevereiro, 1991.
- [21] HUTCHINGS, I. M., LITTLE, J. A; NINHAM, A. J., "*Low Velocity Erosion-Corrosion of Steels in a Fluidized Bed*", *Corrosion-Erosion Wear of Materials at Elevated Temperature*. NACE, 1991.
- [22] CHEN, T. Y.; MOCCARI, A. A.; MACDONALD, D. D., "**Development of Controlled Hydrodynamic Techniques for Corrosion Testing**", *Corrosion*, vol. 48, No.3, 1992.
- [23] SEIPP, H.G., "**Das Korrosionsverhalten von Kupfer in Wassergekühlten Generatorwicklungen**", *VGB Kraftwerkstechnik*, vol. 59, março, 1979.
- [24] SEIPP, H.G., "**Betriebserfahrungen mit Wassergekühlten Generatorwicklungen**", *VGB Kraftwerkstechnik*, vol. 63, maio, 1983.
- [25] DAILY, J.W.; HARLEMAN, D.R.F., "**Fluid Dynamics**", 1966.

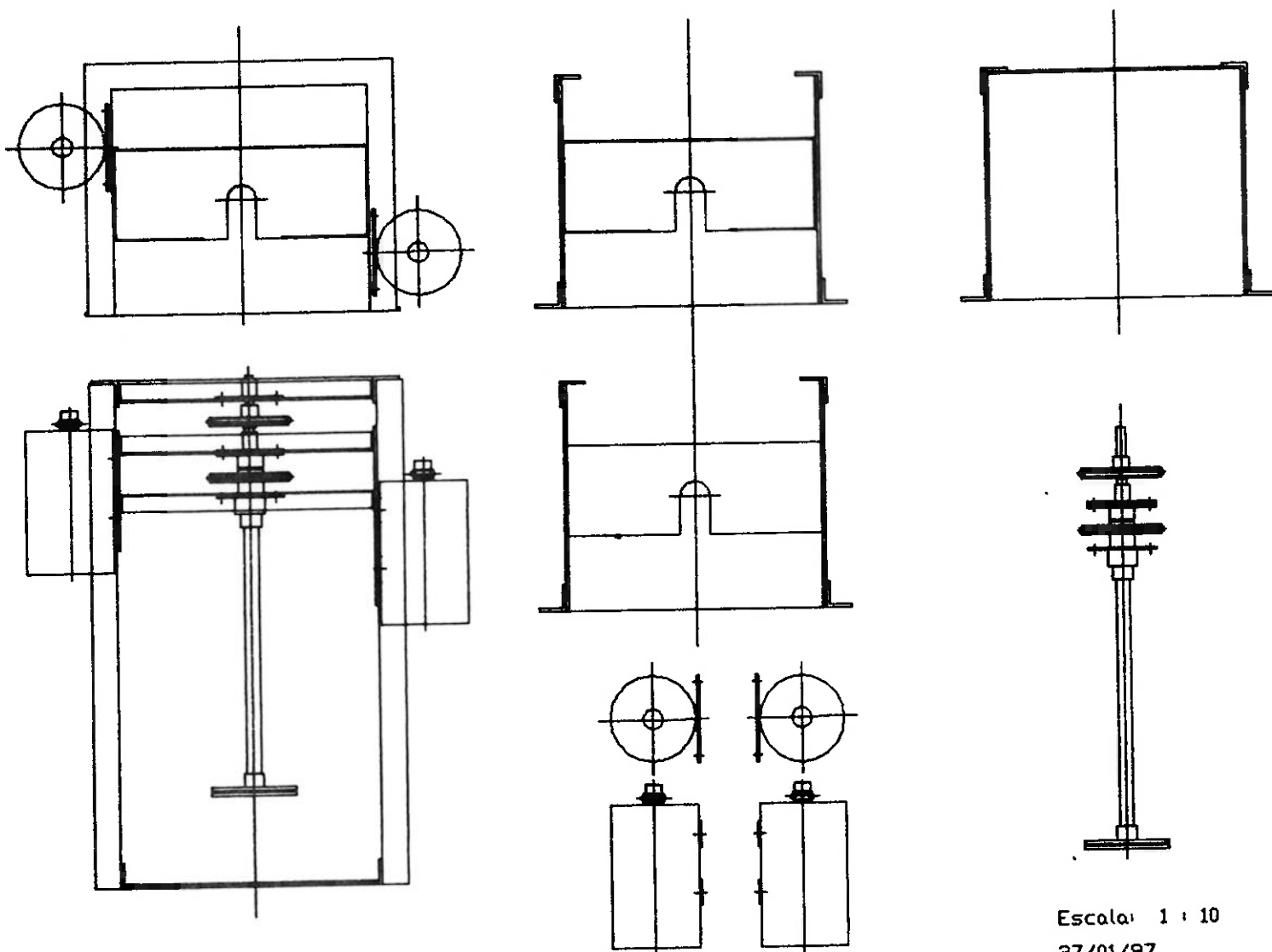
- [26] CZIDOS, H. et al, "Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften", 1991.
- [27] ASTM, norma técnica G31, "Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", 1996.
- [28] ORION, "Model 290 A Portable pH/ISE Instruction Manual", 1991.
- [29] ORBISPHERE LABORATORIES, "2713 Series Dissolved Oxygen Analyser", 1991.
- [30] ASTM, norma técnica G 81, "Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", 1996.
- [31] RELATÓRIO TÉCNICO CENO nº 04/311 - "Ensaio Convencionais para a Avaliação do Processo de Corrosão do Cobre", CENO / USP, Setembro de 1997.
- [32] WULFHORST, A.; BASTOS JR., A.C.; GONÇALVES, E.; SOUZA, G.F.M.; MADRIGNAC, G.; SILVERO, J.C.; BUELTA, M.A.; BACHERETTI, O., "Corrosion del Cobre en Agua Pura", III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Habana - Cuba, 1997.
- [33] BASTOS JR., A.C.; WULFHORST, A.; GONÇALVES, E.; SOUZA, G.F.M.; MADRIGNAC, G.; SILVERO, J.C.; BUELTA, M.A.; BACHERETTI, O., "Corrosão Assistida por Fluxo do Cobre", III Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Habana - Cuba, 1997.

**APÊNDICE I**

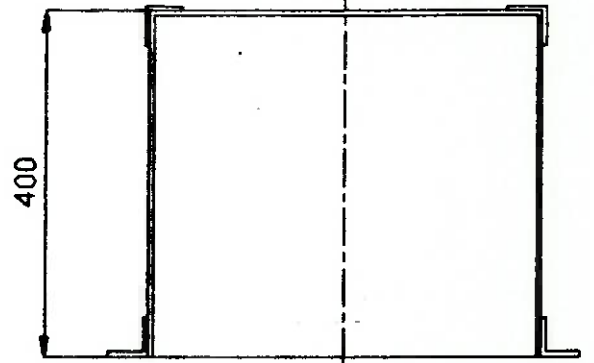
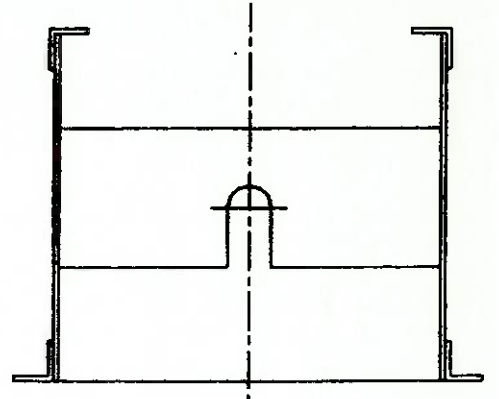
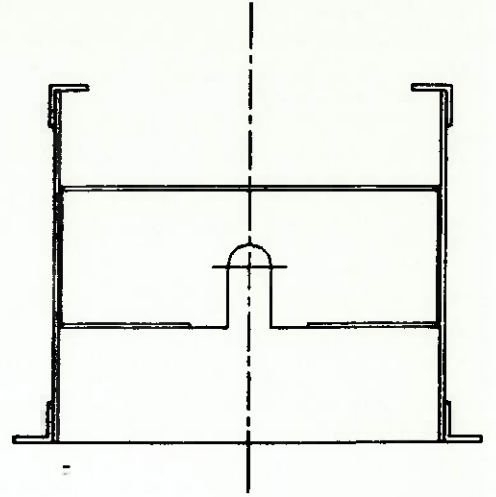
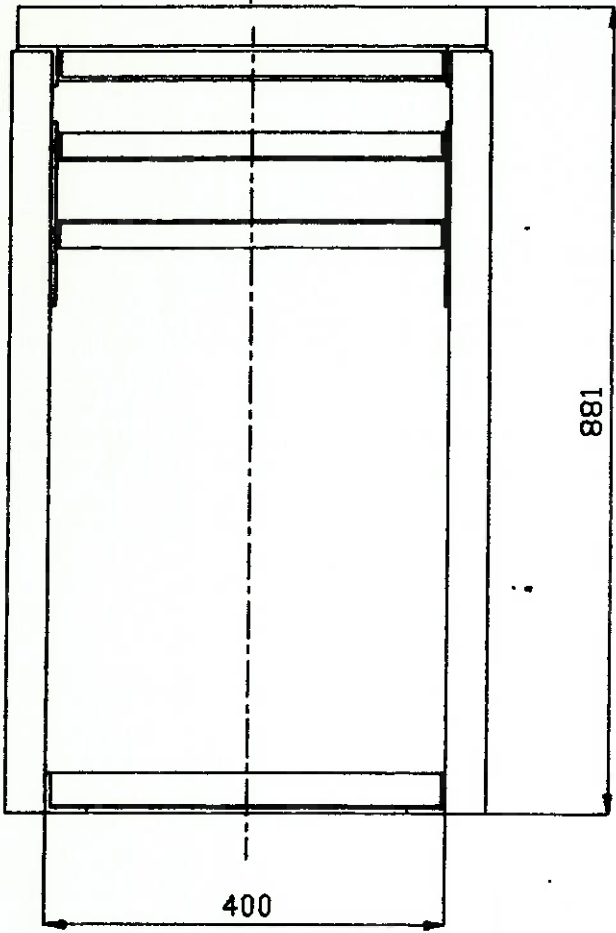
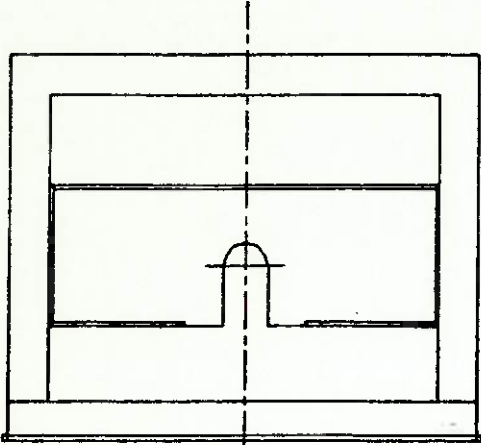
**SISTEMA ROTATIVO DO ENSAIO DE CORROSÃO ASSISTIDA POR FLUXO  
(DESENHOS TÉCNICOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E DETALHES  
CONSTRUTIVOS DO CONJUNTO)**

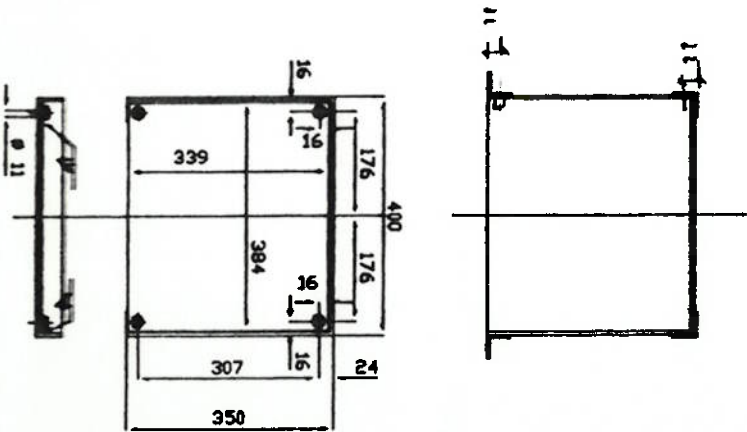
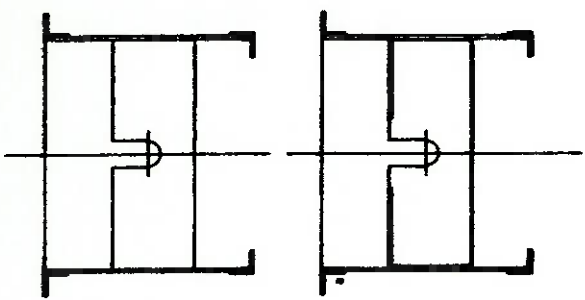
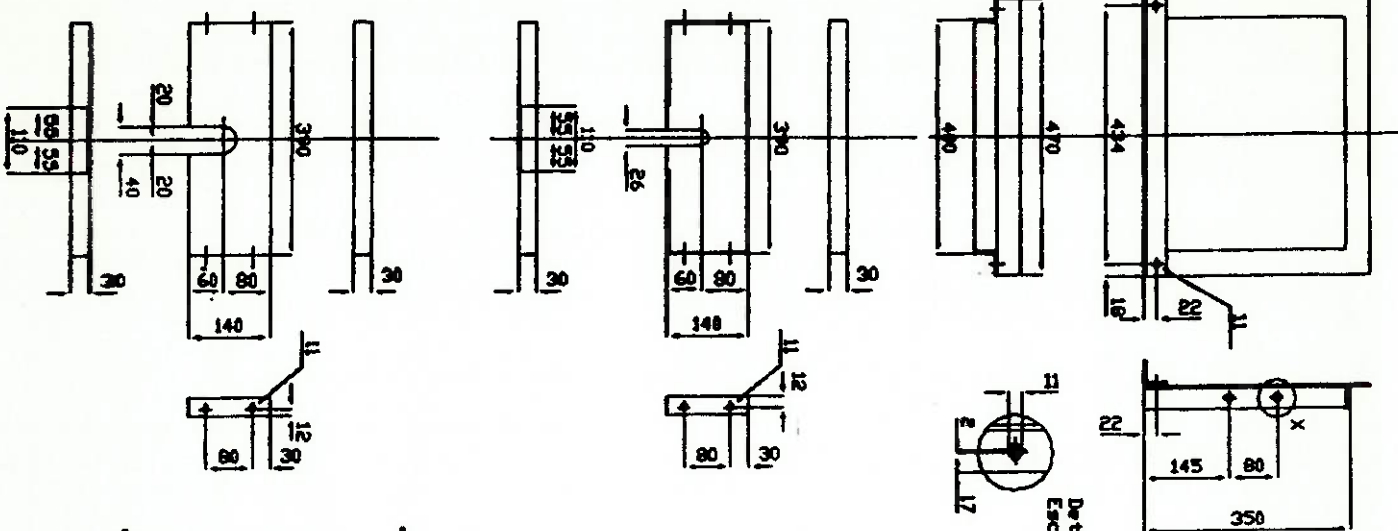
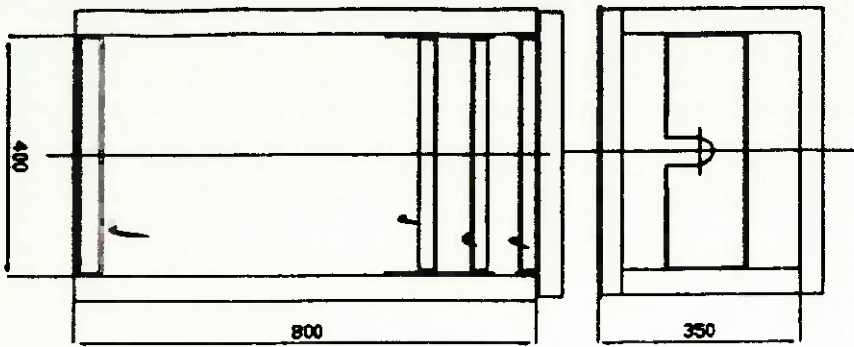
# ESQUEMA DO ENSAIO ROTATIVO

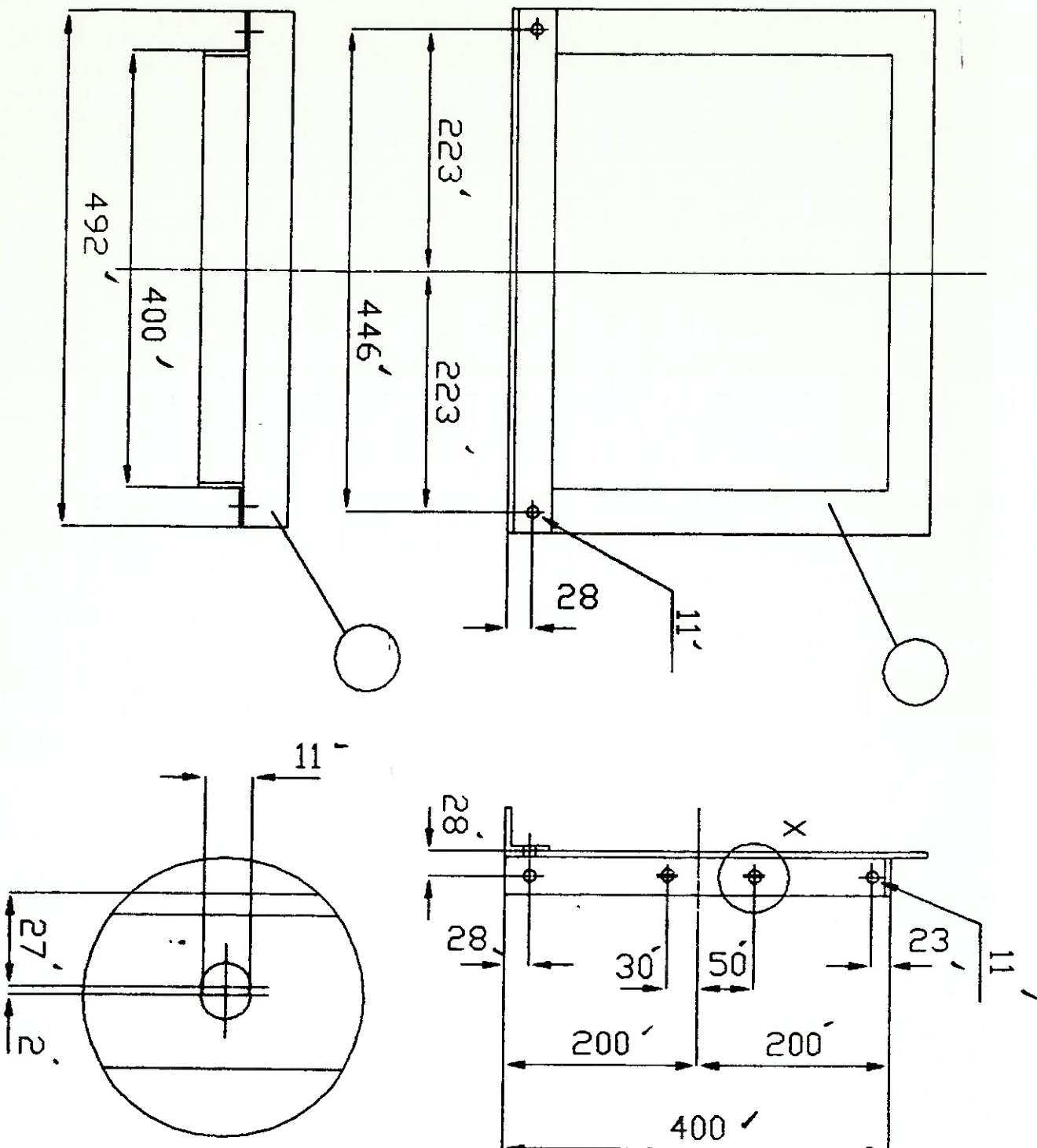
## CONJUNTO ESTRUTURA E TRANSMISSÃO



Escala: 1 : 10  
27/01/97

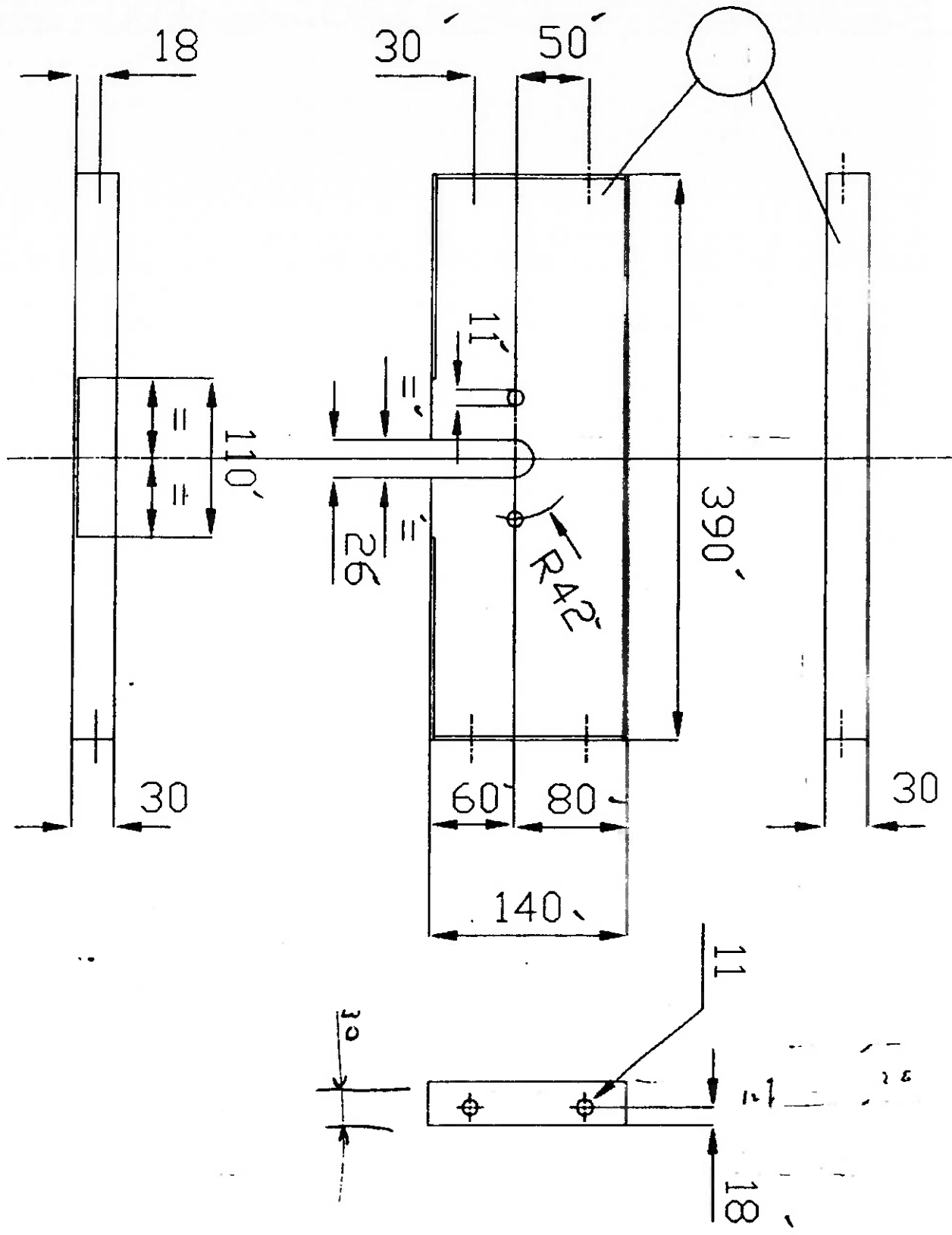


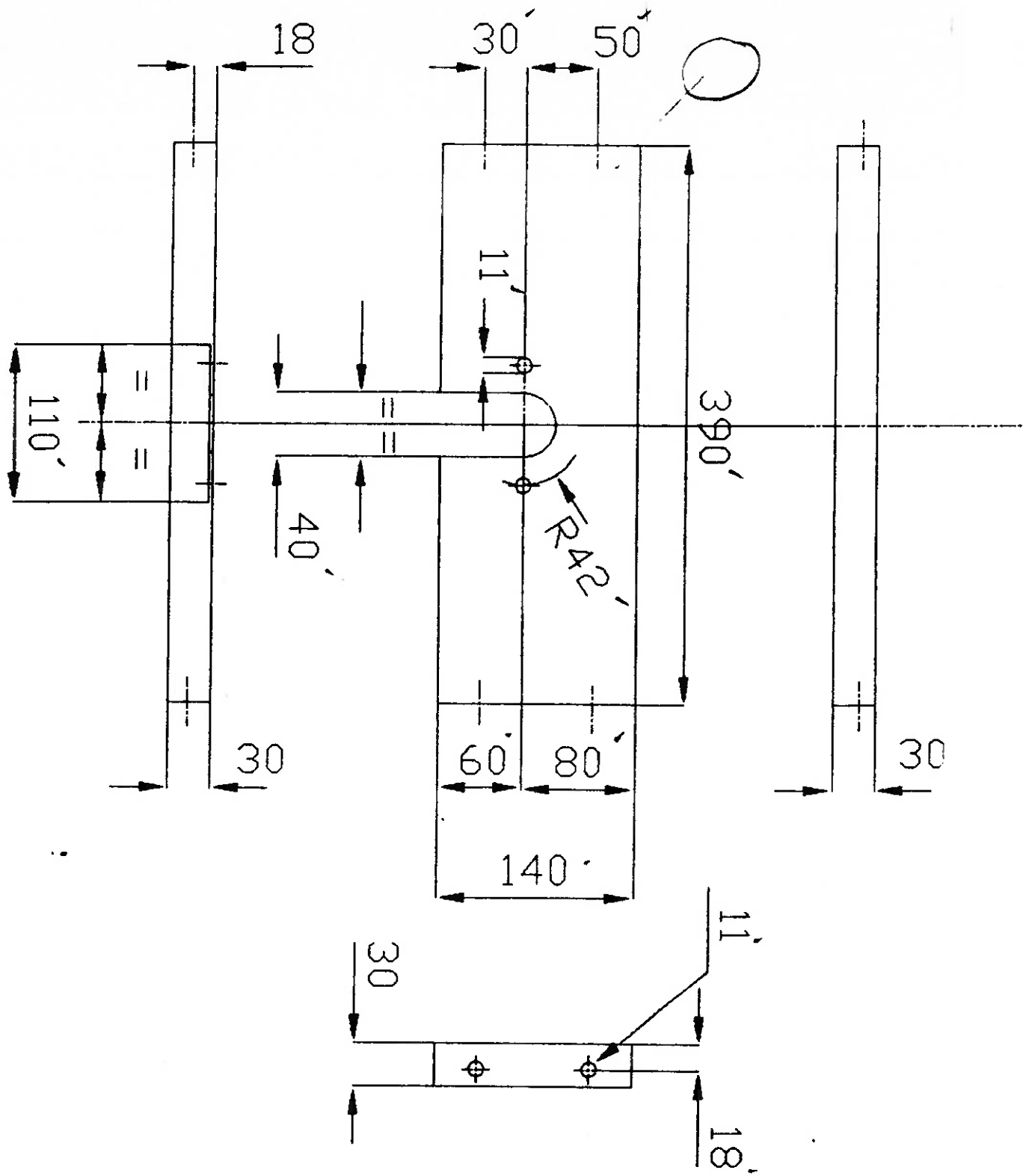


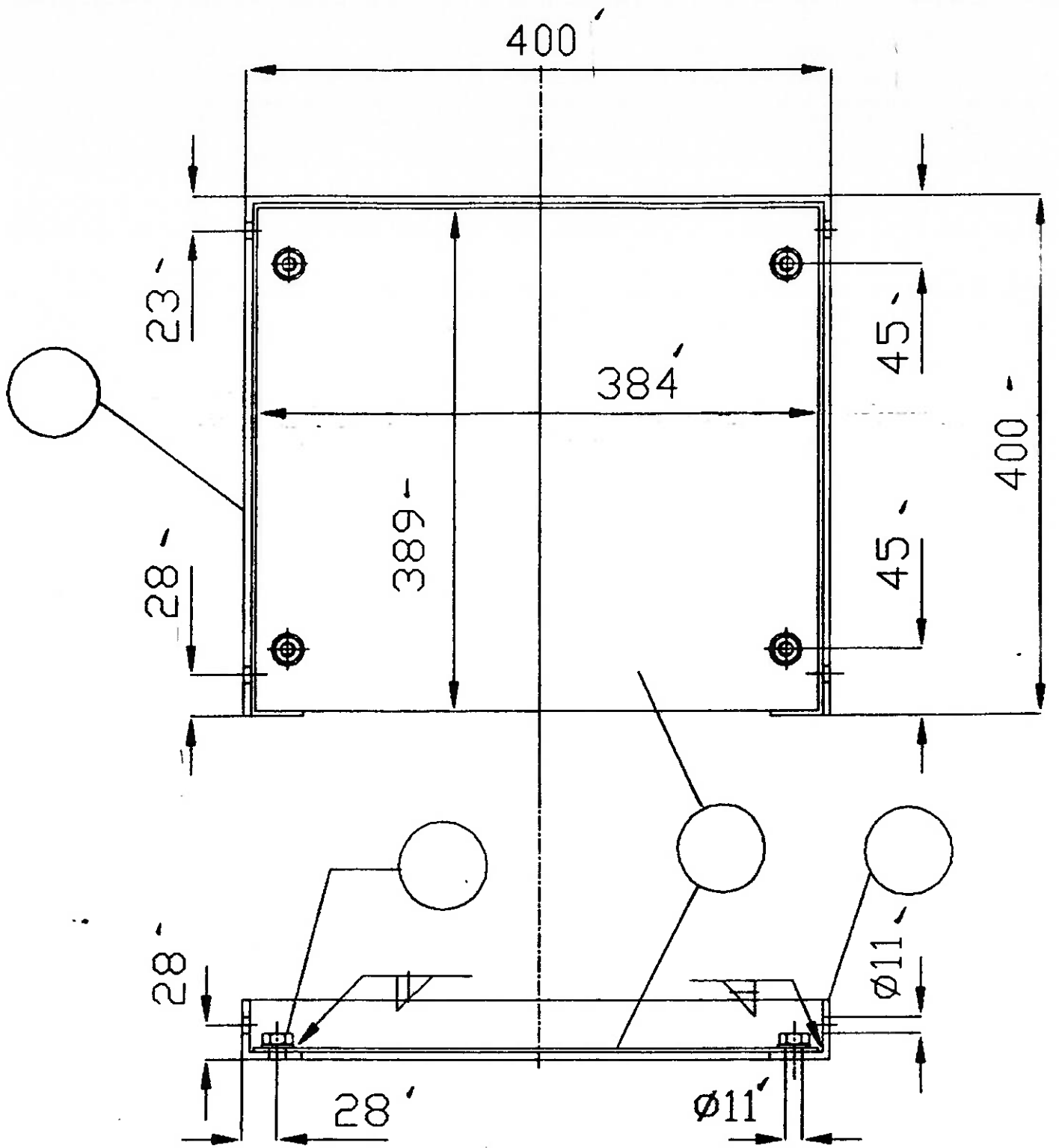


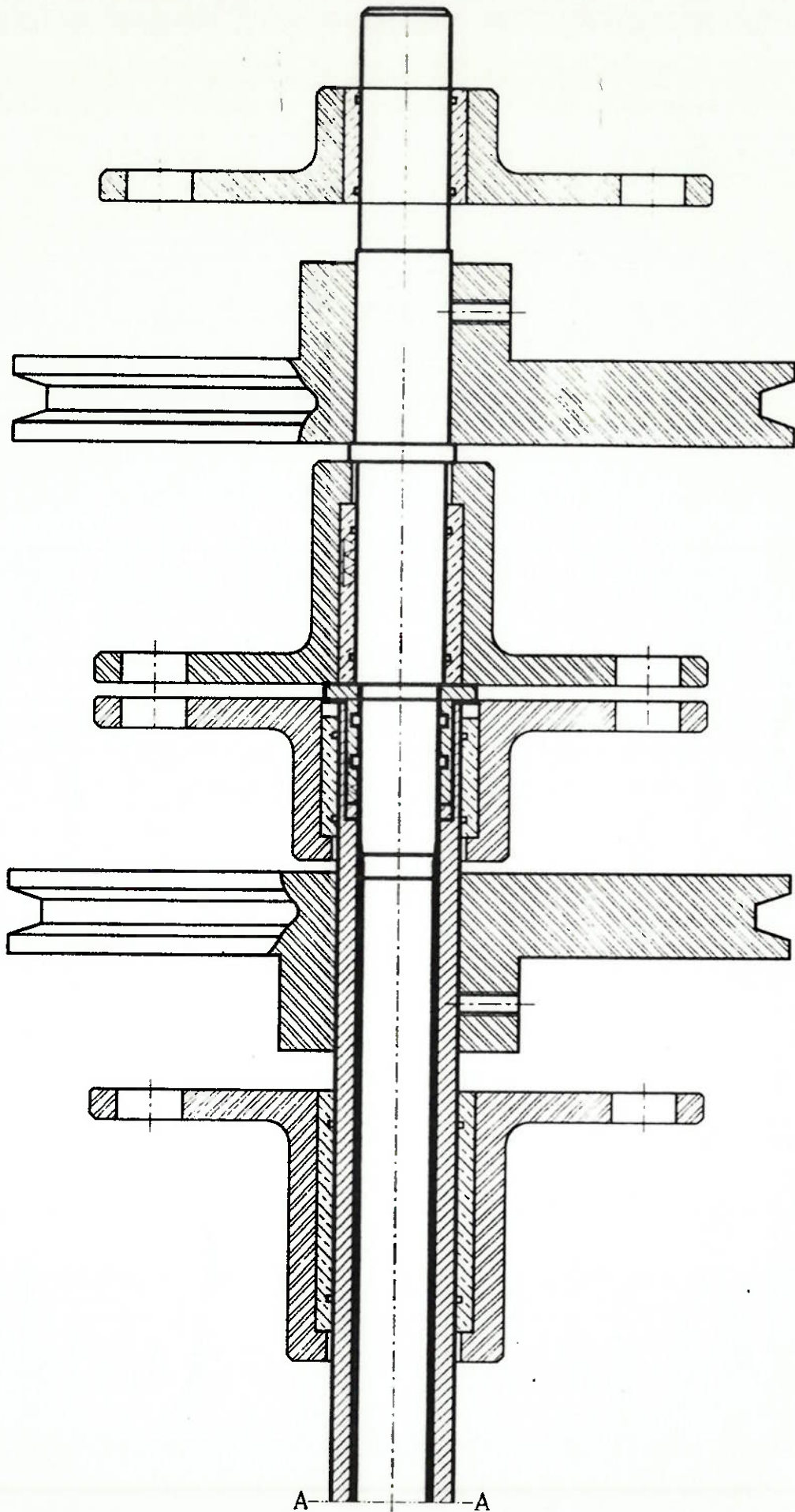
Detalle X  
 Escala 4:1



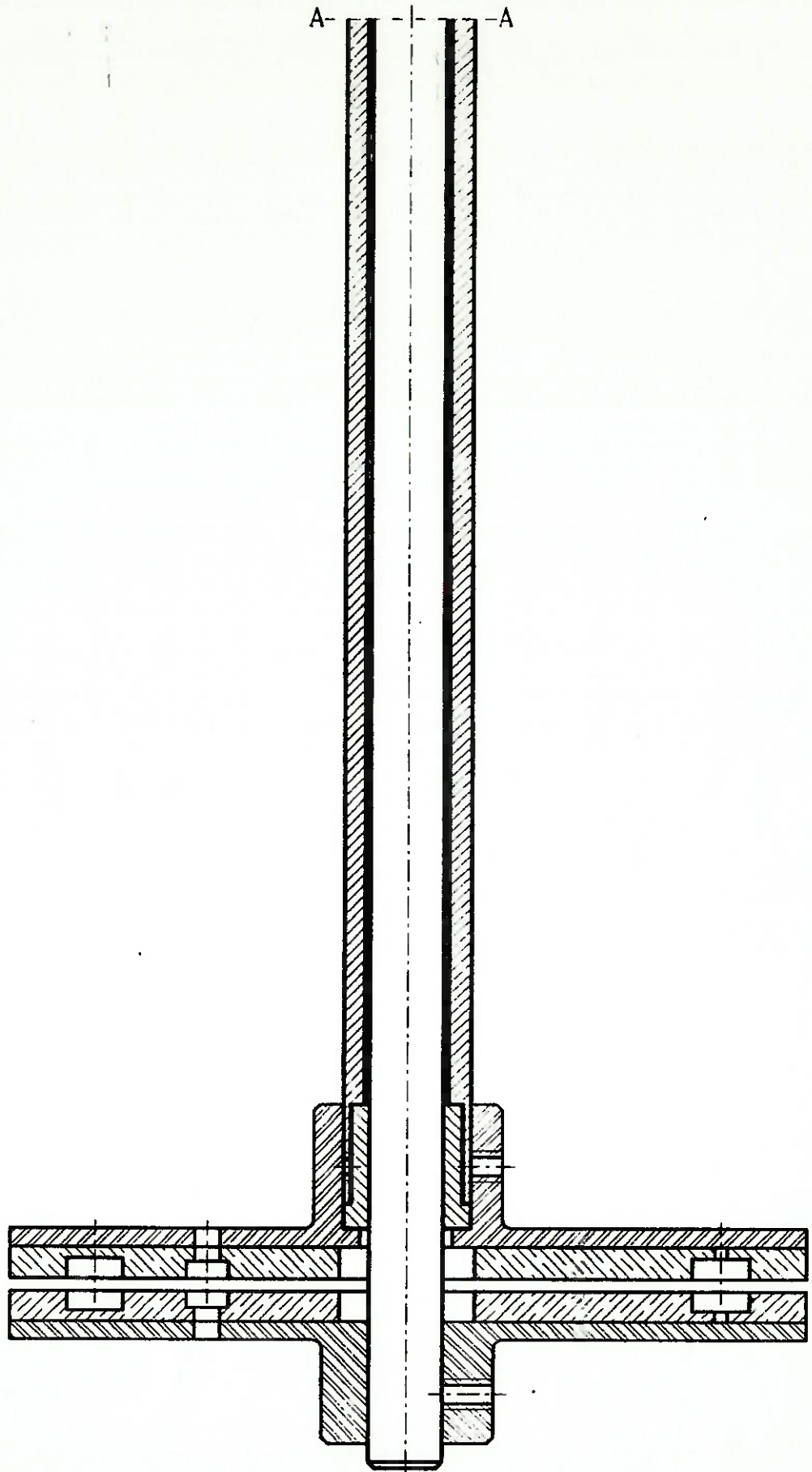




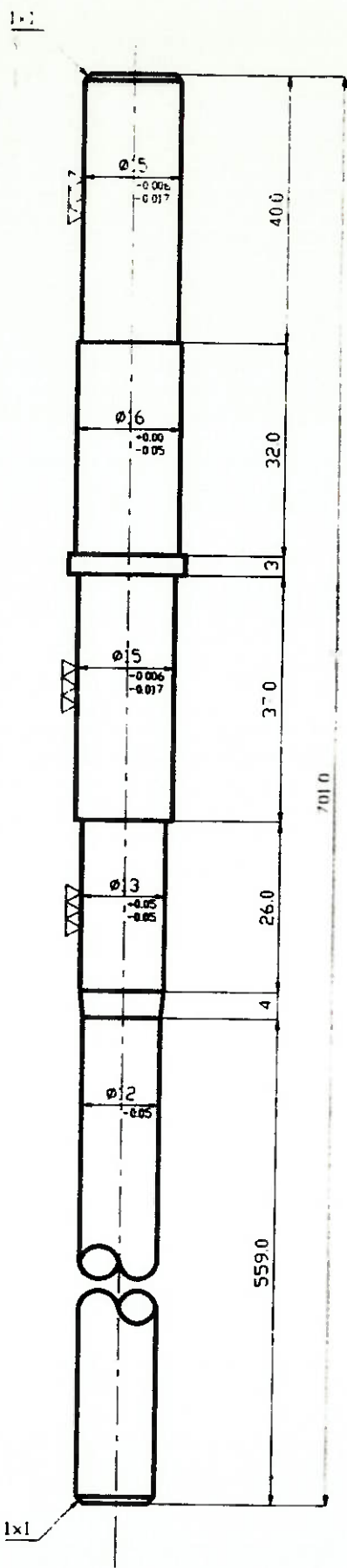




CENO-USP			MATERIAL	DATA 08/03/97	DESENHO Nº 01-6	
ESCALA 1:1	DIM	MM	CONJUNTO DE TRANSMISSÃO-ENSAIO ROTATIVO(1/2)			



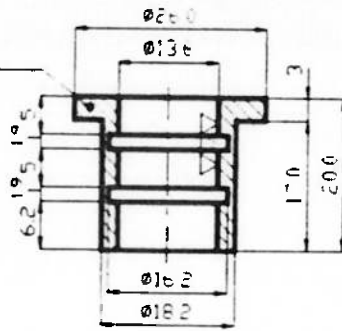
CENO - USP			MATERIAL	DATA 08/09/97	DESENHO Nº 02-C
ESCALA	1:1	DIM	MM	CONJUNTO DE TRANSMISSÃO - ENSAIO ROTATIVO (2 2)	



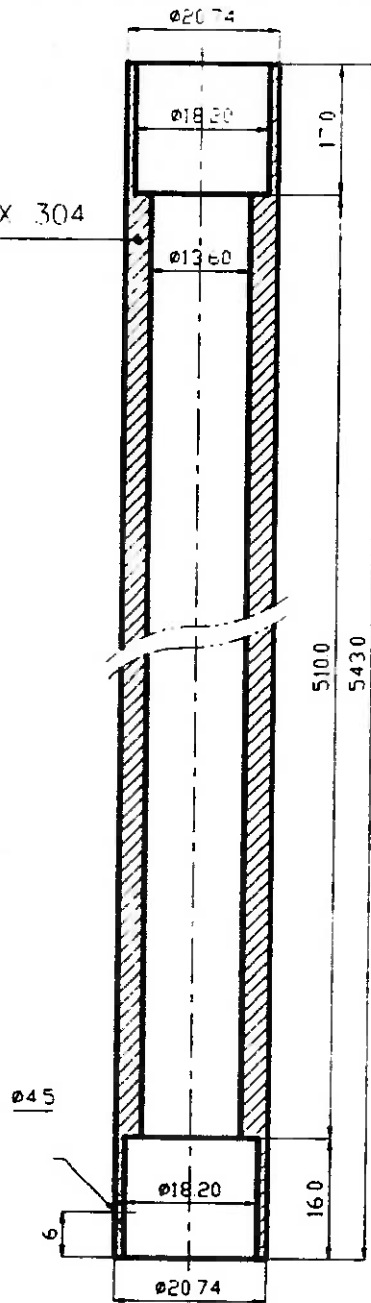
TOLERÂNCIA  
GERAL  $\pm 0.1\text{mm}$

CENO- USP			MATERIAL	DATA	04/19/97	DESENHO Nº	03-6
ESCALA	1:1	DIM	MM	AÇO - INOX 304			
			EIXO				

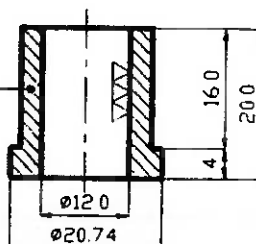
AÇO - INOX 304



AÇO - INOX 304



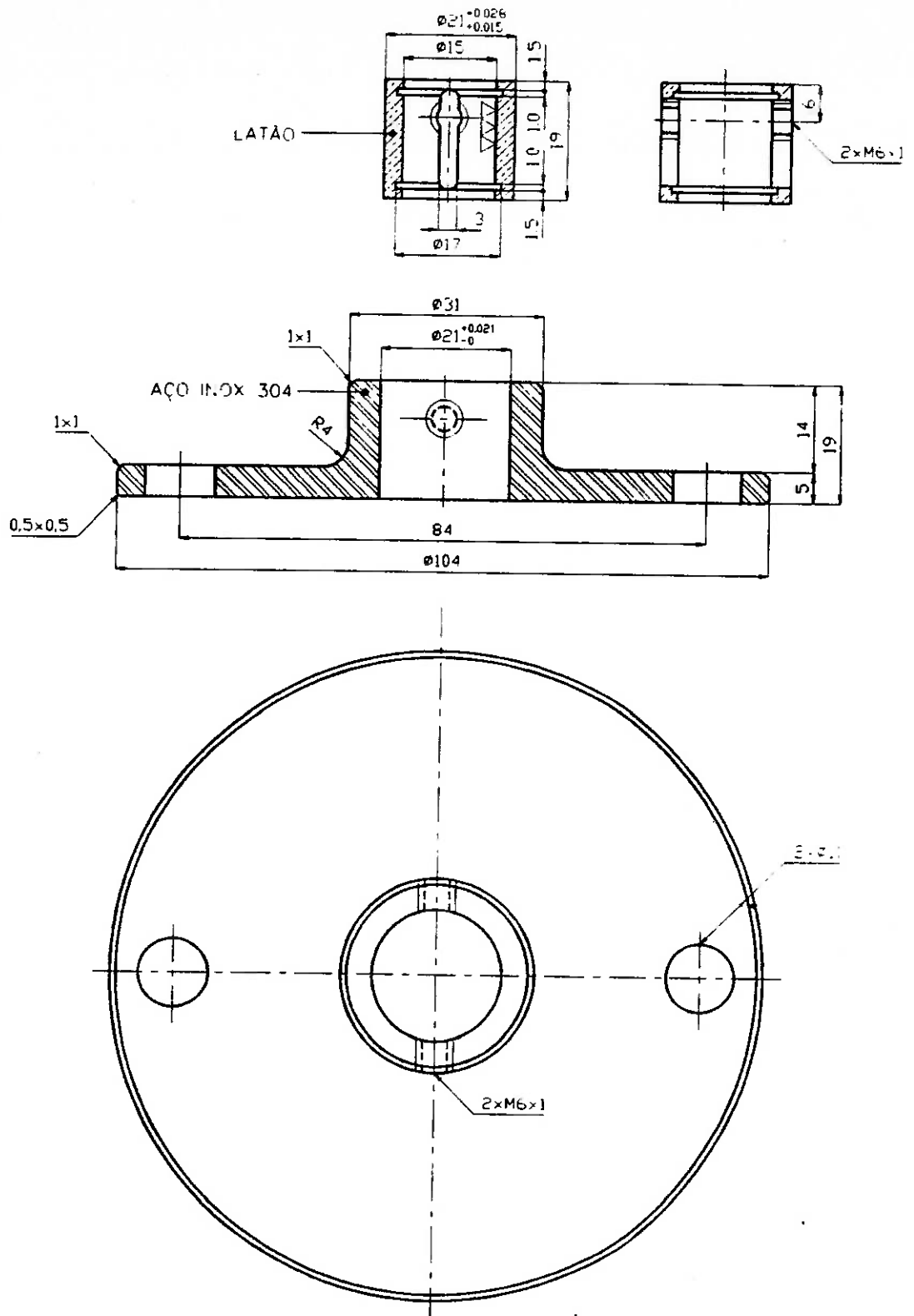
TEFLON



TOLERÂNCIA  
GERAL  $\pm 0,1\text{mm}$

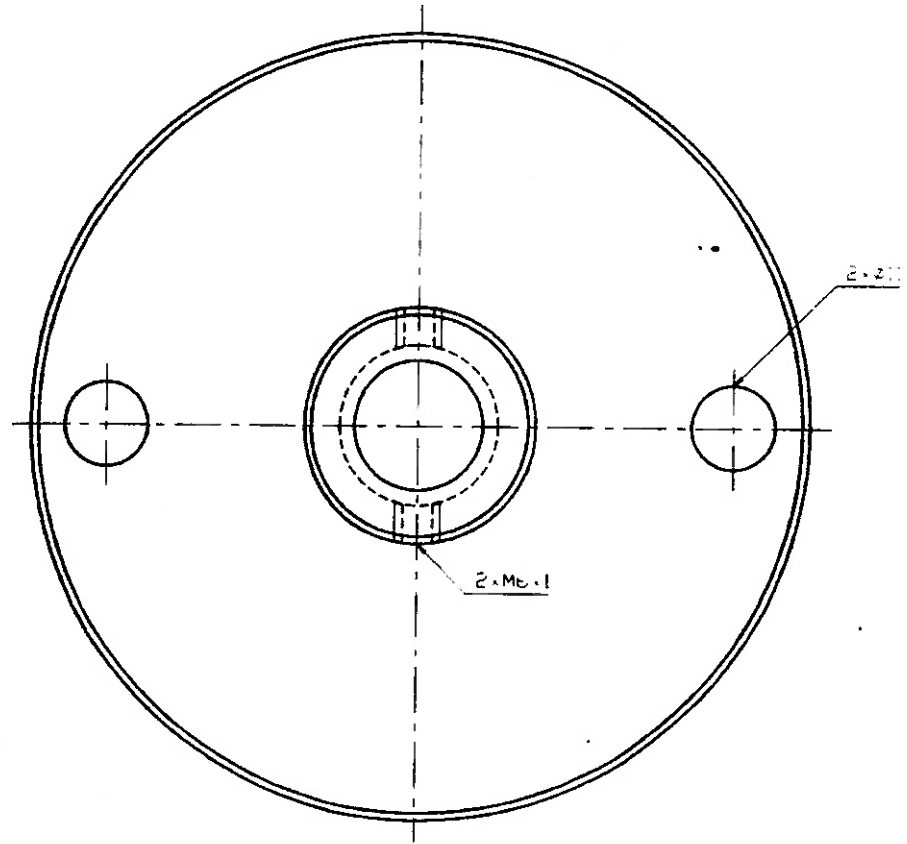
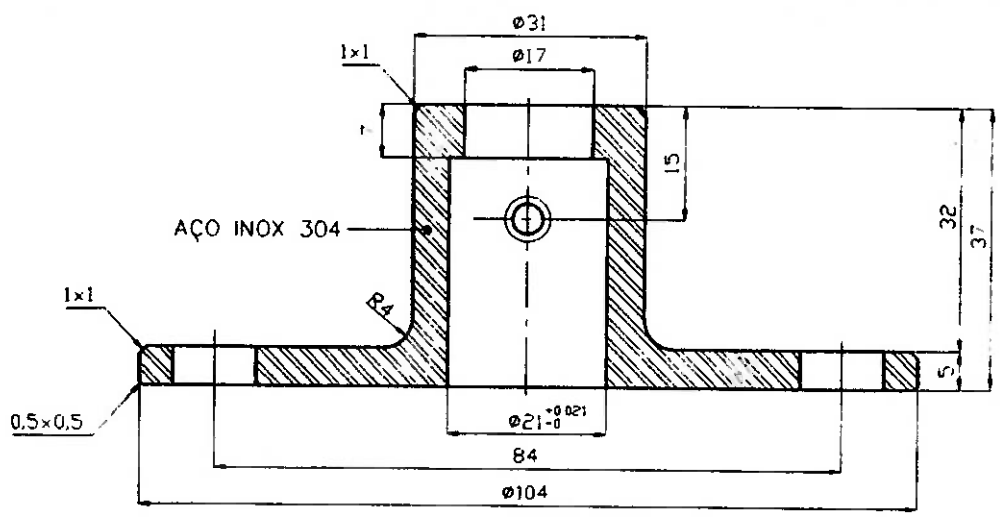
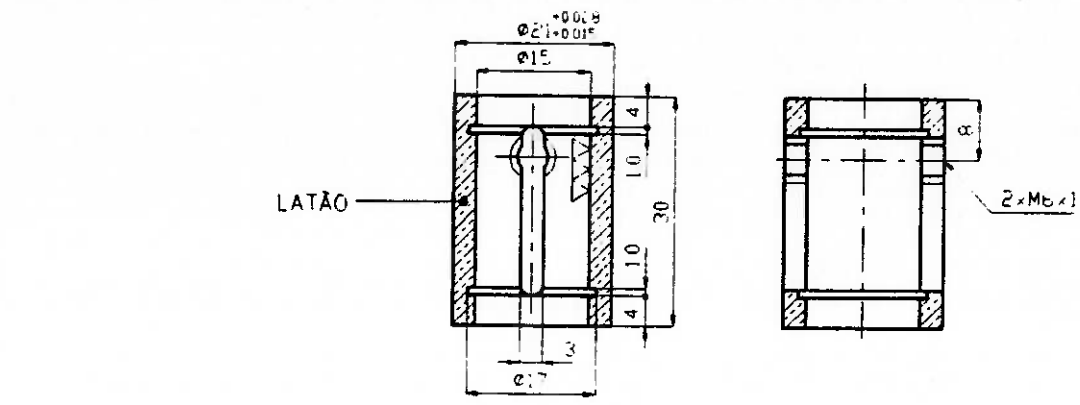
CENO-USP			MATERIAL	DATA	04/03/97	DESENHO Nº	04-2
ESCALA	1:1	DIM	MM	DESCRITO ACIMA	TUBO		





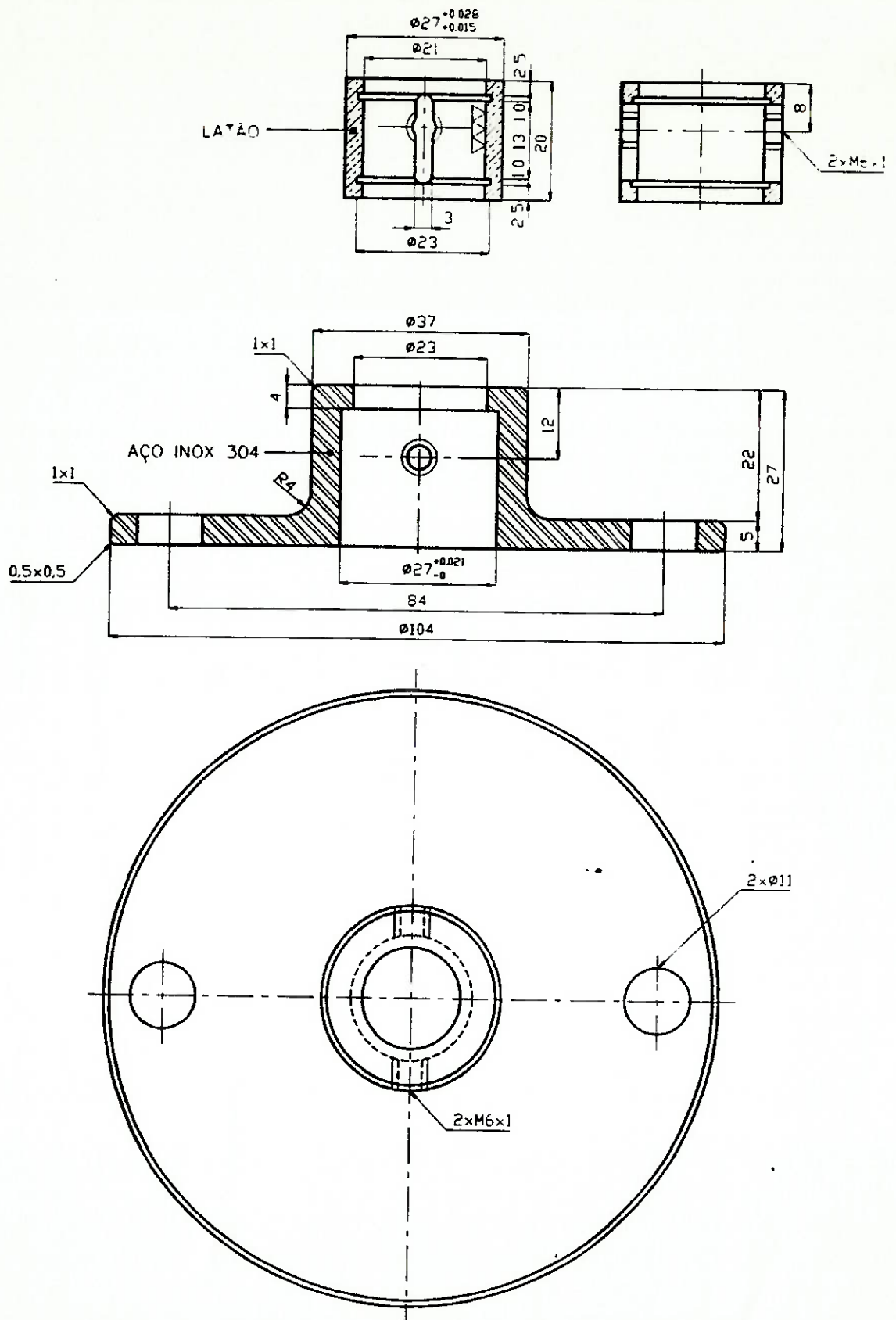
TOLERÂNCIA  
GERAL ±0,1mm

CENO- USP			MATERIAL DESCRITO ACIMA	DATA	25/05/97	DESENHO N°	05-8
ESCALA	1:1	DIM	MM	MANCAL SUPERIOR DO EIXO E BUCHA			



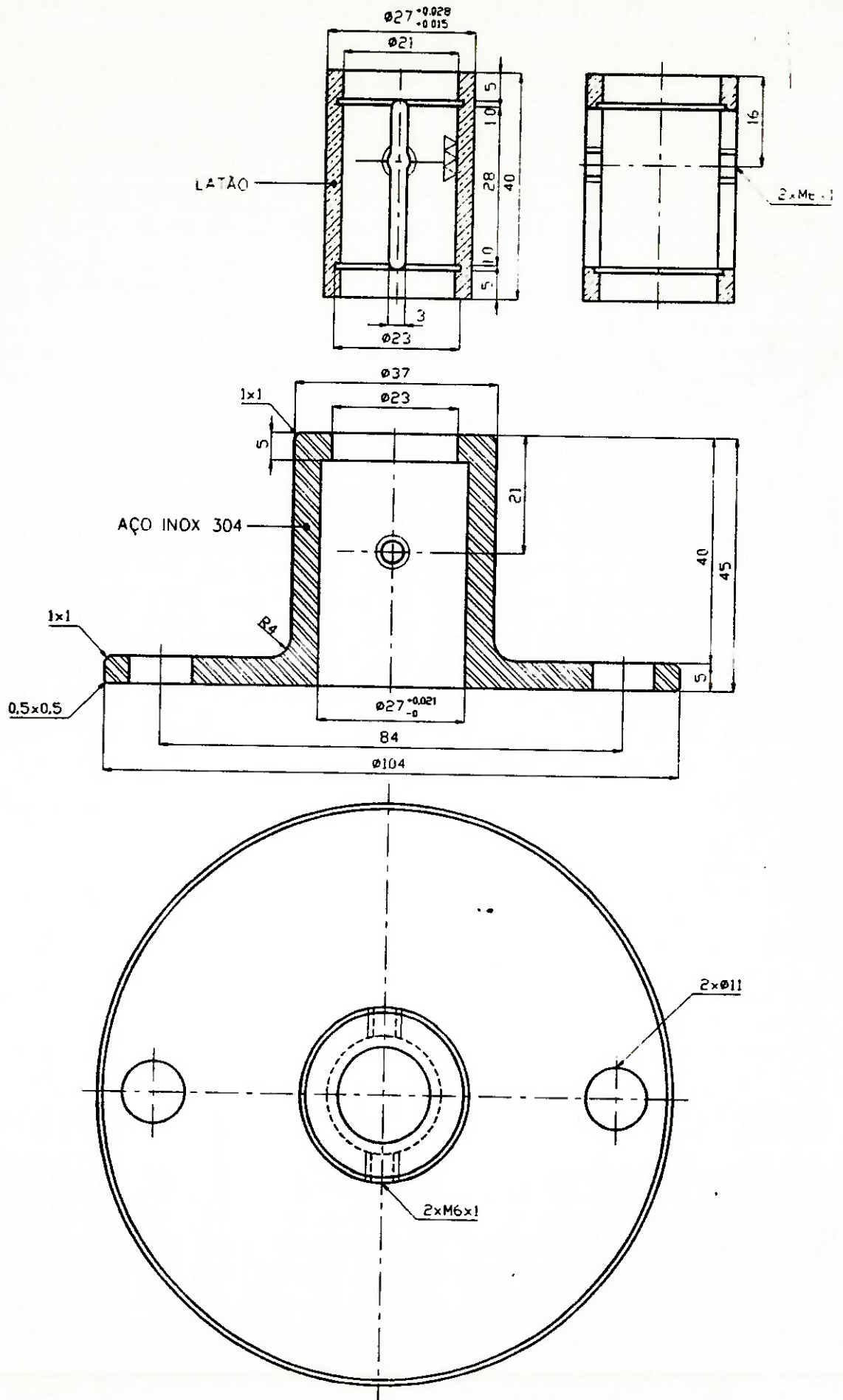
TOLERÂNCIA  
 GEF AL  $\pm 0,1mm$

CENO- USP			MATERIAL	DATA	25/03/97	DESENHO Nº	06-6
			DESCRITO ACIMA				
ESCALA	1:1	DIM	MM	MANCAL INFERIOR DO EIXO E BUCHA			



TOLERÂNCIA  
GERAL  $\pm 0,1\text{mm}$

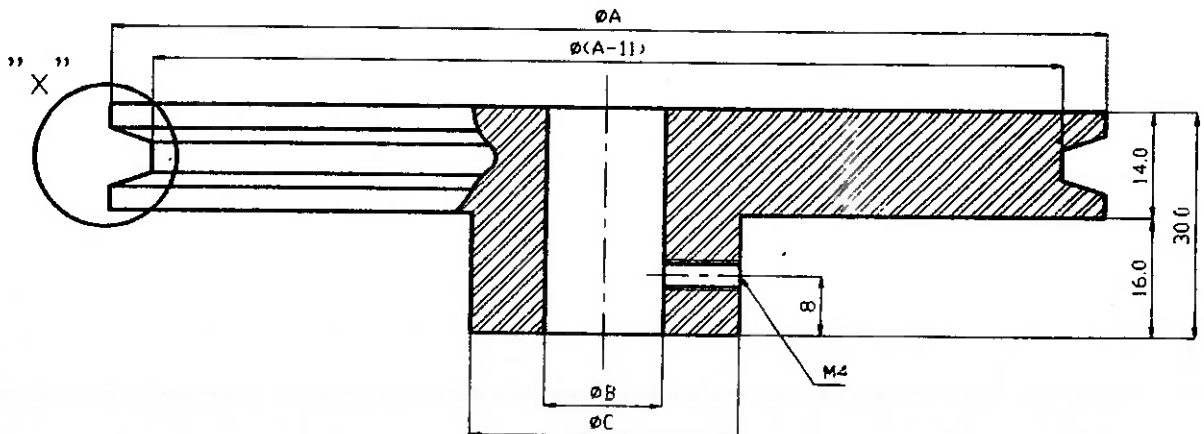
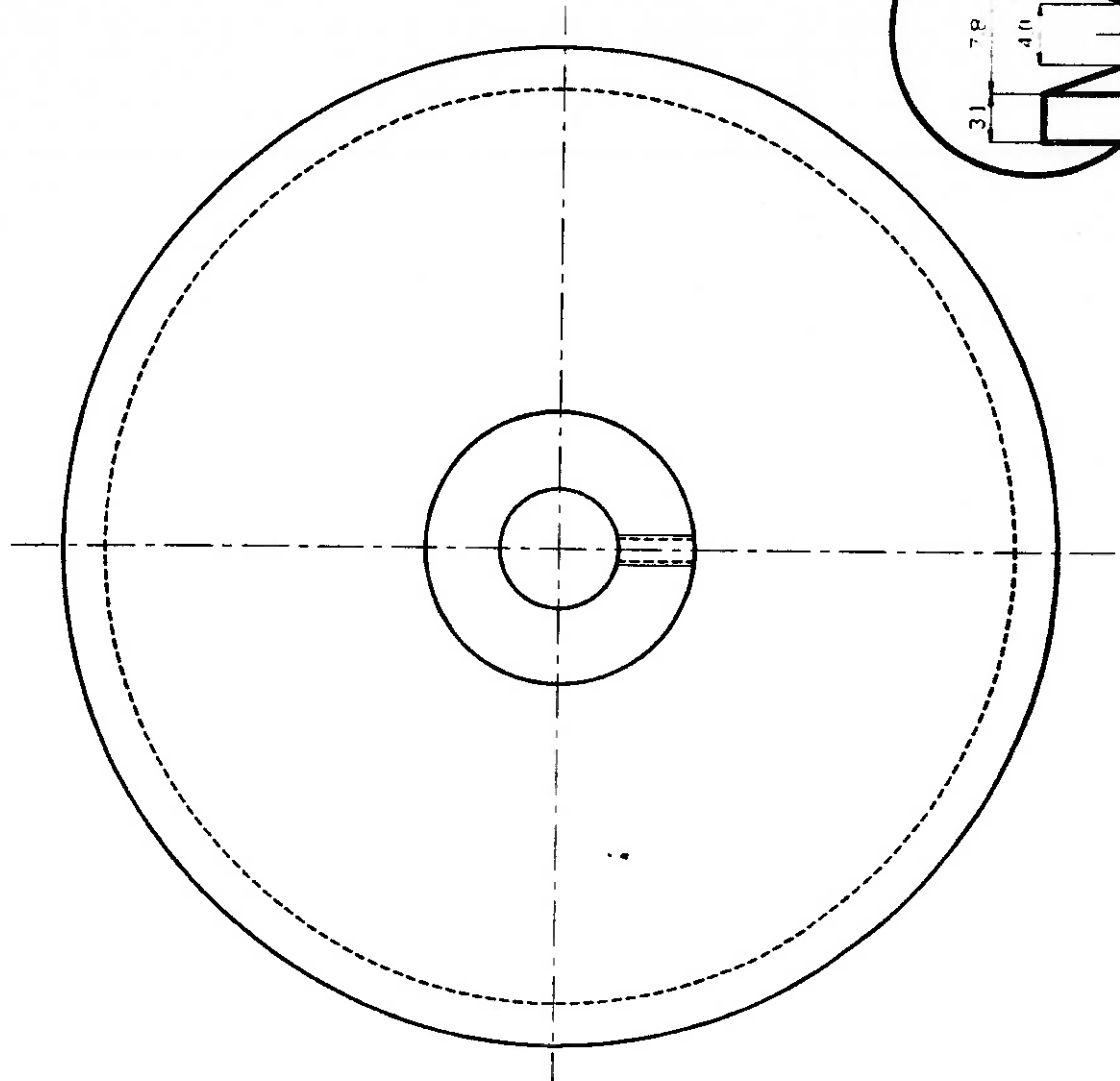
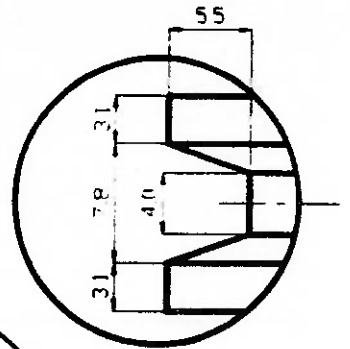
CENO- USP			MATERIAL DESCRITO ACIMA	DATA	25/03/97	DESENHO Nº	07-6
ESCALA	1:1	DIM	MM	MANCAL SUPERIOR DO TUBO E BUCHA			



CENO - USP			MATERIAL	DATA	25/08/97	DESENHO Nº	08-6
ESCALA	1:1	DIM	MM	DESCRITO ACIMA	MANCAL INFERIOR DO TUBO E BUCHA		

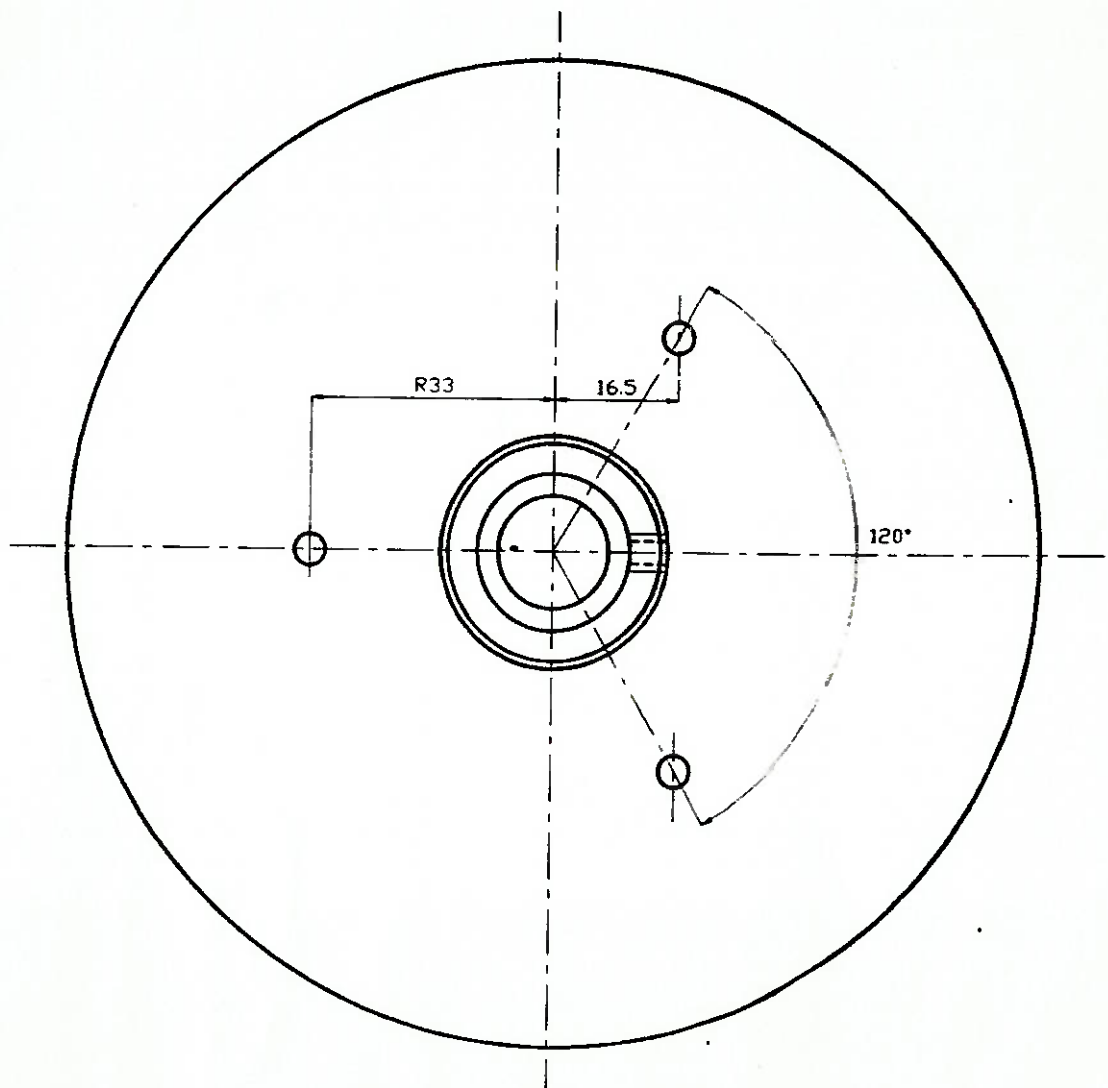
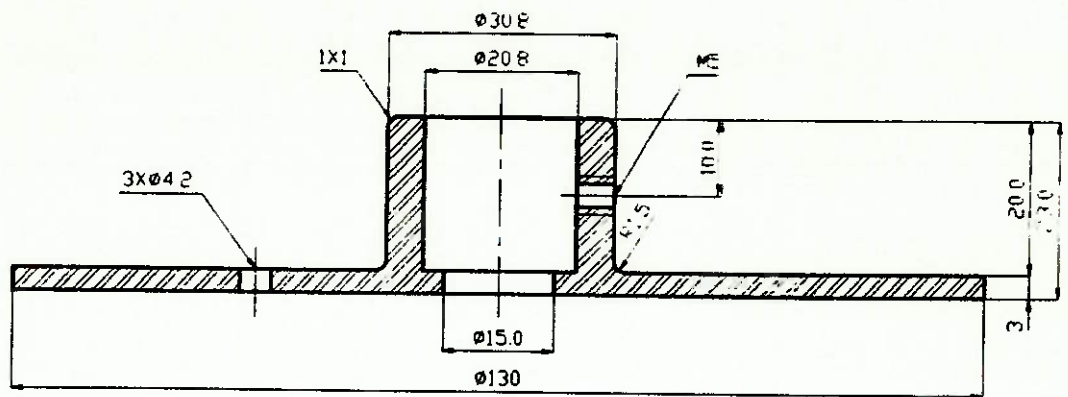
POLIA Nº	A	B	C	Quantidade
1	131.5	15.8	36	1
2	131.5	20.8	41	1

DETALHE "X"  
(ESCALA 2:1)



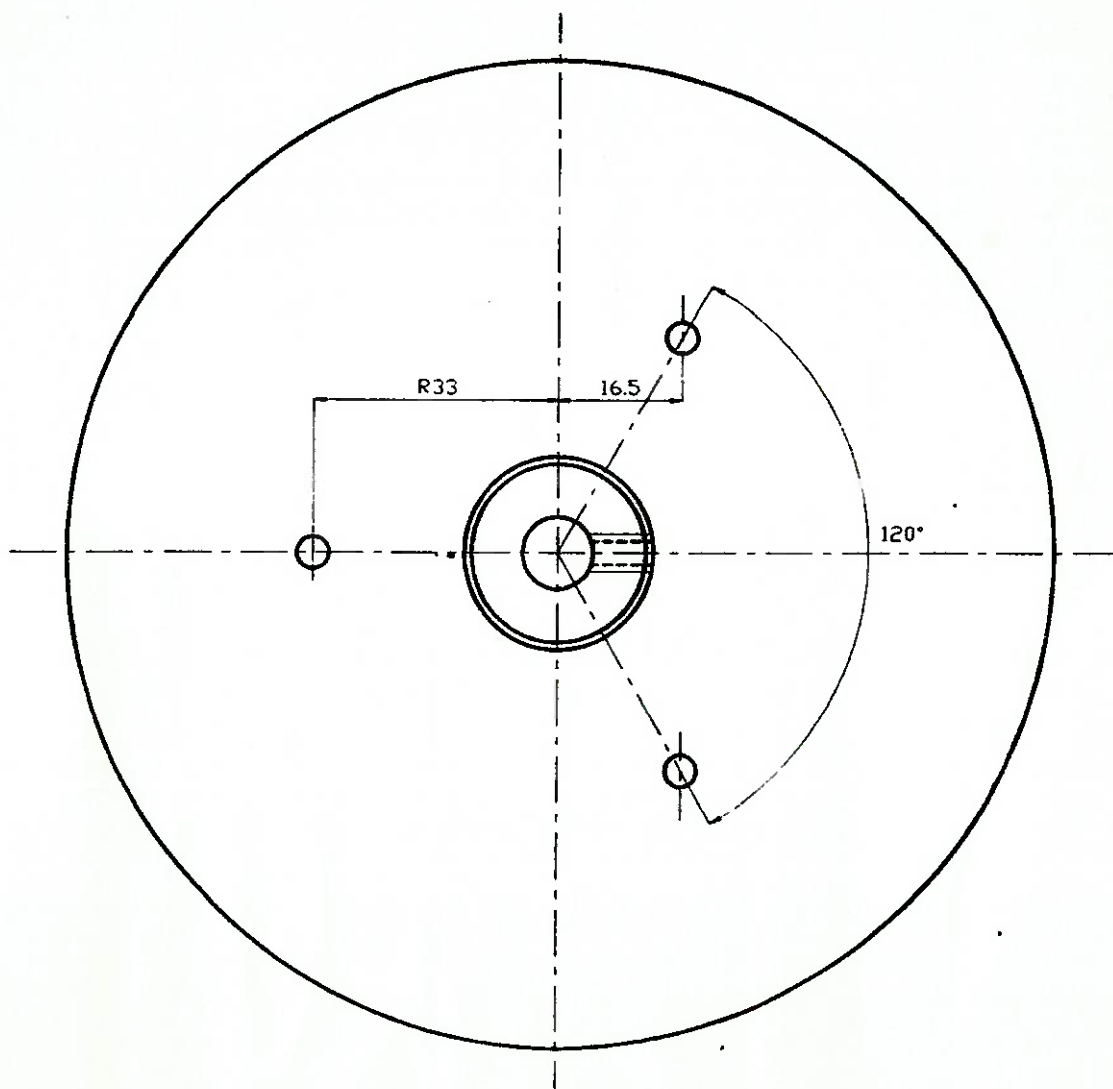
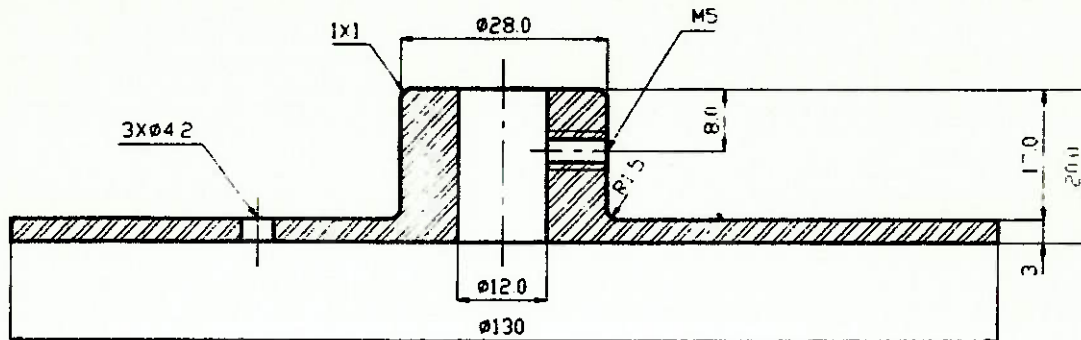
TOLERANCIA  
GERAL  $\pm 0.1\text{mm}$

CENO-USP			MATERIAL	DATA	05/03/97	DESENHO Nº	09-6
ESCALA 1:1 DIM MM			AÇO - INOX 304				
POLIA DO EIXO E DO TUBO (PADRÃO-POLIA 1)							



TOLERANCIA  
GERAL  $\pm 0,1\text{mm}$

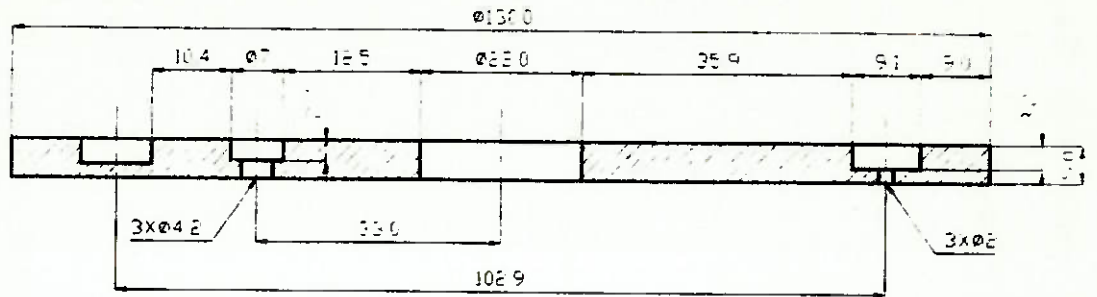
CENO- USP			MATERIAL	DATA	05/09/97	DESENHO Nº	10-6
			AÇO - INOX 304				
ESCALA	1:1	DIM	MM	PORTA-DISCO SUPERIOR			



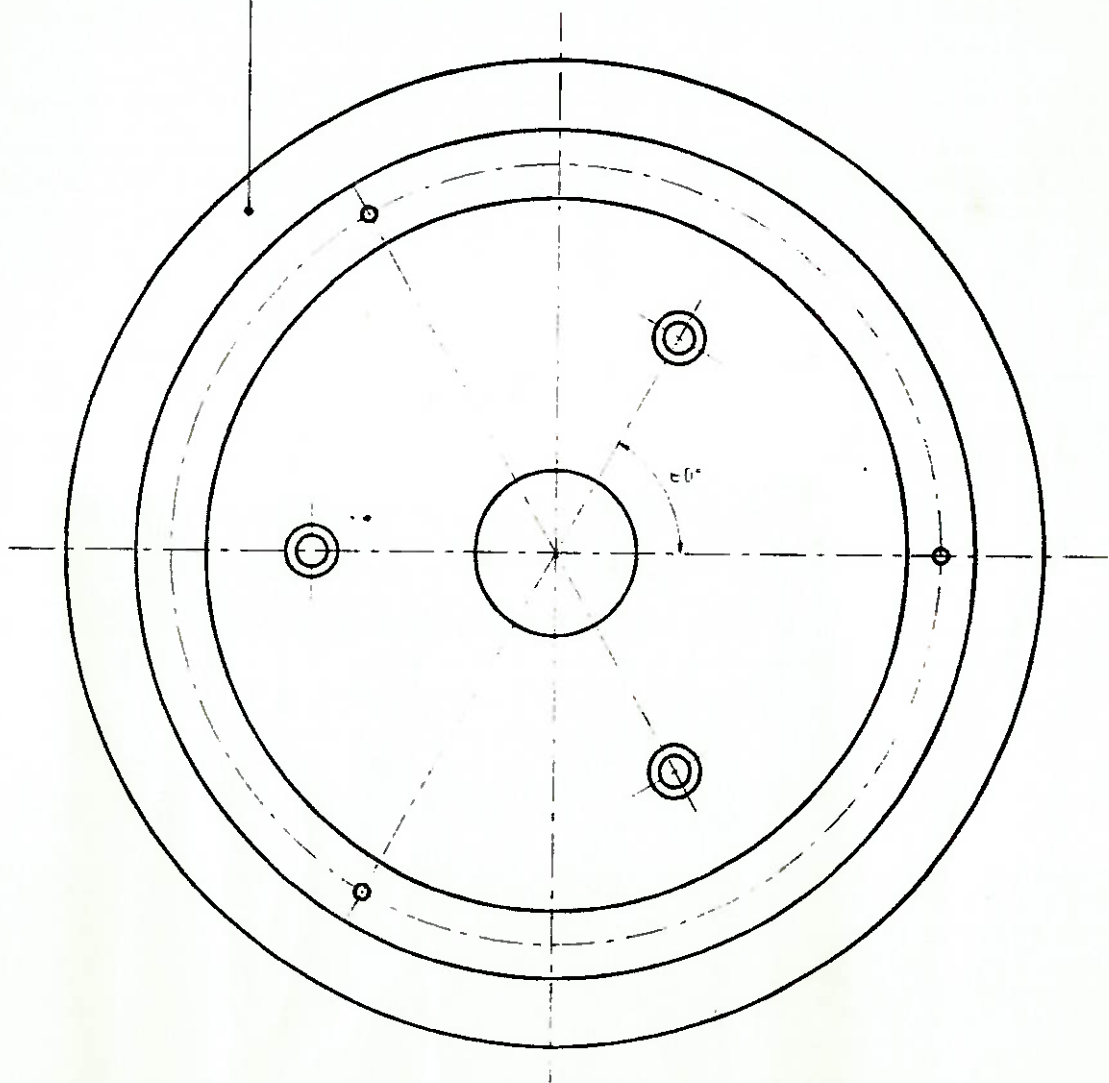
TOLERÂNCIA  
GERAL  $\pm 0,1\text{mm}$

CENO - USP		MATERIAL	DATA	05/09/97	DESENHO Nº	11-6
		AÇO - INOX 304				
ESCALA	1:1	DIM	MM	PORTA-DISCO INFERIOR		



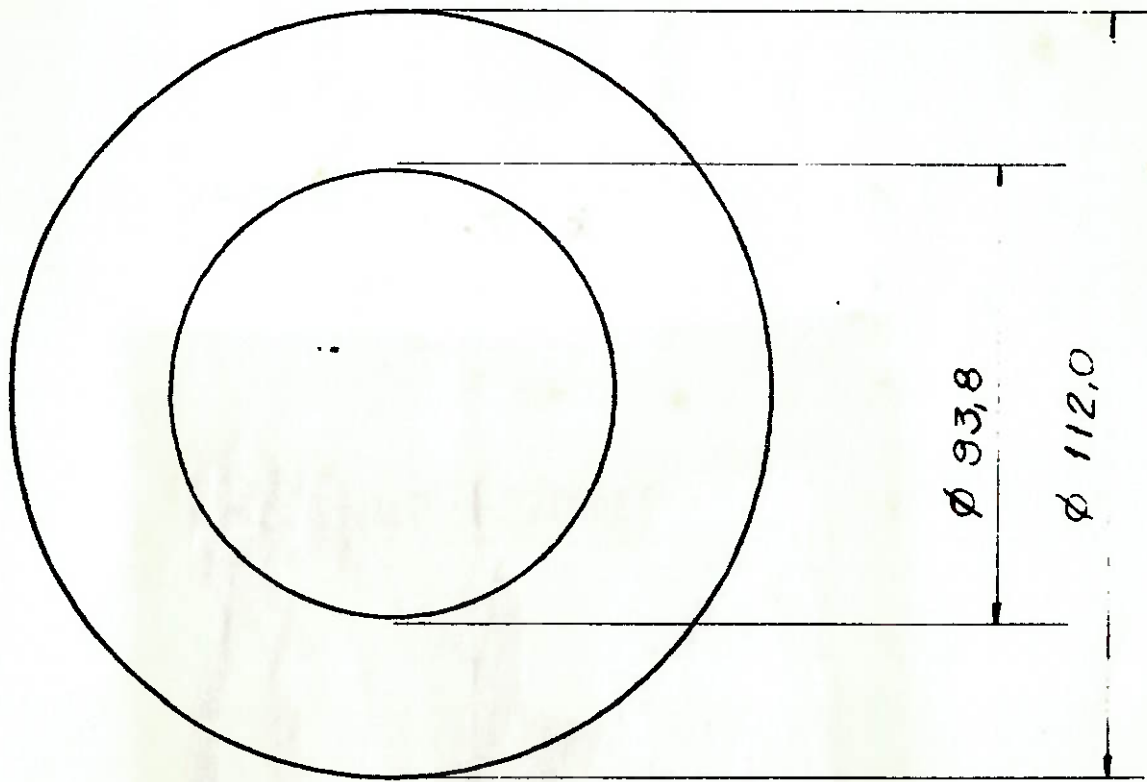


TEFLON PURO  
Quantidade: 2



TOLERANCIA  
GERAL ± 0.1 mm

CENO - USP		MATERIAL TEFLON	DATA 07/09/97	DESENHO Nº: 12-6
ESCALA 1:1	DIM MM	DISCO SUPORTE PARA CORPO DE PROVA		



espessura = 3,18 mm ( 1/8" )

Dimensões em mm

12/05/97	Material	Cobre
sem escola	Corpo de prova - rotativo	