

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DISPOSITIVO PARA ESTUDO CORROSÃO-DESGASTE

Relatório Final de PMC-580 / PMC-581
Projeto Mecânico I e II para Graduação
na Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo

Aluno: Murillo Moranza Di Cicco

Orientador: Prof. Dr. Deniol K. Tanaka

São Paulo
1998

**“Dedico este trabalho a meus familiares que tanto se dedicaram para
minha formação.”**

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Deniol K. Tanaka e ao Prof. Dr. Amilton Sinatora pela paciência, esforço e colaboração para que este projeto se concretizasse.

Agradecimentos especiais ao Professor João Telésforo Nóbrega de Medeiros, pelo apoio e dedicação na fase de conclusão deste trabalho.

Aos integrantes do Laboratório de Fenômenos de Superfície, especialmente ao Eng. Carlos Henrique da Silva e à Eng.^a Marcia Marie Maru, pelo incentivo e companheirismo nos momentos de trabalho.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1 PASSIVIDADE	6
2.2 O ESTUDO DO SINERGISMO CORROSÃO-DESGASTE	9
2.3 REVISÃO DA LITERATURA	13
3. PROJETO DO DISPOSITIVO	15
3.1 COMPONENTES DO SISTEMA	16
3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	17
3.2.1 <i>Especificações técnicas : Potenciostato/Galvanostato.....</i>	<i>18</i>
3.2.2 <i>Equipamento de ensaio de desgaste: Tribômetro.....</i>	<i>20</i>
3.3 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	22
3.3.1 <i>Características Funcionais</i>	<i>22</i>
3.3.2 <i>Características Operacionais.....</i>	<i>22</i>
3.3.3 <i>Características Construtivas.....</i>	<i>23</i>
3.4 ENTRADAS E SAÍDAS DO SISTEMA.....	24
3.5 CRITÉRIOS DE PROJETO	26
3.6 SÍNTESE DE SOLUÇÕES	27
3.7 SOLUÇÃO ADOTADA	32
3.8 PROJETO DOS COMPONENTES	33
3.8.1 <i>Indentador</i>	<i>33</i>
3.8.2 <i>Suportes.....</i>	<i>33</i>

3.8.3	<i>Sistema de Vedação</i>	34
3.8.4	<i>Contatos Elétricos</i>	34
3.9	PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	36
4.	TESTES COM O PROTÓTIPO	37
4.1	ENSAIOS PRELIMINARES	37
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	43
4.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
5.	ANÁLISE DE CUSTOS	47
6.	CONCLUSÕES	49
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
7.1	BIBLIOGRAFIA CITADA	51
7.2	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	52
8.	ANEXOS	53

Índice de Figuras

Figura 1: Comportamento de metais que apresentam o fenômeno da passividade	6
Figura 2: Disposição dos equipamentos no LFS.	17
Figura 3: Painel frontal do Potenciostato.	19
Figura 4: Painel traseiro do Potenciostato.	19
Figura 5: Tribômetro - Máquina de Ensaio Pino contra disco.	21
Figura 6: Configuração da Solução 1.	28
Figura 7: Configuração da Solução 2.	29
Figura 8: Configuração da Solução 3.	30
Figura 9: Configuração das Soluções 4 e 5.	31
Figura 10: Tela de Configuração (“Setup”) do Software M352.	44

Índice de Tabelas

Tabela 1: Componentes do Tribômetro Utilizado.....	20
Tabela 2: Possibilidades Construtivas para os componentes do projeto.....	27
Tabela 3: Resultados dos ensaios com o tribômetro.....	42
Tabela 4: Componentes do Projeto e respectivos custos.....	47

1. Introdução

O presente trabalho, realizado junto ao LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfície) tem por objetivo principal o projeto e a construção de um dispositivo para estudo do sinergismo corrosão-desgaste, mais especificamente visando a medida do tempo de repassivação de metais.

O Laboratório de Fenômenos de Superfície está integrado à área de Projeto e Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Seu campo de trabalho principal é o estudo de fenômenos resultantes da interação entre superfícies ou do meio com as superfícies. Dentre esses fenômenos o LFS concentra-se no estudo do atrito, desgaste e corrosão e, especialmente, da interação entre corrosão e desgaste. Dedicar-se ainda ao controle desses fenômenos, através da seleção de materiais e revestimentos.

A motivação para a realização deste trabalho é construir um equipamento que possibilite o estudo do sinergismo corrosão-desgaste no LFS. A dimensão de sua importância pode ser avaliada pela sua disponibilidade restrita a pouquíssimos grupos de pesquisa no país, apesar da abrangência de sua utilização na avaliação fenomenológica de situações de campo.

O equipamento desenvolvido deve ser capaz de controlar e monitorar as principais variáveis do fenômeno, além de permitir que as mesmas sejam arquivadas ao longo da realização dos ensaios. O equipamento deverá possibilitar a realização de ensaios lineares e rotativos. O LFS possui equipamentos que poderiam ser aproveitados no projeto, como o potenciostato e o tribômetro, satisfazendo às condições acima expostas. Pode-se, além disso, aproveitar-se muitos estudos na área de corrosão-desgaste, obtidos em trabalhos de

estágio e iniciação científica, realizado pelo aluno em períodos anteriores. Tais trabalhos incluem tanto a teoria como a montagem e operação dos equipamentos.

Sendo assim, este trabalho está dividido nas seguintes etapas: apresentação dos aspectos teóricos de interesse, breve descrição dos equipamentos potenciostato e tribômetro, resumo do estudo de viabilidade, desenvolvimento do projeto, construção do protótipo (com análise de custos), procedimentos de ensaio (incluindo configuração de software), apresentação do andamento do projeto e conclusões.

É apresentada também uma breve Revisão da Literatura, que visa orientar aqueles que desejam um maior aprofundamento no assunto.

2. Fundamentos Teóricos

Os danos causados pela desgaste e corrosão atingem várias divisões da indústria, trazendo muitos prejuízos, onde pode ser citada a perda direta de material, diminuição da vida útil dos equipamentos e substituição de componentes desgastados e corroídos.

Os processos de desgaste e corrosão envolvem diferentes mecanismos, tanto no aspecto eletroquímico como no mecânico. O efeito combinado dos mesmos geralmente resulta em um aumento significativo da degradação do material. A interação entre abrasão, *rubbing*, impacto e corrosão pode significativamente aumentar a perda de material, especialmente em meios aquosos, produzindo assim efeito sinérgico.

A intensificação do desgaste ou da corrosão de um componente pode reduzir drasticamente sua vida em serviço em função da elevada perda total de material. Assim, o conhecimento dos mecanismos intensificadores do processo é relevante.

Como exemplo, um aço inoxidável que possua excelente resistência à corrosão; ao se desgastar, por ação de uma única ou mais partículas abrasivas, terá seu filme passivo removido. A resistência à corrosão está atrelada diretamente à integridade desse filme. A quantificação do sinergismo corrosão - desgaste pode auxiliar na escolha dos melhores materiais, que assegurarão a mínima perda total de material, para um meio particular.

Dunn [1995] [1] identificou dezessete relações sinérgicas entre abrasão, impacto e corrosão, que pode significativamente aumentar o desgaste em meios secos ou aquosos. Qualquer estratégia para minimizar os efeitos do sinergismo corrosão – desgaste requer um entendimento do mecanismo envolvido, o modo como ele interage e sua importância em meios específicos.

Em termos quantitativos, muitos pesquisadores tem estudado, recentemente, métodos para definir o problema, ou melhor se aproximar da resposta que descreva o sinergismo corrosão-desgaste. Utilizam equações que relacionam as dimensões do risco, as características dos materiais, as condições do meio e a perda de material (ou o desgaste) esperado. Um fato importante é que os materiais, o meio e as condições de serviço influem drasticamente no mecanismo atuante.

Entretanto, um outro aspecto importantíssimo deve ser analisado. Quando as condições de desgaste ocasionam remoção, rompimento ou fratura da película passiva, passa a entrar em ação não só o efeito do desgaste, mas sim o efeito combinado ou sinérgico corrosão-desgaste. Para que esse efeito não seja desastroso, é conveniente que a camada removida se restabeleça rapidamente.

Observa-se que a camada passiva volta a se formar espontaneamente, em muitos materiais sob condições adequadas de oxidação: ocorre a repassivação do material. O componente volta a se proteger da corrosão, por ocasião da formação dessa camada. O fenômeno ainda não está bem entendido. A habilidade de repassivação dos metais pode ser determinada pelo estudo da cinética de repassivação.

Em termos práticos, mais importante do que entender o mecanismo de formação dessa película, é necessário observar o tempo que a mesma demora para se restabelecer, tornando a proteger o material da corrosão. Muitos estudos têm sido conduzidos para medir esse tempo de repassivação.

O princípio básico na medida do tempo de repassivação consiste em monitorar o comportamento eletroquímico do material durante o processo de desgaste (por exemplo, por riscamento). Com todas as condições cuidadosamente controladas e monitoradas,

mede-se a corrente de repassivação em função do tempo, utilizando-se equipamento adequado que forneça uma curva de polarização do material.

A medida do tempo de repassivação e quais parâmetros influem no mesmo podem fornecer importantes informações sobre condições do meio e materiais a serem utilizados para otimizar o desempenho de componentes colocados em serviço sob condições que favoreçam a atuação do sinergismo corrosão/desgaste.

A seguir, serão discutidos alguns conceitos e algumas teorias estudadas na bibliografia, onde se procura descrever ou quantificar o fenômeno sinérgico corrosão-desgaste.

2.1 Passividade

A passividade [2] corresponde basicamente a uma perda da reatividade química que ocorre em certos metais e ligas sob determinadas condições. O fenômeno é difícil de ser definido devido à sua natureza complexa e condições específicas em que ocorre. Quando um metal está passivado, ele se torna inerte e se comporta como metais nobres, a exemplo da platina e do ouro. Os materiais de engenharia mais susceptíveis a esse tipo de comportamento são o ferro, níquel, silício, cromo, titânio e ligas contendo esses metais.

Seja inicialmente o comportamento de um metal comum, imerso em uma solução ácida desaeurada. Nesse caso, o aumento do potencial de oxidação da solução – que pode ser conseguido adicionando-se oxigênio ou íons do metal envolvido – ocasiona um rápido aumento, exponencial, da taxa de corrosão.

A figura 1 apresenta o comportamento de um metal passivado.

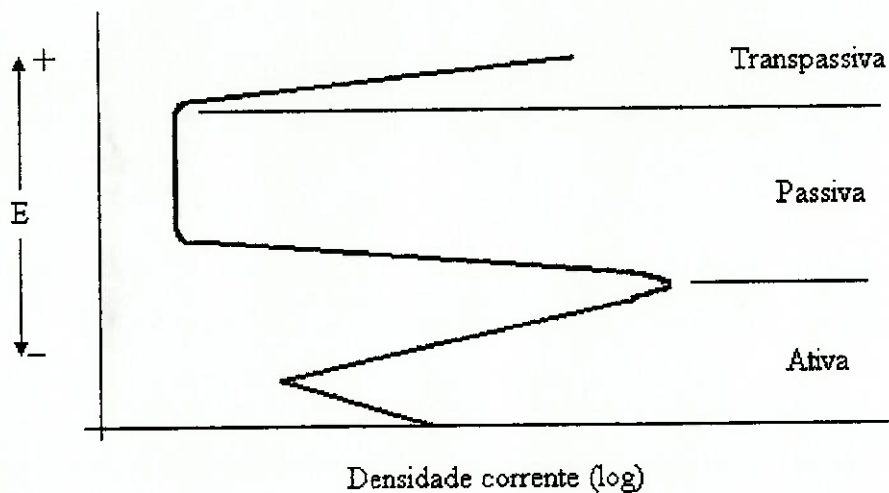


Figura 1: Comportamento de metais que apresentam o fenômeno da passividade [2].

O comportamento desse material com relação à taxa de corrosão pode ser dividido em três partes: ativa, passiva e transpassiva. Na região ativa o comportamento é idêntico ao

de um metal comum, já descrito. Entretanto, se continuarmos adicionando substâncias que aumentem o poder de oxidação da solução, haverá um ponto em que a taxa de corrosão cairá bruscamente. Esse ponto corresponde ao início da região passiva.

Finalmente, em concentrações muito altas de oxidantes ou na presença de oxidantes muito poderosos, chega-se à região transpassiva, onde a taxa de corrosão volta a crescer com o aumento do poder de oxidação. O titânio particularmente não apresenta essa última etapa.

Observa-se, então, uma queda na taxa de corrosão na transição da região ativa para a passiva. Basicamente, ocorre a formação de um filme superficial ou uma barreira protetora que é estável sob concentrações média a elevada de oxidantes e que é destruída em concentrações muito altas dos mesmos.

Essa característica de alguns metais tem sido usada com sucesso no desenvolvimento de novas técnicas de prevenção e combate à corrosão e, conseqüentemente, do processo sinérgico corrosão-desgaste.

Uma outra propriedade importante dessa camada pode ser observada – agora do ponto de vista mecânico. Ela serve como uma camada protetora ao desgaste de superfícies de materiais em contato que apresentem movimento relativo. Esta camada impede o contato metal-metal propriamente dito, onde as interações atômicas são intensas e a adesão causa um desgaste acelerado dos materiais. Na presença da camada passiva o contato deixa de ser metal-metal e passa a ser metal-óxido ou óxido-óxido. Dessa forma são minimizados a adesão e o desgaste decorrente da mesma.

Esse filme passivo pode ser rompido ou fraturado pela exposição do material a condições extremas (como abrasão, erosão e desgaste excessivo). Entretanto, em alguns

materiais, essa camada pode voltar a se formar, caso o meio possua concentração adequada de oxidante – ocorrendo então a repassivação do metal.

A seguir, comentar-se-ão os diversos mecanismos de desgaste e corrosão e a interação entre eles, aprofundando-se o estudo do sinergismo corrosão-desgaste.

2.2 O estudo do sinergismo corrosão-desgaste

Muitos estudiosos têm analisado com cuidado a atuação do sinergismo corrosão-desgaste. Na revisão da bibliografia foram encontrados alguns estudos e alguns modelos desenvolvidos por pesquisadores. A seguir serão apresentados e descritos alguns estudos importantes na área, e como os modelos foram desenvolvidos.

Yue *et al. apud* Watson [1] utilizou um aparato eletroquímico para estudar a corrosão-erosão, variando composição química e pH do meio corrosivo. Yue concluiu que quando o material é ensaiado em soluções fracas (ácidos fracos) as propriedades mecânicas do material do corpo de prova são o principal fator que influencia a taxa de degradação do material. Já para soluções fortes (ácidos fortes e baixo pH), as propriedades eletroquímicas do corpo de prova influenciaram a taxa de corrosão-erosão. Para Yue, a intensidade do sinergismo corrosão-desgaste (no caso erosivo) é função primariamente da acidez do eletrólito. Quando há sinergismo entre corrosão e erosão, não se desenvolve filme passivo na superfície do corpo de prova durante polarização anódica.

Jiang *et al. apud* Watson [1] examinou o efeito do desgaste na corrosão de aços inoxidáveis austeníticos. Concluiu-se que o efeito do desgaste na corrosão está associado à taxa de reconstituição dos filmes passivos rompidos durante riscamento (“*scratching*”), ou seja, a taxa de repassivação. Quando sujeitos a desgaste por deslizamento intermitente, as ligas com maior taxa de repassivação apresentaram menor efeito do sinergismo corrosão-desgaste. Foi observada alteração do comportamento eletroquímico do material ensaiado, devido à presença de condições de desgaste.

Noël e Ball *apud* Watson [1] estudaram o comportamento sinérgico corrosivo-abrasivo em aços de baixa liga, com o objetivo de simular o ambiente de mineração. Nos

seus ensaios, realizados em meios corrosivos de pH = 6,7, observou-se que com o aumento da carga aplicada, a perda de massa devido à corrosão permaneceu praticamente constante, enquanto que a perda de material devido ao desgaste aumentou. Com isso, a atuação percentual da corrosão frente ao desgaste diminuiu. Foi desenvolvida uma equação que descreve o fenômeno.

$$y = A \cdot x^{-0,458}$$

onde y (%) é o efeito da corrosão, A é uma constante que depende das condições corrosivas do meio e materiais, e x (kgf) é a carga. Assim, quando o desgaste abrasivo ocorre continuamente sob cargas elevadas, o efeito percentual da corrosão é desprezível. Para cargas baixas e abrasão não freqüente, o efeito da corrosão pode assumir taxas muito altas. Essa pesquisa pode ser útil quando da seleção de um material para mineração, onde a corrosão-desgaste prevalece. Entretanto, não deve ser generalizada para outros materiais, como, por exemplo, aços inoxidáveis, que podem apresentar características bem diferentes.

Barker e Ball *apud* Watson [1] estudaram o sinergismo corrosão-abrasão de aços inoxidáveis comerciais, martensíticos, ferríticos-martensíticos e austeníticos metaestáveis. O procedimento consistiu em plotar, para cada tipo de aço, a perda em massa *versus* a distância percorrida e o tempo de exposição às condições corrosivas. Aços contendo menos de 11% de Cr em massa não formaram película passiva e foram mais corroídos que os aços que contêm mais de 11% de Cr. Aços com elevada porcentagem de Cr são predominantemente passivos e apresentam baixa perda de material quando expostos em ensaios de 46 horas de exposição à solução corrosiva. Três tipos de comportamento sinérgico foram observados na corrosão-abrasão. No tipo I, os aços mostraram corrosão generalizada logo após a abrasão, sem “tempo de indução”.

“Tempo de indução” é definido como o espaço de tempo até que ocorra corrosão. Os aços do tipo II exibiram uma curta indução, antes do advento da corrosão localizada. Os aços do tipo III passivaram imediatamente e não perderam material, exceto pela corrosão por pites. A perda de material acumulada foi menor no tipo III. Essa pesquisa identificou o efeito sinérgico corrosão-desgaste e seu efeito foi descrito em termos de resistência relativa à corrosão-abrasão para meios aquosos típicos de minas.

Batchelor e Stachowiak *apud* Watson [1] mediram a degradação de aço e magnésio, sob condições de abrasão e corrosão, e compararam o resultado com corrosão simples e abrasão a seco. As taxas de desgaste eram medidas em perda de massa (em gramas), por unidade de comprimento de riscamento (m). O efeito sinérgico foi baseado na razão entre a taxa de corrosão simples e a taxa de desgaste em abrasão a seco (K). Se $K < 0.1$, o sinergismo entre corrosão e desgaste é improvável. Se $K > 0.4$, o sinergismo é quase certo. Quando K assume valores maiores ou iguais a 1, o efeito da corrosão-abrasão pode ser 4 vezes o efeito da corrosão, mesmo quando a taxa de abrasão a seco é desprezível.

Kim *et al.* *apud* Watson [1] estudaram a corrosão-desgaste em equipamentos solicitados em movimento. Utilizaram-se diversos materiais de mancais de aeronaves navais. O efeito sinérgico foi determinado medindo-se o efeito da carga no potencial de circuito aberto. Observou-se que em ambientes em que se formavam filmes passivos, o desgaste aumentou a taxa de corrosão significativamente. O desgaste também mudou o potencial de corrosão para a região mais ativa. A densidade de corrente de corrosão aumentou em cerca de 100 vezes comparada à condição de não-desgaste. Em meios em que não se formou filme passivo, o desgaste não alterou significativamente o potencial de corrosão.

Será apresentado a seguir um breve resumo comparativo dos principais autores analisados na literatura, referentes a estudos de repassivação e comportamentos de materiais no sinergismo corrosão-desgaste.

2.3 Revisão da Literatura

Autor	Materiais e Métodos Utilizados	Resultados/Conclusões
Satish V. Kailas e S.K. Biswas [1993] [3]	<p>Esclerômetro linear (comprimento do risco 3mm). Carga normal de 14N a 148N, dependendo do material. Ângulo do indentedor entre 15° e 45°. Velocidade: $1,66 \times 10^{-5}$ m/s a $1,66 \times 10^{-3}$ m/s. Ensaio lubrificado e a seco.</p>	<p>Estudo da variação do comportamento mecânico do material (tensões, formação de trincas, coeficiente de atrito), alterando a ângulo de ataque do indentedor. Verificação da estabilidade microestrutural.</p>
T. A. Adler e R. P. Walters [1993] [4]	<p>Aparato: Célula de corrosão adaptada para posicionamento de indentedor. Indentedor de diamante (ϕ 0,2 mm da ponta). Meios: ar e solução 1M Na₂SO₄ (pH 6,7). Potenciostato para controlar eletroquimicamente o processo.</p>	<p>Dureza à indentação calculada pela largura do risco e relacionada à dureza Vickers. Medição do desgaste através da integração da área entre o perfil do risco e a superfície original. Resultados não afetados pela presença ou ausência de filme passivo.</p>
T. A. Adler e R.P. Walters [1992] [5]	<p>Aparato: Célula de corrosão adaptada para posicionar indentedor. Solução 1M Na₂SO₄ e ar. Potenciostato para controlar eletroquimicamente o processo. Velocidade de riscamento: 0,0098 m/s a 0,0298 m/s. Carga: 1,12 a 7,0 N (Método estático e método da batida).</p>	<p>Medição do restabelecimento do filme passivo através de análise da variação da corrente durante a realização do risco e observação da geometria do mesmo.</p>
T. A. Adler e R.P. Walters [1992] [6]	<p>Aparato: Célula de corrosão adaptada para posicionar indentedor. Indentedor de diamante. Métodos estático e da batida (simular crosão de partículas colidindo a alta velocidade na superfície). Velocidades e cargas: Método da batida: 0,032 m/s, 5 g; 0,087 m/s, 50 g de 1,12 N a 0,94 N. Solução 1M Na₂SO₄, pH 6,7. Potenciostato para controlar eletroquimicamente o processo.</p>	<p>Corrosão da parte riscada observada pela densidade de corrente e formação de filme passivo. Desgaste estimado através da integração da área entre o perfil riscado e a superfície original.</p>
A.J. Perry, J. Valli, P.A. Steinmann [1988] [7]	<p>Diversos carregamentos e velocidades. Equipamentos disponíveis comercialmente: CSEM manual (CSM); CSEM com carregamento contínuo (CSA).</p>	<p>Estudo da adesão</p>
Ricardo Emilio F. Q. Nogueira e José Daniel B. de Melo [1988] [8]	<p>Esclerômetro linear (retilíneo); Carga utilizada: 0,35 a 2,5 N. Velocidades: $0,5 \times 10^{-4}$ a 15×10^{-4} m/s.</p>	<p>Estudo do comportamento em abrasão do quartzo α, variando a carga e a velocidade. Medição de: número de trincas, largura da trinca, dureza do risco, largura do sulco, atrito (F_T/F_N).</p>

Autor	Materiais e Métodos Utilizados	Resultados/Conclusões
J.D.B. Mello [1986] [9]	Medição de força tangencial, lateral e normal atuando no indentedor. Carga: 0,15 a 2 N. Velocidade de riscamento: 125 a 520 µm/s. Indentedor piramidal de base triangular (tetraedro) de diamante, com sensor piezoelétrico tridimensional.	Determinação das características ao riscamento (dureza, tenacidade, energia específica), para estabelecer a contribuição de cada fase no processo de desgaste abrasivo.
Olof Vingsbo e Sture Hogmark [1984] [10]	Máquina de ensaio Charpy (pendular) modificada. Indentedor cerâmico piramidal quadrado. Metalografia para análise dos resultados.	A energia absorvida é relacionada à resistência à abrasão de diversos materiais (entra também a perda de material).
T. Mathia e B. Encrenaz [1981] [11]	Velocidades de riscamento de 1 a 100 µm/s. Comprimento do risco: 10 µm a 10 mm. Carga de 0,005 N a 0,5 N. Microtribômetro. Indentedor piramidal tipo Vickers.	Observação de microfaturas e presença de tensão residual em função de velocidade de risco e carga aplicada.
J.D.B. Veldkamp, N. Hattu, V.A.C. Snijders [1978] [12]	Indentedor de diamante, pirâmide. Variação da carga e velocidade. Observação de mecanismo de formação de trincas e do número de trincas. Velocidade: 0,4 a 400 µm/s. Carga normal: 0,05 a 5 N.	Investigação da formação de trincas em materiais frágeis. Resultados comparados com alguns modelos teóricos.
N. Mann e A. Broese Van Groenou [1977] [13]	Indentedor de diamante (piramidal quadrado). $2\theta = 100, 120$ e 136° . Velocidade: 1 a 400 µm/s. Carga normal: em torno de 0,2 N. Diversos tipos de aço como material de ensaio (corpo de prova). Modelagem de Bowden e Tabor, variando parâmetros de interesse.	Resultados: Coeficiente de atrito, dureza, tamanho do risco (e geometria).
D. Graham e R. M. Baul [1972] [14]	Indentedor piramidal e esférico; Esclerômetro pendular. Ensaio de materiais dúcteis.	Simulação e estudo do impacto entre ferramenta e peça na usinagem. Alguns aspectos relacionados: força tangencial/normal, energia específica, profundidade de penetração, etc.
A.J. Sedriks e T.O. Mulhearn [1964] [15]	Materiais comerciais tratados termicamente para fornecer um tamanho de grão específico. Indentedor piramidal com diversos ângulos de ataque.	Mecanismos de desgaste abrasivo através de análise de forças e atrito, em materiais endurecidos/tratados.
A.J. Sedriks e T.O. Mulhearn [1963] [16]	Indentedor na forma de pirâmide para simular partículas abrasivas. Carga constante 0,2 kg em todos os experimentos. Velocidades inferiores a 0,5 mm/s.	Equações e valores que representam características dos materiais em abrasão. Observação da geometria do corte.

3. Projeto do Dispositivo

Este projeto tem o objetivo de disponibilizar um equipamento que permita a realização de ensaios eletroquímicos do material durante remoção da película passiva, sob condições controladas, tanto pelo potenciostato como pelo tribômetro. Assim, será medida a velocidade de regeneração da película passiva: corrente de repassivação em função do tempo.

Como fatores que motivaram a realização do projeto, pode ser citado o trabalho de iniciação científica realizado anteriormente pelo aluno (projeto CNPq), onde foram aprofundados conceitos de corrosão e desgaste. Além disso, a necessidade de um equipamento para estudos esclerométricos visando pesquisas em pós-graduação e a escassez de equipamentos similares em laboratórios de fácil acesso, motivaram a efetivação desse projeto. A viabilidade técnica e econômica do projeto foi analisada, durante o estudo de viabilidade e o projeto foi aprovado.

O projeto baseou-se em uma cuidadosa análise dos equipamentos em funcionamento, análise do desenho de conjunto do tribômetro (Anexo 1) e um profundo estudo em artigos de esclerometria (ver Revisão Bibliográfica) e livros da área (ver Referências Bibliográficas).

3.1 Componentes do Sistema

O dispositivo para ensaio, que servirá como interface potenciostato-tribômetro, deve apresentar basicamente os seguintes elementos:

- Suportes para eletrodos;
- Contatos elétricos (sensores/eletrodos);
 - ⇒ Disco (corpo de prova) - Working (potenciostato);
 - ⇒ Solução (eletrodo de referência) - Reference (potenciostato);
 - ⇒ Solução (contra-eletrodo) - Counter (potenciostato);
- Vedação do sistema (impedir que ocorram vazamentos que possam danificar o equipamento);
- Indentador, com dureza muito maior que a do material que compõe o corpo de prova;
- Embalagem para armazenamento;
- Manual de Montagem e Operação.

Entretanto, o sistema pode apresentar outros componentes, para otimizar os resultados do projeto. Tais componentes serão detalhados mais adiante.

3.2 Descrição do Equipamento

O equipamento utilizado como base do projeto, existente no Laboratório de Fenômenos de Superfície, consiste de um potenciostato, para o controle e monitoramento eletroquímico, e de um tribômetro (máquina pino contra disco) utilizado em estudos de desgaste. A idéia principal consiste em integrar tais dispositivos, de forma a obter ensaios de corrosão-desgaste, sendo permitido controle e monitoramento das variáveis de interesse. Ambos os equipamentos possuem software próprio, fornecido pelo fabricante. A interface permite gravar os resultados em arquivos pré determinados pelo usuário, e controlar os ensaios. É necessário, portanto, a disponibilidade de dois microcomputadores. Entretanto, como há versões de software mais básicas, para DOS, os computadores podem apresentar configurações simples (como um processador 386).

A seguir, é ilustrada a disposição dos equipamentos no LFS.

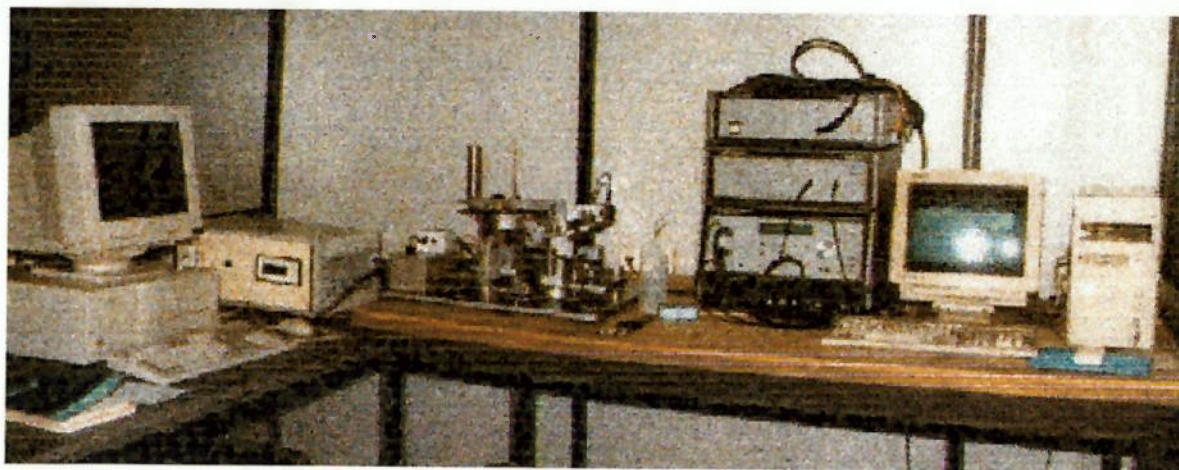


Figura 2: Disposição dos equipamentos no Laboratório de Fenômenos de Superfície.

3.2.1 Especificações técnicas : Potenciostato/Galvanostato

Modelo: 283

Fabricante: EG&G Parc (Princeton Applied Research)

Peso: 18,2 kgf

Dimensões: 17”(largura) x 10,3”(altura) x 20”(profundidade)

Requisitos : 90-130 VoltsAC ou 210-260 VoltsAC - 50 - 60 Hz

Faixa de Temperaturas:

- Aplicações ideais: 20°C a 30°C
- Aplicações aceitáveis: 10°C a 40°C

Computador / Interface: Placa GPBIB PC II-A.

Os comandos podem ser efetuados diretamente a partir do painel frontal ou via micro, através de interface. A interface permite também a coleta de dados diretamente em arquivos pré determinados pelo usuário. No painel frontal são realizadas as conexões com a célula de corrosão (ou outro sistema a ser ensaiado). Através do painel traseiro é realizada a conexão com o micro e a entrada de força.

O software utilizado é o M352 SoftCorr, com versões para DOS e Windows, permitindo o uso de equipamentos desde os mais simples (como processadores 386), até os mais avançados (Pentium ou superior). O software permite configuração de parâmetros de ensaio, formato dos arquivos de dados e análise dos resultados, através de gráficos, equações e tabelas.

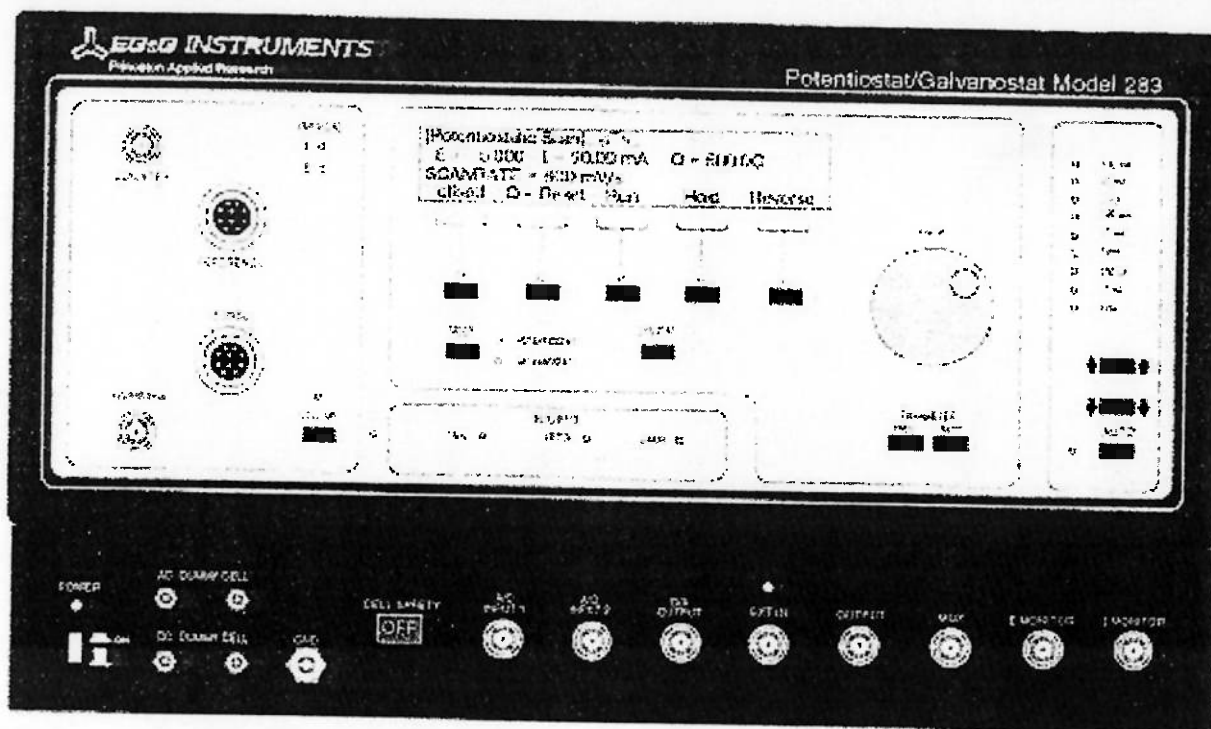


Figura 3: Painel frontal do Potenciostato utilizado nos ensaios.

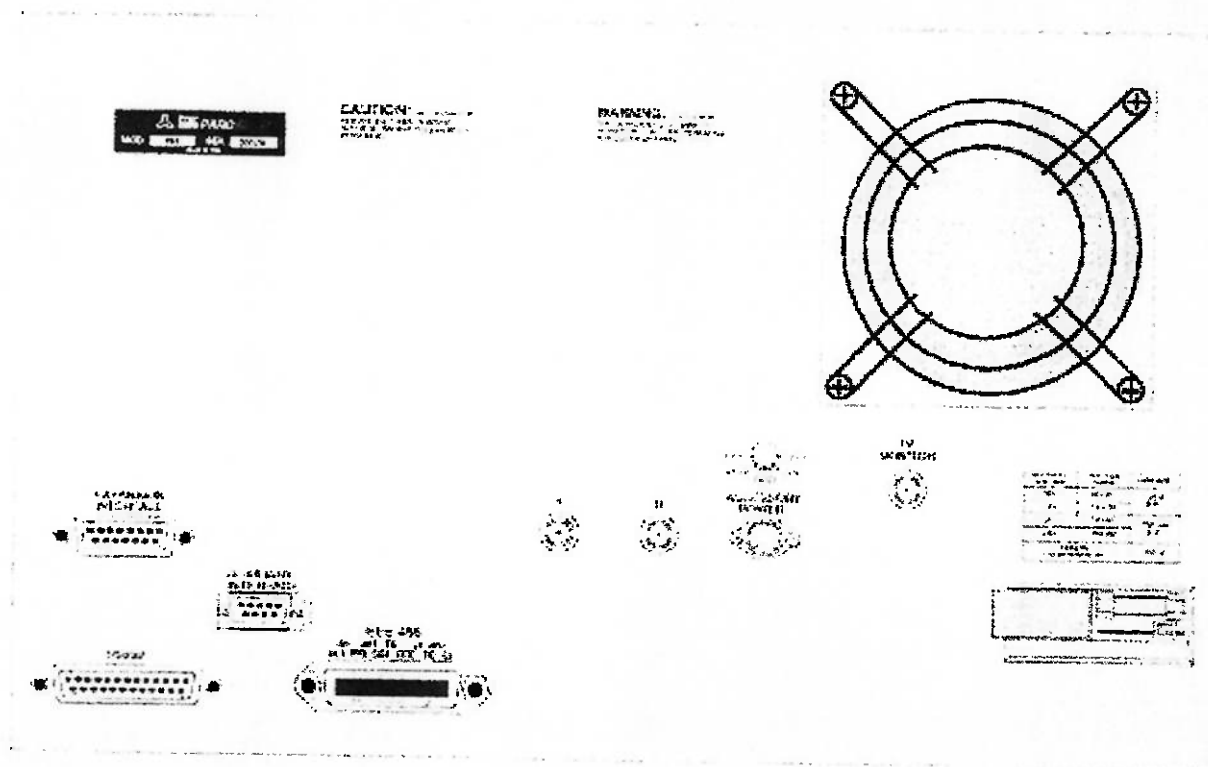


Figura 4: Painel traseiro do Potenciostato que compõe o sistema do projeto.

3.2.2 Equipamento de ensaio de desgaste: Tribômetro

O tribômetro utilizado corresponde a uma máquina de ensaio de desgaste Pino contra Disco. Tal equipamento foi fabricado pela *PLINT & Partners Ltd.* e possui os seguintes componentes, indicados na tabela abaixo:

Componente	Marca	Tipo	N.º de Série
Motor Principal	Parvalux	DC Shunt 100/120 V	SDIC D38 D7013039
Transdutor de Carga	Plint & Partners Ltd.	Databeam 5 Kg	A22325
StrainGauge	SA125	Ganho: 454	125/260
Redutor	HPC	10:1	-
Motor eixo-x	RS	12V, 20 rpm	341-660
Motor braço	RS	24V, 8 rpm	440-363
Drive do Motor	Sprint	400i	1896
Drive do Motor eixo-x	Sprint	200 XVL	1396
Interface	Plint Slim	-	03013
Sensor Umid. / Temp.	Omega	HX93C	C6080
Computador	Dell Computer Corp.	DMM Volts 115/230	KD 4MX
Monitor	Dell Computer Corp.	D1528-LS 100-240 V	90628T003Z36
Teclado	Dell Computer Corp.	SK-1000REW	M960358056
Mouse	Dell Computer Corp.	-	LZA 54512049
Power Supply	Computer Products	16RA Series	-

Tabela 1: Componentes do Tribômetro Utilizado.

Uma vez listados os componentes, é apresentada a forma construtiva do aparelho, o que apresenta extrema importância para os parâmetros de projeto. O Anexo 1 ilustra a forma construtiva do aparelho (desenho de conjunto).

Os parâmetros básicos de ensaio permitidos pelo equipamento são os seguintes:

- Velocidade de deslizamento: 0.01 m/s a 1.6 m/s
- Carga normal de contato: 0.1 N a 20 N

Observa-se que tais parâmetros estão de acordo com grande parte dos estudos realizados na área, o que permite que tal equipamento seja utilizado para esse fim.

O software fornecido pela Plint, para DOS, permite o ajuste de configurações de parâmetros de ensaio, seqüência de ensaio, e aquisição de dados em arquivos pré determinados. A saída dos dados é no formato do programa Quattro Pro, mas é preferível converter os dados para formato Excel, procedimento adotado para análise dos resultados deste projeto.

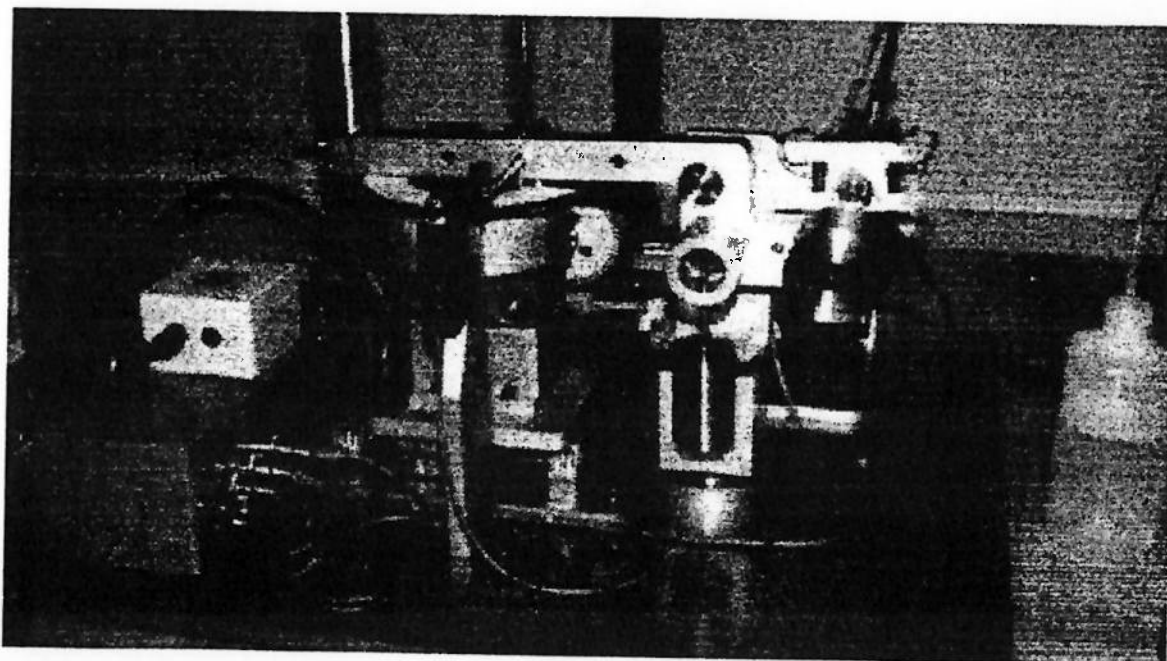


Figura 5: Tribômetro - Máquina de Ensaio Pino contra disco.

3.3 Características do Projeto

3.3.1 Características Funcionais

Facilidade de operação: As peças devem permitir uma montagem fácil, sendo que devem ser colocadas, se necessário, ferramentas que facilitem a montagem e operação do dispositivo. É preferível, entretanto, que se utilize de ferramentas padronizadas e/ou daquelas que são fornecidas junto com o equipamento base.

Segurança: O kit deve oferecer proteção adequada, no intuito de evitar acidentes. Entende-se por acidente o evento que possa colocar em risco a condição física do operador, ou a integridade do equipamento. Para tanto, é necessário prever condições anormais de funcionamento, controlando as entradas do sistema (entradas desejáveis e indesejáveis).

3.3.2 Características Operacionais

Durabilidade: Por se tratar de equipamento de laboratório, sua utilização pode ser bastante freqüente e ocorrer sob as mais diversas condições. Mesmo assim, pode-se fixar um tempo mínimo de vida que o equipamento a ser projetado deve apresentar. Neste caso, podemos fixar a vida do dispositivo em dois anos, considerando utilização de 3 horas diárias, cinco dias por semana (estimativa baseada em observação do uso dos demais equipamentos do LFS). Não se inclui aí o indentador, que por motivos óbvios poderá ser substituído com mais freqüência.

Confiabilidade: O tempo para a primeira falha é uma boa medida para a confiabilidade do equipamento. No presente projeto, entende-se que o tempo para primeira falha não deve ser inferior a 1 (um) ano, sob as mesmas condições de uso descritas acima. Após a primeira falha, o tempo entre falhas sucessivas deve superar 6 (seis) meses.

Manutenção: A manutenção dos componentes do dispositivo pode ser realizada em cada desmontagem do mesmo: limpeza de componentes, lubrificação, ajustes de peças móveis, entre outros. Um aspecto importante para o bom funcionamento do dispositivo diz respeito ao indentador, cujo perfil deve ser medido periodicamente, para verificar se é necessário a troca do mesmo.

3.3.3 Características Construtivas

Como se trata de um dispositivo que servirá como interface para duas máquinas já existentes e em operação, o projeto será fortemente influenciado pelas características das mesmas. Entretanto, pode-se propor ainda alguns aspectos construtivos a serem respeitados:

Dimensões: Não há limitações para as dimensões do dispositivo; apenas deve ser observada compatibilidade com o tribômetro e potenciostato, e não interferência nos mesmos.

Dispositivo Desmontável: O dispositivo desenvolvido neste projeto deve ser desmontável, para permitir que as máquinas que compõem o sistema sejam utilizadas isoladamente, sem alterações de suas características originais. Além disso, a desmontagem deve ser rápida e o mais simples possível, o que diminui os riscos de danificar o equipamento. O produto deve acompanhar uma embalagem para armazenamento entre desmontagens, enquanto o mesmo não esteja sendo utilizado.

Componentes básicos do equipamento a ser projetado: Como já foi citado anteriormente, o kit deve apresentar os seguintes componentes: Suportes para eletrodos; Contatos elétricos; Vedação do sistema (impedir que ocorram vazamentos que possam danificar o equipamento); Indentador, com dureza muito maior que a do material que compõe o corpo de prova.

3.4 Entradas e Saídas do Sistema

- Entradas desejáveis :

1. Corpos de prova;
2. Energia elétrica;
3. Comandos do operador.

- Saídas desejáveis:

1. Arquivos com resultados dos ensaios, armazenados por aquisição de dados computadorizada;
2. Equipamento desmontável, para permitir a utilização tanto do potenciostato como do tribômetro isoladamente;
3. Material ensaiado para análise em laboratório.

- Entradas indesejáveis:

1. Objetos estranhos colocados no sistema a ser ensaiado, que possam danificar o equipamento ou interferir nos resultados dos ensaios;
2. Comandos inadequados;
3. Corrente ou tensão elevadas (no caso de haver componentes elétricos);

- Saídas indesejáveis:

1. Ruído excessivo;
2. Vibrações excessivas;
3. Acidentes;
4. Falha ou ruína de componentes do sistema;
5. Vazamentos;
6. Choques no operador (se houver componentes elétricos);

7. Interferência entre os componentes do sistema, causadas pela colocação do dispositivo;
8. Microcomputadores, potenciostato ou tribômetro danificados.

3.5 Critérios de Projeto

No desenvolvimento deste projeto estão sendo levados em consideração os seguintes critérios de projeto:

- Segurança;
- Utilização de peças e equipamento padronizado;
- Preservação das características do Potenciostato e do Tribômetro;
- Durabilidade;
- Simplicidade e facilidade de operação e manutenção;
- Confiabilidade;
- Custo de fabricação;
- Desempenho;
- Custo de operação;
- Frequência de manutenção;
- Mínimo esforço do operador;
- Boa aparência.

3.6 Síntese de Soluções

Apresentados os critérios e características de projeto, segue abaixo tabela com possibilidades construtivas consideradas no projeto.

Contato Corpo de Prova Working	Contato – Potenciostato Working	Apoio Eletrodos: – Counter – Reference	Vedação
Solda	Mercúrio Líquido	Braço da Tribômetro	Borracha (O-Ring)
Encaixe Rotativo	Encaixe Rotativo	Suporte da Célula de Carga	Recobrimento do Prato com resina
Encaixe Fixo	Encaixe Fixo		Reprojeto do Prato
Escova			

Tabela 2: Possibilidades Construtivas para os componentes do projeto.

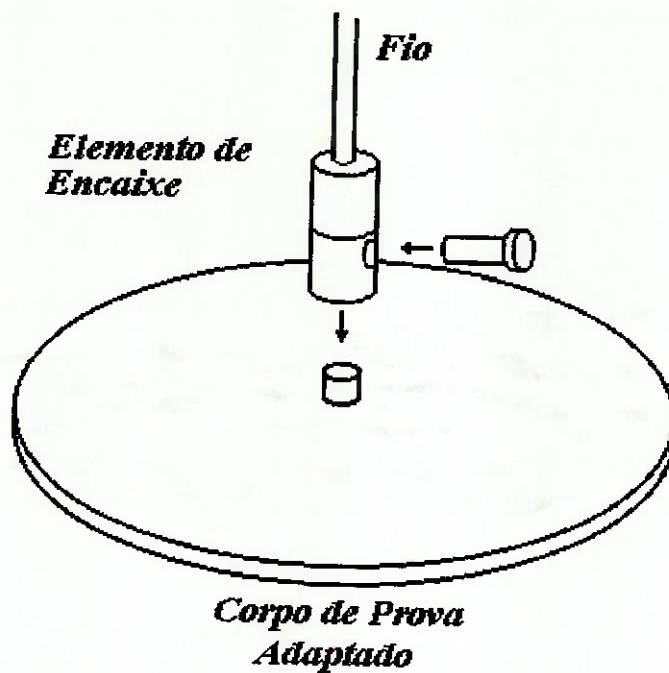
Assim, foram desenvolvidas algumas soluções que obedecessem aos critérios de projeto, anteriormente apresentados. Tais soluções serão apresentadas a seguir. Todas foram analisadas na etapa de Estudo de Viabilidade deste projeto.

Foi desconsiderada a opção de refazer o projeto do prato de apoio do corpo de prova, para que o mesmo fosse conectado ao potenciostato, por tratar-se de procedimento que alteraria as características originais do tribômetro, o que afetaria uma das condições deste projeto.

O contato entre corpo de prova e cabo de torção do tipo escova foi descartado, pois segundo estudos realizados, pode ocasionar ruído excessivo, o que prejudicaria o desempenho do equipamento em serviço.

Solução 1

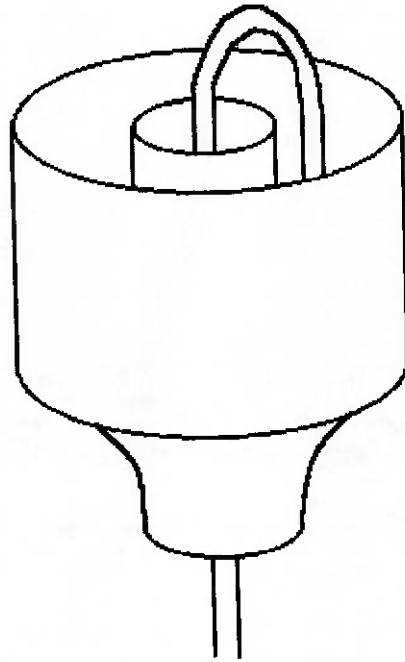
Figura 6: Configuração da Solução 1.



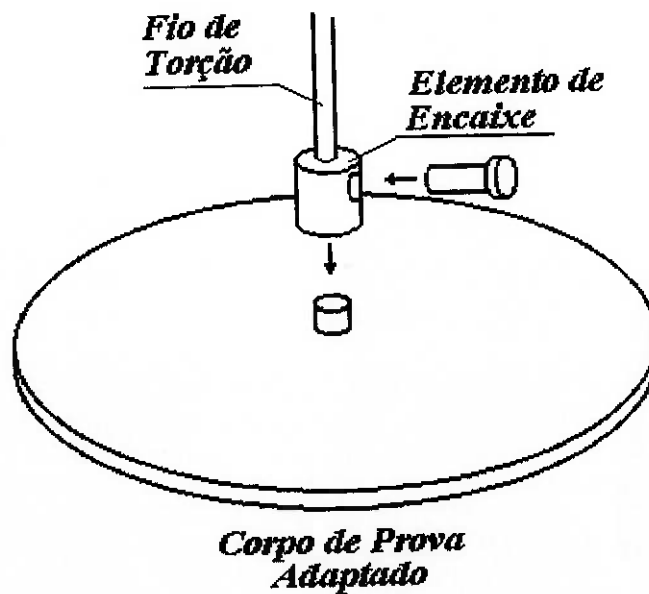
- Como o contato entre o corpo de prova e o fio é rotativo, basta conectar o fio diretamente ao terminal Working do potenciostato.
- A vedação do sistema poderia ser feita utilizando-se de um anel de vedação (O-Ring) ou revestindo-se o prato com resina.

Solução 2

Figura 7: Configuração da Solução 2.

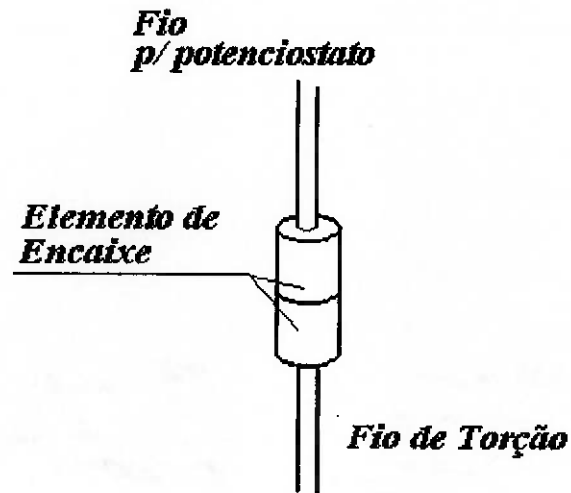


O corpo de prova é adaptado para receber um encaixe fixo (que gira junto com o cdp). O recipiente com mercúrio líquido faz a conexão entre o fio de torção (que está girando) e o terminal Working do potenciostato.

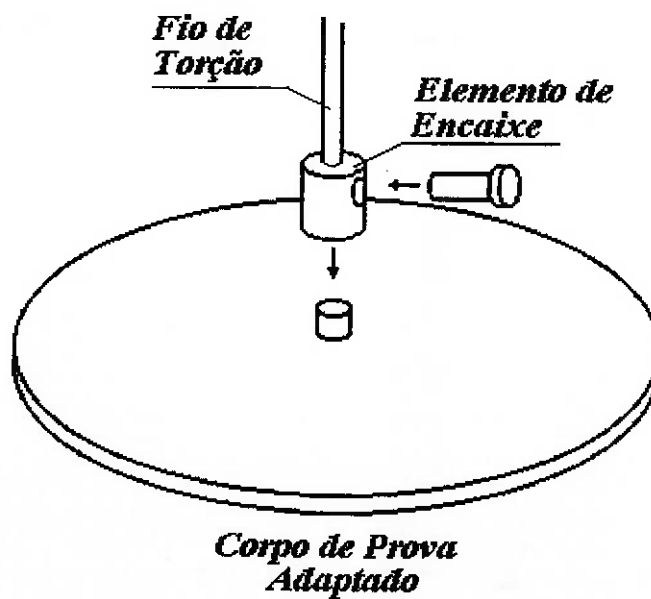


Solução 3

Figura 8: Configuração da Solução 3.

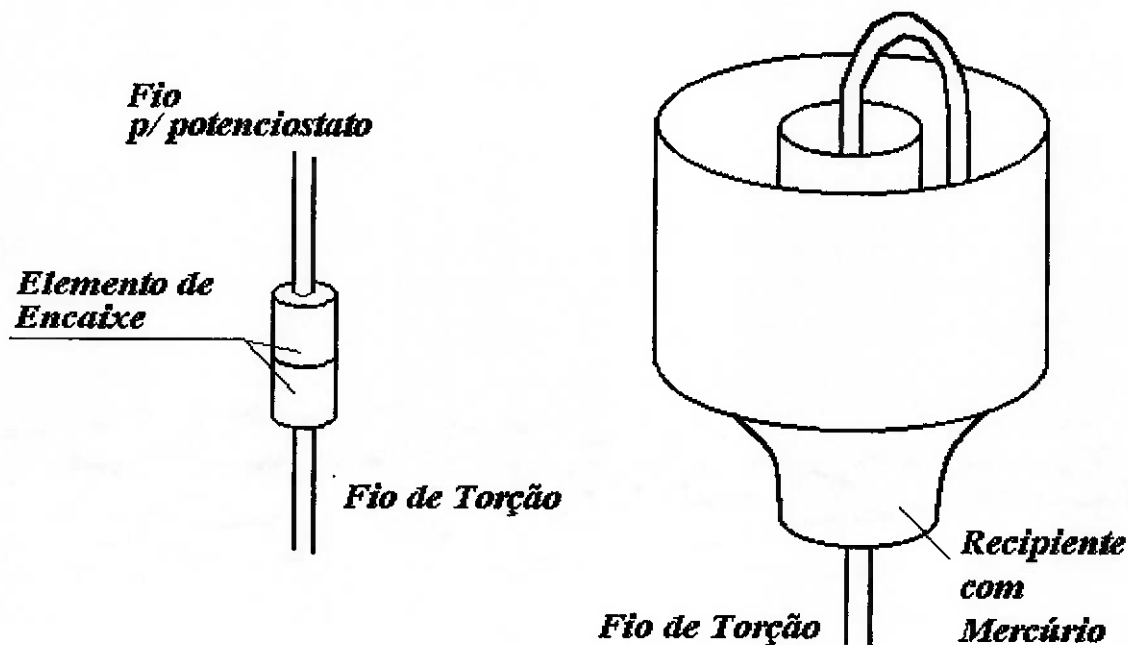


Solução muito parecida com a anterior, entretanto, o contato entre o fio de torção e o eletrodo Working é feito por um elemento rotativo, projetado especialmente para esse fim.

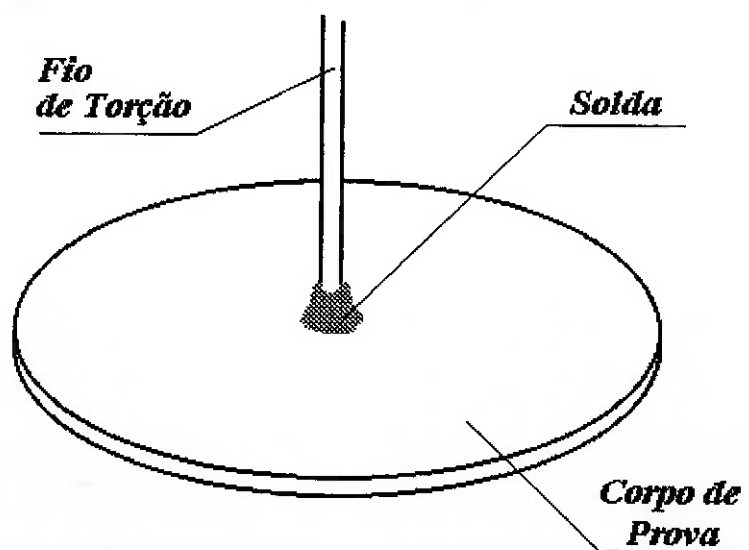


Soluções 4 e 5

Figura 9: Configuração das Soluções 4 e 5.



O corpo de prova e o fio de torção são soldados entre si. Permite-se duas variações: elementos rotativos no contato com o potenciostato ou o recipiente com mercúrio líquido. As observações a respeito da vedação do sistema e encaixe dos demais eletrodos são as mesmas das soluções anteriores.



3.7 Solução Adotada

Como solução do Projeto, adotou-se a solução de número 2, utilizando-se do método da Matriz de Decisão.

Como variação ao ensaio rotativo, a parte superior pode ser descartada quando da realização de ensaios do tipo linear, onde não há rotação do corpo de prova e o mesmo pode ser conectado diretamente ao potenciostato.

3.8 Projeto dos Componentes

Foram projetados os seguintes componentes do dispositivo:

- Indentador
- Suporte para Eletrodos
- Contatos Elétricos
- Vedação do Sistema

3.8.1 Indentador

O indentador selecionado, deveria adequar-se ao tribômetro. Inicialmente, foi lapidado, em safira sintética, um indentador com 3 mm de diâmetro e dimensões conforme Anexo 6. Entretanto, devido a dificuldades de encaixe no tribômetro, causada por imperfeições na lapidação (difícil controle de tolerâncias dimensionais), foi necessário adaptar o mesmo, utilizando-se dos pinos fornecidos pelo fabricante do tribômetro (pinos de latão, cilíndricos). Nesses pinos foi realizado um furo de centro, de forma a proporcionar ajuste interferente com o pino de rubi, que poderia então ser montado sem problemas junto ao tribômetro. Como configuração final, tem-se o dispositivo indicado no Anexo 6. Um outro problema, verificado nos testes com o protótipo, foi a quebra dos indentadores com pequeno ângulo de ponta (40° e 60°). Confeccionou-se, então, para disponibilizar outras opções ao usuário, pinos com diferentes ângulos.

3.8.2 Suportes

Foram desenvolvidos dois suportes básicos:

Suporte para eletrodos Counter (Contra-Eletrodo) e Reference (Eletrodo de Referência), dividido em duas peças: Suportes 1 e 2, indicados nas Anexos 3 e 4;

Suporte para Eletrodo Working (ligado ao corpo de prova, por meio de dispositivo rotativo, quando do ensaio rotativo) - Suporte 3, Anexo 5. Quando o ensaio é do tipo risco linear, este último suporte é descartado, sendo que o corpo de prova é conectado diretamente ao potenciostato, utilizando-se de um fio simples.

Ambos os suportes são fixos na peça de número 29 do tribômetro, por meio de parafusos (Vide anexo 1 desenho de conjunto do tribômetro), por meio de parafusos. O material utilizado deve ser inerte do ponto de vista da corrosão, para evitar resultados indesejados. A montagem de cada um pode ser observada no item Montagem do Equipamento.

3.8.3 Sistema de Vedação

O procedimento para vedação do sistema tem o objetivo de bloquear a passagem de líquido para partes como mancais, rolamentos, motores elétricos, componentes eletrônicos e sensores mecânicos, afim de preservar o sistema.

Tal método já foi utilizado em ensaios de desgaste, em meio aquoso. Utilizam-se elementos plásticos colocados nos furos e as fendas são vedadas com resina líquida. As fendas são preenchidas com resina aquecida (líquida) que, quando resfriada, se solidifica e garante o sistema. O uso da resina é importante, pois a mesma deve ser inerte ao meio, impedindo assim que interfira nos resultados do ensaio.

3.8.4 Contatos Elétricos

Os contatos elétricos são os responsáveis pela condução de corrente elétrica pelo sistema a ser ensaiado. Basicamente, o sistema apresenta os seguintes contatos elétricos:

- Contato Corpo de Prova – Fio de Torção (Conexão 1, Anexo 7): consiste de uma adaptação do corpo de prova (Anexo 2), onde é fixado um parafuso e um elemento de encaixe, que garante a ligação ao fio de torção. Material de fabricação: Material inerte à corrosão.
- Contato Fio de Torção – Eletrodo Working (Potenciostato)- Conexão 2, Anexo 8: utilizou-se um recipiente de vidro, contendo mercúrio líquido, dentro do qual o fio de torção poderia girar livremente conduzindo corrente elétrica. Dentro deste recipiente, coloca-se o fio que faz a conexão ao terminal Working do Potenciostato.
- Demais contatos: Contra eletrodo (anel de platina) e eletrodo de referência (próprio da célula de corrosão) colocados nos respectivos suportes, diretamente imersos no meio de ensaio.

3.9 Protótipo Desenvolvido

Foi construído um protótipo, conforme desenvolvimento do projeto, para fornecer informações sobre o funcionamento do dispositivo. Tal protótipo foi muito útil, embora haja sido confeccionado com materiais não definitivos e sua aparência (um dos critérios de projeto) não tenha sido considerada.

Alguns componentes foram confeccionados em madeira, por facilidade de trabalho e por ser material inerte à corrosão. Além disso, os componentes não seriam solicitados de forma extrema, do ponto de vista mecânico. Tal dispositivo foi utilizado para realização dos testes e ensaios, descritos e acompanhados nos itens seguintes deste texto.

Como maior dificuldade do projeto, pode ser citado a conexão do prato (corpo de prova) com o fio de torção, que se rompia com facilidade nos testes. Diversas configurações foram testadas, chegando-se à configuração final, que foi devidamente testada e aprovada.

Outro problema que surgiu ao longo do projeto foi a quebra do potenciostato, que foi retirado algumas vezes para manutenção, prejudicando o andamento do projeto e cumprimento do cronograma.

O protótipo foi finalizado em aproximadamente seis meses, após o término do estudo de viabilidade, sendo iniciada então a fase de testes e ensaios, e conseqüente análise dos resultados.

4. Testes com o Protótipo

4.1 Ensaios Preliminares

Foram realizados, no decorrer do projeto, ensaios e testes com os equipamentos, com os seguintes objetivos:

- Conhecimento do equipamento, recém adquirido;
- Verificação do funcionamento do equipamento;
- Configuração dos micros, instalação dos softwares e familiarização com os mesmos.

Inicialmente foram realizados experimentos com o potenciostato que, a princípio, visavam a familiarização com o equipamento e a absorção de conceitos que pudessem ser úteis para o desenvolvimento do dispositivo de medida de tempo de repassivação. Os ensaios consistiam basicamente na medida do potencial de corrosão do corpo de prova e no ensaio da polarização cíclica.

A princípio, o corpo de prova - um pequeno disco de ferro fundido branco - era preparado. Tal preparação consistia no polimento do mesmo, utilizando-se uma lixa grossa e lixas d'água de diversas granulações. Após eliminar a camada superficial numa lixa grossa motorizada, passava-se para a etapa manual utilizando a lixa d'água número 180, depois a 240, 320, 400 e, finalmente, lixa 600. O corpo de prova era finalmente limpo com álcool. Posteriormente, passa-se ao preparo da solução. Foram utilizados dois tipos de solução:

- Solução 3,5% em massa de NaCl em água destilada (“água do mar sintética”);
- Solução 0,5 Molar H_2SO_4 em água destilada.

Montada a célula de corrosão com o corpo de prova devidamente posicionado, coloca-se a solução em seu interior.

Passava-se ao preparo do potenciostato: calibração. Esta era feita ligando-se os cabos da seguinte maneira:

- *Reference + Counter em DC dummy* ;
- *Sense - Working em Cell.*

Através do painel do potenciostato, efetuando-se os comandos : 1) System; 2) F1; 3) F4.

Aguardava-se o sinal de “OK” e desconectavam-se os cabos.

Uma vez calibrado o potenciostato, realiza-se sua conexão com a célula de corrosão, conforme ilustra a figura abaixo.

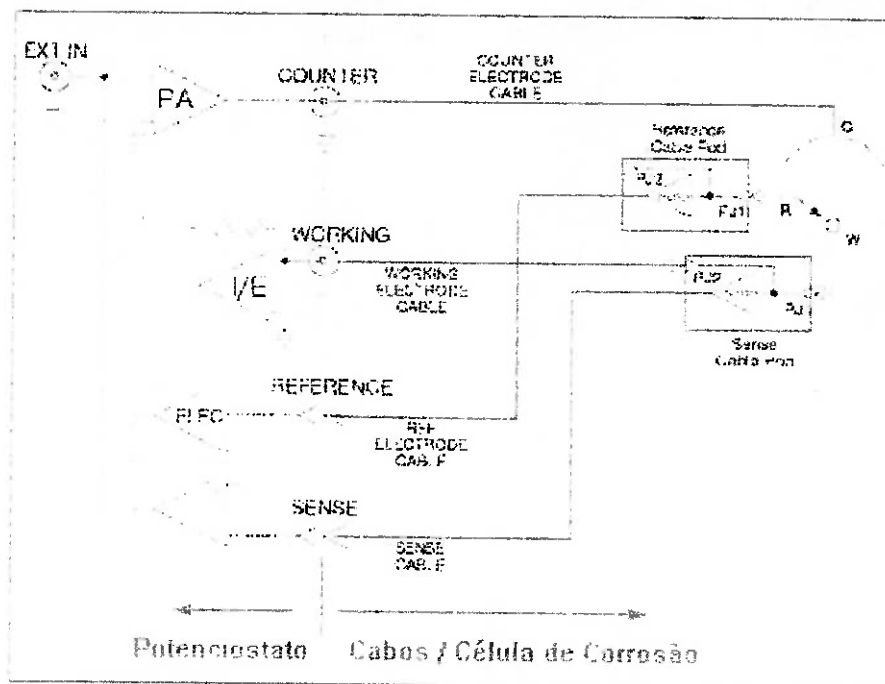


Figura 6: Conexões Potenciostato/Célula de Corrosão. As conexões na célula eram realizadas com garras jacaré. Já as conexões no potenciostato eram realizadas com cabos “buffer” (entradas JP1 e JP2).

A tecla Cell Safety era posicionada em ON.

Através do micro, no software M352 eram selecionados os parâmetros do ensaio, de acordo com o tipo de experimento (Polarização Cíclica, Potencial de Corrosão x Tempo, ou outros). O ensaio era então iniciado, através do comando RUN.

Encerrado o ensaio os dados eram salvos em arquivos para análise posterior. As conexões eram desfeitas e a célula de corrosão era desmontada e devidamente limpa. O equipamento estava pronto para outro ensaio.

Foram realizados ensaios de polarização cíclica e medida do potencial de corrosão, para água do mar sintética e solução aquosa de H_2SO_4 .

a) Ensaios de determinação do Potencial de Corrosão x Tempo.

Esse experimento permite a construção de uma curva de Potencial de Corrosão x Tempo. Se for realizado por tempo suficiente, o ensaio indicará um momento no qual o potencial de corrosão se torna constante (se estabiliza). O valor para o qual esse potencial de corrosão converge pode ser adotado para outros ensaios que necessitam desse dado como parâmetro. Um exemplo do que foi feito nesta pesquisa é a utilização do Potencial de Corrosão obtido neste ensaio para realizar ensaios de polarização cíclica da amostra.

b) Ensaios de Polarização Cíclica.

Os ensaios de Polarização Cíclica proporcionam uma análise qualitativa dos mecanismos de corrosão por pites (“*pitting*”). Este ensaio é também denominado “*pitting scan*” e pode determinar a tendência que o material apresenta ao “*pitting*”, ou corrosão localizada, sob certas condições dos meios corrosivos. O ensaio é particularmente útil no desenvolvimento de ligas que exigem uma elevada resistência à corrosão por pites.

O resultado do ensaio é uma curva que indica o Potencial de Corrosão (miliVolts) *versus* o logaritmo da corrente pela área (Amperes por metro quadrado – densidade de

corrente). Para realizar o ensaio, os parâmetros de entrada são o potencial vértice e a corrente inicial, para especificar onde se deseja que a leitura seja revertida.

O ensaio de Polarização Cíclica focaliza o comportamento do material na vizinhança do “joelho” da curva obtida, que corresponde à região a partir da qual a corrente elétrica passa a aumentar muito rapidamente com aplicação de um aumento da diferença de potencial. O programa aplica um potencial controlado a partir do potencial de corrosão (determinado em outro ensaio, anteriormente descrito), estendendo-se até algum ponto depois do “joelho”. A leitura progressiva de dados (com aumento da corrente e do potencial) é seguida por uma leitura regressiva até um ponto entre o vértice e o potencial de corrosão.

O resultado da curva obtida mostra quais as chances do material sofrer “*pitting*”:

- a) Se a curva regressiva apresenta aproximadamente o mesmo percurso da curva progressiva - na região depois do “joelho” - o material apresenta baixa susceptibilidade à corrosão por pites;
- b) Se a corrente regressiva depois do “joelho” for menor que a apresentada na progressão, o material provavelmente apresentará “*pitting*”.

O “*pitting*” é indicado pela repassivação dos pites durante a leitura regressiva, causando uma corrente menor que aquela obtida na leitura progressiva para cada potencial aplicado. A curva apresenta um comportamento de histerese e a posição e comportamento da curva indica as características do material no que diz respeito ao “*pitting*”.

Para o tribômetro, foram realizados ensaios visando testar o funcionamento do pino de rubi (indentador). Tais ensaios não necessitavam de lubrificação, pois desejava-se simplesmente medir o coeficiente de atrito rubi x aço carbono. Esta experiência consistia nos seguintes passos básicos:

1. Realização de limpeza do material: pino de rubi, disco (corpo de prova), etc;
2. Ajuste do prato com o redutor do tribômetro, utilizando um relógio comparador. Este procedimento foi adotado para evitar desalinhamento durante a rotação, o que poderia afetar os resultados;
3. Ajuste do corpo de prova (disco) no prato, também utilizando relógio comparador;
4. Nivelamento do braço que comporta o indentador, ajustando a altura do pino;
5. Colocação da carga pré-definida;
6. Programação da rotina de ensaio, via micro. Ajuste de parâmetros nos arquivos: “*Definition File*”, “*Alarm File*”, “*Sequence File*”;
7. Criação de um “*Data File*”: arquivo de aquisição de dados experimentais;
8. Verificação final e início efetivo do ensaio.

Foram realizados também, para observação do sistema de vedação, ensaios para observação do funcionamento do dispositivo em condições de lubrificação, ou seja, com uma solução colocada no interior do prato.

1. Inicialmente, o prato era revestido por uma camada protetora de cera de abelhas, liqüefeita com maçarico e aplicada com um pincel;
2. Antes da colocação do corpo de prova, era colocado, abaixo do mesmo, um disco plástico flexível para vedar o parafuso de fixação do prato;
3. Posicionado o corpo de prova, todo o sistema era revestido com cera, para prover vedação adequada;
4. Seguiam-se os outros passos normalmente, colocando-se, antes do início do ensaio, a solução que seria utilizada.

Segue uma breve apresentação dos resultados, para ilustração da utilização da máquina de pino contra disco:

Medida	Carga	Pressão	Coefficiente de Atrito (media)
1	1,2 N	2,4 MPa	0,042
2	3 N	6 MPa	0,148
4	6 N	12 MPa	0,193
5	10 N	20 MPa	0,224

Tabela 3: Resultados dos ensaios com o tribômetro.

Após uma breve descrição dos ensaios realizados com o potenciostato e tribômetro, serão descritos, a seguir, os procedimentos experimentais para testes do funcionamento e desempenho do protótipo desenvolvido no decorrer do projeto.

4.2 Procedimentos Experimentais

1. Preparo do Corpo de Prova e Solução

O corpo de prova consiste de um disco a ser usinado conforme indica desenho (Anexo 2), confeccionado com o material que deseja-se ensaiar.

Utilizou-se como meio corrosivo soluções aquosas 3,5% em massa de NaCl (“água do mar sintética”) e 0,5 M de H₂SO₄. Cada ensaio utiliza aproximadamente 100 ml de solução.

2. Montagem do Equipamento

O potenciostato deve estar ligado antecipadamente, no mínimo 30 minutos antes da realização do ensaio. Os terminais devem ser conectados conforme indica a figura 6 apresentada anteriormente.

A máquina Pino contra Disco deve ser montada na seguinte seqüência:

- Colocação do corpo de prova;
- Nivelamento do prato;
- Vedação do prato;
- Colocação do indentador de interesse;
- Aplicação do carregamento desejado, colocando-se as massas no local adequado.

O dispositivo de adaptação, que consiste no objetivo deste projeto, será montado nas seguintes etapas:

- Montagem dos suportes;
- Conexão do cabo de torção ao corpo de prova;
- Posicionamento dos sensores (eletrodos do potenciostato);
- Conexão dos sensores (eletrodos) ao potenciostato seguindo esquema da figura 6 acima;

- Colocação do mercúrio líquido.
3. Ajuste de Parâmetros: Software

No software M352, deve ser selecionado o tipo de ensaio, a curva de polarização a ser utilizada, o eletrodo de referência que estará em serviço, conforme indica a figura a abaixo.

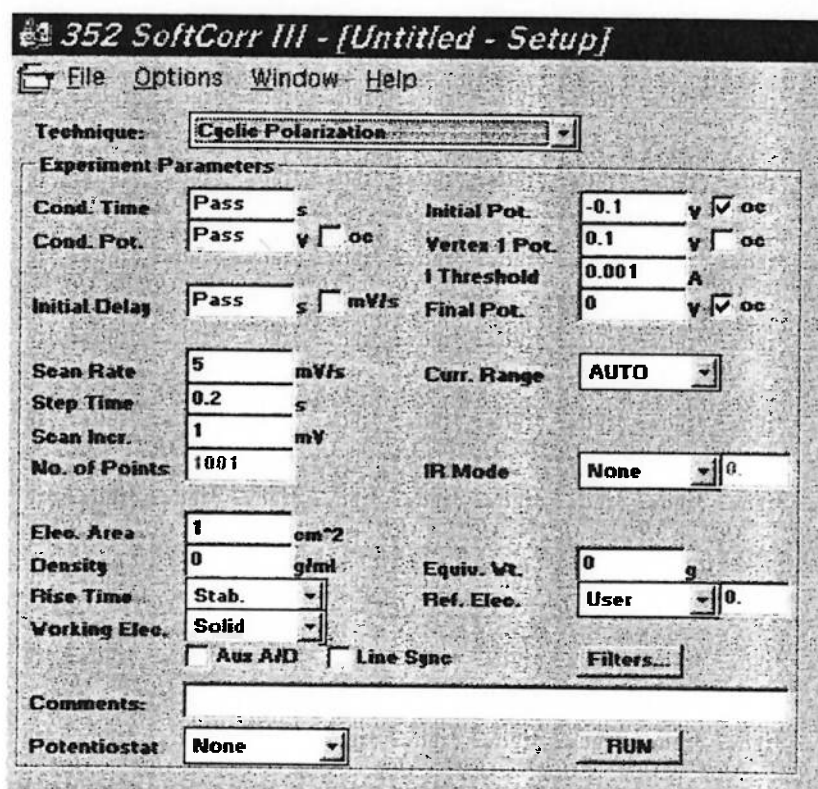


Figura 10: Tela de Configuração (“Setup”) dos parâmetros dos ensaios, quando da utilização do potenciostato.

Software TE79: Deve ser dado como entrada, os parâmetros de ensaio; no arquivo “Definition File” são determinadas as características da aquisição de dados e armazenamento dos dados obtidos (formato dos arquivos, gráficos, alarmes, etc.).

Para todos os itens citados nessa etapa de montagem, é importante que o usuário esteja munido dos manuais das máquinas e programas.

4. Realização do Ensaio

Deve ser acompanhado cuidadosamente pois, devido à complexidade do dispositivo, muitos imprevistos podem danificar a máquina, equipamento ou o corpo de prova: vazamentos de solução, de mercúrio líquido, quebra do indentador, ou problemas com o software (como travamentos inesperados).

5. Aquisição de Dados

Realizado o ensaio, deve-se conferir se os dados obtidos estão conforme foram especificados, se estão devidamente armazenados em disco. Além disso, pode ser necessário ajustar tais dados, conforme interesse de quem realiza o ensaio.

6. Desmontagem e Limpeza

Como são utilizados produtos muito agressivos, é necessária uma limpeza cuidadosa dos mesmos após a realização do ensaio. As peças do sistema de adaptação devem ser acomodadas na embalagem adequada, que acompanha o produto.

4.3 Apresentação e Análise dos Resultados

Foram realizados testes com todos os componentes mecânicos do dispositivo. Observaram-se falhas, após alguns ciclos de trabalho, da conexão 1, que liga o corpo de prova ao cabo de torção. Entretanto, após trabalho de correção do item, o dispositivo passou a funcionar perfeitamente.

Do ponto de vista mecânico, o protótipo está funcionando conforme esperado e especificado em projeto.

O LFS está em fase de implantação e montagem da parte elétrica do dispositivo, colocação dos sensores (eletrodos e conexões ao potenciostato) e verificação de funcionamento. Toda e qualquer conclusão a esse respeito deverá ser colocada posteriormente a essa fase, de total importância para finalização efetiva do projeto e utilização plena do equipamento no LFS.

5. Análise de Custos

Uma vez determinados os componentes e métodos de ensaio, além dos processos de obtenção de cada uma das peças, pode-se elaborar um levantamento de custos de construção e por ensaio.

Custos de Montagem

Componente (Ref.)	Quantidade	Preço Unitário (US\$)	Preço Total (US\$)
Indentador	3 peças (40, 60 e 80°)	20,00	60,00
Suporte 1	1 peça	5,00	5,00
Suporte 2	1 peça	10,00	10,00
Suporte 3	1 peça	10,00	10,00
Cabo de Torção	1 peça	5,00	5,00
Conexão 1	1 peça	1,00	1,00
Conexão 2	1 peça	10,00	13,00
Mercurio Líquido	50 ml		
Vedação	-	10,00	10,00
Parafusos	8	0,10	0,80
Outros	-	-	20,00
Total	-	-	134,80

Tabela 4: Componentes do Projeto e respectivos custos.

Custos de Ensaio/Manutenção

Solução: US\$ 2,00/Litro

Corpo de Prova: US\$ 5,00 / peça

Manutenção: US\$ 2,00 / ensaio

Um fator importante, que pode nortear o projeto é a existência das principais máquinas, ou seja, o potenciostato e o tribômetro pois, no caso de aquisição das mesmas, incluindo software e hardware, o custo de projeto pode atingir algumas dezenas de milhares de dólares.

O custo total está dentro do previsto no Estudo de Viabilidade, onde foi determinado um teto de US\$ 200,00.

6. Conclusões

O presente projeto tratou da elaboração e construção de um dispositivo para ensaio de corrosão-desgaste, para o estudo da repassivação dos metais. Utilizou como base, os equipamentos já existentes no Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS – como o potenciostato e tribômetro (pino contra disco), abrangendo assim, o aspecto tribológico e eletroquímico, tanto em controle dos ensaios como em monitoração e obtenção de dados experimentais.

Este trabalho foi dividido em três partes básicas: “Teoria”, “Projeto” e “Testes e Resultados”.

Na parte teórica, foi apresentada uma breve discussão dos conceitos estudados na literatura e como os pesquisadores da área tratam do assunto, terminando com uma revisão da bibliografia, que pode indicar aos interessados temas mais específicos. O Projeto Básico apresentou o problema, sugeriu diversas soluções para o mesmo, selecionou uma delas e, a partir dessa solução, desenvolveu cada componente, num processo interativo que envolvia criação e trabalho em campo, com testes dos componentes projetados e do protótipo.

A parte de testes incluiu uma etapa de testes preliminares, com os componentes em separado (máquina pino contra disco e potenciostato), com o objetivo de verificar o funcionamento de cada item do dispositivo, incluindo hardware e software. Finalmente, o protótipo desenvolvido ao longo deste projeto foi montado e posto à prova. Realizados testes em cada componente desenvolvido, chegando-se à montagem final do equipamento, realização de ensaios e verificação de validade dos resultados.

Foi realizada, também, uma análise dos custos, conforme especificado no estudo de viabilidade. Como já discutido, o projeto é financeiramente viável para o LFS porque não

- [15] SEDRIKS A.J. E MULHEARN T.O., The Effect of Work Hardening on the Mechanics of Cutting in Simulated Abrasive Process, *Wear*, 7 (1964), 451-459
- [16] SEDRIKS A.J. E MULHEARN T.O., Mechanics of Cutting and Rubbing in Simulated Abrasive Process, *Wear*, 6 (1963), 457-466

7.2 *Bibliografia Consultada*

FONTANA, M.G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1986.

GENTIL, V., *Corrosão*, Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.

SCHWEITZER, P.A., *Corrosion and Corrosion Protection Handbook*, Marcel Dekker, New York, 1983.

HUTCHINGS, I.M., *Tribology*, Edward Arnold, London, 1992.

8. Anexos

Anexo 1

Desenho de Conjunto Tribômetro

Anexo 2

Croqui Corpo de Prova

há necessidade de compra de um potenciostato e/ou tribômetro, equipamento que pode chegar a dezenas de milhares de dólares. O dispositivo de adaptação pode ser facilmente construído, pois os materiais são de simples obtenção e custo acessível.

Quanto ao andamento do projeto, resta ainda verificar o funcionamento dos componentes elétricos que o compõem. Entretanto, os componentes mecânicos já estão determinados e montados, podendo já serem considerados para o projeto executivo. Deverá ser elaborado, também, um manual de montagem, para auxiliar àqueles que se interessarem em desenvolver trabalho semelhante.

Como trabalhos futuros, podem-se propor, além de finalização de montagem e testes, o desenvolvimento de uma embalagem para o dispositivo - com o objetivo de que o mesmo seja devidamente armazenado quando não utilizado - e a elaboração de um Manual para o Usuário.

Esperava-se que o trabalho experimental ficasse não apenas concluído como totalmente operacional. Entretanto, dificuldades que fugiram ao nosso controle impediram-no, protelando essa etapa importante do projeto, pelo *feedback* a ser propiciado. Por outro lado, já que se dispunha de um tempo pré-determinado para a conclusão deste trabalho, foi muito útil o aprendizado, inclusive deste último insucesso, o que consolidou ainda mais a necessidade de elaboração de um cronograma que levasse em conta variáveis controláveis mas, também, parâmetros de difícil controle.

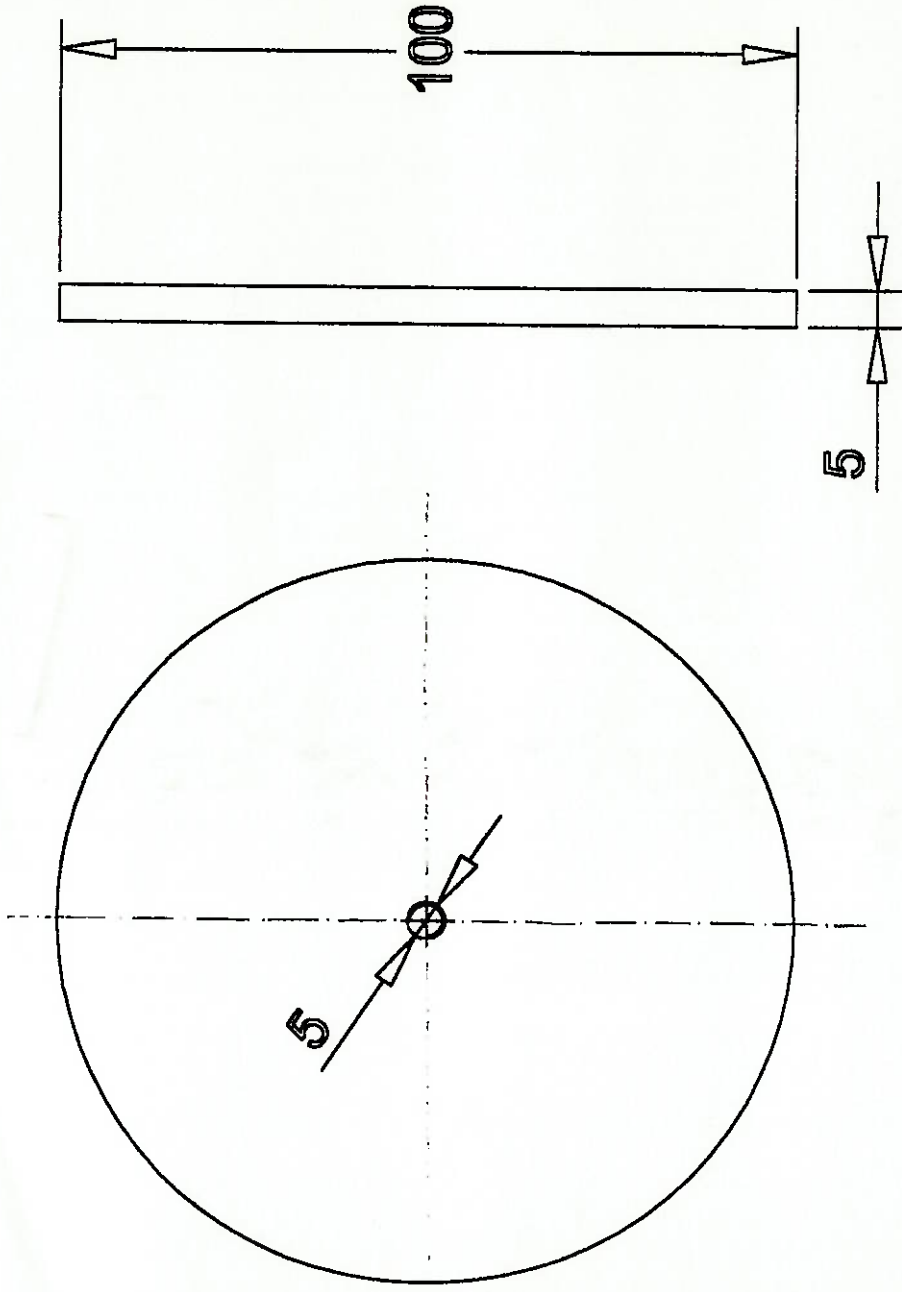
Do ponto-de-vista do amadurecimento relativo ao tema, a semente plantada terá a possibilidade de germinar a uma taxa mais acelerada que o normal, seja pelo aprofundamento teórico no assunto, seja pelo contato direto com as ferramentas experimentais e os profissionais que tornam essa área não apenas relevante tecnicamente, como economicamente para o país.

7. Referências Bibliográficas

7.1 Bibliografia Citada

- [1] WATSON S.W. *et al.*, Methods of measuring wear-corrosion synergism, *Wear* 181-183 (1995) 476-484.
- [2] FONTANA, M.G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [3] SATISH V. KAILAS E S.K. BISWAS , Material Response to Two-Dimensional Scratching By Wedges, *Wear*, 162-164 (1993) 110-118
- [4] ADLER T. A E WALTERS R.P., Wear and Scratch Hardness of 304 Stainless Steel Investigated with a Single Scratch Test, *Wear*, 162-164 (1993) 713-720
- [5] ADLER T. A E WALTERS R.P., Repassivation of 304 Stainless Steel Investigated with a Single Scratch Test, *Corrosion Science*, Vol. 49, 1992, N.o 5, pp. 399-408
- [6] ADLER T. A E WALTERS R.P., Corrosion and Wear of 304 Stainless Steel Using a Scratch Test, *Corrosion Science*, Vol. 33, N.o 12, pp. 1855-1876, 1992
- [7] PERRY A.J., VALLI J., STEINMANN P.A., Adhesion Scratch Testing: A Round-Robin Experiment, *Surfaces and Coating Technology*, 36 (1988), 559-575
- [8] RICARDO EMÍLIO F. Q. NOGUEIRA E JOSÉ DANIEL B. DE MELO, Abrasão do Quartzo: Um Estudo Esclerométrico. Anais da 8.^a CBECIMAT, UNICAMP, Campinas, SP (12/1988), 451-456
- [9] VELDKAMP J.D.B., HATTU N., SNIJDERS V.A.C., Crack Formation During Scratching of Brittle Materials, *Fracture Mechanics Of Ceramics*, Vol. 3 (1978)
- [10] OLOF VINGSBO E STURE HOGMARK, Single Pass Pendulum Grooving: A Technique for Abrasive Testing, *Wear*, 100 (1984) 489-502
- [11] MATHIA T. E ENCRENAZ B., Hysteresis in the Abrasive Wear of Brittle Solids, *Wear*, 73 (1981), 73-77
- [12] MELLO J.D.B., A Sclerometric Study of Unidirectionally Solidified Cr-Mo White Cast Irons, *Wear*, 111 (1986) 203-215
- [13] MANN N. E BROESE VANM GROENOU A., Low Speed Scratch Experiments on Steels, *Wear*, 42 (1977) 365-390
- [14] GRAHAM D. E BAUL R. M., An Investigation into the Mode of Metal Removal in the Grinding Process, *Wear*, 19 (1972), 301-314

LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície

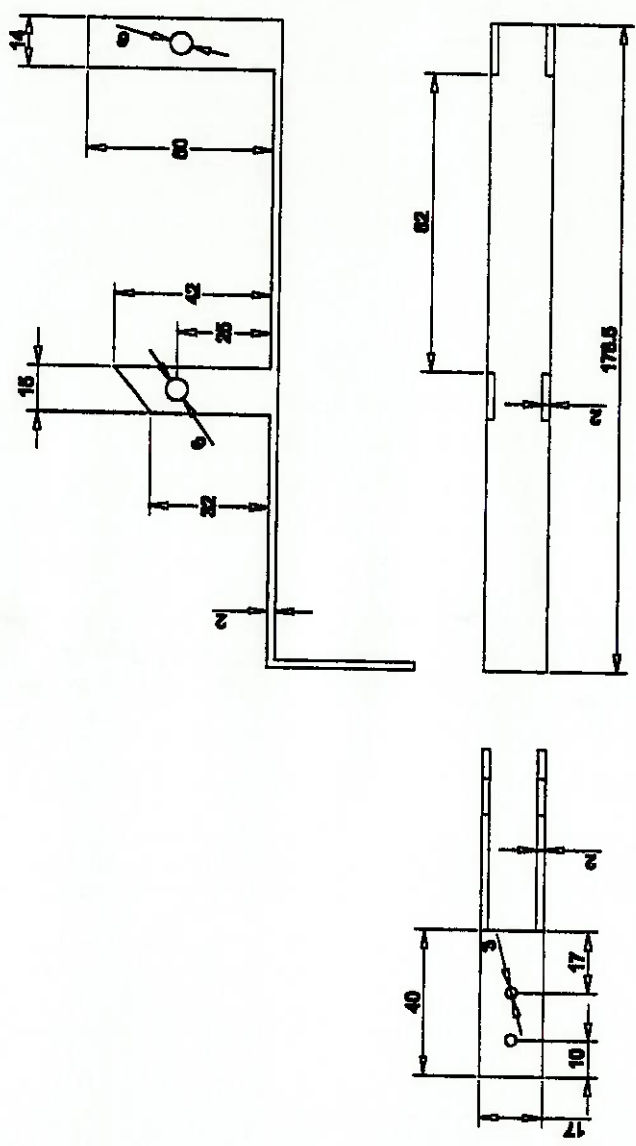


Corpo de Prova	Material:	Escala: 1:1
LFS - Pol USP / Mecânica	Quant.:	Medidas em mm
PMC-581 Projeto Mecânico II	Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste	

Anexo 3

Croqui Suporte 1

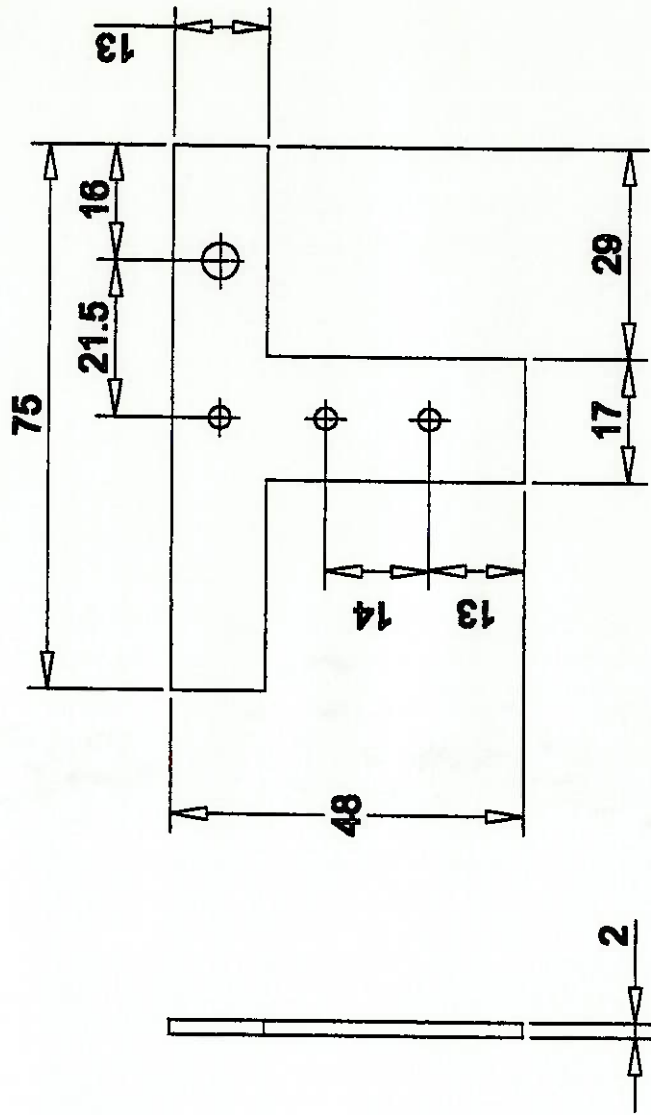
LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície



<p>Material:</p>	<p>Material:</p>	<p>Escala: 1:2</p>
<p>Quant:</p>	<p>Quant:</p>	<p>Medidas em mm</p>
<p>Suporte para eletrodos</p> <p>LFS - Polí USP / Mecânica</p> <p>PMC-581 Projeto Mecânico II</p>	<p>Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste</p>	

Anexo 4

Croqui Suporte 2

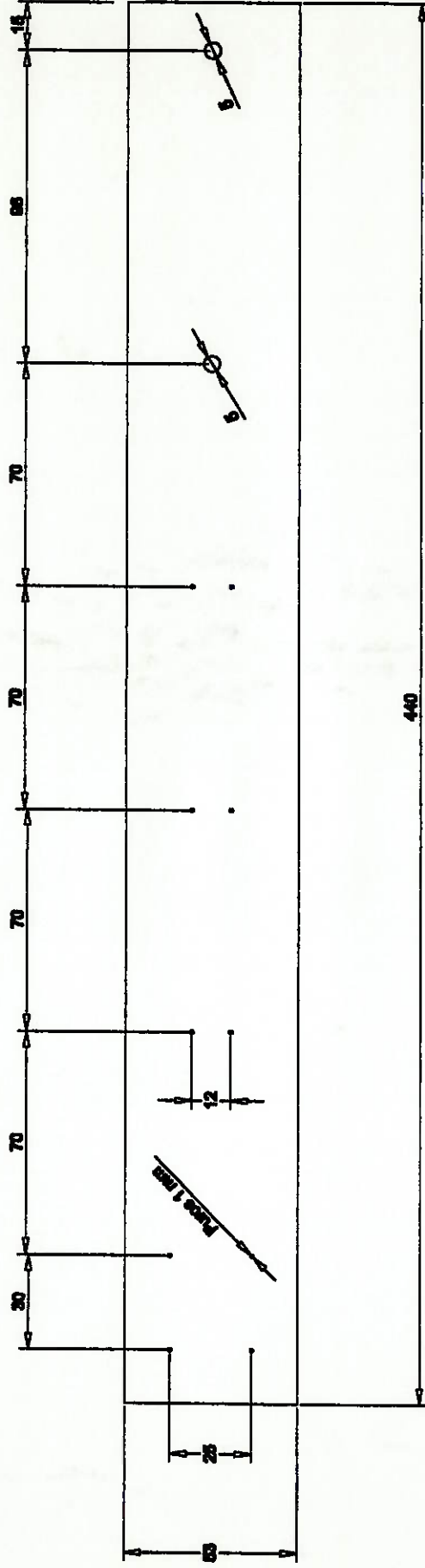


<p>Suporte para eletrodos</p>	<p>Material:</p>	<p>Escala: 1:1</p>
<p>LFS - Poli USP / Mecânica</p>	<p>Quant:</p>	<p>Medidas em mm</p>
<p>PMC-581 Projeto Mecânico II</p>		
<p>Dispositivo para ensalo Corrosão-Desgaste</p>		

Anexo 5

Croqui Suporte 3

LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície



Material: Escala: 1:2	Material: Escala: 1:2
Quant.: Medidas em mm	Quant.: Medidas em mm
Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste	Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste

Suporte para Conexão / Working

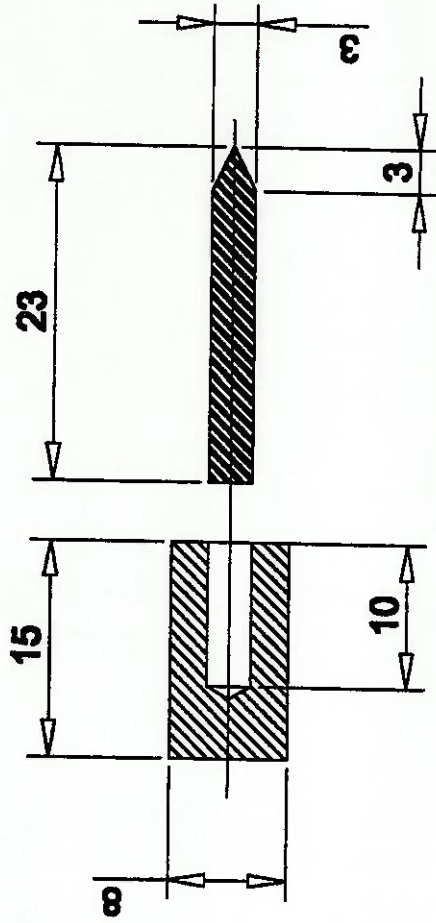
LFS - Poli USP / Mecânica

PMC-581 Projeto Mecânico II

Anexo 6

Croqui Indentador

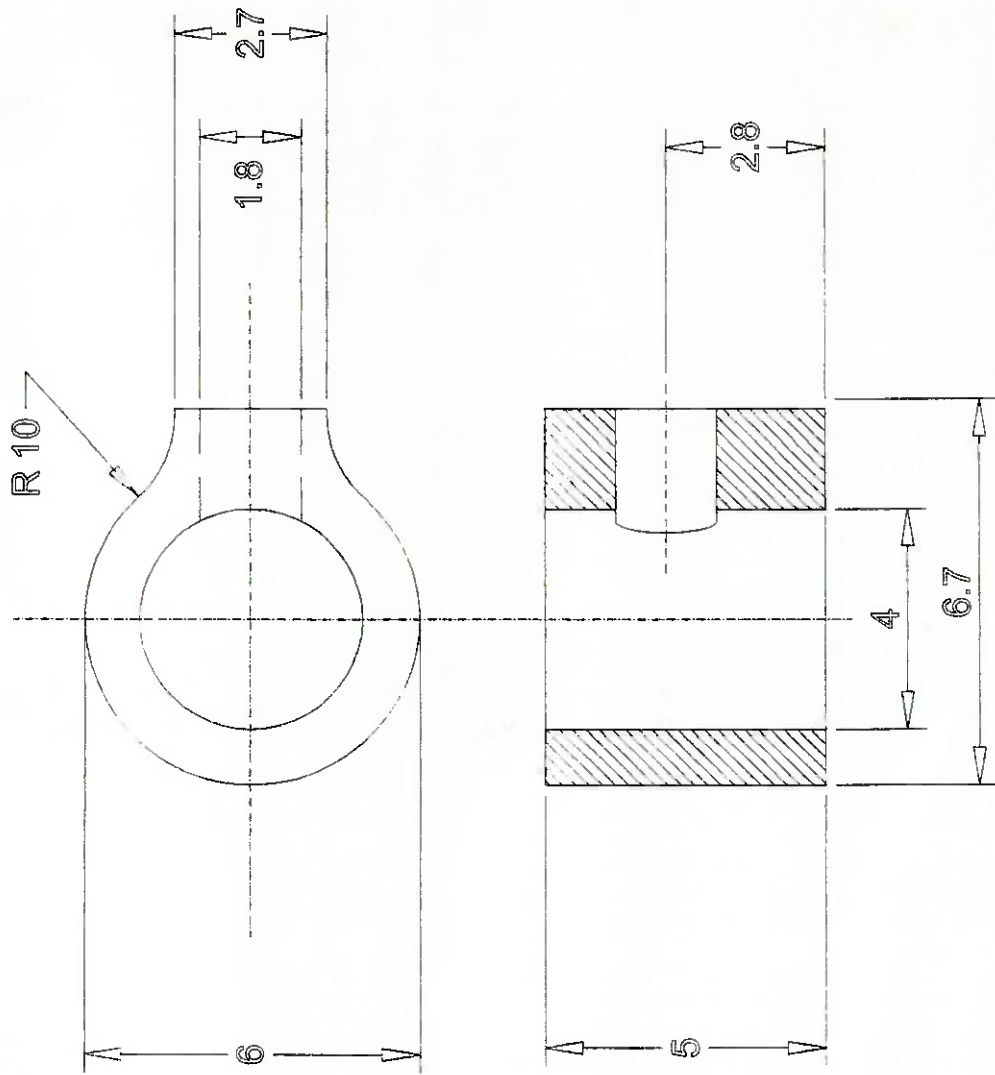
LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície



Indentador	Material:	Escala: 2:1
LFS - Poli USP / Mecânica	Quant.:	Medidas em mm
PMC-581 Projeto Mecânico II	Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste	

Anexo 7

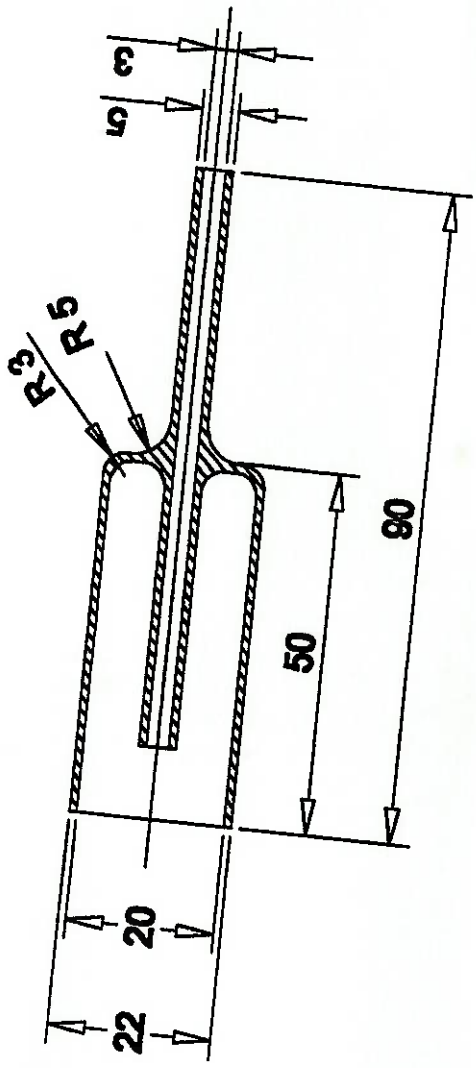
Croqui Conexão 1



Conexão Corpo de Prova	Material:	Sem Escala
LFS - Poli USP / Mecânica	Quant.:	Medidas em mm
PMC-581 Projeto Mecânico II	Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste	

Anexo 8

Croqui Conexão 2



Conexão Potenciostato		Material: Vidro		Escala: 1:1	
LFS - Pol USP / Mecânica		Quant.:		Medidas em mm	
PMC-581 Projeto Mecânico II		Dispositivo para ensaio Corrosão-Desgaste			