

**LUIZ FERNANDO CASSOLI MAZZALI**

*Luiz Fernando Cassoli Mazzali*  
*Arb e meo (81)*

**PROJETO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIOS DE EROSÃO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para a  
obtenção do título de engenheiro pleno.

Área de Atuação:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Deniol Tanaka

1998

Aos meus amigos e à minha família, que tanto ajudaram  
nas frias e longas noites deste inverno politécnico...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradaceço em primeiro lugar aos professores Deniol Tanaka e Amilton Sinatora, pelo incentivo e diretrizes propostas. Ao professor André Tschiptschin pela assistência na construção do projeto. Ao professor Jurandir Yanagihara, pela assistência prestada na conclusão deste trabalho.

Ao engenheiro Alejandro Toro, o qual sem sua valiosa ajuda nunca cumpriríamos nossos objetivos.

E principalmente ao amigo e companheiro de tempos de ginásio, colegial e faculdade Paulo Augusto de Souza Trindade.

# SUMÁRIO

## RESUMO

INTRODUÇÃO .....	4
O ENSAIO .....	5
PRINCIPAIS COMPONENTES .....	8
MATRIZ DE DECISÃO.....	9
REQUISITOS GERAIS DO PROJETO .....	11
DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO PROJETO: .....	13
• MOTOR.....	13
• BASE DE SUSTENTAÇÃO PARA O MOTOR.....	13
• PLACA DE FIXAÇÃO DO MOTOR .....	16
• EIXO MOTOR.....	16
• DISCO PARA FIXAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	17
• CORPOS-DE-PROVA .....	18
• RECIPIENTE PARA SE COLOCAR O FLUIDO DE TRABALHO .....	20
• RECIPIENTE EXTERNO (CAMISA) PARA ARREFECIMENTO .....	20
• ACOPLAMENTO .....	21
• MACACO PARA ELEVÇÃO .....	21
• VARIADOR DE FREQUÊNCIA.....	22
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	23
PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	23
• Baldes .....	23
• Eixo.....	25
• Base em U.....	25
• Hastes em L.....	27
• Placa de fixação do motor.....	28
• Discos .....	29
• Acoplamento.....	29
UMA BREVE INTRODUÇÃO AOS ELEMENTOS DE CONTROLE.....	31
MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS .....	32
DEFINIÇÕES .....	33
VARIÁVEL CONTROLADA .....	33
VARIÁVEL MANIPULADA.....	33
SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA FECHADA.....	33
LINEARIZAÇÃO.....	33
A TRANSFORMADA DE LAPLACE .....	35
DEFINIÇÃO .....	35
PROJETANDO UM SISTEMA DE CONTROLE.....	37
REQUISITOS DOS SISTEMAS DE CONTROLE.....	37
MODELAMENTO MATEMÁTICO .....	37
ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE.....	38
MÉTODO BÁSICO PARA PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE .....	39
ETAPAS DO PROJETO .....	40

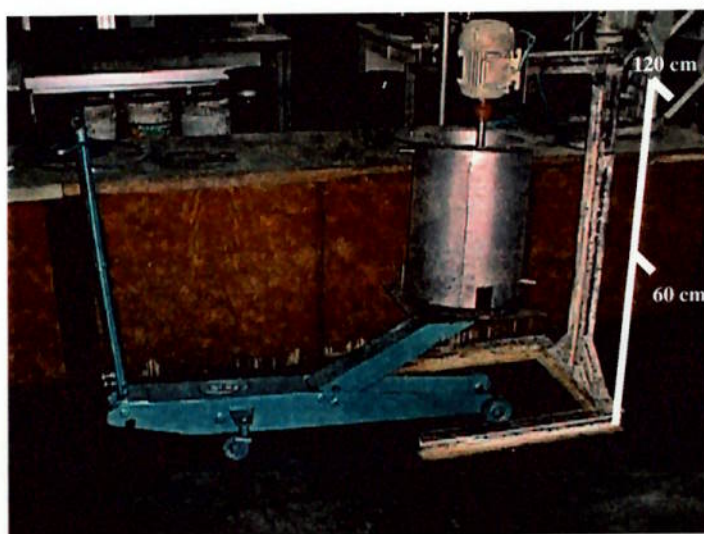
<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> .....	40
<b>SISTEMAS TÉRMICOS</b> .....	<b>41</b>
<i>CONDUÇÃO</i> .....	42
<i>CONVECÇÃO</i> .....	42
<i>IRRADIAÇÃO</i> .....	43
<i>BALANCEAMENTO DE ENERGIA DO PROCESSO</i> .....	46
<i>BALANCEAMENTO DE ENERGIA DA CAMISA D'ÁGUA</i> .....	46
<i>BALANCEAMENTO DE ENERGIA DO METAL</i> .....	46
<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>50</b>

## Resumo

Ensaio de erosão vêm sendo realizados há muitos anos por pesquisadores, principalmente em universidades. Estes ensaios, dentre tantos outros, são de grande valia para a obtenção de dados e formulação de teorias, além de simples constatações de ordem tecnológica. Dada a importância deste tipo de atividade, o suporte técnico vem logo ao primeiro plano. A validação dos dados obtidos, a padronização dos testes, o conhecimento da precisão envolvida, todos estes fatores são apenas alguns que nos indicam o teor da confiabilidade dos testes.

Levando em conta todos os pontos citados acima, percebemos rapidamente que o maquinário utilizado sempre é de suma importância. Nosso projeto consiste exatamente em construir uma máquina para ensaios de erosão, que nos permita analisar substancialmente os resultados obtidos.

Nossos corpos-de-prova serão dos mais variados tipos de aços, principalmente os martensíticos. Abaixo segue uma foto da máquina concluída, localizada no laboratório da Faculdade de Metalurgia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



## **Introdução**

O objetivo deste trabalho é o projeto e construção de uma máquina de ensaio de erosão, seguido do controle térmico de seu fluido de trabalho.

A erosão é um tipo de desgaste comumente presente em aços carbono. As condições de teste são variadas em termos de velocidade de rotação, distâncias percorridas (relativas à quantidade de horas que é realizado o teste), temperatura do fluido de trabalho e constituição das partículas presentes no fluido.

A máquina para os testes de erosão é constituída por um eixo vertical onde está acoplado um disco, responsável pela fixação dos corpos-de-prova, os quais estarão imersos no fluido (lama) de trabalho.

Deve-se notar que este é um teste padronizado, e por isso nos detivemos a variações não muito significativas em relação aos projetos já existentes.



## O Ensaio

Testes serão realizados usando-se corpos-de-prova de 15x15x3.5 mm com uma distância radial de 8,7cm, fluido de trabalho contendo de 30 a 40% de areia (proporção mássica), velocidade de rotação à 600, 800 e 1000 rpm e distância percorrida variando entre 250 e 1300 km.

Como foi dito, a erosão é função da quantidade de massa sólida no fluido, portanto, quanto menores forem as proporções de areia, o movimento se tornará mais livre (aleatório) e maiores as chances de termos danificações na estrutura do material. Uma composição com altos teores de areia levam o movimento a perder sua aleatoriedade, com menores danificações na estrutura, tendo as partículas uma tendência maior à deslizar sobre o corpo-de-prova, gerando uma abrasão.

As taxas de desgaste devem ser feitas normalizadamente em termos de perda de massa em função da distância percorrida no ensaio, que podem ser convertidas em termos de volume perdido por unidade de volume e por unidade de distância ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3} \text{m}^{-1}$ ).

Após a realização do teste, devemos observar em microscópio a microestrutura do corpo-de-prova, observando-se as variações existentes em relação à microestrutura inicial.

Dois tipos de fluido abrasivo podem ser usados nesse tipo de teste, o de pontiagudas (fresh) ou o com partículas “sem fio” (worn).

No teste com partículas do tipo fresh, a resistência ao desgaste aumenta na medida que se aumenta a dureza do aço e se aumenta o teor de carbono presente neste. Já o teste do tipo worn, é dividido em dois grupos:

- Aços não contendo ou com baixos teores de cromo – a resistência ao desgaste decai com o aumento da dureza do aço



- Aços contendo altos teores de cromo – a resistência ao desgaste é três vezes maior que a dos aços sem cromo

Neste último tipo de ensaio as composições em relação ao carbono não alteram significativamente a taxa de erosão.

Vários testes já foram feitos em 22 tipos diferentes de aço, sendo notado que a taxa de desgaste no fluido abrasivo decai a medida que se decorre o ensaio, principalmente nos aços que apresentam maior dureza.

Esse teste se aplica para que possamos fazer uma analogia à turbinas hidráulicas, maquinários de mineração, bombas, implementos em fazendas, etc.

A movimentação de minérios se dá de forma análoga ao fluido abrasivo usado nos testes, porém a movimentação desses minérios causa significantes taxas de erosão e corrosão, especialmente nos pontos onde são observados mudanças de direção no fluxo. Esse aumento de erosão pode ser notado em cotovelos, junções em T, hidrociclones, válvulas, entre outras. Em nosso teste, a erosão se dá devido às partículas (areia) existentes no fluido, e a corrosão se dá devido às reações com o fluido. Há de se notar que as taxas de corrosão variam de acordo com o PH e a temperatura.

Para termos uma análise eficaz em termos de erosão devemos acrescentar no fluido abrasivo um inibidor de corrosão, pois é sempre válido lembrar que o processo de desgaste é um resultado da interação dos processos de erosão e corrosão. Assim, se quisermos medir a corrosão existente no processo é só fazermos um outro teste com as mesmas características do primeiro e sem o inibidor. Pelo método da diferença de massas entre os dois testes, temos a taxa de corrosão avaliada. Em testes realizados do tipo fresh, a corrosão é responsável por taxas variando entre 38-46% do total da perda

de massa e no do tipo worn de 67 à 74%. Inibidores não conseguem anular por completo o processo de corrosão, porém resultados significativos são alcançados.

Estudos realizados mostram que a erosão é proporcional à velocidade do fluido em operação, à um fator K referente à geometria do corpo estudado, densidade das partículas que efetuam a erosão e densidade do corpo-de-prova, sendo inversamente proporcional à dureza e a dutibilidade.

O fator de proporcionalidade em relação à velocidade, segundo a grande maioria dos estudos, está relacionado à um expoente  $n$  ( $E \propto U^n$ ), sendo que  $n$  varia entre 2.3 e 3.4. Porém, já tivemos a oportunidade de ler papers, onde a máxima taxa de erosão foi determinada à velocidade média\*. A partir do teste de erosão, podemos verificar a que fator  $n$  de proporcionalidade nosso teste se relacionará.

## Principais Componentes

Após esta breve introdução, podemos notar que o projeto requer alguns elementos básicos. São eles:

- eixo motor
- disco de acoplamento ao eixo com fixadores para corpos-de-prova
- corpos-de-prova
- recipiente para se colocar o fluido de trabalho (lama)
- recipiente externo (camisa) por onde passará o fluido de arrefecimento

(água) para o controle térmico

- motor
- placa de fixação para o motor
- base de sustentação para o motor
- acoplamento
- macaco para elevação do recipiente
- variador de frequência para se controlar a velocidade do eixo motor

Tomando os itens acima citados como requisitos para o bom andamento do projeto, podemos montar nossa matriz de decisão.

# MATRIZ DE DECISÃO

Itens	Alternativas		
	A	B	C
Forma do recipiente	circular	retangular	quadrado
Acionamento do motor	elétrico	combustão	elétrico
Fixação dos corpos de prova	verticalmente	horizontalmente	verticalmente
Troca do fluido	deslocamento do recipiente	remoção do recipiente	remoção do recipiente
Variação de velocidade do eixo motor	variador de frequência	correia	correia dentada
Material do disco	PVC	Polipropileno	Teflon
Material do recipiente	aço inox AISI 316L	aço inox AISI 304	aço inox AISI 316L
Dispositivo de elevação	macaco jacaré	macaco vertical	macaco jacaré
Acoplamento	elástico	rígido	rígido
Tipo de aço para os corpos de prova	martensítico	ferrítico	austenítico
Forma dos corpos de prova	cilíndricos	retangulares	cilíndricos

Esta matriz de decisão foi montada para apenas termos a idéia de como podemos variar nossos parâmetros. Logicamente, o número de combinações possíveis é muito maior que as 3 acima citadas. Por isso fomos mais criteriosos na alternativa A, para que esta seja a mais viável devido às análises previamente feitas.

Há de se notar que o projeto acima referido é financiado por uma bolsa FAPESP e tem fins puramente científicos, por isso na análise de sua viabilidade deve ser notado que não requeremos retornos econômicos.

## **Requisitos Gerais do Projeto**

### ***1. Todos os corpos-de-prova testados devem estar submetidos às mesmas condições***

Este item nos remete a importância da padronização dos testes, para fins de comparação e também nos guia em termos de se obter a melhor solução na fixação dos corpos-de-prova. Esta última afirmação pode ser exemplificada através da verticalização dos furos rosqueados no disco, isto é, todos os corpos-de-prova terão a mesma velocidade tangencial.

### ***2. Possibilitar a fácil substituição dos corpos-de-prova***

Por se tratar de um projeto efetivo e em plena execução, o item acima torna-se de suma importância já que vários testes serão realizados e inúmeras substituições executadas.

### ***3. Possibilitar a troca do fluido erosivo de forma simples e eficaz***

O projeto da base é claramente voltado para o fim mencionado: a fácil substituição do fluido abrasivo. Apesar do fator financeiro ter permeado o projeto desta base, a solução obtida, apesar de apresentar menos rigidez, era a mais funcional e por isso foi executada.

### ***4. Manter o fluido erosivo em temperaturas permissíveis***

Mais uma vez nos remetemos ao item de padronização e validade dos testes. Como a temperatura é diretamente proporcional à erosão e à corrosão, o controle desta primeira é imprescindível para o bom andamento e validação dos ensaios.



**5. *Selecionar um motor de baixa potência visando diminuir o peso na ponta da viga em L***

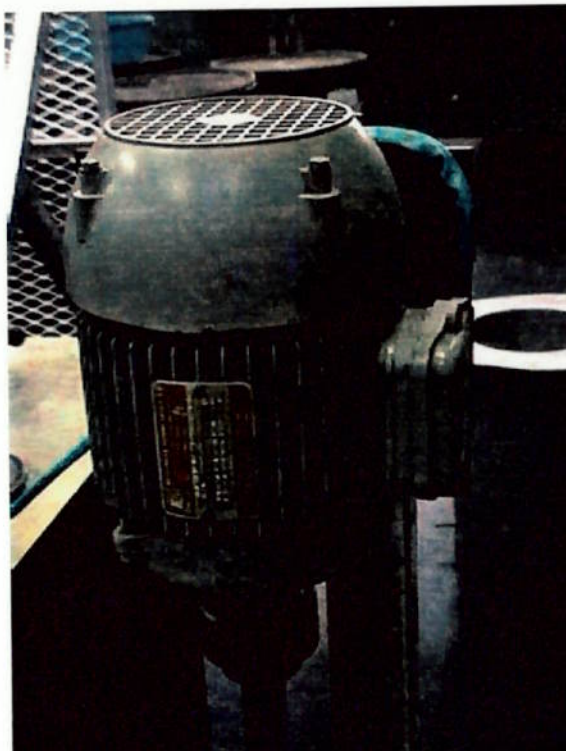
Para garantirmos a boa estabilidade do sistema, a única viga em balanço deve possuir uma pequena massa em sua ponta não engastada. Para isso, escolhemos um motor de pequeno peso (cerca de 2 Kg), e assim solucionamos o problema de vibração do sistema.



## **Descrição dos elementos constituintes do projeto:**

- **Motor**

O motor usado é trifásico de 0,75 CV, faixa de trabalho nominal entre 1430 e 1720 rpm com aproximadamente 2kg.



Fotografia do motor em sua posição de funcionamento

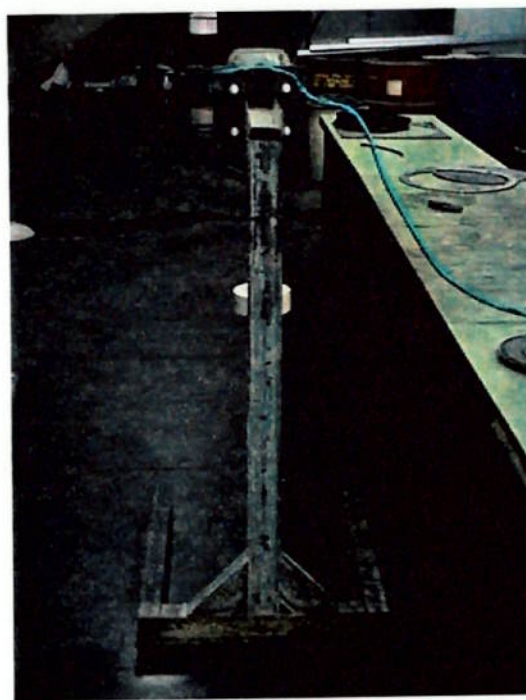
- **Base de sustentação para o motor**

A base é composta por 5 vigas estruturais de perfil I e soldadas entre si, garantindo boas propriedades frente à resistência dos materiais. A altura da base é de 124 cm (viga disposta verticalmente em relação ao chão), sendo que as vigas em contato com o chão apresentam 70 cm (2 vigas) e a que serve como elemento de junção para essas outras citadas, tem um comprimento de 50 cm.



Fotografia da base em U e no detalhe o perfil em I das vigas

Por fim, a viga em contato com a viga vertical, a qual é responsável pela fixação da placa onde é parafusado o motor, apresenta um comprimento de 35 cm.

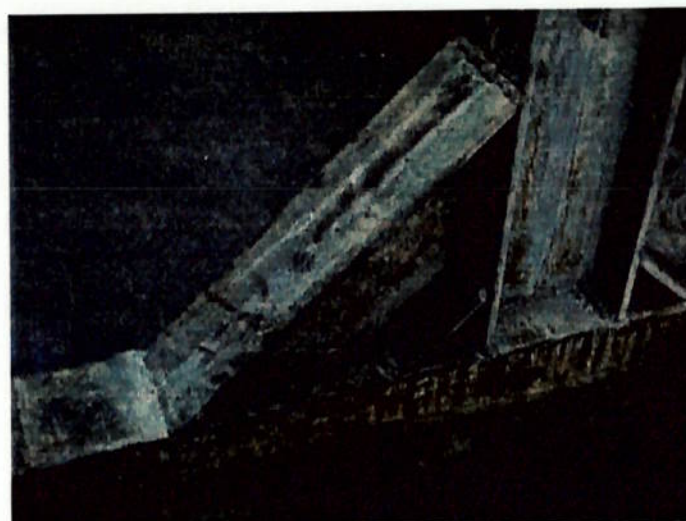


Fotografia da Haste Vertical e seus reforços

Uma melhor compreensão da estrutura como um todo poderá ser acompanhada nas páginas seguintes do projeto.

Todas as vigas apresentam uma largura de 6 cm, altura de 8cm e espessura de 0,5 cm, sendo elas compostas de aço estrutural.

Os elementos de junção entre as vigas é composto por soldas, capazes de conferir à estrutura uma boa rigidez, mesmo porque a solicitação imposta sobre ela é muito pequena visto as características do motor.

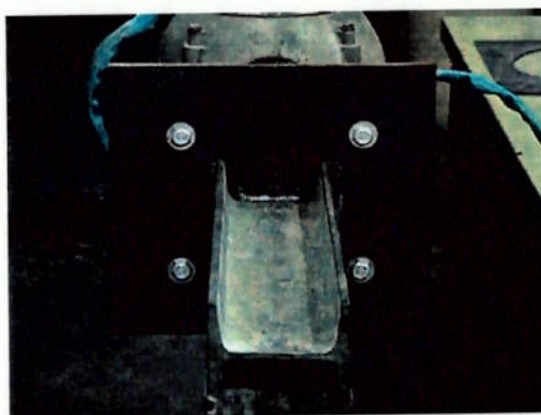


Fotografia dos reforços da haste vertical

- **Placa de fixação do motor**

Esta placa é feita de aço estrutural, contendo quatro furos para a fixação do motor.

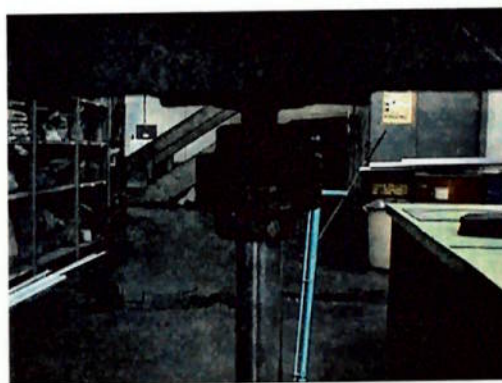
Esta placa foi primeiramente soldada a haste horizontal e posteriormente furada para se garantir um erro pequeno de posicionamento entre o eixo do motor e a haste vertical.



Fotografia da placa fixadora do motor na posição final

- **Eixo motor**

O material do eixo motor é o aço AISI 316L e possui 1" (uma polegada) de diâmetro. Seu comprimento é de 39 cm , sendo rosqueado em sua ponta para a fixação do disco. Note-se que como a bitola do motor era de  $\frac{3}{4}$ ", tivemos de usinar o eixo.





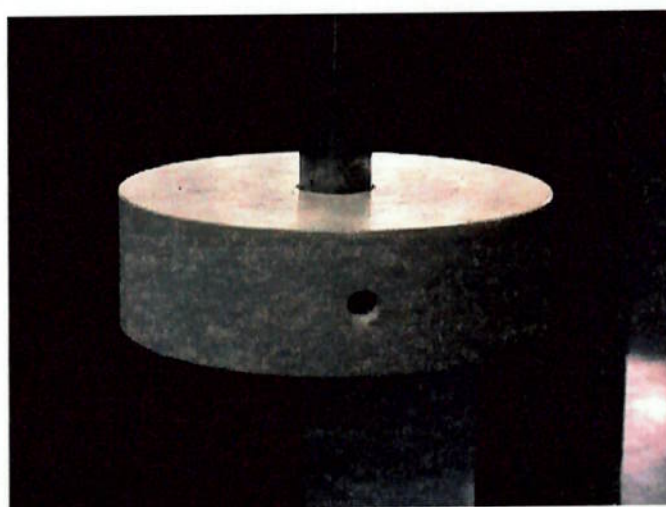
Abaixo pode-se visualizar o papel do eixo de forma mais clara. Este é na verdade o elemento que transmite a potência do motor para o disco.



Fotografia do eixo juntamente com o disco e o acoplamento

- **Disco para fixação dos corpos-de-prova**

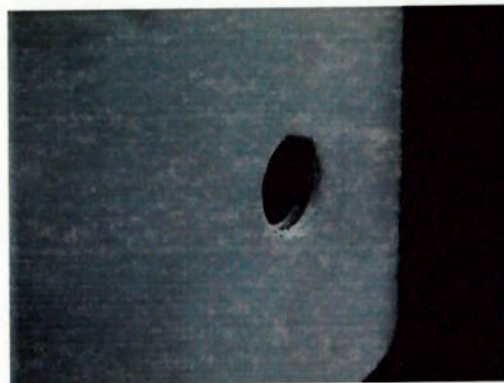
Foram feitos dois discos para a fixação dos corpos-de-prova. O material utilizado foi o PVC num deles e polipropileno no outro, porém de dimensões semelhantes.



Fotografia do disco em posição de funcionamento

Seu diâmetro é de 15 cm, com um furo central rosqueado para a entrada do eixo motor. Possui 4 furos radiais para a disposição dos corpos-de-prova horizontalmente e

4 furos axiais, ficando os corpos-de-prova em uma direção vertical. Os corpos-de-prova devem estar igualmente espaçados, ou seja, a uma distância de  $90^\circ$  entre eles. A



fixação das amostras também são feitas através de roscas.

O material dos discos foi assim selecionado, pois devemos controlar severamente as condições de operação do ensaio. Como o fluido é bastante abrasivo, haverá também a erosão do disco, o qual soltará partículas no fluido, contaminando-o indesejadamente. Desta forma usaremos estes materiais que são relativamente moles, não causando danos à superfície metálica.

Detalhe do rosqueamento para a fixação dos corpos de prova

### • Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova são de 10 mm de diâmetro, apresentando roscas em suas extremidades para sua fixação.

O material dos corpos-de-prova são aços dos mais diferentes tipos, dando-se preferência aos martensíticos.

Os aços martensíticos apresentam teor máximo de cromo de 14%, para permitir a transformação martensítica, mas de qualquer forma, são selecionados para condições ambientais não muito severas e para peças onde a resistência mecânica é

fundamental. Além do relativo baixo teor de cromo, esses aços possuem alto teor de carbono que conduz à formação de precipitados.

Os aços martensíticos podem ser considerados equivalentes aos aços para têmpera e revenimento (carbono ou ligados).

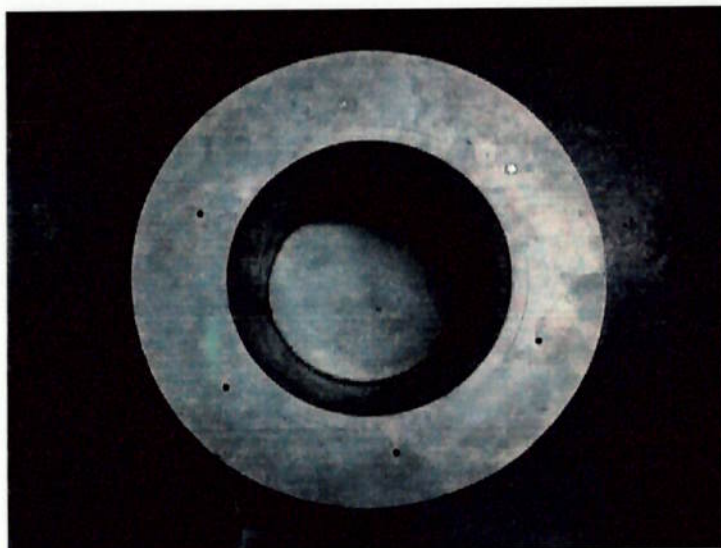
A seguir estão algumas propriedades dos martensíticos recozidos como referência:

<i>AISI</i>	<i>Limite de escoamento</i> 0,2% (MPa)	<i>Limite de Resistência</i> (Mpa)	<i>Along.</i> <i>Em 50 mm</i> (%)
410	285	530	25
416	280	530	30
420	350	670	25



- **Recipiente para se colocar o fluido de trabalho**

Este recipiente é feito de aço inox AISI 316L com espessura de 5mm e diâmetro de 300 mm. Para a fabricação desse elemento foi feito o calandramento para garantir sua circularidade, e então a soldagem.



Fotografia do balde interno

- **Recipiente externo (camisa) para arrefecimento**

Esse recipiente é fabricado através do mesmo processo do recipiente interno, contendo, entretanto, dois furos para entrada e saída de água, a qual funcionará como fluido de arrefecimento. Estes orifícios estão localizados em extremidades opostas, sendo um na parte inferior e outro na parte superior dos recipientes.

- **Acoplamento**

Foi escolhido um acoplamento de  $\frac{3}{4}$ " (eixo de saída do motor) para 1" (eixo acoplado ao disco), com 40 mm de diâmetro, possuindo uma pequena elasticidade para que não haja vibrações maiores.

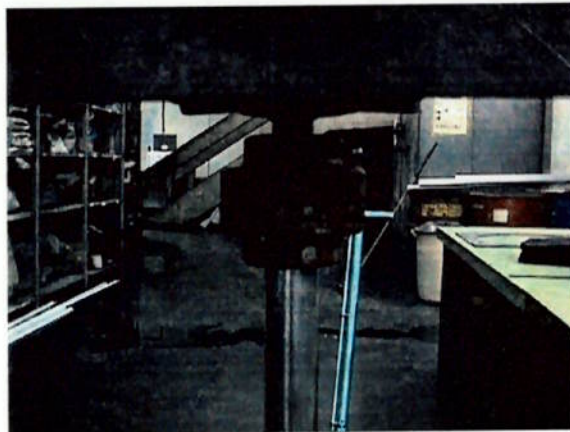
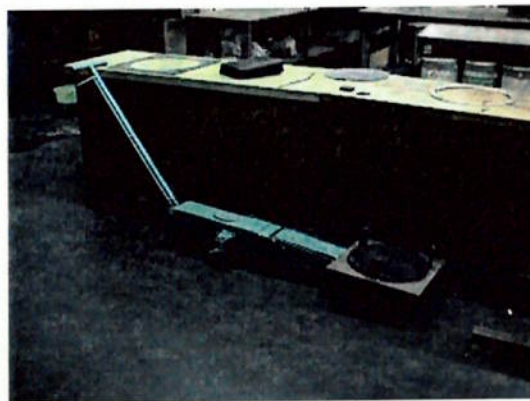


Foto do acoplamento ligando o eixo ao motor

- **Macaco para elevação**

Foi escolhido um macaco do tipo jacaré devido à limitação que a altura de elevação do recipiente impôs às características do projeto. Essa altura (aproximadamente 35 cm) não é encontrada nos macacos convencionais, e por motivos econômicos não valeria a pena projetar e fabricar um novo macaco mesmo levando-se em consideração as grandes dimensões do macaco jacaré.



- **Variador de frequência**

Uma das variáveis do nosso projeto é a variação de velocidade para os testes. Assim, devemos ter algum dispositivo capaz de variar a velocidade de giro do motor. Para isso foi escolhido um variador de frequência trifásico, conectado ao circuito do motor para que sejam selecionadas diferentes rotações.

Obs: os elementos que entrarão em contato com o fluido de trabalho devem ser projetados usando-se o aço inox AISI 316L, pois este contém manganês, o que lhe confere uma boa resistência aos íons cloreto que poderão fazer parte do fluido. Por se tratar de um tipo de aço bastante caro, apenas o recipiente interno e o eixo deverão ser construídos com este tipo de material.

## **Análise de Sensibilidade**

Nosso projeto pode ser abordado como sendo um conjunto de parâmetros, que juntos representam os atributos do sistema. Estudar o processo de fabricação destes parâmetros um a um, é bastante importante para garantir que as variáveis envolvidas foram modeladas de forma correta e que juntas representam o projeto proposto.

A seguir estudaremos a adequabilidade das especificações propostas e sua exequibilidade física.

## **Processos de Fabricação**

- **Baldes**

O balde externo foi construído da seguinte forma:

1. Foi comprada uma chapa de aço e 1,20 x 2,00 metros.
2. Foi efetuado o corte adequado para proporcionar um fácil “enrolamento” do balde. Estas dimensões são 1,13 x 0,50 metros. Note-se que já temos as dimensões aproximadas do balde externo.  $\phi$  18 cm e altura 50 cm.
3. A soldagem do Balde externo foi feita pelo Laboratório de Física da USP, devido a sua boa reputação e a de seus técnicos em construir máquinas similares a esta.

O balde interno foi feito de maneira análoga. Suas dimensões finais foram  $\phi$  15 cm e altura 47 cm.

Note-se que o aço escolhido para este balde interno foi o 316L em virtude de sua boa resistência a corrosão, lembrando que este último está em permanente contato com um fluido abrasivo.

Sabemos que água irá fluir entre os dois baldes e por isso foi contruída uma espécie de flange para vedação conforme indicado na figura abaixo.



Flange para vedação dos baldes

É importante ressaltar que não foi necessário o dimensionamento desta flange, já que as pressões a que estará submetido o sistema são ínfimas.



- ***Eixo***

O eixo, também de aço 316L, possui 1" e somente foi necessário o torneamento do eixo na parte superior do acoplamento para possibilitar o encaixe deste com a bitola do motor. Também tivemos de cortar a barra original no comprimento de 39 cm para atender às nossas necessidades.



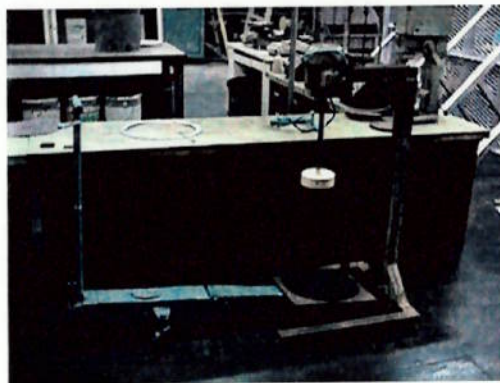
- ***Base em U***

O aspecto construtivo mais importante a ser mencionado neste item é a estabilidade que esta base deveria proporcionar ao sistema. Projetamos uma base, com critérios de rigidez bastante rigorosos, porém, como se trata de um projeto em plena execução, tivemos de nos flexibilizar e adotar uma base menos rígida, mas de fácil construção e com uma propriedade essencial – o baixíssimo custo. Segue o método de construção.

Foram soldadas 3 vigas de alma I de forma a representarem juntas a figura U. Apesar do projeto ter perdido rigidez em relação ao projeto original, é observável a maior mobilidade com a qual o conjunto macaco-balde pode se deslocar na máquina.



Detalhe do modo de soldagem na base em U



Fotografia representando a mobilidade do macaco



Base estrutural completa



- *Hastes em L*

O aspecto de rigidez desta parte do projeto foi bastante estudada, já que qualquer vibração adicional no sistema poderia comprometer a tomada de dados do ensaio.

A fim de aumentar a rigidez do conjunto, foram soldadas duas vigas-reforço a base, ligando esta a haste vertical, conforme indicado na figura abaixo.



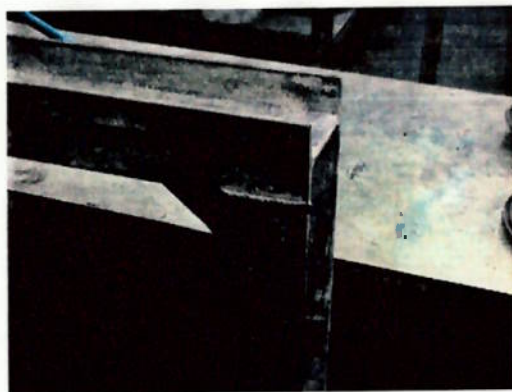
Fotografia dos reforços da haste vertical



Detalhe da soldagem entre a base horizontal e a haste vertical

A soldagem entre as hastes vertical e horizontal proporcionou uma altura final para a máquina de 124 cm (sem contar com o motor e sua placa de fixação).

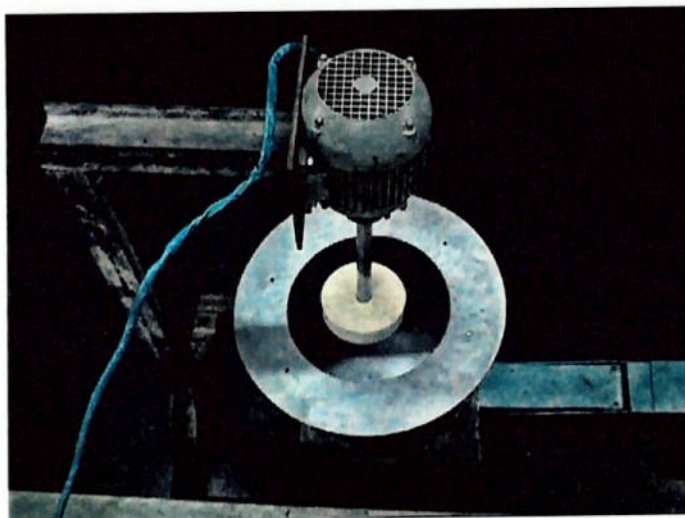
Novamente foi soldado um suporte para aumentar a rigidez do conjunto (entre a haste vertical e horizontal), na verdade este suporte era uma chapa de metal de 0,5 cm de espessura, de 11 cm de comprimento por 5 cm de largura. A haste horizontal de 35 cm foi soldada a haste vertical, formando finalmente a base de fixação do conjunto, juntamente com a base horizontal em U.



Detalhe da soldagem entre as hastes  
vertical e horizontal

- ***Placa de fixação do motor***

Esta placa é responsável pela fixação do motor. Observando a figura abaixo vemos que 4 furos foram executados e que a placa foi soldada a haste horizontal. Este esquema nos mostra o posicionamento vertical do motor.



Fotografia demonstrando o posicionamento do motor

- ***Discos***

Os discos foram selecionados de acordo com os corpos-de-prova. O material de um deles é o polipropileno e o outro foi feito de PVC. Os discos possuem 8 furos roqueados: 4 radiais e 4 verticais. É importante ressaltar que os furos são diametralmente opostos e que os verticais foram feitos para proporcionar aos corpos-de-prova a mesma velocidade tangencial.

- ***Acoplamento***

Devido às dimensões disponíveis de acoplamentos tivemos de usinar o eixo a fim de estabelecer a conexão entre o mesmo e o motor, além de amortizar as vibrações. A seguir segue o modo físico de armação e e funcionamento do sistema.

1. Com os corpos de prova já posicionados e o recipiente com fluido abrasivo em seu interior, aproximamos o macaco:



Fotografia da aproximação do balde

2. Após a aproximação do macaco, podemos elevar o balde até uma altura conveniente:



Fotografia do balde em posição de ensaio

## **Uma breve introdução aos elementos de controle**

O controle automático de diversas atividades no cotidiano do homem moderno tem proporcionado ótimas soluções para problemas dinâmicos. De fato, ocorre uma grande melhoria na produtividade dos processos e o ponto ótimo de operação é atingido e controlado de forma adequada.

Podemos citar como o primeiro trabalho significativo de controle automático, a obra de James Watt, que criou um controlador centrífugo para manuseio da velocidade de uma máquina a vapor do século XVIII.

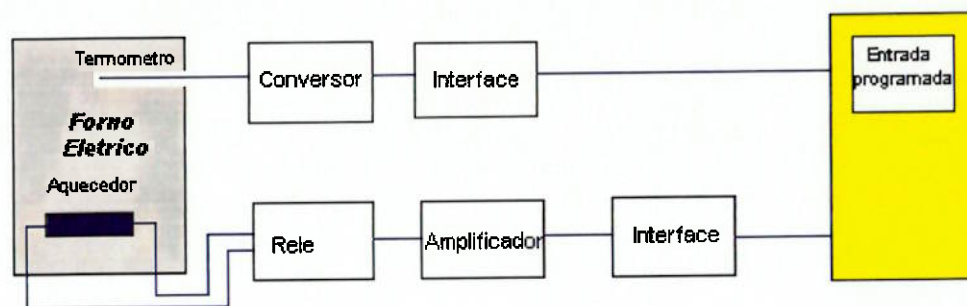
Os métodos de resposta em frequência, muito usados na década de 40, possibilitaram aos engenheiros da época projetar sistemas de malha fechada lineares, que satisfaziam os critérios de desempenho da época. Porém devido à crescente complexidade dos processos que necessitavam de controle e principalmente devido à mudança nos conceitos de desempenho, custo e precisão, a teoria de controle moderno foi desenvolvida. Somente ela pode solucionar problemas com diversas entradas e saídas e inúmeras equações conseqüentes destes parâmetros.

Sendo assim, usaremos a Teoria Moderna de Controle para manipular e controlar a temperatura do fluido abrasivo, através da manipulação da temperatura da “camisa d’água”.



## Modelagem de Sistemas Dinâmicos

Em todos os sistemas de controle conhecidos, alguns componentes são considerados básicos como por exemplo sensores, conversores, transmissores, placas de interface analógico-digital e finalmente amplificadores. Um exemplo comum de sistema de controle térmico segue logo abaixo:



Neste tipo de sistema, a temperatura é medida por um termômetro analógico. O conversor digital modifica o sinal vindo do termômetro e a interface passa a temperatura digital para o controlador. Assim como em nosso projeto, caso a temperatura medida esteja fora do *range* proposto, este sinal será tomado como uma fonte de erro e então o controlador enviará um sinal através da interface-amplificador-relé para o aquecedor até que a temperatura de saída atinja o valor proposto pelo projeto.

Podemos concluir então que o sinal de temperatura é uma fonte de erro que realimenta a malha do contrador de forma similar (mas não igual) a qual a temperatura da água na saída do recipiente serve de fonte de erro para nosso projeto.

## Definições

Para o bom entendimento do projeto proposto, cabe aqui definir algumas variáveis que usaremos depois.

### *Variável Controlada*

É a grandeza ou condição medida durante o funcionamento da máquina e que é controlada.

### *Variável Manipulada*

É a grandeza ou condição que é manipulada pelo controlador, assim efetuando correções na variável controlada.

### *Sistemas de Controle em Malha Fechada*

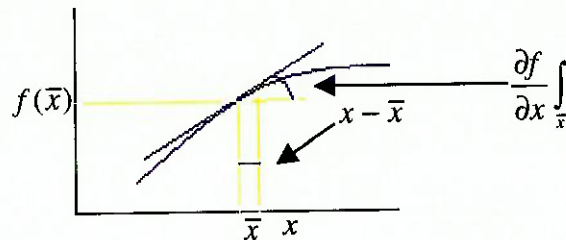
Estes tipos de sistemas são realimentados e o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado (este último pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e uma de suas funções derivadas) é inserido no controlador de forma que o erro é reduzido e a saída do sistema é trazida a um valor desejado.

### *Linearização*

Veremos mais adiante que a estabilidade de um sistema controlado é imprescindível. Caso ocorra a multiplicação de duas funções dependentes de uma mesma variável, não poderemos garantir a estabilidade do sistema. A solução para este tipo de problema é baseada na expansão da função não-linear em uma série de Taylor em torno do ponto de operação e a retenção apenas do termo linear. Em



virtude de desprezarmos os termos de ordem maior desta série, devemos nos certificar de que as variáveis se desviem apenas ligeiramente da condição de operação, isto é, os termos desprezados devem ser bastante diminutos.



$$f(x_1, x_2) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \int_{\bar{x}_1, \bar{x}_2} (x_1 - \bar{x}_1) + \frac{\partial f}{\partial x_2} \int_{\bar{x}_1, \bar{x}_2} (x_2 - \bar{x}_2) + \text{termos superiores}$$

Expansão da Série de Taylor:

$$f(x) = f(\bar{x}) + \frac{\partial f}{\partial x} \int_{\bar{x}} (x - \bar{x})$$

Assim obtemos a expressão linearizada que necessitamos tendo em vista a já supracitada estabilidade do sistema. É importante ressaltar novamente que um modelo matemático pode representar perfeitamente o comportamento dinâmico de um sistema, porém as condições de operação não podem variar amplamente, pois pode-se comprometer a precisão do modelo.

## A Transformada de Laplace

O método da transformada de Laplace é um modo operacional que pode ser utilizado para resolver equações diferenciais lineares. O uso deste método nos permite transformar diversas funções como as senoidais, senoidais amortecidas e funções exponenciais em funções algébricas de uma variável complexa (s).

Operações como integração ou diferenciação podem ser substituídas por operações algébricas no plano complexo. Uma das vantagens do método de Laplace é o fato de podermos fazer uso de métodos gráficos pra prever o desempenho de um sistema qualquer sem que tenhamos que efetivamente resolver as equações diferenciais deste sistema.

### *Definição*

Seja

$f(t)$  = uma função de tempo  $t$  tal que  $f(t) = 0$  para  $t < 0$

$s$  = variável complexa

$L$  = símbolo operacional que indica que a quantidade que ele prefixa deve ser transformada pela integral de Laplace :

$$\int_0^{\infty} e^{-st} dt$$

$F(s)$  = transformada de Laplace de  $f(t)$

Então teremos que a transformada de Laplace será dada por:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

O processo utilizado para se achar a função de tempo  $FI(t)$  a partir da transformada de Laplace é chamado de Transformação Inversa de Laplace, sendo:

$$L^{-1}[F(s)] = f(t)$$

As demais considerações sobre a transformada de Laplace, como por exemplo as condições de existência da transformada ou sobre seu limite inferior não serão abordadas neste projeto, pois são irrelevantes para nosso objetivo final.

## **Projetando um Sistema de Controle**

### ***Requisitos dos Sistemas de Controle***

Assim como já mencionado, um sistema de controle deve ter como premissa básica a sua estabilidade, sendo que além desta estabilidade absoluta devemos ter também uma estabilidade relativa razoável, ou seja, a resposta deve apresentar um amortecimento razoável. Ainda devemos ter uma velocidade de resposta razoavelmente rápida assim o sistema poderá reduzir o erro a zero ou pelo menos a um patamar razoável e dentro dos limites propostos.

### ***Modelamento Matemático***

Em projetos de sistemas de controle, utilizamos modelos matemáticos representativos, ou seja, substituímos todos os componentes do sistema por seus modelos matemáticos, assim não utilizando espécie alguma de hardware.

Note-se que este é um dos maiores problemas/soluções de um projeto de sistema de controle: definir os modelos matemáticos que representam de forma satisfatória os componentes do sistema. Estes últimos não podem ser muito simplificados de forma a não prever, tão pouco exercer de forma eficaz o comportamento dinâmico do componente e também não devem ser muito complicados, dificultando a interpretação dos resultados. De fato, um modelamento matemático deve possuir os aspectos essenciais de um componente físico e suas previsões sobre o comportamento do sistema devem ser razoavelmente precisas.

Uma importante característica dos modelamentos de controle é a utilização de modelos iguais para sistemas aparentemente diferentes. Isto possibilita a unificação da teoria de controle.

Na engenharia de controle são utilizadas equações diferenciais invariantes no tempo, funções de transferência e equações com variáveis de estado para modelos matemáticos de sistemas lineares invariantes no tempo e contínuos no tempo. Embora as relações de entrada-saída de muitos componentes sejam não-lineares, acabamos por linearizar tais relações em torno dos pontos de operação, limitando assim a faixa de variáveis.

### ***Análise e Projeto de Sistemas de Controle***

Neste estágio definiremos o que se entende por análise, projeto, análise de resposta transitória e síntese.

Entendemos como análise de um sistema de controle, a investigação do desempenho do sistema sob condições especificadas anteriormente e cujo modelo matemático é conhecido.

Projetar um sistema constitui em determinar um procedimento ou modelamento de forma a se realizar determinada tarefa. Caso as características da resposta dinâmica e/ou as características no estado estacionário não forem satisfatórias deveremos adicionar um compensador ao sistema e esta implementação deverá ser feita de forma empírica.

A análise da resposta transitória nada mais é do que a determinação das respostas de uma planta para comandar entradas e entradas de perturbações. A análise no estado estacionário é a determinação da resposta após a resposta transitória ter desaparecido.

Achar um sistema de controle através de um procedimento direto que realize determinada tarefa é entendido como síntese.

### ***Método Básico para Projeto de Sistemas de Controle***

Procedimentos experimentais sempre fazem parte do projeto básico de um sistema de controle. Sínteses de sistemas de controle lineares são teoricamente possíveis, porém observamos na prática que muitos sistemas não se comportam de forma esperada e por isso procedimentos experimentais são sempre necessários. No projeto convencional devemos nos certificar de que o sistema de malha fechada é estável (condição primordial) e possui características aceitáveis na resposta transitória, isto é, velocidade e amortecimento razoáveis.

Há ainda um índice comparativo muito importante na medida que este proporciona uma visão global do processo. Este *Índice de Desempenho* mostra a diferença entre o desempenho ideal e real.

A escolha desta medida cabe somente ao projetista e deve atender às especificações do sistema em questão. O erro deverá ser sempre minimizado até o ponto onde o desempenho medido se torna satisfatório. É importante ressaltar que a teoria de controle moderno prove ferramentas muito mais poderosas do que a teoria clássica para esta minimização dos erros.

A especificação do sinal de controle sobre o intervalo de tempo de operação é chamada de **Lei do Controle**. O problema básico reside no fato de se determinar o controle ótimo, sendo este último sujeito a várias restrições de ordem matemática e econômica, guiando assim nosso índice de desempenho. Reiteramos que a seleção deste índice deve ser feita de modo rigoroso, já que a seleção do controle ótimo e



conseqüentemente a solução de um sistema depende da determinação de um índice compatível com as atividades da dada planta.

### ***Etapas do Projeto***

Em primeiro lugar devemos selecionar os atuadores e sensores. Solucionados os modelos matemáticos, projetamos um sistema de malha fechada onde o erro realimenta o sistema e assim podemos obter as especificações desejadas.

### ***Considerações Finais***

Sabemos que os sinais do controlador são baseados na diferença entre a entrada de referência e a saída, porém é muito comum ocorrer perturbações, sendo estas internas ou externas. Um sistema de controle eficaz deve sempre seguir a entrada de comando e não ser sensível a variação de parâmetros e ruídos externos, porém o controlador deve sempre levar em consideração quaisquer perturbações que afetem a saída do sistema.

É desejável controlar e medir a variável que indica o estado do sistema. Em muitos casos a variável a ser controlada é de certa forma intangível e por isso faz-se necessário o controle de uma variável secundária a fim de se controlar o sistema de forma eficaz, porém sempre, ou quase sempre haverá a influência de outras variáveis na relação entre a variável controlada “primária” e a “secundária” e por isso o controle deve ser sempre feito preferencialmente sobre a variável primária tão diretamente quanto possível.

## Sistemas Térmicos

Definiremos aqui o conceito de Sistema Térmico como sendo aqueles processos nos quais ocorrem a transferência de calor de uma substância para uma outra qualquer.

Um modo de representar um sistema térmico é usar de resistências e capacitâncias, porém sabemos que este método é pouco preciso já que a resistência e a capacitância térmica são propriedades distribuídas igualmente sobre todo material. O método mais preciso é sem dúvida o de parâmetros distribuídos, porém, para simplificar nossa análise e atender aos objetivos propostos, usaremos os parâmetros concentrados.

Sendo assim, usaremos um modelo de parâmetros concentrados onde os elementos caracterizados pela resistência ao fluxo de calor têm capacitância térmica desprezível e os elementos caracterizados por sua capacitância térmica possuem capacidade térmica desprezível.

Sabemos existir três maneiras pelas quais o calor pode fluir de uma substância para outra:

1. Condução
2. Convecção
3. Irradiação

## ***Condução***

Para transferência de calor por condução temos:

$$q = K \Delta\theta$$

onde

$q$  = Taxa de fluxo de calor em kcal/s

$\Delta\theta$  = Diferença de temperatura em °C

$K$  = Coeficiente em kcal/s°C

Sendo que o coeficiente  $K$  é dado por:

$$K = \frac{kA}{\Delta X}$$

onde

$k$  = Condutividade Térmica em kcal/m s °C

$A$  = Área normal ao fluxo de calor em  $m^2$

$\Delta X$  = Espessura do condutor em metros

## ***Convecção***

Para transferência de calor por convecção temos:

$$q = K \Delta\theta$$

onde

$q$  = Taxa de fluxo de calor em kcal/s

$\Delta\theta$  = Diferença de temperatura em °C

$K$  = Coeficiente em kcal/s°C

Sendo que o coeficiente  $K$  é dado por:

$$K = HA$$

onde

$A$  = Área normal ao fluxo de calor em  $m^2$

$H$  = Coeficiente de convecção em kcal/ $m^2$  s °C

### ***Irradiação***

Analisaremos agora o caso de transferência de calor por irradiação:

$$q = K_r (\theta_1^4 - \theta_2^4)$$

onde

$q$  = Taxa de fluxo de calor em kcal/s

$K_r$  = Coeficiente que depende da emissividade, tamanho e configuração da superfície de emissão e recepção

$\theta_1$  = Temperatura absoluta no emissor em K

$\theta_2$  = Temperatura absoluta no receptor em K

O coeficiente  $K_r$  é um número muito pequeno e por isso a transferência de calor por irradiação é aplicável somente se a temperatura do emissor for muito alta quando comparada a do receptor, isto é,  $\theta_1 \gg \theta_2$ . Observando isto, podemos reduzir a equação anterior para:

$$q = K_r \bar{\theta}^4$$

onde  $\bar{\theta}$  é uma diferença de temperatura efetiva entre emissor e do receptor. A diferença de temperatura efetiva  $\bar{\theta}$  é dada por

$$\bar{\theta} = \sqrt[4]{\theta_1^4 - \theta_2^4}$$

onde  $\theta_1 \gg \theta_2$ .

## Modelagem do Sistema Proposto

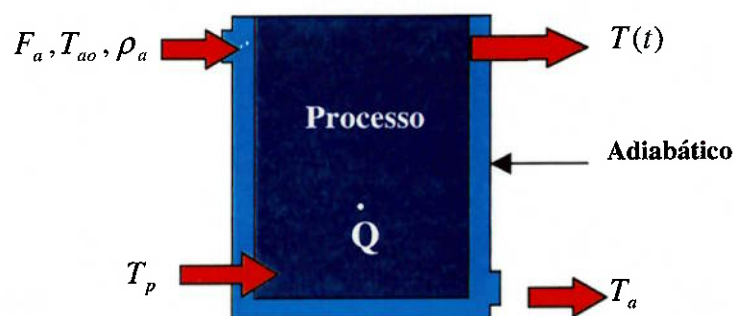
O objetivo do projeto deste sistema de controle é monitorar a temperatura do processo indicado na figura abaixo, ou seja, usaremos uma camisa d'água para alterar a temperatura do processo, levando em consideração todos os parâmetros do projeto, como por exemplo a transferência de calor por condução e radiação.

Resumindo o esquema proposto podemos verificar através da figura abaixo que temos como algumas das entradas, a temperatura, vazão e a densidade do fluido refrigerante. Este fluido será a água, por motivos econômicos e tecnológicos.

Se observamos as três entradas citadas acima, podemos ver claramente que o fator a ser controlado será a vazão, já que estaremos sujeitos a densidade e a temperatura da água que nos for proporcionada.

Seguem então, as deduções das equações de controle, troca de calor e balanço de energia para nosso projeto.

### *Tanque Resfriado por camisa d'água:*



Todas as equações a seguir seguem o princípio da conservação da massa e energia.



Para simplificar o processo, consideramos  $cp$  constante.

***Balanceamento de Energia do Processo:***

$$Q + U_p \cdot A_p [T_p - T_m] = \forall_p \cdot \rho_p \cdot cv_p \cdot \frac{dT_p(t)}{dt}$$

***Balanceamento de Energia da Camisa d'água:***

$$U_a \cdot A_a [T_m - T_a] + U_{amb} \cdot A_{amb} [T_m - T_a] + F_a \cdot \rho_a \cdot c_a (T_a - T_{a0}) = \forall_a \cdot \rho_a \cdot cv_a \cdot \frac{dT_a(t)}{dt}$$

***Balanceamento de Energia do Metal:***

$$U_p \cdot A_p [T_m - T_p] - U_a \cdot A_a [T_a - T_m] = \forall_m \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \frac{dT_m(t)}{dt}$$

Linearizando teremos:

$$f(x, y) = f(\bar{x}, \bar{y}) + \frac{\partial f}{\partial x} \int_{\bar{x}, \bar{y}} x \cdot \bar{y} + \frac{\partial f}{\partial y} \int_{\bar{x}, \bar{y}} \bar{y} \cdot x$$

Para o processo:

$$T_p(s) = \frac{K_1}{\tau_p s + 1} T_m(s) + \frac{K_2}{\tau_p s + 1} Q(s)$$

$$\tau_1 = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot c_p}{U_p \cdot A_p}$$

$$K_1 = 1$$

$$K_2 = \frac{1}{U_p \cdot A_p}$$

Assim teremos:

$$T_m(s) = \frac{1}{\tau_m s + 1} [K_3 T_p(s) + K_4 T_a(s)]$$

$$\tau_m = \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot c_m}{U_p \cdot A_p + U_a \cdot A_a}$$

$$K_3 = \frac{U_p \cdot A_p}{U_p \cdot A_p + U_a \cdot A_a}$$

$$K_4 = \frac{U_a \cdot A_a}{U_p \cdot A_p + U_a \cdot A_a}$$

Para a camisa d'água:

$$T_a(s) = \frac{K_5}{\tau_a s + 1} T_m(s) + \frac{K_6}{\tau_a s + 1} T_{a0}(s) + \frac{K_7}{\tau_a s + 1} F_a(s) + \frac{K_8}{\tau_a s + 1} T_{amb}(s)$$

Processos onde ocorrem transferência de calor, possuem uma inércia considerável, isto é, para se controlar a temperatura num processo deste tipo devemos nos “antecipar” às oscilações proporcionadas pelo sistema e proporcionar um controle adequado aos parâmetros definidos do projeto.

Tendo em vista as características acima descritas do nosso sistema, usaremos um controlador PID cuja função transferência  $G_c(s)$  é dada pela seguinte forma:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

onde

$K_p$  = ganho proporcional

$T_i$  = tempo integral

$T_d$  = tempo derivativo

Para o controlador PID,  $T_i \approx \tau$  e  $T_d \approx \frac{1}{4} \tau$

As constantes descritas acima são os parâmetros do controlador, porém pode-se escrever a equação acima como:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

onde

$K_p$  = ganho proporcional

$K_i$  = ganho integral

$K_d$  = ganho derivativo

Neste caso,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  serão os parâmetros do sistema.

Note-se aqui, que para determinarmos as constantes do controlador, deveríamos ter pelo menos algumas estimativas sobre o tempo e o comportamento do ensaio quando em pleno teste, porém não temos ainda estes valores de referência já que a máquina não foi posta em funcionamento.

## **Conclusões**

As principais conclusões sobre este projeto serão obtidas após o início dos ensaios com os corpos-de-prova. Entretanto podemos enumerar alguns pontos sobre o projeto executivo e sobre o controle de temperatura da camisa d'água.

### ***Projeto Executivo***

Nosso projeto foi finalizado e seu objetivo de dar suporte para os ensaios foi, até o presente momento, cumprido. A máquina projetada e construída não tinha um teor criativo muito bom, mas seu aspecto funcional supera todos os problemas, sejam estes de qualquer ordem.

### ***Controle de Temperatura***

Ao longo do projeto, tivemos a oportunidade de ler diversos *papers* que foram de grande valia para o projeto final. Como mencionado acima, o aspecto criativo deixou a desejar porém quando tomamos a temperatura do fluido abrasivo como um aspecto crítico do projeto, pudemos finalmente realizar algo que não tínhamos lido, ou que pelo menos foi mencionado poucas vezes. Gostaríamos e vamos finalizar o controle desta temperatura, porém teremos de realizar diversos testes antes e assim, finalizar nosso projeto dinâmico do controlador e finalmente terminar por completo nossa máquina para ensaios de erosão.