

**Universidade de São Paulo  
Escola Politécnica  
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos**

9,3  
(nove, tres)

*Nam*

**ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS NO ENSAIO DE  
COMPRESSÃO TORÇÃO**

**Autor:**

**Célio Katsuyoshi Hiraoka**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

**São Paulo**

**2003**

## **Dedicatória**

**Aos meus pais, irmãos e  
amigos mais próximos que  
dividiram comigo momentos de  
alegria e conquistas no  
decorrer de minha vida  
acadêmica.**

## **Agradecimentos**

Ao orientador Profº Gilmar Ferreira Batalha da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que tanto contribuiu e apoiou na elaboração deste trabalho.

Ao aluno de mestrado Carlos Salazar que trabalhou na execução do projeto mecânico da máquina de compressão-torção.

Aos profissionais técnicos do laboratório de fabricação mecânica que ofereceram ajuda na execução de operações de usinagem de peças e no fornecimento de informações técnicas relevantes ao sucesso deste estudo.

A todos os professores e amigos do departamento da engenharia mecânica que me ofereceram apoio na execução deste trabalho.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
<b>2. METODOLOGIA</b>	<b>8</b>
<b>3. ENSAIO DE COMPRESSÃO-TORÇÃO</b>	<b>9</b>
3.1. INTRODUÇÃO	9
3.2. CRITÉRIOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO	10
3.3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	11
3.4. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE NOMINAL DA MÁQUINA	12
3.5. PROJETO E FABRICACÃO DA ESTRUTURA DO DISPOSITIVO DE MEDICÃO DE ATRITO POR COMPRESSÃO-TORÇÃO	13
3.6. PROJETO DO SUBSISTEMA DE GERAÇÃO DE TORÇÃO	16
3.7. PROJETO DO SUBSISTEMA DE GERACÃO DE COMPRESSÃO	19
3.8. PROJETO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS DA MÁQUINA DE ENSAIO	23
<b>4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS</b>	<b>25</b>
4.1 INTRODUÇÃO	25
4.2. PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	27
<b>5. SENSORIAMENTO</b>	<b>31</b>
5.1. EXTENSÔMETROS	31
5.2. TIPO DOS EXTENSÔMETROS	32
5.5.1. <i>Cristais Piezelétricos</i>	39
5.6 TRANSDUTOR DE TORQUE	42
5.6.1 <i>Introdução</i>	42

5.6.2. Projeto	45
5.6.3. Calibração das Células de Torque	46
<b>6. INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO</b>	<b>48</b>
<b>7. CORPO-DE-PROVA</b>	<b>50</b>
7.1. MEF (MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS)	50
7.2. RESULTADOS DOS CORPOS-DE-PROVA	52
<b>8. EXPERIMENTOS</b>	<b>55</b>
8.1. ENSAIOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS – LABVIEW	55
8.2 ENSAIOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS – MATLAB	59
8.3 LEVANTAMENTO DE GRÁFICOS DO ENSAIO	61
<b>9. CONCLUSÕES</b>	<b>68</b>
<b>10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>70</b>
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>72</b>

## Listas de Figuras

**Figura 1.1 – Sistema de Aquisição de Dados**

**Figura 3.1- Esquema do dispositivo de medição de atrito da máquina de ensaio de compressão-torção.**

**Figura 3.2 - Esquema do subsistema de geração da torção da máquina de ensaio de compressão-torção.**

**Figura 3.3 - Esquema do subsistema de geração da compressão da máquina de ensaio de compressão-torção.**

**Figura 3.4 - Foto mostrando os componentes da estrutura da máquina de ensaio durante a etapa de fabricação.**

**Figura 4.1 - Sinal original e seqüência de amostras do sinal digitalizado.  
(T=período de amostragem)**

**Figura 5.1.a - Strain gage tipo roseta      Figura 5.1.b - Strain gage tipo roseta bi-axitri-direcional**

**Figura 5.1.c-Strain gage roseta do tipo delta**

**Figura 5.2 - Transdutor de pressão que emprega efeito transversal**

**Figura 5.3 - Cristal longitudinal para uso em efeito piezelétrico**

**Figura 5.4 - Diagrama esquemático de um manômetro com sensor piezoresistivo.**

**Figura 5.5 - Desenho Esquemático da Célula de Torque**

**Figura 5.6 - Células de Torque**

**Figura 5.7 -Verificação da faixa de Deformação Linear de 0 à 1500  $\mu m$ .**

**Figura 6.1 – Sistema de aquisição utilizado nos ensaios**

**Figura 7.1 – MEF aplicado ao corpo-de-prova de alumínio Faxial = 100N**

**Figura 7.2 – MEF aplicado ao corpo-de-prova de alumínio Faxial = 220N**

**Figura 7.3 – Corpo-de-prova com Faxial = 110N**

**Figura 7.4 – Corpo-de-prova com Faxial = 126,38N**

**Figura 7.5 – Corpo-de-prova com Faxial = 142,42N**

**Figura 7.6 – Corpo-de-prova com Faxial = 158,44N**

**Figura 7.7 – Corpo-de-prova com Faxial = 174,44N**

**Figura 7.8 – Corpo-de-prova com Faxial = 190,30N**

**Figura 8.1 – Tela do LabView – ( Ensaio com ruído)**

**Figura 8.2 – Tela do LabView – ( Ensaio sem ruído)**

**Figura 8.3 – Tela do LabView – (Sistema acionado)**

**Figura 8.4 – Gráficos de  $\Delta V$ (volts)xNúmero de Pontos**

**Figura 8.5 – Gráficos de  $\Delta V$ (volts)xNúmero de Pontos**

**Figura 8.6 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

**Figura 8.7 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

**Figura 8.8 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

**Figura 8.9 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

**Figura 8.10 – Gráfico Torque(Nm)xFatrito(N)**

**Figura 8.11 – Gráfico Torque(Nm)xFaxial(N)**

**Figura 8.12 – Gráfico Torque(Nm)xFatrito(N)**

**Figura 8.13 – Gráfico Torque(Nm)xFaxial(N)**

## **Lista de Tabelas**

**Tabela 5.1 - Deformação permanente em extensômetros HBM, tipo Universal**

**Tabela 5.2 - Calibração dos Torquímetros**

**Tabela 8.1 – Comparativo de Coeficiente de Atrito**

## **Resumo**

O projeto consiste na montagem de um sistema de aquisição de dados provenientes do ensaio de Compressão-Torção.

Este sistema de aquisição de dados possue as seguintes estruturas: sensoriamento, tratamento dos sinais, aquisição dos sinais e levantamento de dados. Perante esses estudos e aplicações é que se compõe o estudo do projeto.

Durante a pesquisa iremos detalhar cada uma dessas etapas do processo de aquisição e tratamento do sinal elétrico proveniente do ensaio, para melhor entendimento do projeto.

Este ensaio de compressão-torção, já é desenvolvido em países europeus e do continente asiático, sendo que no Brasil, ainda não tem sua aplicação largamente difundida. Sendo realizados experimentos apenas por grandes empresas e por alguns centros universitários.

## **Abstract**

The project is based on the assembly of a data acquisition system proceeding from the twist-torsion test.

This assay will be carried through the following structures:sensor measurement, signals treatment,data acquisition signal and data-collecting. For these studies and applications are compound the study of the project.

During this research will be specifying each of these levels of acquisition's process and electrical signal treatment proceeded from test, for the best understanding of the project.

This compression-twist test already is developed in European countries and Asiatic continent in which Brazil, doesn't have any wide spread out application. Being carried through experiments only for great companies and for some universities centers.

## 1. Introdução

Com o crescimento da utilização de computadores nas bancadas de laboratórios de pesquisa, testes, medição e automação industrial, há atualmente várias formas para a realização de aquisição de dados através de computadores pessoais. A aquisição dos dados é realizada através de sistemas com placas ou módulos de aquisição. Estas placas podem ser cartões ou dispositivos compostos de barramentos como, por exemplo: PCI, CompactPCI/PXI, USB, IEEE1394, ISA e portas de comunicação do tipo paralela ou serial.

Dentre os sistemas de aquisição, aqueles que são compostos de placas permitem a aquisição dos dados e sua transferência direta à memória do computador. Os sistemas de módulos externos utilizam equipamentos remotos ao PC que são conectados via porta serial ou paralela.

O funcionamento do sistema pode ser descrito da seguinte forma, coleta do sinal, adequação do sinal para ser digitalizada, digitalização do sinal, software para o gerenciamento do ensaio e coleta de dados (figura 1)



**Figura 1.1 – Sistema de Aquisição de Dados**

Os componentes do sistema são descritos abaixo:

- **Sensoriamento:** Transdutor e Encoders convertem uma grandeza física (temperatura, força, pressão, etc.) em elétrica (V, mV, A, freqüência, etc). TC, RTD, LVDT.
- **Tratamento do sinal:** Condicionadores de sinal asseguram a qualidade do sinal antes da conversão A/D, amplificando, filtrando e linearizando. Amplificadores, filtros, etc.
- **Aquisição do sinal:** Placas de aquisição e controle, também chamadas de placas "plug-in" elas realizam a conversão do sinal analógico para digital (A/D) para que o PC possa processar ou armazenar o sinal, ou o contrário (D/A) permitindo ao PC controlar eventos, I/O digitais para monitoração ou acionamento de chaves, contadores e timers para medidas de largura de pulso, freqüência, etc.
- **Levantamento de dados:** Software, responsável por todas as funções do sistema de testes, interface com o usuário, armazenamento e análise dos dados, é o que permite o uso do PC como instrumento.

## 2. Metodologia

Durante o projeto foram realizados estudos detalhados do sistema de aquisição de dados, desde a obtenção dos sinais elétricos provenientes dos sensores que estarão transformando propriedades físicas em elétricas, tratamento dos sinais, codificação/decodificação e monitoramento dos mesmos através de interfaces computacionais.

Também, foram realizados estudos do funcionamento da máquina do ensaio de Compressão-Torção, a fim de uma melhor compreensão dos resultados do ensaio. Sendo ainda, que foram realizadas modificações no equipamento, conforme houve necessidade para tal fato.

Os estudos da máquina do ensaio de compressão-torção foram direcionados a: dispositivos mecânicos, dispositivos hidráulicos e dispositivos elétricos.

Também foram realizadas pesquisas, sobre o corpo-de-prova a ser utilizado durante os ensaios. Os estudos foram direcionados a materiais de grande uso no mercado nacional e não largamente pesquisados anteriormente, a fim de buscar uma inovação no projeto.

### **3. Ensaio de Compressão-Torção**

#### **3.1. Introdução**

O projeto de uma máquina de compressão-torção em estado plano, necessário ao estudo de conformabilidade e das condições de atrito em processos de conformação de chapas metálicas, será detalhado neste capítulo. O projeto da máquina de compressão-torção e de seus componentes foram realizados pelo aluno de mestrado Carlos Salazar.

Durante o projeto temos de dar importância na obtenção de condições de contorno precisas e no aprimoramento de modelos físicos e físico-matemáticos existentes dos processos de conformação via métodos experimentais, e quando possível de realizados com máquinas desenvolvidas especificamente para esta finalidade. Conseqüentemente, evidencia-se a necessidade e a importância do desenvolvimento desta máquina de compressão-torção em estado plano para uso em laboratório.

Uma dificuldade comum encontrada após pesquisas de campo em prensas industriais é que estas geralmente não apresentam recursos adequados para um planejamento experimental em condições apropriada para pesquisas científica por estarem projetadas exclusivamente para a produção. Também se teriam que estas prensas seriam de um custo elevado tanto pela sua aquisição quanto pela operação e manutenção, se fossem fabricadas para produção e investigação científica.

No projeto de uma máquina ou elemento qualquer, é necessário um estudo através do qual a estrutura e suas partes componentes serão dimensionadas de forma que tenham a resistência suficiente para suportar os esforços e as condições de uso a que serão submetidas. Este processo envolve a análise de tensões das partes componentes da estrutura e considerações a respeito das propriedades mecânicas dos materiais.

Desta forma no projeto de uma máquina de ensaio de compressão-torção, tem que se levar em conta a capacidade de reproduzir os níveis de carregamento e velocidades lineares e angulares necessários para a realização dos testes nas condições previstas. Assim como a possibilidade de troca e acoplameto de peças e dispositivos.

A fabricação da máquina de compressão-torção permitiria a realização dos ensaios de torção em estado plano, possibilitando futuramente outros ensaios mais complexos ou a simulação de outros processos de conformação mecânica.

### **3.2. Critérios de Projeto e Construção**

Considerando-se os requisitos necessários para os equipamentos de laboratório, os seguintes critérios de projeto e construção para a máquina de compressão-torção em estado plano foram estabelecidos:

- a)Construção de um sistema composto de subsistemas de características modular.
- b)Capacidade de controlar as cargas e as velocidades durante os testes das amostras.
- c)Capacidade de receber um dispositivo de compressão-torção em estado plano a frio.
- d)Possibilidade de receber a instalação de instrumentos de medida de torque,carga,pressão e deslocamento linear e angular.

e) Utilizar e reutilizar somente materiais disponíveis no almoxarifado, assim como recuperar ou reciclar componentes sem uso ou considerados "sucata" na oficina e laboratórios do Departamento de Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

f) No caso de não contar com os respectivos elementos para a evolução da construção da máquina de ensaio, considerar a opção de compra.

g) Possibilidade de ser construída por processos de fabricação simples disponível em oficinas mecânicas das universidades brasileiras.

### **3.3. Desenvolvimento do Projeto**

Tomou-se em conta as características específicas do equipamento a se projetar, calculou-se os parâmetros essenciais ao dimensionamento e especificação dos subsistemas que comporão a máquina de compressão-torção de chapas metálicas.

Adotou-se a seguinte seqüência para o desenvolvimento do projeto:

- a) Determinação da capacidade nominal da máquina.
- b) Projeto do transdutor de torque e um dispositivo de calibração de células de torque.
- c) Projeto dos componentes estruturais do dispositivo de medição de atrito.
- d) Projeto do subsistema de geração de compressão.
- f) Projeto dos componentes estruturais da máquina de ensaio.

### 3.4. Determinação da Capacidade Nominal da Máquina

Dentre os requisitos básicos para o projeto de uma máquina de laboratório para compressão-torção em estado plano, tem-se: a determinação da capacidade nominal de carga e velocidade de operação do equipamento. Por ser um equipamento destinado a laboratório e ensaio de corpos de prova de chapas de metal e de pequenas dimensões sua operação dar-se-á em uma ampla faixa de valores de cargas e velocidades compatíveis com as dimensões desejadas para ao equipamento, mais especificamente:

Força Normal Máximo =10KN

Torque Máximo =10Nm

Tensão de Atrito interfacial por cisalhamento = 15Mpa

Para o dimensionamento será considerado um primeiro indentador plano em forma de anel, podendo ser posteriormente substituído por outro de geometria diferente. Para uma primeira etapa se empregará um indentador com diâmetro externo de 30mm e diâmetro interno de 15mm, o que corresponde a uma área de 530mm<sup>2</sup> o que resultará numa tensão de atrito interfacial por cisalhamento aproximada da ordem de 5,7Mpa.

Para as velocidades de deslocamento linear adotou-se uma faixa de 0 a 20mm/s , para as velocidades angulares estabeleceu-se uma faixa de 0,25 a 30rpm.

### **3.5. Projeto e fabricacão da estrutura do dispositivo de medição de atrito por Compressão-Torção**

O projeto do dispositivo de medição de atrito depende da faixa de trabalho na qual seria usado, assim como do tipo e geometria do transdutor a se empregar. Após da seleção do transdutor, a qual seria uma célula de torque instrumentada com extensômetros de resistência elétrica, se projeta uma estrutura externa, a qual transmitirá a força de compressão, fornecida por um componente externo. Esta estrutura asegura no seu interior à célula de torque, alem de isolá-la da ação da força de compressão.

A estrutura do dispositivo evitará que a célula gire livremente no seu interior, assegurando-a pelo seu extremo superior, o extremo inferior poderá girar livremente e estará ligado ao punção, o qual quando entre em contato com uma amostra produzirá uma torção na célula de torque.

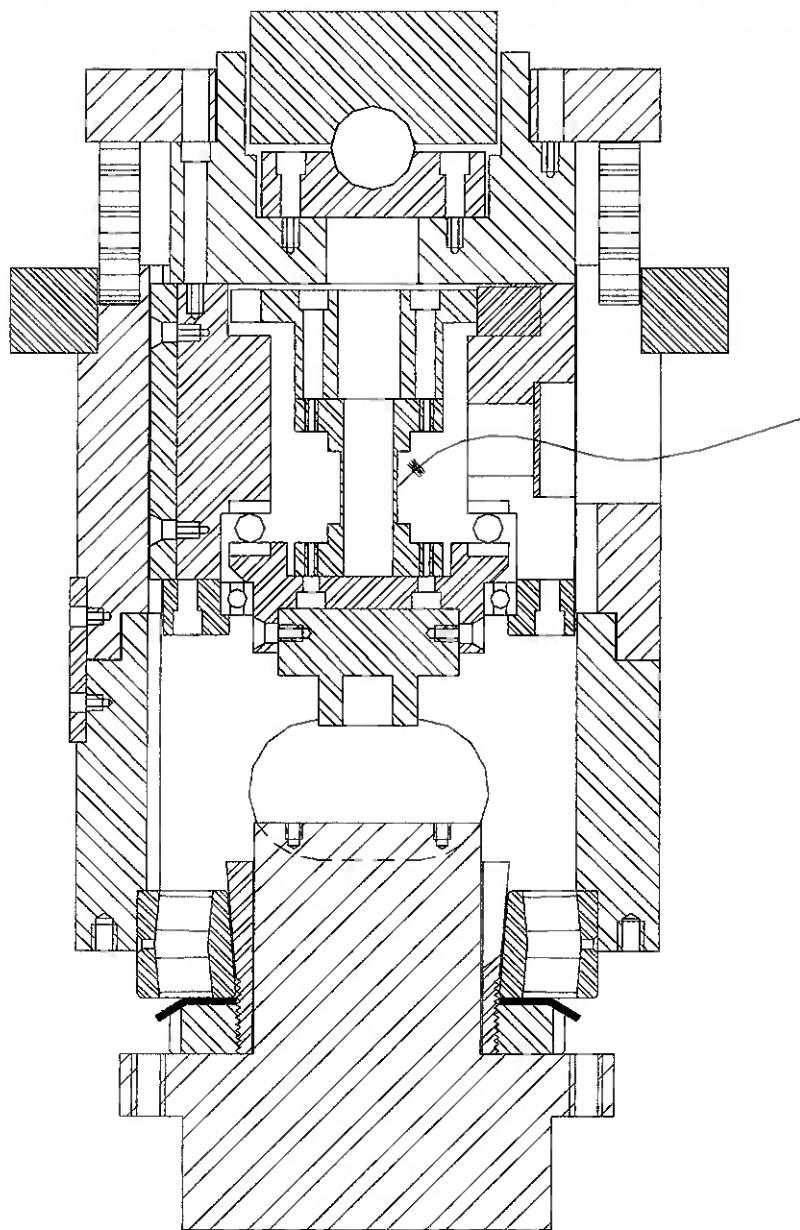
No extremo superior do dispositivo se projetou um mini-sistema, tipo rolamento de esfera, o qual permite uma transmissão da força de compressão em forma vertical, aceitando-lhe uma pequena desviação, a respeito do eixo vertical. Adicionalmente, evitaria qualquer transmissão, de um suposto torque, que poderia se transmitir ao componente que fornece a força de compressão a consequência do ensaio.

Projetou-se uma carcaça guia, composta de duas peças, montando-se uma acima da outra e fixadas numa única posição, empregando para isto uma chaveta parafusada. Nesta carcaça se alojara a estrutura do dispositivo e ao mesmo tempo servirá para guiar o deslocamento do dispositivo durante a ação de compressão, através . Uma outra função é, fixar a mesa porta-mostra, de modo de garantir a concentricidade dos elementos atuantes durante o ensaio.

No extremo superior se alojara uma mola, a qual permitirá o retorno da estrutura a seu ponto inicial, após o cesse da ação da força de compressão; e pela fase inferior da peça inferior da carcaça, se fixará a uma placa de aço, que tem a função de mesa suporte. A sua vez esta mesa suporte estará fixada, nos seus extremos, à estrutura da máquina de ensaio. A peça inferior da carcaça conta com duas janelas opostas que permitiram o acesso à área de sujeição da amostra, na mesa porta-amostra

A mesa porta-amostra, foi fabricada em aço ferramenta, sendo sua função fazer girar a amostra durante o ensaio, simultaneamente com a engrenagem maior, por estar fixada a esta por médio de parafusos. Nesta parte inferior desta mesa deverá ser instalado um transdutor rotativo, para ter um controle do giro durante o ensaio.

A figura 3.1 na página seguinte, mostra um esquema do dispositivo de medição de atrito.



**Figura 3.1- Esquema do dispositivo de medição de atrito da máquina de ensaio de compressão-torção.**

\* Projeto realizado pelo aluno de mestrado Carlos Salazar

### 3.6. Projeto do Subsistema de Geração de Torção

As opções para gerar a torção na máquina de compressão-torção são varias podendo ser realizada por sistemas hidráulicos, elétricos , mecânicos numa configuração mista, tais como:

- Hidráulicos:
  - Motor hidráulico
  - Motor servo-hidráulico
- Elétricos:
  - Motor C.C
  - Motor Passo a Passo
  - Servo-motor
  - Motor de C.A. + Inversor de freqüência
- Mecânicos + Motor (C.A. / hidráulico [H])
  - Motor (C.A. / H) + Correias
  - Motor (C.A. / H) + Correntes
  - Motor (C.A. / H) + Redutores de engrenagens retos
  - Motor (C.A. / H) + Redutores de engrenagens helicoidais
  - Motor (C.A. / H) + Redutores de parafuso sem fim
  - Motor (C.A. / H) + Redutor de planetario

Todas as opções anteriores, quando selecionadas com motor de C.A podem adicionalmente utilizar um Inversor de freqüência.

O sistema de geração de torção selecionado foi o de motor de C.A + inversor de freqüência e engrenagens retos, porque se contava com o aceso de um sistema de redução por engrenagens retos, obtidos de um robô que se encontrava disponível para o aproveitamento de seus componentes.

#### **a) sistema de redução por engrenagens retos**

A relação transmissão deste sistema é de 1:6. Está composto de uma engrenagem maior composto de 108 dentes, diâmetro exterior de 356 mm, sendo a engrenagem acionada. Nesta será fixada a mesa porta-amostra, para gerar a rotação na amostra durante o ensaio. Esta engrenagem está apoiada na face externa de uma das pistas de um rolamento axial de esferas (designação: 51164), a outra pista se apóia num assento que se encontrará fixado na base da estrutura da máquina de ensaio.

A engrenagem motriz é menor, com 18 dentes, de diâmetro exterior de 65 mm, esta encaixada no eixo do motor elétrico e aciona duas engrenagens das mesmas características, sendo estas são as que transmitem a rotação à engrenagem maior. Todas as engrenagens menores estarão instaladas numa estrutura tipo caixa que serve também de suporte para o motor elétrico.

### b)sistema elétrico da geração de rotação

Emprega-se um motor elétrico, um variador de freqüência e um seccionador elétrico trifásico.

- **Motor:**

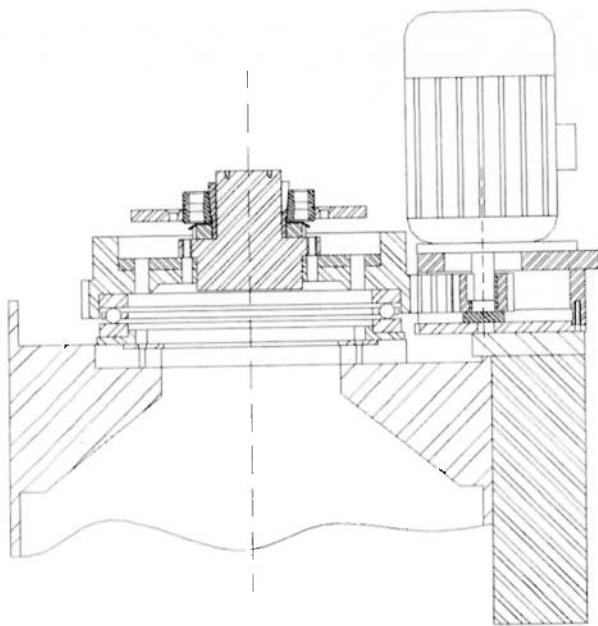
Marca	: WEG S.ª
Modelo	: 90L
Fase	: 3 ~
Potencia Nominal	: 2,2 KW [3 HP-CV]
Tensão Nominal	: 220 / 380 V
Corrente Nominal	: 8,86 / 5,13 A
Freqüência	: 60 Hz
RPM	: 1720
Ip/In	: 6,8
Cos $\phi$	: 0,8

- **Variador de freqüência:**

Marca	: WEG S.A.
Modelo	: CFW07 – 10/3AC.220-230
Alimentação	: 1 ~
Corrente Nominal	: 10 A
Tensão	: 220 V
Potência	: 2,2KW [3 CV]
Dimensões	: 210x156x137 (mm)
Peso	: 3,2 Kg
Entrada	: Rede/Line 220-230VAC 1 – 18 A 50/60 Hz
Saída	: Rede/Line 10 A 0 – 300 Hz

- **Seccionador elétrico trifásico:**

Marca	: Mastin.
Modelo	: MB 231
Fases	: 3 ~
Fusíveis	: 25 A, 250 V



**Figura 3.2 - Esquema do subsistema de geração da torção da máquina de ensaio de compressão-torção.**

### **3.7. Projeto do Subsistema de Geracão de Compressão**

As opções para gerar a torção na máquina de compressão-torção são varias podendo ser realizada por sistemas hidráulicos, pneumáticos ou mecânicos, tais como:

- **Hidráulicos:**
  - Cilindro de ação direta
  - Cilindro com acumulador

- **Pneumáticos:**
  - Cilindro de ação direta
  - Cilindro com acumulador
- **Mecânicos**
  - Parafuso de potência
  - Torquímetro

Foi selecionado como sistema de geração de compressão o acionamento hidráulico, porque alem de permitir a variação continua de forças e de velocidades durante o ensaio, apresenta as seguintes vantagens: possibilita mas facilmente a monitoração do ensaio e apresenta componentes padronizados e disponíveis comercialmente o que facilita a fabricação e montagem deste subsistema para a máquina de ensaio.

Alem das vantagens explicadas acima, se contava com a disponibilidade de uns cilindros hidráulicos do robô, anteriormente mencionado, assim como a uma máquina de ensaio tipo prensa em desuso, o que disponibilizava o aproveitamento de seus componentes. Uma outra situação favorável era a possibilidade de usar um painel didático de circuitos hidráulicos, sendo este finalmente de grande ajuda para a execução dos testes da máquina de ensaio assim como os ensaios projetados.

As componentes do subsistema hidráulico são:

- **Cilindro Hidráulico:**

Comprimento do corpo : 525,5 mm

Diâmetro do pistão: 25,4 mm

Comprimento do pistão : 150 mm

- **Dispositivo de conexão hidráulica**

Material : Alumínio naval

Dimensões (c x l x a): 122 x 85 x 45 (mm)

Nipples: roscados para furos roscados M18, comprimento 50 mm

- **Painel didático de circuitos hidráulicos**

- **Motor:**

Marca : WEG

Modelo : 132 (S) 185

Potência : 5 CV

Tensão Nominal : 220 V

Corrente Nominal: 15 A

Fase : 3 ~

- **Bomba:**

Marca : Vickers

Modelo : S214-BR2 05BR-IJT

- **Mangueiras Hidráulicas:**

Diâmetro externo: 17 mm

Quantidade : 04

Comprimento : 2 m

Conector : Marca: Aeroquip, Modelo: FD45-serie 6

- **Manômetro:**

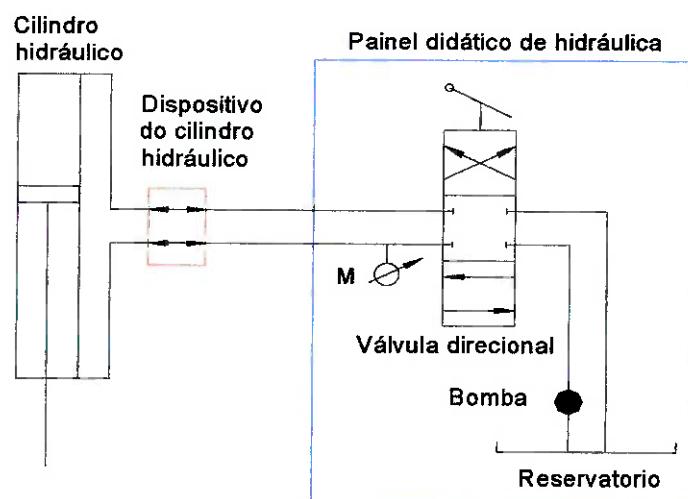
Marca : Vickers

Escala e Unidade : 0-70 bar

- **Válvula de distribuição**

Marca : Vickers

Modelo : DG.17.V.3.2.C30.BR1



**Figura 3.3 - Esquema do subsistema de geração da compressão da máquina de ensaio de compressão-torção.**

\* Projeto realizado pelo aluno de mestrado Carlos Salazar

### **3.8. PROJETO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS DA MÁQUINA DE ENSAIO**

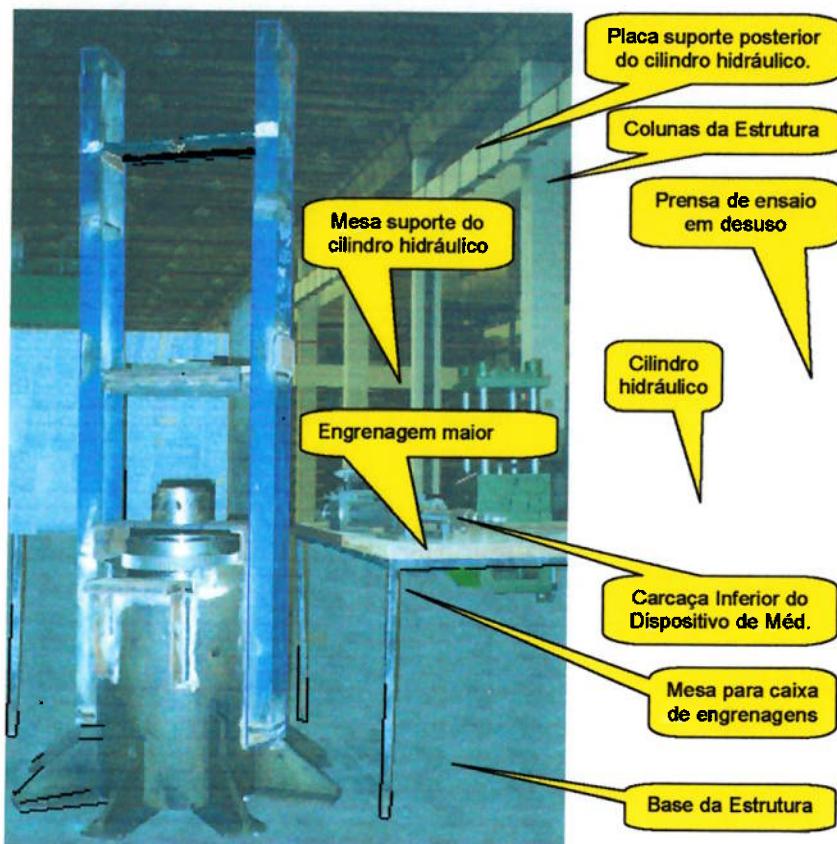
No projeto da estrutura da máquina de ensaio levou-se em conta:

- A capacidade dos componentes para resistir as tensões produzidas durante o ensaio.
- Possibilitar a instalação dos componentes dos outros subsistemas de geração compressão e torção
- Continuar com o princípio de redução de custos e reaproveitamento de componentes em desuso que possam ser úteis para o desenvolvimento do projeto e fabricação.

A base da estrutura foi a base de um robô, é de aço e tem forma de tubo, provista de 08 pés (suportes), distribuídas radialmente na base. Internamente, na parte superior, apresenta uma configuração tipo mesa circular a qual será usada para montar o suporte do rolamento maior e acima de este o rolamento mais a engrenagem.

São soldadas duas colunas, verticalmente e opostas uma da outra, feitas de perfil tipo L, soldadas formando um canal C. No interior das colunas se soldarão transversalmente placas de reforço. No meio da coluna soldaram-se cantoneiras - para a fixação da mesa suporte do cilindro hidráulico - as quais se comportariam como reforços adicionais. No extremo superior da coluna soldou-se a Placa suporte posterior do cilindro hidráulico, a qual com a instalação de outros componentes permitiram montar ao cilindro hidráulico verticalmente; esta placa também se comportará como um reforço adicional no extremo superior das colunas evitando que estas tendam a se abrir.

Entre a base e as colunas soldaram-se os suportes da placa-mesa da carcaça do dispositivo de ensaio; estes suportes são de perfil C e quando seja fixado como parte da estrutura também será mais um reforço das colunas.



**Figura 3.4 - Foto mostrando os componentes da estrutura da máquina de ensaio durante a etapa de fabricação.**

Na figura 3.4 se mostra uma foto da estrutura quando estava no processo de fabricação, também se pode ver no lado direito a prensa de ensaio em desuso, cujos componentes hidráulicos seriam utilizados futuramente e na mesa observa-se o primeiro cilindro hidráulico que ia a ser utilizado no projeto da máquina de torção-compressão.

## 4.Sistema de Aquisição de Dados

### 4.1Introdução

O computador utilizado no sistema de aquisição de dados pode afetar drasticamente a velocidade máxima a aquisição de dados de maneira contínua, da placa para o computador. As tecnologias atuais ostentam processadores rápidos, como os das categorias Intel Pentium e Motorola PowerPC aliados a tecnologia de barramentos como a arquitetura PCI,ISA/EISA ou Macintosh NuBus.

Com a proliferação dos cartões PCMCIA os sistemas de aquisição portáteis vêm rapidamente tornando-se alternativas aos sistemas de mesa e bancada de aquisição de dados baseados no PC.

Em aplicações remotas de aquisição de dados, que utilizam a comunicação serial como RS232 ou RS485, a transferência de dados é normalmente limitada pelas taxas da comunicação serial.

Todos os computadores do tipo IBM-PC são capazes de realizar operações programáveis de entrada e saída (E/S) e operações de transferência utilizando interrupção. Transferências por DMA (Direct Memory Access) que não são disponíveis em alguns computadores aumentam a taxa de transferência do sistema através do uso de um circuito dedicado no controle da transferência de dados diretamente na memória do sistema.

Utilizando este procedimento o processador não é incomodado com os dados em movimento e, portanto é livre para envolver-se no processamento de tarefas mais complexas. Para obter os benefícios de transferências de DMA ou com interrupções, a placa de aquisição deve ser capaz de executar esses tipos de transferências.

Um outro fator limitante para aquisição de grande quantidade de dados é o disco rígido. O tempo de acesso ao disco e a fragmentação do disco rígido podem reduzir显著mente a taxa máxima de transferência. Para sistemas que necessitem adquirir sinais de alta freqüência, deve-se selecionar um disco rígido de alta velocidade e ter certeza que exista espaço disponível não fragmentado para armazenar os dados.

Muitas vezes, aplicações requerem o processamento em tempo real de sinais de alta freqüência. Tais aplicações precisam de um processador de 32 bits acompanhado de um co-processador ou um processador dedicado como, por exemplo, um processador digital de sinais (DSP). Por outro lado, se a aplicação somente faz a aquisição e ajuste do sinal uma vez ou duas por segundo, um PC de baixo custo é satisfatório. Portanto, a capacidade do computador que pode afetar显著mente o desempenho do seu sistema de aquisição de dados.

## 4.2. Placa de Aquisição de Dados

As aplicações das placas eletrônicas de aquisição de dados são muitas e muito variadas, especialmente na indústria e controlo de processos, mas em muitos casos dizem respeito a aplicações comuns e problemas típicos dos processos de produção.

As vantagens em utilizar placas eletrônicas de aquisição de dados são importantes: preço, facilidade de instalação, disponibilidade de ferramentas e toda a potência de um computador pessoal para realizar o controle.

O problema fundamental é que se trata de um sistema de controlo centralizado: o que significa que todos os sinais que queremos adquirir e os dispositivos que vamos controlar devem estar diretamente ligados ao nosso cartão de aquisição de dados. Isto obriga a colocar o computador junto a estes dispositivos, ou a realizar um importante trabalho de ligação de cabos.

A alternativa passa por utilizarmos sistemas de controlo distribuídos, nos quais se usam várias unidades de processo (computadores e micro controladores), comandando cada um deles uma parte dos dispositivos do sistema que, comunicam entre si mediante uma rede informática, podendo ser controlados a partir dum computador central, ou atuar de forma independente.

#### 4.2.1.Características

-Todos as placas realizam basicamente a mesma função: a conversão de dados digitais, do computador, em sinais elétricos e vice-versa.

-Saídas e entradas digitais: permite-nos criar e obter sinais elétricos em duas posições ou valores: ativado e desativado.

-N.º de entradas / saídas digitais: a quantidade de sinais de dois valores que podemos controlar, tanto para a saída como para a entrada.

-Voltagem e corrente dos sinais digitais: servem para definir o tipo de sinais elétricos que podemos controlar e daí, os dispositivos elétricos e eletrônicos que podemos ligar à nossa placa. Normalmente utilizam-se 5 voltes para indicar que o sinal está ativado e 0 voltes para indicar que está desativado.

-Saídas e entradas analógicas: Um dos dispositivos mais utilizados com as placas eletrônicas de aquisição de dados são os sensores (de temperatura, de pressão, de intensidade da luz, etc.) que permitem medir valores físicos convertendo-os em sinais elétricos.

-Número de entradas/saídas analógicas: número de sinais elétricos contínuos com infinitos valores que podemos ligar à nossa placa, tanto de entrada como de saída. Normalmente, o número de entradas/saídas digitais costuma ser inferior ao de entradas/ saídas analógicas.

-Voltagem e corrente das entradas/saídas analógicas: Para o caso de entrada terá uma categoria de -5 até 5 voltes, sendo que, qualquer outra voltagem inferior ou superior produz um resultado errôneo. No caso da saída analógica, a sua categoria encontra-se entre os 0 e os 5 voltes.

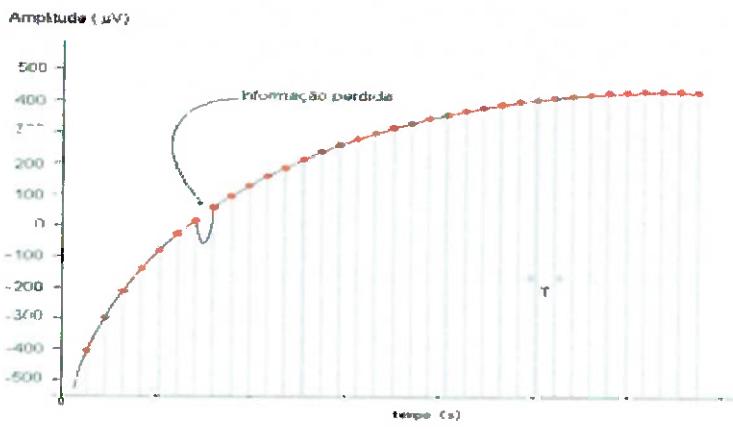
-Contadores/ Temporizadores: Muitas placas eletrônicas de aquisição de dados dispõem de circuitos capazes de contar quantas vezes muda de valor um sinal elétrico que se encontra ligado à placa, ou produzir um sinal elétrico cada certo período de tempo.

-Interrupção e DMA: A nossa placa eletrônica de aquisição de dados pode avisar o programa que o comanda através de uma interrupção e transferir os dados mediante o DMA ou Acesso Direto à Memória do computador. Estes costumam ser de grande utilidade principalmente em situações, nas quais queremos fazer aplicações com restrições de tempo significativas ou que adquiram dados a grande velocidade. No caso de aplicações fáceis e não críticas estas características não costumam utilizar-se.

#### 4.2.2. Conversão: Analógica/Digital

Com a evolução dos métodos de processamento digital, tornou-se necessária, para que os dados sejam lidos pelo microcomputador, a transformação do sinal elétrico que é contínuo em sinal discreto. A transformação de sinais contínuos em discretos é realizada por digitalização. Esta operação é executada por meio de uma placa de conversão analógica digital. A digitalização consiste na representação de um sinal contínuo por uma seqüência de amostras instantâneas, recolhidas em espaços de tempo pré-fixados (freqüência de amostragem). Cada amostra traduz a amplitude do sinal contínuo no instante da amostragem. A seqüência de amostras constitui um sinal discreto no tempo que pode ser armazenado, reproduzido e processado de forma digital.

Para que o processo de amostragem não conduza a perda de informação (Figura 4.1) é necessário que a freqüência de amostragem seja, pelo menos, 2.4 vezes superior à máxima freqüência presente no sinal (Teorema de Nyquist). O registro eletromiográfico caracteriza-se normalmente, por uma freqüência máxima de 300/500 Hz. A taxa de amostragem deverá ser de pelo menos 720 Hz. A opção de uma taxa de amostragem de 1000 Hz garante uma margem de segurança adequada, quando se trata de analisar atividades musculares grosseiras. Para situações mais abrangentes é aconselhável trabalhar com uma taxa de amostragem na ordem de 3000 Hz.



**Figura 4.1 - Sinal original e seqüência de amostras do sinal digitalizado.**  
( $T$ =período de amostragem)

## 5. Sensoriamento

### 5.1. Extensômetros

Trata-se de um sensor de deformação que pode ser usado diretamente em peças na avaliação de deformações superficiais ou em diversos sistemas mecânicos, compondo assim transdutores para grandezas como: pressão, força e aceleração.

Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico depositado sobre um polímero o qual pode ser colado na superfície sob análise.

- Ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando assim a deformação da superfície.
- Existem dois valores padronizados de resistência 120W e 350 W.

### 5.2. Tipo dos Extensômetros

A escolha do tipo do extensômetro refere-se a sua aplicação, por exemplo:

## 5.2.Tipo dos Extensômetros

A escolha do tipo do extensômetro refere-se a sua aplicação, por exemplo:

- a)Medidas de deformações estáticas
- b)Medidas de deformações dinâmicas
- c)Temperatura de operação
- d)Limite de deformação
- e)Capacidade da corrente de excitação
- f)Auto Compensação da Temperatura

### a)Medidas de deformações estáticas

Requer do extensômetro grande performance. Sua escolha associada aos acessórios tais como: cola, materiais de impermeabilização e fios de conexões, deve ser feita para cada caso de aplicação, levando em consideração as limitações de toda instalação.

Um extensômetro para ser utilizado em medidas estáticas e deve satisfazer as condições tais como: grande sensibilidade longitudinal (fator do extensômetro), mínima sensibilidade transversal, baixa sensibilidade a temperatura, onde grandes variações de temperatura ocorrem e máxima estabilidade elétrica e dimensional.

**b)Medidas de deformações dinâmicas**

O extensômetro deve ter grande sensibilidade longitudinal e confeccionado com materiais resistentes à fadiga.

**c)Temperatura de Operação**

Deve ser observada à temperatura de trabalho. Existem extensômetros para as mais variadas faixas de trabalho e o limite de temperatura de operação de um extensômetro depende dos componentes que entram na sua composição.

**d)Limite de deformacão**

Existem na prática extensômetros para alongamento de até 10%, mas os mais comuns, como o que foi escolhido são para 2% de deformação. Esta propriedade depende da liga do filamento e dos materiais da base e sua colagem e, ainda, da própria fixação do extensômetro.

**e)Capacidade da corrente de excitacão**

A corrente suportada pelo extensômetro é de grande importância na sensibilidade do sistema de medida, uma vez que a tensão de saída do aparelho em que está o extensômetro ligado, é diretamente proporcional à corrente de excitação. Mas temos que levar em conta a dissipação do calor gerado pelo efeito Joule nessa resistência que implica na estabilidade ou erro de leitura.

A corrente que deve ser imposta ao circuito é dependente do extensômetro em si, ou seja, do tamanho da grade, do tipo de base e do material em que está colado; os valores práticos, para uma orientação, de maneira geral pode se ter:

Para os extensômetros de base de papel, a corrente suportada é de até 25 mA e para os extensômetros de base de baquelita colado em metal pode suportar até 50 mA.

Para os extensômetros aplicados em materiais de baixo coeficiente de condução térmica, tais como: plásticos, gesso, concreto e outros, é aconselhável não ultrapassar 6 mA de excitação.

Os instrumentos normais para uso em extensometria, funcionam com correntes inferiores a 5 mA.

#### f) Auto Compensação de Temperatura

Quando utilizamos extensômetros com coeficiente térmico linear diferente do coeficiente térmico do material onde o extensômetro está aplicado, ao variar a temperatura, o extensômetro estará sujeito a uma deformação aparente que é proveniente unicamente da variação da temperatura. Os extensômetros auto compensados com a temperatura, são obtidos combinados perfeitamente, o coeficiente de dilatação térmica da liga da grade, com o material em que está aplicado o extensômetro e mantendo o coeficiente de resistividade com a temperatura nula, evidentemente, para um dado intervalo de temperatura.

### **5.3.Tipos de Material Base e de Configuração da Grade**

A material base utilizada varia de acordo com o fabricante e com as vantagens ou desvantagens apresentadas por este, frente a utilização do extensômetro e as variações de temperatura que suporta.

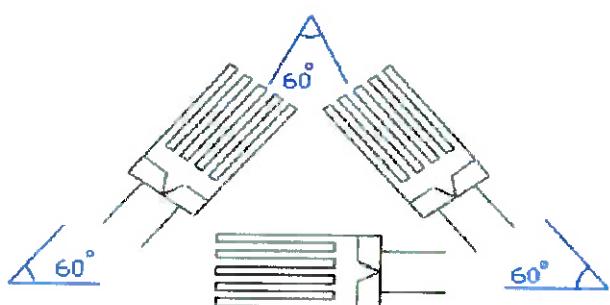
Nos strain gages metálicos podem ser usados diferentes tipos de substratos, tais como, poliamida, papel, poliéster, phester e outros. Uma das bases mais comuns, neste caso, é a phester, composta de fenol tipo epóxi, por ser fina, flexível e de fácil colagem. Sua faixa de uso está entre -50 °C a +180 °C. Já o substrato de poliamida possui excelente qualidade de resistência à temperatura na faixa de -500 °C a +200 °C, garantindo maior durabilidade ao extensômetro.

Os strain gages de semicondutores apresentam, em geral, um substrato de fenol com boa estabilidade na faixa de -50 °C a +170 °C.

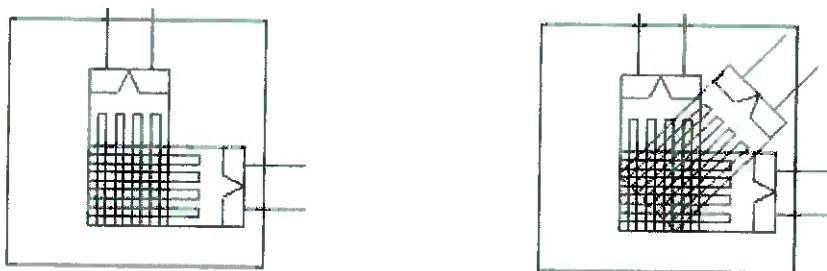
Com referência à configuração do extensômetros, esta inclui a forma da grade, o número e orientação das grades num strain gage de múltiplas grades e o arranjo particular das mesmas. A escolha de um determinado tipo depende, naturalmente, da informação desejada.

Para medidas de deformação localizadas uniaxiais, pode ser usado o extensômetro composto de uma única grade. Neste caso, o comprimento e a largura da grade depende das medidas desejadas. Por exemplo, o strain gage deve ser colocado nos pontos da estrutura onde ocorrem as maiores deformações. Nestes casos, em geral as regiões de alta concentração de tensões são bem localizadas, devendo-se então escolher um strain gage de comprimento e largura não superior a região, uma vez que o extensômetro vai indicar uma deformação média da região.

Para as medidas de deformações em mais de uma direção (bi-axial, triaxial, etc.), conhecidas ou não, strain gages em forma de roseta são os mais aconselháveis. Com configurações em forma de roseta se minimizam os erros de colagem em diferentes direções, mas, ainda se deve ter o cuidado quanto ao tamanho do strain gage, em relação à região de tensões a ser medida. Nas figuras 5.1.a, 5.1.b e 5.1.c tem-se o esquema de algumas configurações de strain gages em forma de roseta.



**Figura 5.1.a - Strain gage tipo roseta** **Figura 5.1.b - Strain gage tipo roseta bi-axitri-direcional**



**Figura 5.1.c-Strain gage rosetta do tipo delta**

#### **5.4. Extensômetros comerciais**

Os fabricantes de strain gages são relativamente poucos, dentre os quais pode se salientar: Kiowa (Japão), Micro Measurements (EUA), HBM (Alemanha Ocidental), BLH (EUA), Phillips (Holanda).

A sofisticada tecnologia, a variação de tipos de strain gages (em função das aplicações) e a quantidade produzida praticamente limitam o número de fabricantes a um círculo muito restrito.

A seleção do extensômetro adequado depende, obviamente, de uma série de fatores, dentre os quais:

- Objetivo (tipo) da medição;
- O material onde será colado o strain gage (alumínio, cobre, aço);
- Dimensões do strain gage;
- Precisão necessária na medida;
- Potência que o strain gage pode dissipar (sem que a passagem de corrente produza aquecimento inconveniente);
- Preço.

Os modelos e tipos de strain gages oferecidos são os mais diversos, variando de fabricante para fabricante. A HBM, por exemplo, divide a sua linha de produtos em quatro classes: Precision Strain Gages, Universal Strain Gages, Standard Strain Gage e Other Strain Gages. É claro que a série "Precision" é mais cara. Entretanto, para se construir uma célula de carga com precisão 0,02%, provavelmente se necessita recorrer a extensômetros de precisão.

Os extensômetros tipo KL, da Kiowa, por exemplo, são extensômetros para uso com grandes deformações (4 - 8%); trata-se de extensômetros do tipo "fio", o material da grade é liga Cu-Ni, a faixa de operação é de -10 a +60 °C , a corrente máxima que pode circular pelo extensômetro é de 25 mA, tem baixa resistência à umidade e não é auto-compensado (em termos de temperatura).

Como se pode observar, a escolha da faixa de deformação em que o extensômetro irá operar é fundamental; para o extensômetro KFW, da Kiowa, a máxima deformação permitida é da ordem de 1%; deformações maiores podem, inclusive, danificar o extensômetro. Assim sendo, uma das características que o extensômetro possui, é a máxima deformação estática elástica permitida; entretanto, este valor não deve ser atingido, ao se operar em medições mecânicas.

A tabela 5.1 mostra o que ocorre, em termos de deformação permanente, com o extensômetro da HBM, tipo Universal:

**Tabela 5.1 - Deformação permanente em extensômetros HBM, tipo Universal**

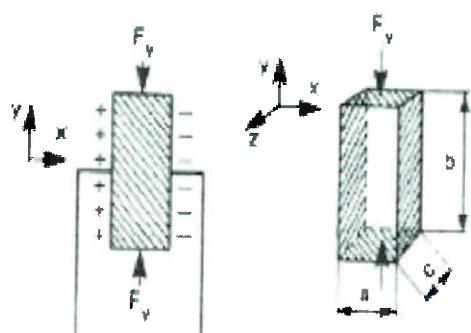
Deformação de Trabalho(mm/m)	Deformação permanente(mm/m)	Nº de ciclos
3000	300	$10^4$
2000	300	$10^6$
1000	300	$10^7$

Cada fabricante possui um catálogo completo com os diferentes tipos de strain-gage que produz e suas características. A escolha de um ou outro dependerá, sobretudo, do material a ser estudado, da faixa de deformação, das condições de temperatura e umidade, do custo e da disponibilidade no mercado.

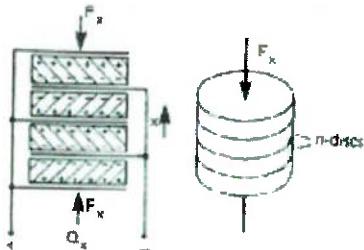
## 5.5. Transdutor de Pressão

### 5.5.1. Cristais Piezelétricos

Um sensor piezelétrico gera um sinal elétrico quando está sendo deformado. De todos os materiais piezelétricos, o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é um dos materiais mais convenientes para desenvolvimento de transdutores de força, principalmente devido à estabilidade de seu sinal. Os cristais usados em transdutores são cortados segundo um plano de corte, de modo que somente sejam sensíveis às pressões ou forças de cisalhamento em uma determinada direção.



**Figura 5.2 - Transdutor de pressão que emprega efeito transversal**



**Figura 5.3 - Cristal longitudinal para uso em efeito piezelétrico**

Aproveitando estas características do cristal, é possível construir transdutores que medem forças de empuxo, esforços de corte, momentos fletores, etc... Para medir forças de tração, procede-se a uma pre-compressão de um cristal de efeito longitudinal, de modo que a tração atua como agente de descompressão.

Existem dois tipos principais de sensores de quartzo usados para medição. O primeiro é do tipo no qual a força aplicada causa o surgimento de uma carga eletrostática, como mostrado anteriormente; normalmente mede-se a voltagem ao invés da carga - através de um amplificador e o sinal resultado pode ser calibrado diretamente em força, por exemplo. O segundo tipo envolve um cristal na forma de elemento ressonante, onde a frequência é modificada com a força aplicada.

É comum encontrar transdutores que usem simultaneamente 3 cristais, medindo simultaneamente forças em 3 deformações (ou acelerações, por exemplo. Configurações desse tipo conseguem desvio de linearidade da ordem de 0,2 - 0,3%, faixas de pressão de 25Mpa e a resposta é uniforme até 30 KHz, com picos de até 100 KHz. Como existe uma resistência DC praticamente infinita ao longo do sensor, esses dispositivos **não se prestam para medições estáticas.**

O limite de frequência inferior é da ordem de 1 Hz, dependendo da sensibilidade . O tipo de amplificador usado com esses sensores é do tipo "operacional de alto ganho, com estágio de entrada baseado num MOSFET", adequado para impedância de entrada muito alta. As principais características destes transdutores são: alta estabilidade, faixa de resposta ampla em frequência, estabilidade boa à temperatura, boa linearidade e baixa histerese.

### 5.5.2.Piezoresistivos

Muitos metais e outros materiais sólidos variam a resistividade quando submetidos à tensões mecânicas. Extensômetros de resistência elétrica (strain gages) são um bom exemplo. O interesse particular no Si permitiu construir filmes finos no formato de diafragma, que sofre deflexão quando se aplica uma pressão. O diafragma é um wafer do tipo-n feito com Si - que recebeu quatro pares de resistores por difusão; cada par possui um resistor cuja principal componente é radial e o outro componente é circunferencial (circuito em ponte completa compensa temperatura - como visto com strain gages). Mecanicamente, eles formam uma parte do diafragma, mas está eletricamente isolado pela junção p-n e desse modo funcionam como os strain gages, ligado num circuito tipo Ponte de Wheatstone.



**Figura 5.4 - Diagrama esquemático de um manômetro com sensor piezoresistivo.**

## 5.6 Transdutor de Torque

### 5.6.1 Introdução

Apesar do fato que a medição do torque pode ser realizada por uma variedade de sistemas mecânicos e elétricos os transdutores de torque que empregam extensômetros são amplamente reconhecidos como o mais útil, preciso e portátil de todas as possíveis soluções, sendo a sua concepção relativamente fácil de entender. O termo célula de torque, amplamente usado a nível comercial, descreve um transdutor compacto.

O projeto das células de torque dependerá do tamanho obrigado e a magnitude do torque. Pela condição de rigidez e sensibilidade escolhe-se uma estrutura para a célula de forma de cilindro oco. Na fabricação da célula, usinou-se no corpo da estrutura duas faces planas paralelas até atingir a espessura de trabalho calculado onde serão fixados os extensômetros elétricos e dois flanges de fixação nos extremos desta.

Pretende-se determinar experimentalmente a relação entre as deformações por torção ao carregar a célula de torque e realizar a calibração, para o uso posterior no dispositivo de compressão-torção construído no laboratório de máquinas. Iremos comparar os valores obtidos experimentalmente com a solução teórica obtida da teoria de análise de deformações.

#### Materiais empregados na construção da célula de torque

- Extensômetro

Marca: Measurements Groups, Inc

Tipo: CEA-XX-187UV-350

Resistência ôhmica: 350

Fator( $24^\circ$ ): 2,04

Área: 3,3x2,0mm

- Terminais CPF-50C
- Gaza
- Acetona
- Fita Adesiva MJG-2
- Cola M-bond KBR-610
- Estanho para Soldagem

- Pasta para Soldagem
- Fio Metálico 134AWP (Cu)
- Fio Metálico 137HWN(Manganin)
- Fita Teflon TFE-1
- Borracha de Silicone SGP-2
- Chapas de Alumínio(3x20x30mm)
- Recobrimento de Proteção M-COAT A

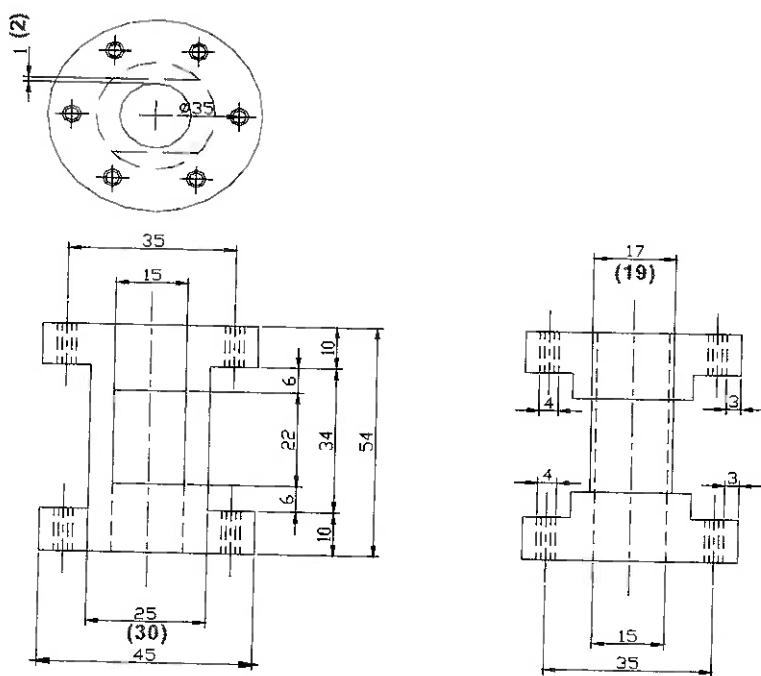
Ferramentas e equipamentos empregados na construção da célula de torque

- Alicate de corte
- Faca
- Tesoura
- Lupa
- Lapiseira de grafite 0,5mm
- Borracha
- Escala de Aço:200mm
- Pinças:100mm e 150mm
- Pinça de Mola HSC-3
- Espátula SPT-1
- Ferro de Solda
- Multímetro Digital
- Estufa
- Pinça de forno

### 5.6.2. Projeto

Para o projeto do Transdutor de Torque temos:

- Através das condições de rigidez e sensibilidade, pode-se optar por uma estrutura de cilindro oco.
- Usinou-se duas faces na estrutura central e flanges nos extremos.
- Calibrou-se a célula instrumentada.
- Comparação com valores obtidos da teoria da análise de deformações.



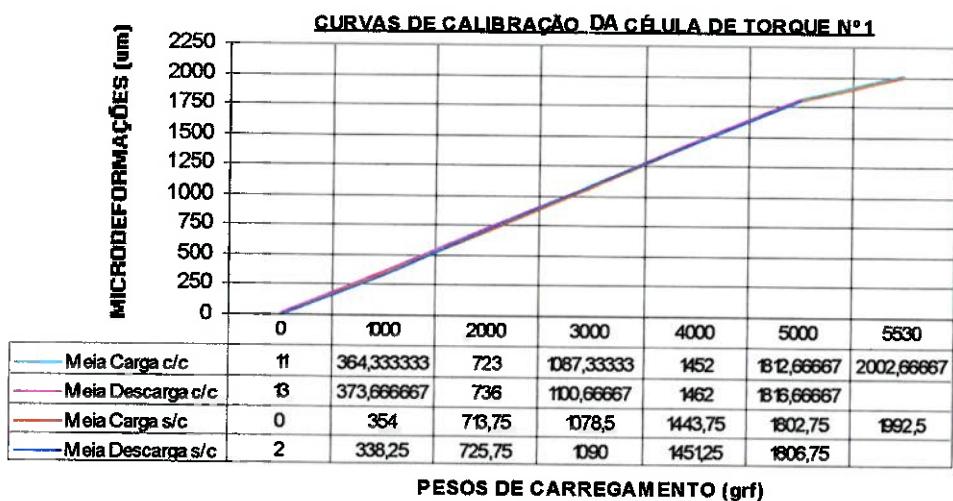
**Figura 5.5 - Desenho Esquemático da Célula de Torque**



**Figura 5.6 - Células de Torque**

### 5.6.3.Calibração das Células de Torque

A calibração dos dois torquímetros foi realizado, para diferentes valores de carga P na faixa compreendida de 0 à 5530 grf. Através dos dados de carga e de deformações foram levantados o gráfico da figura 5.7 e da tabela 5.2.



**Figura 5.7 -Verificação da faixa de Deformação Linear de 0 à 1500  $\mu\text{m}$ .**

\* Projeto realizado pelo aluno de mestrado Carlos Salazar

**Tabela 5.2 Calibração dos Torquímetros****Calibração da célula de torque Nº 1, usando a contraponta num extremo**

Peso (N)	0	10	20	30	40	50	55,3
Etapas	Deformações ( $\mu\text{m}$ )						
1a Carga	0	357	723	1090	1455	1812	2003
1a Descarga	11	371	735	1098	1460	1817	
2a Carga		363	721	1086	1451	1812	2002
2a Descarga	12	373	736	1100	1461	1816	
3a Carga		365	724	1088	1453	1814	2004
3a Descarga	13	374	736	1102	1463	1818	
4a Carga		365	724	1088	1452	1812	2002
4a Descarga	14	374	736	1100	1462	1816	
<u>Media Carga c/c</u>	11	364,3	723	1087	1452	1813	2003
<u>Media Descarga c/c</u>	13	373,7	736	1101	1462	1817	

Espessura de parede : 1 mm  
 Hora da calibração : 11:10 h  
 Usando contra-ponta : Sim  
 Tempo de assentamento : 1 min  
 Temperatura ambiente : 25,3 °C

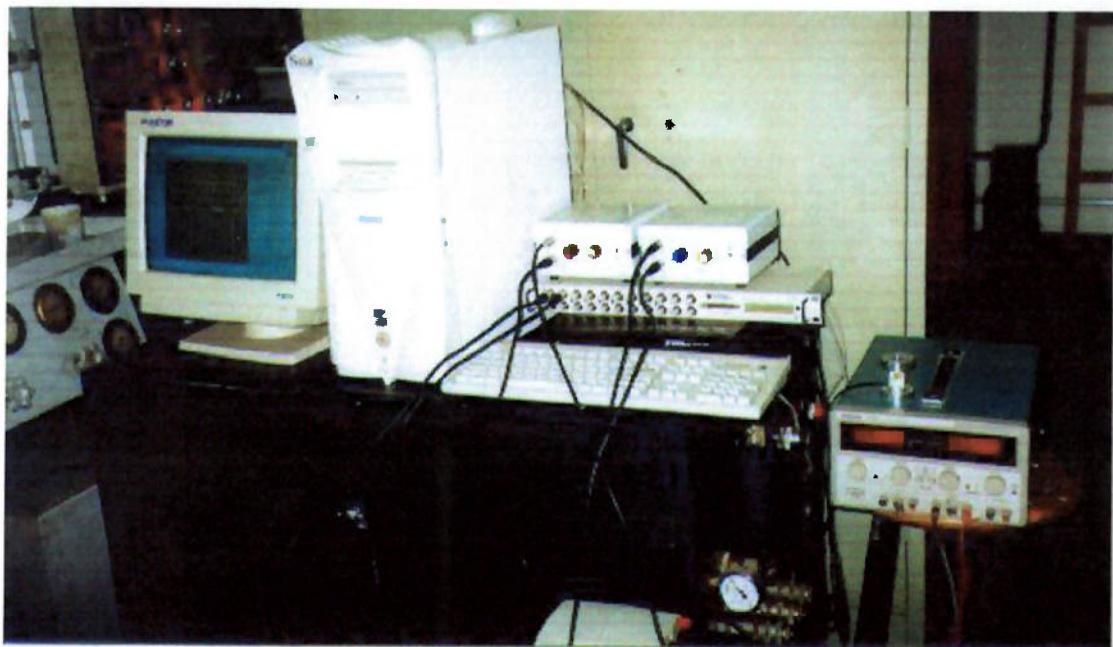
**Calibração da célula de torque Nº 1, com um extremo em balanço**

Peso (N)	0	10	20	30	40	50	5.53
Etapas	Deformações ( $\mu\text{m}$ )						
1a Carga	0	353	711	1075	1442	1800	1990
1a Descarga	1	362	725	1088	1450	1805	
2a Carga		353	714	1080	1444	1802	1993
2a Descarga	2	263	725	1090	1451	1807	
3a Carga		355	715	1080	1444	1804	1993
3a Descarga	3	364	726	1091	1452	1807	
4a Carga		355	715	1079	1445	1805	1994
4a Descarga	4	364	727	1091	1452	1808	
<u>Media Carga s/c</u>	0	354	713,8	1079	1444	1803	1993
<u>Media Descarga s/c</u>	2	338,3	725,8	1090	1451	1807	

Espessura de parede : 1 mm  
 Hora da calibração : 11:50 h  
 Usando contra-ponta : Não  
 Tempo de assentamento : 1 min  
 Temperatura ambiente : 26,5 °C

## 6. Instrumentação do Sistema de Aquisição

### Sistema de aquisição do ensaio



**Figura 6.1 – Sistema de aquisição utilizado nos ensaios**

#### **Placa de Aquisição**

Daqpad – Modelo: 6070E

Canais de entrada: 16

Taxa de amostragem: 1,25 MS/s

12 bit – Multifunction I/O

Fabricante: National Instruments

**Conektor- BNC 2090**

Acho ACH 15 – 16 canais

Fabricante: National Instruments

**Fonte DC**

Modelo: PS280

2 canais de saída

Faixa de voltagem: 0 – 30V

Faixa de Amperagem: 0 – 2A

Voltagem/Amperagem (fixa):5V – 3A

**Filtro Passa Baixa/Amplificador de Sinal**

Modelo: Butterworth 6ºordem

Limites de excursão dos sinais de saída:

+/- 11V p/ alimentação via rede elétrica (110V)

+/- 7,5 V p/ alimentação via rede elétrica (+9V)

Ganho de Sinal: 1,5,10,50,100,500,1000

Frequência de Corte: 100,2K, 5K, 10K

## 7. Corpo-de-Prova

### 7.1.MEF (Método dos Elementos Finitos)

A fim de realizarmos a modelagem do corpo-de-prova utilizando-se um modelo de elementos finitos, necessitamos da predefinição de alguns parâmetros como, por exemplo: força axial, força atrito, área de contato do punção e posição dos parafusos de fixação.

Todas estas propriedades foram calculadas ou medidas anteriormente a aplicação do MEF. O programa escolhido para a aplicação do MEF foi o Algor.

#### Parâmetros:

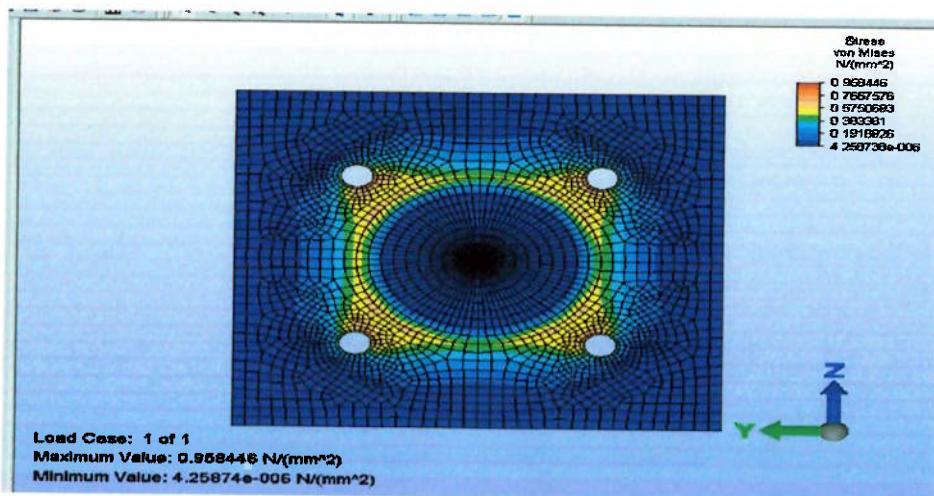
Faxial: 100N à 200N

Fatrito: 10N à 90N

Área de Contato do Punção: $530\text{ mm}^2$

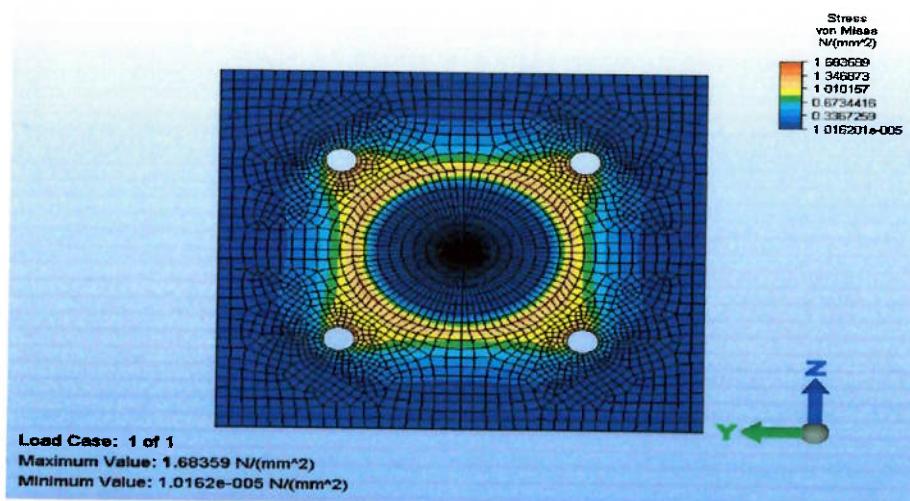
### Software Algor

**Faxial=100N**



**Figura 7.1 – MEF aplicado ao corpo-de-prova de alumínio Faxial = 100N**

**Faxial=220N**



**Figura 7.2 – MEF aplicado ao corpo-de-prova de alumínio Faxial = 220N**

Nota-se nos modelos realizados com o MEF as regiões de maior concentração das tensões de compressão, sendo a região onde haverá contato direto entre o punção e o corpo-de-prova do ensaio.

Nesta região o corpo-de-prova é submetido diretamente ao esforço axial (Faxial) e ao momento de torção. Nas regiões marginais a área de contato do punção, as tensões se distribuem uniformemente havendo regiões onde o esforço axial é extremamente baixo e o momento de torção já não exerce tamanha influência às medições.

Os modelos de MEF foram baseados em parâmetros de Faxial dentro de faixas compreendidas entre 100N a 200N, que são os valores utilizados nos ensaios da máquina de compressão-torção, sendo que também foram levantados modelos referentes a outras faixas de atuação do punção.

## 7.2.Resultados dos Corpos-de-Prova

Através dos ensaios realizados com o sistema de compressão-torção, pudemos fazer uma avaliação dos corpos-de-prova após terem sido submetidos ao ensaio.

A seguir são mostradas as amostras:

Material do Corpo-de-Prova: Alumínio



**Figura 7.3 – Corpo-de-prova com Faxial = 110N**



**Figura 7.4 – Corpo-de-prova com Faxial = 126,38N**



**Figura 7.5 – Corpo-de-prova com Faxial = 142,42N**



**Figura 7.6 – Corpo-de-prova com Faxial = 158,44N**



**Figura 7.7 – Corpo-de-prova com Faxial = 174,44N**



**Figura 7.8 – Corpo-de-prova com Faxial = 190,30N**

Durante os ensaios as forças Faxial e Fatrio a que foram submetidas as amostras (material Alumínio) estão dentro das especificações permitidas ao projeto.

As forças axiais estão entre os valores de 100N a 200N, que representam uma faixa de trabalho admissível ao projeto da máquina.

## 8.Experimentos

### 8.1. Ensaios do sistema de aquisição de dados – LabView

A seguir serão apresentados os gráficos do ensaio de compressão-torção realizados durante o projeto, que foram possibilidos com o auxílio do Software LabView.

Neste software foi montado um sistema de aquisição por blocos, onde foram descritas as telas de monitoração do ensaio e os respectivos blocos de auxílio com funções de temporizadores, contadores, ajuste de botões e elementos gráficos.

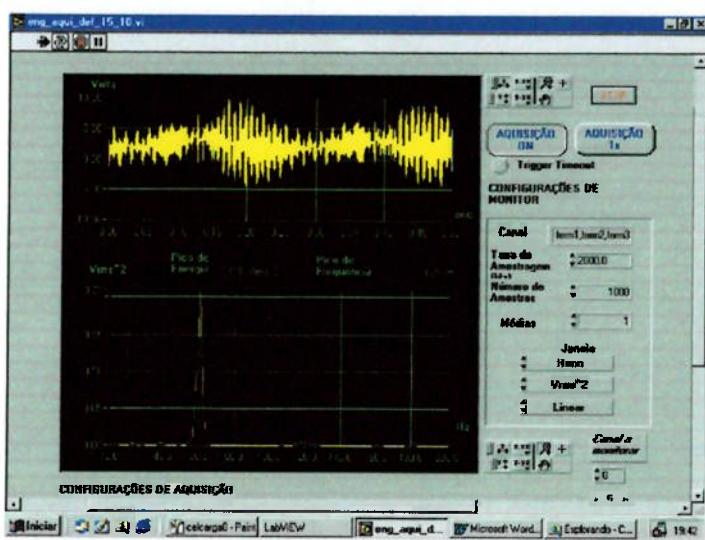
Para os ensaios realizados com a máquina foram levados em consideração o Critério de Nyquist que fornece a taxa de amostragem mínima para a obtenção real e fiel do sinal de saída.

No caso a seguir temos uma taxa de amostragem de 2000 Samples/s com um número de amostras em torno de 1000 amostras.

Serão mostrados os sinais de 2 ensaios onde em um caso utiliza-se o filtro analógico e no outro caso não fazemos uso do filtro analógico.

## Caso 1

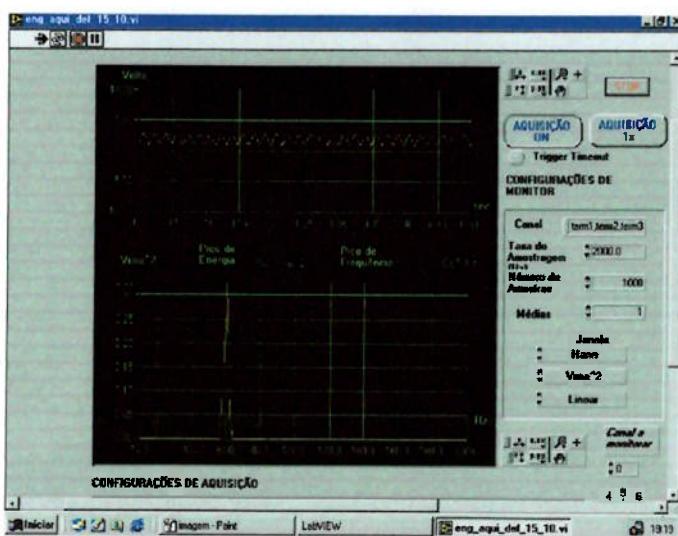
O gráfico abaixo foi obtido de um ensaio com o sinal do torquímetro apresentando “ruído”, devido a não presença do filtro analógico presente ao ensaio.



**Figura 8.1 – Tela do LabView – ( Ensaio com ruído)**

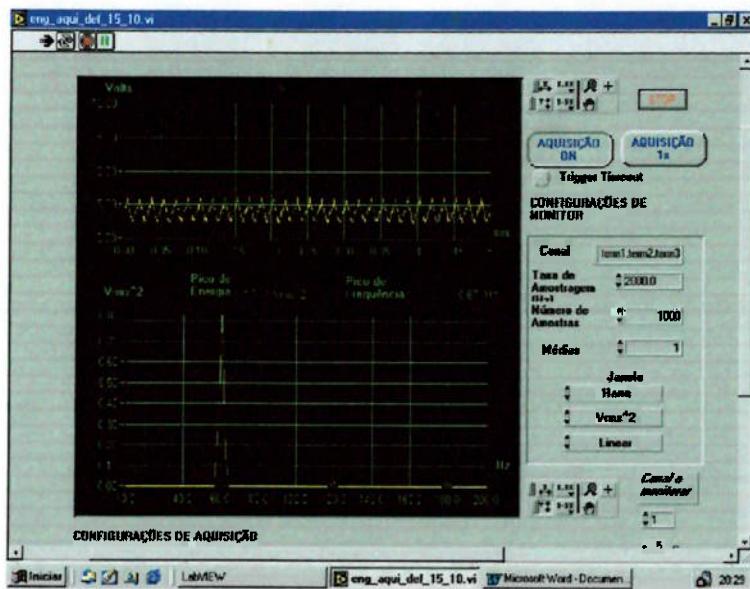
## Caso 2

Porém os mesmo ensaios anteriores, utilizando-se o “**filtro analógico passa-baixa**” apresentará modificações, que representam a eliminação das altas freqüências.



**Figura 8.2 – Tela do LabView – ( Ensaio sem ruído)**

Durante o acionamento do torquímetro o sinal de saída do mesmo apresentará um  $\Delta V(Volts)$  que está correlacionada a deformação dos extensômetros ( $\mu e$ ). Esta variação de voltagem que fornece a base para as medições e transformações em propriedades físicas envolvidas no ensaio.



**Figura 8.3 – Tela do LabView – (Sistema acionado)**

Nesta tela de monitoração do LabView é onde realizamos as alterações de taxa de amostragem e número de pontos a serem captados pela placa de aquisição.

Além como outros parâmetros de hardware que exercerão influência nas medições dos ensaios.

Através do espectro de freqüência, notamos a presença do pico de freqüência que ocorre a  $f=60\text{hz}$ .

Os dados referentes ao ensaio de compressão-torção são armazenados em arquivos do software e sofrem tratamento no software do MatlabR12.

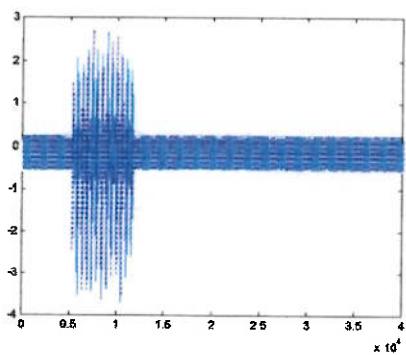
Existe a possibilidade da utilização de filtros digitais nos sinais gravados para a eliminação de qualquer faixa de freqüência, porém para que isso possa ser feito de maneira adequada foi necessário um estudo mais aprofundado das freqüências encontradas e sua correlação com o processo de compressão-torção.

## 8.2 Ensaios do sistema de aquisição de dados – Matlab

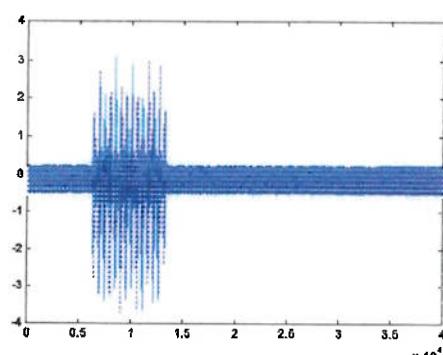
Neste item, iremos mostrar os sinais de aquisição obtidos dos ensaios de compressão-torção. Para estes ensaios foram utilizadas taxas de amostragem obedecendo ao critério de Nyquist, sendo que foram utilizados os filtros analógicos passa-baixa.

Houve uma variação da carga axial em cada medição representadas pelas numeração de 1 à 6.

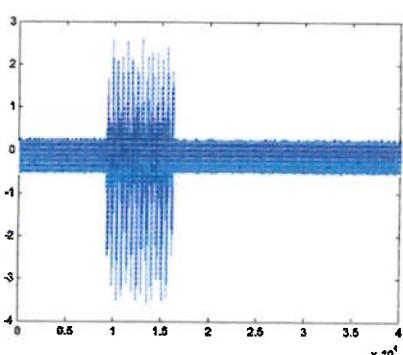
**Carga: 1**



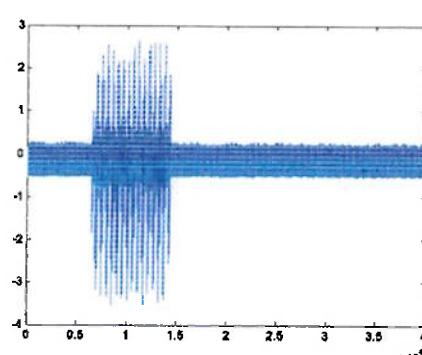
**Carga: 2**



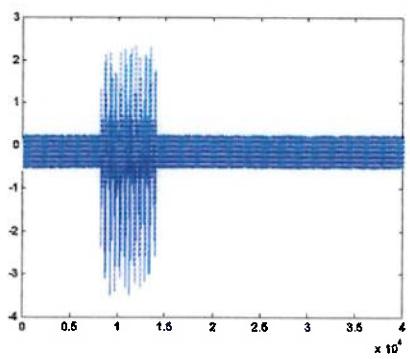
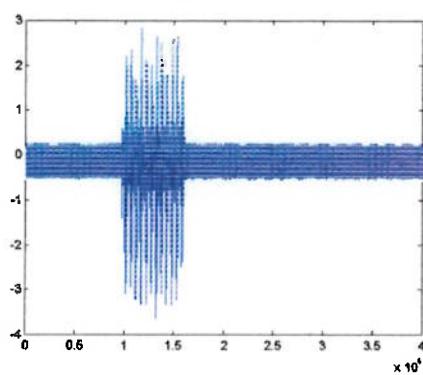
**Carga 3**



**Carga 4**



**Figura 8.4 – Gráficos de  $\Delta V$ (volts)xNúmero de Pontos**

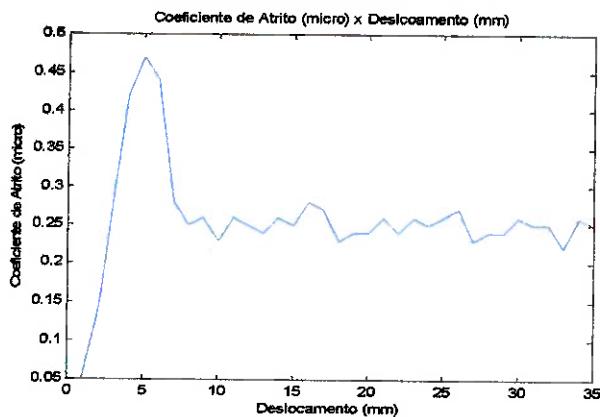
**Carga 5****Carga 6****Figura 8.5 – Gráficos de  $\Delta V$  (volts) x Número de Pontos**

### 8.3 Levantamento de gráficos do ensaio

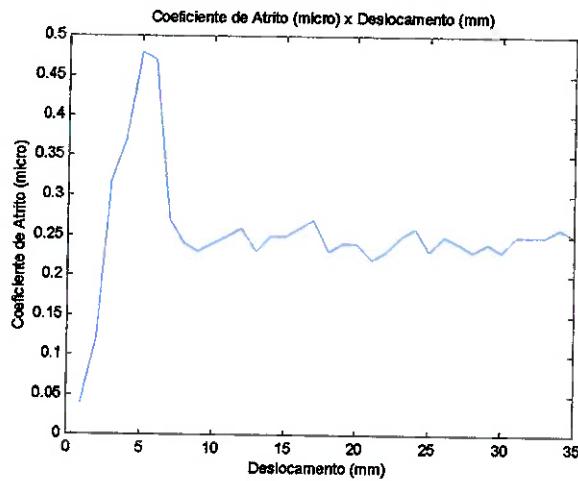
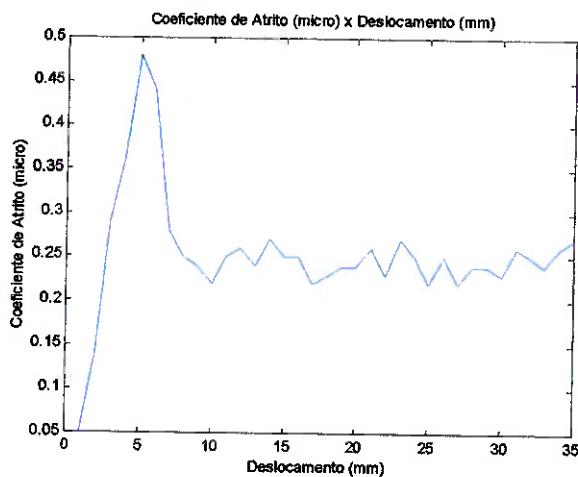
Neste item iremos mostrar os gráficos referentes as grandezas físicas e mecânicas envolvidas com o ensaio de compressão-torção.

Os gráficos a seguir são referentes as grandezas de Coeficiente de atrito x Deslocamento do punção. Este ensaio foi realizado com base nos experimentos realizados e publicados na ref.[1]. Apesar desses experimentos não apresentarem os mesmos parâmetros sendo que nos ensaios realizados pelo equipamento de compressão-torção não foram utilizados lubrificantes (P01 a Pst) conforme o livro menciona.

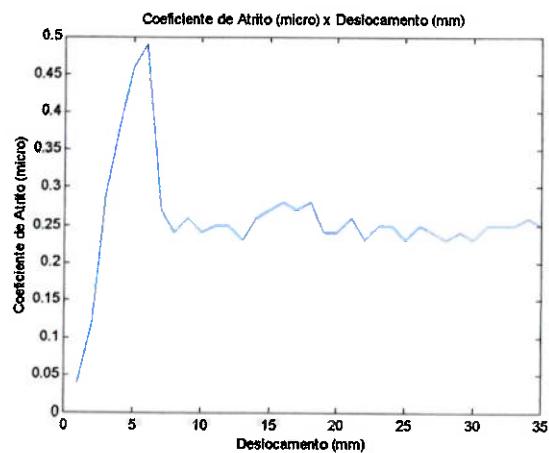
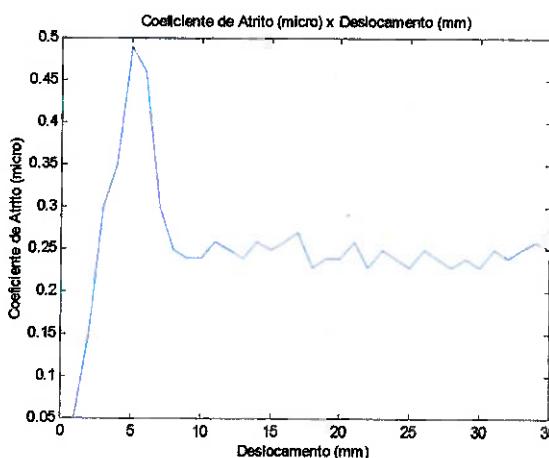
#### Ensaio 1



**Figura 8.6 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

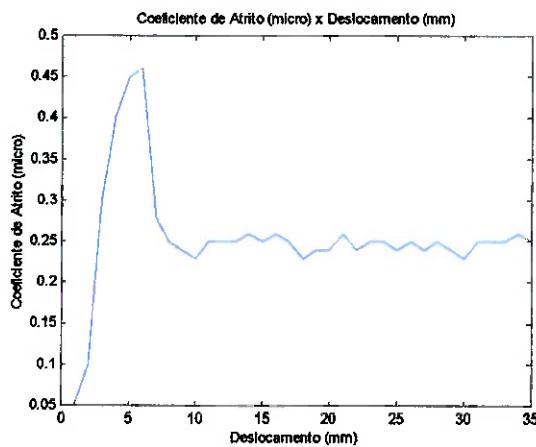
**Ensaio 2****Ensaio 3**

**Figura 8.7 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

**Ensaio 4****Ensaio 5**

**Figura 8.8 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

## Ensaio 6



**Figura 8.9 – Gráficos do Coeficiente de Atrito ( $\mu$ ) x Deslocamento (mm)**

Através dos ensaios realizados nos corpos-de-prova de alumínio notamos que o coeficiente de atrito encontrados nos ensaios apresenta valores um pouco abaixo do valor teórico estimado para o  $\mu = 0.3$  , porém muito próximos em relação a este.

A seguir mostraremos uma tabela comparativa dos valores de  $\mu$  obtidos experimentalmente:

**Tabela 8.1 – Comparativo de Coeficiente de Atrito**

Coeficiente de Atrito
$\mu = 0.3$ (teórico)
$\mu = 0.244643$ (ensaio1)
$\mu = 0.245714$ (ensaio2)
$\mu = 0.246071$ (ensaio3)
$\mu = 0.243929$ (ensaio4)
$\mu = 0.249286$ (ensaio5)
$\mu = 0.25$ (ensaio6)

Os ensaios foram realizados alterando-se as cargas axiais a que foram submetidas os corpo de prova, para avaliar a variação do coeficiente de atrito sob influência destas grandezas.

Através das medições realizadas com o ensaio de compressão-torção levantamos também, um comparativo entre as grandezas físicas teóricas de: torque (Nm), força axial(N) e força de atrito (N). Os gráficos representam as variações ocorridas entre o esperado teórico com os obtidos experimentalmente.

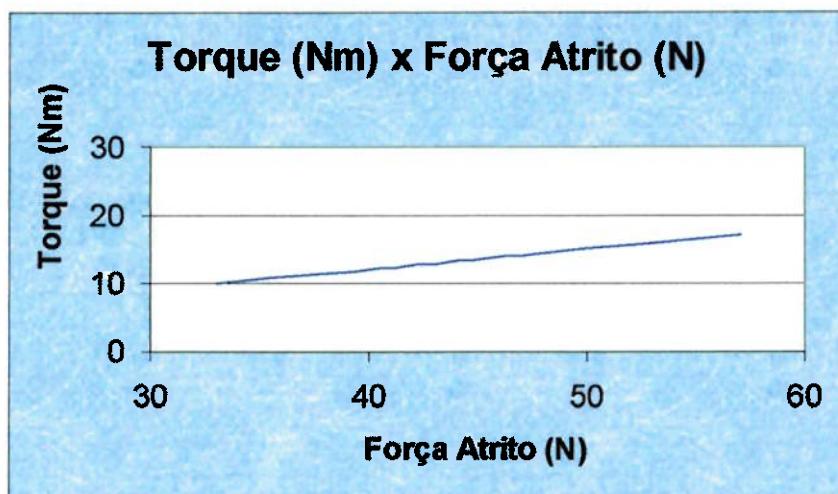


Figura 8.10 – Gráfico Torque(Nm)xFatrito(N)

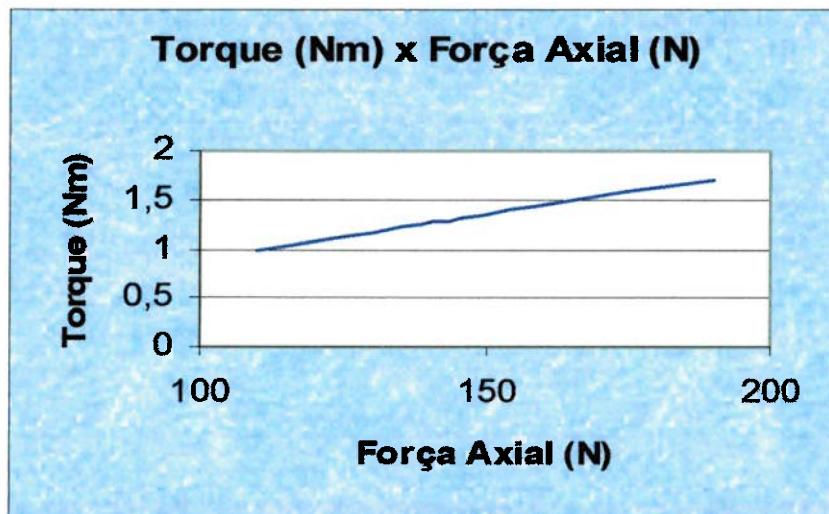
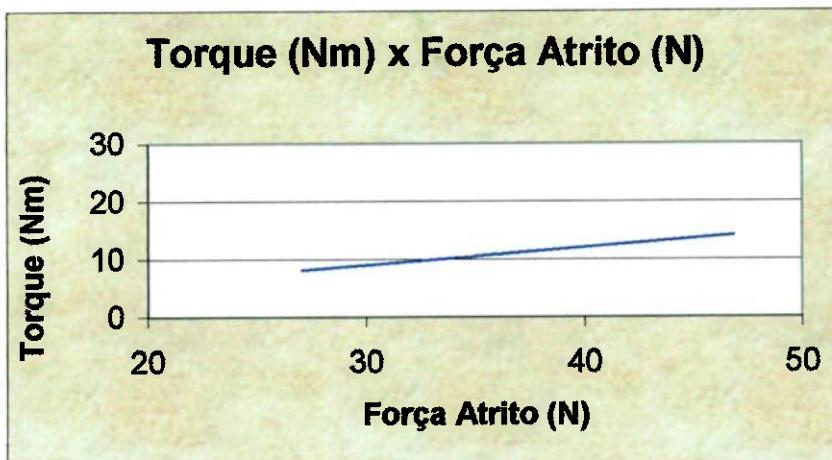
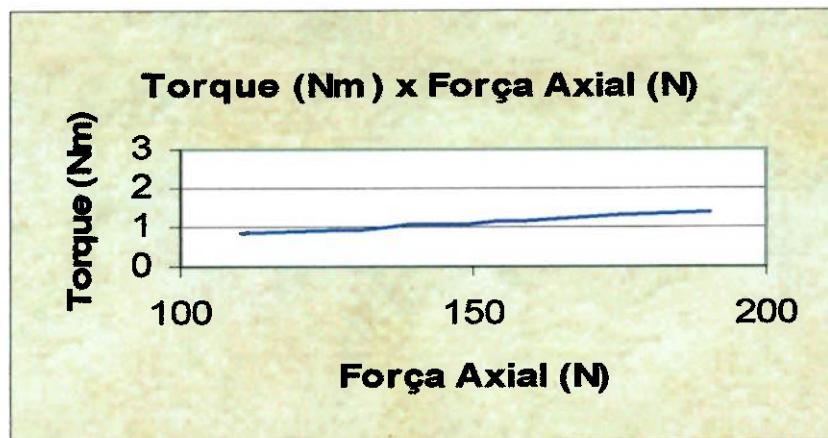


Figura 8.11 – Gráfico Torque(Nm)xFaxial(N)



**Figura 8.12 – Gráfico Torque(Nm)xForça Atrito(N)**



**Figura 8.13 – Gráfico Torque(Nm)xForça Axial(N)**

Através dos gráficos de torque (Nm) em função das forças axiais(N) nota-se uma proporcionalidade em relação ao aumento da força de axial de 100N à 200 N acompanhada de um aumento do torque .

Notamos também uma queda entre o valor teórico e o valor experimental provocada em partes pela redução do coeficiente de atrito na prática.

## 9.Conclusões

Neste projeto da máquina de compressão-torção e do sistema de aquisição constatamos a grande importância do ensaio na determinação de parâmetros físicos relacionados ao processo de fabricação estudado.

O ensaio já possui enorme repercussão mundial sendo que diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas principalmente na área da aquisição de dados e no aprimoramento da precisão das máquinas.

Durante o projeto do sistema de aquisição levamos em consideração a enorme quantidade de variáveis que exercem influência direta ao ensaio. De início a escolha do corpo-de-prova do material alumínio foi devido a ampla utilização do material na indústria metalúrgica e da semelhança de propriedades mecânicas apresentadas pelo mesmo em relação aos materiais de referência do ensaio.

Foi realizado um estudo da concentração das tensões de Von Misses na região de contato do punção com o corpo-de-prova, com o auxílio do Software Algor referente ao método de elementos finitos(MEF).

No sensoriamento, a validação das medidas realizadas com o torquímetro foi permitida após a calibração do dispositivo. Esta parte do projeto foi realizada na FEI, com a instrumentação dada pelo Calibrador P-3500(Portable Strain Indicator).

O sistema de compressão do corpo-de-prova, a ser realizado pelo dispositivo hidráulico (Bancada Vickers), teve que sofrer modificações devido à imprecisão causada pela válvula de controle do pistão, sendo que a solução encontrada foi à inserção de massas de valor conhecido sob a câmara de compressão, minimizando desta forma erros de medição da força axial.

Através de um estudo aprofundado referente ao "ruído do sinal", caso comum em sistemas de aquisição, constatamos a necessidade do uso de um sistema de filtro e amplificação do sinal elétrico proveniente do dispositivo de sensoriamento para que não houvesse perda de informação durante a transferência de dados.

Como função do sistema de filtragem foram feitas as análises: analógica e digital. A filtragem analógica foi realizada com o filtro passa-baixa de freqüência variável (faixa de 1 à 10Khz) e a filtragem digital foi realizada com o uso de programação no software Matlab.

A aquisição do sinal elétrico também tomou como relevante o estudo do valor da taxa de amostragem e período de aquisição do sinal, de modo a garantir o Critério de Nyquist para adquirir o valor real do sinal amostrado. O armazenamento dos dados digitais do sinal elétrico foram feitas com o auxílio do Software Labview, assim como o levantamento de gráficos do espectro de freqüência e do sinal de tensão em função do número de amostras.

Com as informações do sinais elétricos armazenadas no formato de arquivo \*.AQU realizamos o tratamento do sinal e levantamos gráficos: força axial, força atrito, coeficiente de atrito e torque.

Após o levantamento de dados gráficos do ensaio de compressão-torção realizamos um comparativo teórico em paralelo com ensaios desenvolvidos e publicados em ensaios da referência bibliográfica Transactions of Asme ref[1], para validação de resultados.

Todo os estudos realizados com este projeto da máquina de compressão-torção e do sistema de aquisição mostraram-se qualitativamente válidos no referente a resultados.

## 10. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar o processo de compressão-torção introduzindo-se filetes de óleos “materiais lubrificantes”, a fim de verificar a eficácia dos mesmos no ensaio.
- Estudar o mecanismo de desgaste do punção em função da quantidade de medidas realizadas no experimento, determinando-se a vida útil da ferramenta.
- Estudar o processo de compressão-torção para diferentes formas geométricas dos materiais utilizados como corpo-de-prova do ensaio.
- Estudar a possibilidade da ocorrência de fenômenos físicos paralelos ao ensaio referentes a desgaste, seguido de escorregamento e sua influência ao ensaio da máquina de compressão-torção.
- Estudar mecanismo de precisão de dispositivo de controle hidráulico, para seu uso na instrumentação de compressão da máquina.
- Estudar a influência das folgas nos mecanismos de engrenagem atrelada a coroa do motor trifásico, com a possível ocorrência de oscilações nas medições.
- Estudar um possível controle automático para acionamento e parada do dispositivo da máquina de compressão-torção atrelada ao inversor de freqüência.

## 11. Referências Bibliográficas

- [1] - KAWAI, N. & DOHDA, K. – *A New Lubricity Evaluation Method for Metal Forming by a Compression-Twist Type Friction Testing Machine*, Transactions of the ASME – Journal of Tribology, v.109, 2, 1987, 343-350.
- [2] - FONTAINE, J. F. – *The Torsion-Tensile Testing for the characterization of cold metal formability*, J. of Materials Processing Technology, 32, 1992, 253-262.
- [3] - CANOVA, G. R. et al – *The use of torsion testing to assess material formability*, In: *Formability of Metallic Materials*, ASTM STP 753, American Society for Testing and Materials, 1982, pp. 189-210.
- [4] - SHAW, M. – *Metal cutting principles*, Clarendon Press, Oxford, 1984, capítulo 7 – Dynamometry, pg. 131-67.
- [5] - DOEBLIN,E.O. – *Measurements Systems* – Application and Design , 4<sup>th</sup> edition, McGrawHill,1990
- [6] - HOLMAN,J.P. – *Experimental Methods for Engineers*, 6<sup>th</sup> edition, New York, McGrawHill,1994
- [7] - CATALOGUE - Instrumentation Reference and Catalogue 1997, *Test and Measurement Industrial Automation*,National Instruments pg. 3.2 – 3.11.
- [8] - HANSELMAN, Duane; LITTLEFIELD, Bruce. *MATLAB, Guia do Usuário*. Makron Books do Brasil Editora Ltda, 305 p., 1997.

## Anexos

## Anexo A

### Sensoriamento (Cálculos)

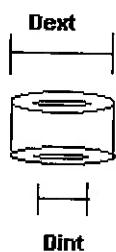
Os seguintes dados foram estimados para os dispositivos de sensoriamento (Torquímetro), em função dos valores do punção (área de contato anular) e de dados obtidos de ensaios (catálogos e revisão da literatura) que serão utilizados na prensa de Compressão-Torção.

Condições de contorno adotadas de trabalhos anteriores:

$$\sigma_{\text{normal}} = \sigma_{zz} = 20 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,3$$

Características de Ferramenta superior indentadora (punção em forma de anel)



$$\text{Opção 1} \Rightarrow d_{\text{ext}} = 70 \text{ mm} + d_{\text{int}} = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Opção 2} \Rightarrow d_{\text{ext}} = 25 \text{ mm} + d_{\text{int}} = 21,5 \text{ mm}$$

$$\text{Opção 3} \Rightarrow d_{\text{ext}} = 50 \text{ mm} + d_{\text{int}} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Opção 4} \Rightarrow d_{\text{ext}} = 30 \text{ mm} + d_{\text{int}} = 15 \text{ mm}$$

**1º Cálculo:**

$$A_1 = \pi \frac{(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4} = \pi \frac{(70^2 - 50^2)}{4} = 1884 \text{ mm}^2 \quad (\text{Área do anel do Punção})$$

$$F_N = \sigma * A = 20 * 1884 = 37698,2 \text{ N} \rightarrow 40 \text{ KN} \quad (\text{Força Normal})$$

$$F_T = \mu * F_N = 0,3 * 40 = 12 \text{ KN} \quad (\text{Força Tangencial})$$

$$T = F_T * R_{ext} = 12 \text{ KN} * 35 \text{ mm} = 420 \text{ Nm} \quad (\text{Torque})$$

**2º Cálculo:**

$$A_1 = \pi \frac{(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4} = \pi \frac{(25^2 - 21,5^2)}{4} = 127,82 \text{ mm}^2 \quad (\text{Área do anel do Punção})$$

$$F_N = \sigma * A = 20 * 127,82 = 2556,4 \text{ N} \rightarrow 2,6 \text{ KN} \quad (\text{Força Normal})$$

$$F_T = \mu * F_N = 0,3 * 2,6 = 0,78 \text{ KN} \rightarrow 1 \text{ KN} \quad (\text{Força Tangencial})$$

$$T = F_T * R_{ext} = 1 \text{ KN} * 12,5 \text{ mm} = 12,5 \text{ Nm} \quad (\text{Torque})$$

**3º Cálculo:**

$$A_1 = \pi \frac{(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4} = \pi \frac{(50^2 - 40^2)}{4} = 706,8 \text{ mm}^2 \quad (\text{Área do anel do Punção})$$

$$F_N = \sigma * A = 20 * 706,8 = 14,1 \text{ kN} \quad (\text{Força Normal})$$

$$F_T = \mu * F_N = 0,3 * 14,1 = 4,2 \text{ kN} \quad (\text{Força Tangencial})$$

$$T = F_T * R_{ext} = 4,2 \text{ kN} * 25 \text{ mm} = 106 \text{ Nm} \quad (\text{Torque})$$

**4º Cálculo:**

$$A_1 = \pi \frac{(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4} = \pi \frac{(30^2 - 15^2)}{4} = 530,1 \text{ mm}^2 \quad (\text{Área do anel do Punção})$$

$$F_N = \sigma * A = 20 * 530,1 = 10602,6 \text{ N} \rightarrow 10,6 \text{ kN} \quad (\text{Força Normal})$$

$$F_T = \mu * F_N = 0,3 * 10,6 = 3,2 \text{ kN} \quad (\text{Força Tangencial})$$

$$T = F_T * R_{ext} = 3,2 \text{ kN} * 15 \text{ mm} = 48 \text{ Nm} \quad (\text{Torque})$$

## Anexo B

### Tabelas de Torquímetros

Estas informações serão agora comparada com máquinas de ensaios e prensas comerciais usadas em operações industriais e os sistemas de aquisição de dados utilizados, mais especificamente:

- 1) registro do deslocamento angular durante a compressão torção via encoder
- 2) registro das forças Fx, Fy, Fz e do momento torçor Mz

Nesta etapa esta sendo procedida uma estimativa sobre as faixas de trabalho oferecidas comercialmente e faixa de valores citados na literatura sobre processos de fabricação;

### Dinamômetros com capacidade de medição de forças e torques

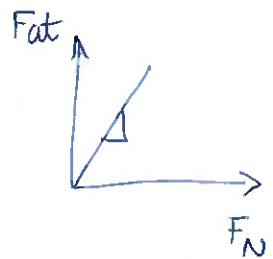
Dados técnicos		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Faixas	Fx,Fy	(-5 a 5 KN)	(-20 a 20KN)	(-15 a 15 KN)	-20 a 20 kN
	Fz	(-20 a 20Nm)	(-30 a 30KN)	(-15 a 30KN)	-10 a 40 kN
	Mz	(-200 a 200Nm)	(1100 a 1100Nm)	-	-
Limiar de resolução		<0,01N	<0,01N	<0,01N	<0,01N
Rotação maxima		10000rpm	5000rpm	-	-
Freqüência natural		1KHz	1KHz	individual	3 KHz
Proteção		IP67	IP67	IP68	IP67

**Sistemas de ensaio de compressão torção comerciais oferecidos para processos de fabricação**

Dados técnicos	Esforço axial Fz	Torque Mz
Faixa I	25 kN	200 N.m
Faixa II	50 kN	500 N.m
Faixa III	100 KN	1000 N.m
Faixa IV	250 KN	2000 N.m
Faixa V	500 kN	5000 N.m

## Anexo C

### Parâmetros Físicos



Ensaio 1 $\mu = 0,244643$			
Faxial(N)	Fatrato(N)	Tmin (Nm)	Tmax (Nm)
110	26,91073	4,03661	8,073219
126,38	30,91798	4,637697	9,275395
142,38	34,83227	5,224841	10,44968
142,42	34,84206	5,226308	10,45262
158,44	38,76124	5,814186	11,62837
174,44	42,67552	6,401329	12,80266
190,3	46,55556	6,983334	13,96667

Ensaio 2 $\mu = 0,245714$			
Faxial(N)	Fatrato(N)	Tmin (Nm)	Tmax (Nm)
110	27,02854	4,054281	8,108562
126,38	31,05334	4,658	9,316001
142,38	34,98476	5,247714	10,49543
142,42	34,99459	5,249188	10,49838
158,44	38,93093	5,839639	11,67928
174,44	42,86235	6,429353	12,85871
190,3	46,75937	7,013906	14,02781

Ensaio 3 $\mu = 0,246071$			
Faxial(N)	Fatrato(N)	Tmin (Nm)	Tmax (Nm)
110	27,5	4,125	8,25
126,38	31,595	4,73925	9,4785
142,38	35,595	5,33925	10,6785
142,42	35,605	5,34075	10,6815
158,44	39,61	5,9415	11,883
174,44	43,61	6,5415	13,083
190,3	47,575	7,13625	14,2725

Ensaio 4 $\mu = 0,243929$			
Faxial(N)	Fatrito(N)	Tmin(Nm)	Tmax (Nm)
110	26,83219	4,024829	8,049657
126,38	30,82775	4,624162	9,248324
142,38	34,73061	5,209592	10,41918
142,42	34,74037	5,211055	10,42211
158,44	38,64811	5,797217	11,59443
174,44	42,55097	6,382646	12,76529
190,3	46,41969	6,962953	13,92591

Ensaio 5 $\mu = 0,249286$			
Faxial(N)	Fatrito(N)	Tmin (Nm)	Tmax (Nm)
110	27,42146	4,113219	8,226438
126,38	31,50476	4,725715	9,451429
142,38	35,49334	5,324001	10,648
142,42	35,50331	5,325497	10,65099
158,44	39,49687	5,924531	11,84906
174,44	43,48545	6,522817	13,04563
190,3	47,43913	7,115869	14,23174

Ensaio 6 $\mu = 0,243929$			
Faxial(N)	Fatrito(N)	Tmin (Nm)	Tmax (Nm)
110	27,5	4,125	8,25
126,38	31,595	4,73925	9,4785
142,38	35,595	5,33925	10,6785
142,42	35,605	5,34075	10,6815
158,44	39,61	5,9415	11,883
174,44	43,61	6,5415	13,083
190,3	47,575	7,13625	14,2725

## Anexo D

- **Ensaios do sistema de aquisição de dados**
- **Massas M1, M2, M3, M4 e M5**
- **Pré-carga: 11kg**

### Tabela de Massas

Massa	Kg
Pré-carga	11
Peso M1	1,638
Peso M2	1,604
Peso M3	1,602
Peso M4	1,600
Peso M5	1,586

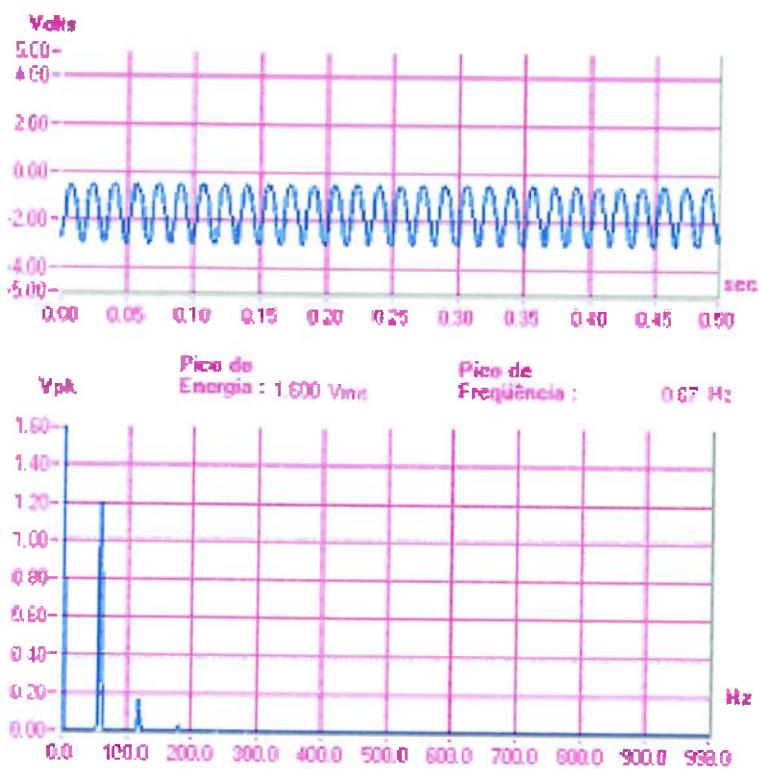
## Anexo E

<b>Coeficiente de Atrito</b>					
m=0,246071	m=0,245714	m=0,25	m=0,243929	m=0,246289	m=0,244643
0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05
0,1	0,15	0,14	0,12	0,12	0,14
0,3	0,3	0,28	0,32	0,29	0,29
0,4	0,35	0,42	0,37	0,38	0,36
0,48	0,49	0,47	0,48	0,46	0,48
0,46	0,46	0,44	0,47	0,49	0,44
0,28	0,3	0,28	0,27	0,27	0,28
0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,25
0,24	0,24	0,26	0,23	0,26	0,24
0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,22
0,25	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25
0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,26
0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,24
0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,27
0,25	0,25	0,25	0,25	0,27	0,25
0,26	0,26	0,28	0,26	0,28	0,25
0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,22
0,23	0,23	0,23	0,23	0,28	0,23
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,26	0,26	0,26	0,22	0,26	0,26
0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23
0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,27
0,25	0,24	0,25	0,26	0,25	0,25
0,23	0,23	0,26	0,23	0,23	0,22
0,25	0,25	0,27	0,25	0,25	0,25
0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,22
0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,23	0,23	0,26	0,23	0,23	0,23
0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26
0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
0,25	0,25	0,22	0,25	0,25	0,24
0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,27

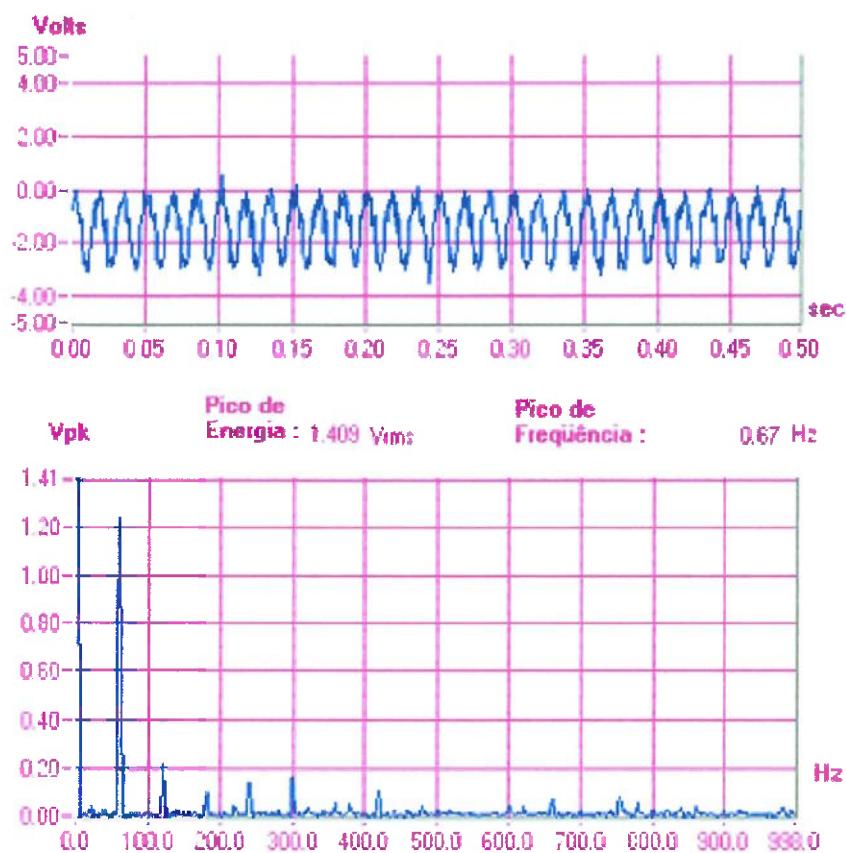
## Anexo F

### Dados do sinal de aquisicao realizados pelo LABVIEW

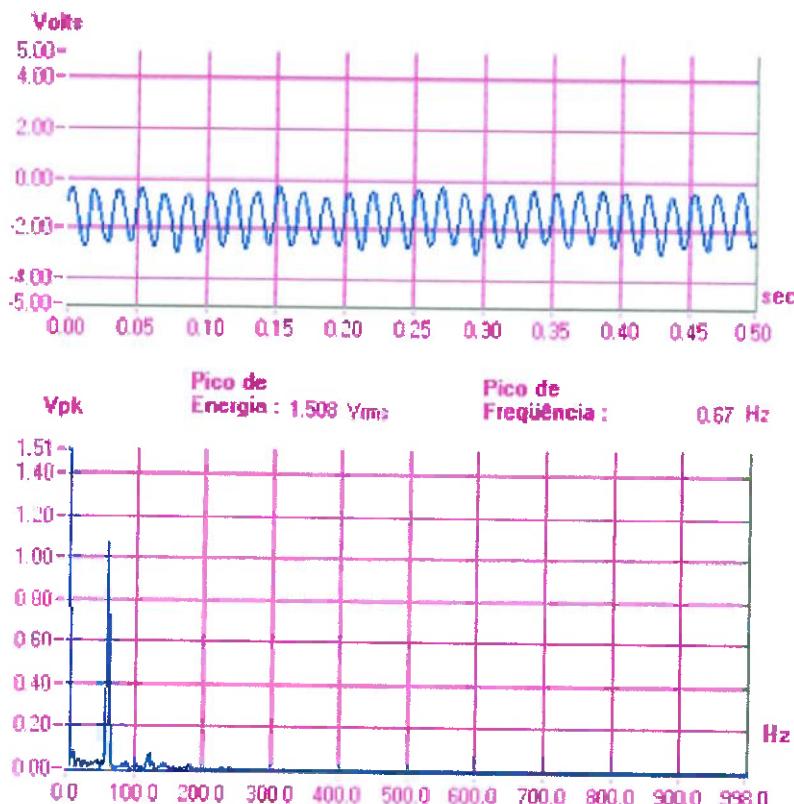
#### 1) Sinal de Aquisicao – com filtro – Frequencia de Corte 100 (desligado)



## 2) Sinal de Aquisicao – com filtro – Frequência de Corte 10000 (desligado)



### 3) Sinal de Aquisicao – com filtro – Frequênciade Corte 100 (ligado)



#### 4) Sinal de Aquisicao – com filtro – Frequência de Corte 10000 (ligado)

