

**ADELSON VIEIRA REIS**

**DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO**

**Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Graduação em Engenharia.**

**Orientador :**  
**Prof. Marcílio Alves**

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

**São Paulo**  
**1999**

## Índice :

<i>Introdução e Objetivos</i>	2
<i>Método Brasileiro para Ensaio de Tração</i>	2
<i>A Importância do Controle de Qualidade</i>	5
<i>Ensaio de Tração – Aspectos Teóricos</i>	9
<i>Fundamentos Teóricos</i>	19
<i>Desenvolvimento e Teste</i>	27
<i>Conclusão</i>	35
<i>Referências Bibliográficas</i>	36
<i>Anexo – Desenho de Conjunto</i>	37

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

**1. Introdução e Objetivos :**

O seguinte relatório visa a apresentação do que foi desenvolvido na segunda parte do trabalho de formatura. O trabalho tem como assunto o projeto de uma máquina de ensaio de tração e torção sobre pressão e este relatório contém informações do projeto desde sua concepção até a execução do desenho de conjunto e do desenho de fabricação das partes do mesmo. Como não foi possível a construção do dispositivo torção e de pressão por motivos que serão discutidos posteriormente, o autor dará mais ênfase no dispositivo de tração. Deve-se ressaltar que o projeto da máquina inclui somente o desenvolvimento da estrutura onde estará alocado o corpo de prova, bem como os mecanismos acoplados para os ensaios de tração e torção.

**2. Método Brasileiro para Ensaio de Tração :**

O Método Brasileiro para Ensaio de Tração de Materiais Metálicos sofreu algumas alterações por ser superado pelo rápido progresso no setor metalúrgico. Podemos considerar duas orientações possíveis na determinação de um método para ensaio de tração de materiais metálicos :

1 - a metodologia dos diversos passos a seguir no ensaio, tais como a precisão das máquinas e das medidas, velocidade de ensaio, tipos de fixação etc., sem no

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

entanto determinar os corpos de prova a serem empregados; estes seriam, então, indicados em cada uma das especificações de material a exigir ensaio de tração;

2 - a metodologia do ensaio, na acepção indicada no item anterior, fixando, também os corpos de prova para cada tipo e aspecto com que usualmente se apresentam os materiais metálicos; é essa orientação mais usual, seguida nos Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra, França, e, na América do Sul, pela Argentina.

O segundo critério é o mais aceito pela maioria dos autores e pesquisadores, principalmente a fim de evitar que na elaboração das especificações de materiais se multipliquem por demais, por falta de orientação, os tipos de corpos de prova e de base de medida do alongamento. Em suma, a fixação de um certo número de corpos de prova, no método de ensaio, pode evitar a multiplicação desnecessária dos mesmos. O método deve pois prever o ensaio do maior número possível de materiais, fixando os tipos de corpos de prova adequados a cada um deles.

Na elaboração do método de ensaio deve ainda presidir uma idéia mestra quanto à base de medida do alongamento, como acontece no 4º Método Brasileiro. Isto é, dever-se-ia, na medida do possível, medir o alongamento de todos os metais, e sob todas as formas com que se apresentam industrialmente, sobre uma base que guarda-se sempre a mesma relação para com a secção transversal. Respeitada essa condição – a lei de Barba – ter-se-ia números comparáveis entre si para exprimir o alongamento, como podemos verificar no livro ‘ Contribuição para a Revisão do Método Brasileiro para Ensaio de Tração de Materiais Metálicos’ de João Gustavo Haenel (IPT).

Infelizmente, não é possível respeitar essas condições no ensaio de todos os produtos. Casos há em que as dimensões da secção transversal são tão pequenas que requerem comprimentos de medida maiores para tornar o ensaio praticamente viável. E’ o caso das chapas finas e dos arames. Exceções dessa natureza são justificadas. Não o são, no entanto, quando novas bases de medida são fixadas arbitrariamente e sem necessidade. E’ o

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

caso dos corpos de prova de ferro fundido maleável no método argentino e no Norte-Americano. O primeiro abandona a relação  $L=10D$ , excessiva é verdade para um corpo de prova fundido com 15mm de diâmetro, e toma-o, nesse caso, igual a  $3D$ , ( $L$  = base de medida do alongamento;  $D$  = diâmetro da secção transversal dos corpos de prova). O segundo abandona a relação  $4D$  e a faz igual a  $3,2 D$  sem a devida justificativa.

Dessa forma, podemos dizer que o ponto crucial do método de ensaio de tração está assim na base de medida do alongamento.

Segundo a orientação dos métodos suíços e alemães, o Brasil e a Argentina adotam o comprimento de medida  $L=11,3\sqrt{S}$  ( $S$  = secção transversal do corpo de prova).

Devem ser, necessariamente, definidas, num ensaio de tração de rotina, as seguintes propriedades :

- a) Limite de escoamento : a tensão que assinala o início das grandes deformações em um número muito restrito de ligas metálicas – especialmente nos aços doces – que possuem fase de escoamento, isto é, fase do ensaio em que as deformações aumentam consideravelmente, sem que a carga continue a aumentar.  
Pode ser definido pelo limite superior de escoamento, isto é, o início da fase de escoamento.  
Pode ainda indicar o limite inferior de escoamento, isto é, a menor tensão observada durante a fase de escoamento ou a tensão média observada durante essa fase.
- b) Limite de resistência : a maior tensão observada durante o ensaio de tração, referida à secção inicial do corpo de prova.
- c) Alongamento : o aumento de comprimento de uma base de medida, referido ao seu comprimento inicial, medido após a ruptura do corpo de prova.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

- d) Estricção : a diminuição relativa da secção de ruptura do corpo de prova, referida à sua secção inicial
- e) Limite convencional de elasticidade : a tensão correspondente a uma deformação permanente arbitrariamente estipulada.

E' conveniente, afim de evitar confusões, que se esclareça no método o significado das propriedades designadas em vários métodos estrangeiros e em grande parte da literatura técnica por limite de elasticidade e limite de proporcionalidade.

Estas duas propriedades não têm mais hoje o sentido absoluto que outrora se lhes atribuia. O limite de elasticidade, definido como a maior tensão para a qual uma vez retirado o esforço solicitante não é observada deformação permanente é hoje, mais objetivamente condicionado ao aparecimento de uma deformação permanente, extremamente pequena (cerca de 0,001% em alguns casos). Do mesmo modo, o limite de proporcionalidade – maior tensão para a qual a acréscimos iguais de tensão correspondem acréscimos iguais de deformação – tem hoje sua definição condicionada à existência de um desvio, extremamente pequeno e arbitrariamente fixado, nessa proporcionalidade (por exemplo 0,0003%). Esses dois limites não existem na acepção absoluta que lhes valeu a denominação permanente e não há trecho algum do diagrama tensão-deformação que seja rigorosamente uma reta.

### **3. A Importância do Controle de Qualidade :**

O termo qualidade indica a precisão com que um produto corresponde às condições de utilização exigidas e a constância com que esta precisão se encontra em todas as peças de uma encomenda, ou de uma série ou mesmo em peças de série ou mesmo em peças de séries diferentes. A noção de qualidade está intimamente ligada à posterior

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

utilização da peça e é portanto em função desta que deverão ser fixadas as propriedades consideradas como as mais adequadas. De uma maneira geral, há interesse em que a finalidade de utilização da peça a ensaiar seja conhecida.

E' também evidente que o desejo de todo o técnico seria o de poder traduzir a noção de qualidade por um número ou série de números. Embora no aspecto particular dos ensaios mecânicos dos metais esta seja a prática adotada, convém salientar que essa visão quantitativa é insuficiente, havendo um aspecto qualitativo do problema que de maneira alguma deverá menosprezar-se em face do aspecto primeiramente citado. Assim, por exemplo, pode exprimir-se quantitativamente a resistência mecânica, mas será difícil representar por um número a ausência de qualquer defeito.

E' de se notar a importância que têm tomado o controle de qualidade, por um lado porque as exigências relativas a esta são crescentes e, por outro, porque o controle revelou-se não só indispensável para responder a essas exigências e assegurar a qualidade necessária mas ainda como meio eficaz de agir sobre os custos, sobre a produtividade e, finalmente, sobre a rendibilidade da empresa.

Emprega-se por vezes, impropriamente, o termo "alta qualidade" relativamente a peças com certas características elevadas, tais com a tensão de ruptura ou a dureza. No entanto, como se depreende do que atrás foi dito, a qualidade não implica necessariamente valores elevados destas características. E' um erro procurar sistematicamente características ótimas para as peças quando não são indispensáveis à função a que estas se destinam, pois se aumenta inutilmente o preço. Em todos os casos devem, no entanto, ser observados rigorosamente os critérios de qualidade necessários para satisfazer a utilização em vista, porque as economias realizadas à custa da qualidade são falsas economias.

Para definir a qualidade de um metal são essenciais duas propriedades físicas designadas por "tenacidade" e "ductilidade", que se incluem nas propriedades mecânicas

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

clássicas. Estas propriedades expressam-se por números representativos das grandezas com as quais estão diretamente relacionadas – carga de ruptura, alongamento, resiliência, etc. – cujas combinações fornecem os chamados “índices de qualidade”.

A tenacidade exprime a resistência do metal à deformação e à ruptura. A sua melhor representação quantitativa é dada por grandezas determinadas pelo ensaio de tração: limite elástico e carga de ruptura.

Por vezes, realiza-se somente o ensaio de dureza que por ser um ensaio não destrutivo pode executar-se sobre a totalidade das peças. Para um certo grupo de aços, há uma relação quase constante entre a carga de ruptura e a dureza, de tal modo que o conhecimento desta pode bastar para ter um idéia da tenacidade do material

A segunda característica essencial da qualidade de um metal é, como já se disse, a ductilidade, que está relacionada com a capacidade de deformação. E' expressa por duas grandezas igualmente determinadas pelo ensaio de tração : “o alongamento” e a “estrição”.

Durante o ensaio, nota-se que o corpo de prova cilíndrico se alonga inicialmente de uma maneira regular, sofrendo aquilo que se designa por alongamento homogêneo. Num certo instante, aparece numa zona qualquer do provete um estrangulamento; a deformação continua então essencialmente nessa zona, em que a carga por unidade de secção é a mais elevada e o estrangulamento prossegue até à ruptura

A diferença entre a área inicial e a área final do provete na zona de ruptura, caracteriza a estrição, que se exprime em percentagem da secção inicial. A diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial caracteriza o alongamento, que se exprime em percentagem do comprimento inicial.

A ductilidade traduzindo a capacidade do metal para se deformar antes da ruptura será, evidentemente, tanto maior quanto mais elevados forem os valores do alongamento e da estrição.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

Um outro aspecto da ductilidade é revelado pelo ensaio de resiliência, cujo significado é mais complexo e discutível.

Este ensaio de choque em provete entalhado exprime um trabalho de ruptura que só tem significado em relação a condições de ensaio bem determinadas.

Sabe-se que no resultado deste ensaio influem essencialmente três fatores :

- Velocidade do choque;
- Forma do entalhe;
- Temperatura;

O trabalho de ruptura é tanto menor quanto maior é a velocidade do choque, mais pronunciado é o entalhe e mais baixa é a temperatura. Sabe-se também que para cada um destes fatores há um valor crítico, a partir do qual o modo de ruptura é totalmente transformado, passando de frágil a dúctil. A variação entre dois modos de ruptura pode ser de tal maneira brutal que uma pequena modificação de uma das condições de ensaio pode conduzir a uma variação completa do modo de ruptura e facilitar a passagem do metal do estado dúctil ao estado frágil.

Raramente um único ensaio e um só número bastam para definir a qualidade de um metal.

E' evidente que uma resiliência quase nula num aço, que normalmente deve ter um valor elevado, basta para declarar que ele é de má qualidade. O fato de ter uma resiliência elevada não basta porém, geralmente, para poder afirmar que a sua qualidade é satisfatória.

Os dados quantitativos resultantes dos diversos ensaios são geralmente apenas índices, não sendo, pois, diretamente utilizáveis nos cálculos de resistência de materiais.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

De uma maneira muito geral (e com certas restrições como, por exemplo, o metal não ter sido sujeito a qualquer tratamento), os valores que exprimem a ductilidade no ensaio de tração variam inversamente com tenacidade, quer dizer, o alongamento e a estrição são tanto menores quanto mais elevada for a carga de ruptura.

Em virtude desta variação inversa, associa-se muitas vezes os valores da carga de ruptura, do alongamento e da estrição em “índices de qualidade”.

Um dos mais correntes é o índice  $R_M + nA$  ( $R_M$  é a carga de ruptura;  $A$  é o alongamento). Para um dado aço, este índice é praticamente constante, podendo, portanto, constituir uma característica da qualidade do aço, válida, pelo menos, para certos limites da carga de ruptura.

Um outro índice muito utilizado para certas aplicações é o produto  $R_M \times A$ .

Outros índices de qualidade fazem intervir a estrição, sendo um deles o seguinte :

$$R_L = R_M \cdot \frac{1000}{100-z}, \text{ onde } z \text{ refere-se a estrição.}$$

Um cálculo simples mostra que se trata da carga de ruptura relacionada com a secção final do provete e não com a sua secção inicial. A esta carga de ruptura dá-se o nome de resistência limite ( $R_L$ ).

#### 4. Ensaio de Tração :

O ensaio consiste em submeter o corpo de prova a um esforço de tração uniaxial, distribuído uniformemente em toda a sua secção transversal, geralmente até a ruptura, com o fim de determinar uma ou várias das características mecânicas. O ensaio é realizado à temperatura e meio ambientes, salvo especificação em contrário.

Uma máquina para ensaio de tração é composta por vários elementos :

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

- órgãos de suporte do corpo de prova
- órgãos de produção de esforço
- aparelhos de medida das deformações
- aparelhos de medida dos esforços

A maioria das máquinas atuais utiliza dispositivos eletrônicos que, em virtude da sua fraca inércia (ao contrário dos hidráulicos anteriormente usados) , apresentam uma baixa precisão. Os esforços são medidos por dinamômetro e os alongamentos por um extensômetros.

Veja um exemplo de máquina de tração na foto abaixo :

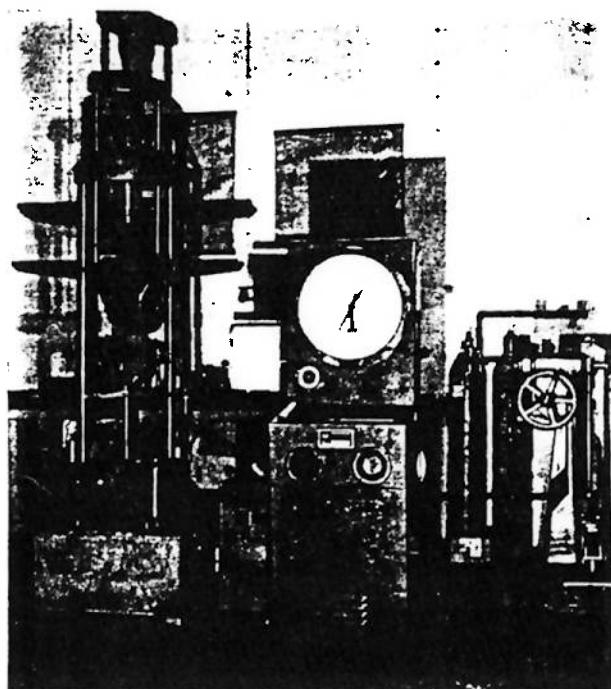


Fig.1 – Máquina para Ensaio de Tração

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

Para assegurar a concordância dos resultados obtidos nos diversos laboratórios, é indispensável proceder periodicamente à taragem das máquinas de tração. Esta operação pode efetuar-se estaticamente, equilibrando a força de tração da máquina, ou dinamicamente, por ruptura de um corpo de prova de resistência conhecida.

O modo de proceder para tal operação deve obedecer à recomendação ISO R 147.

Os ensaios de tração de um corpo de prova de seção uniforme que é submetido a uma carga gradual seguem curva típica de “tensão-deformação” como podemos observar na figura abaixo :

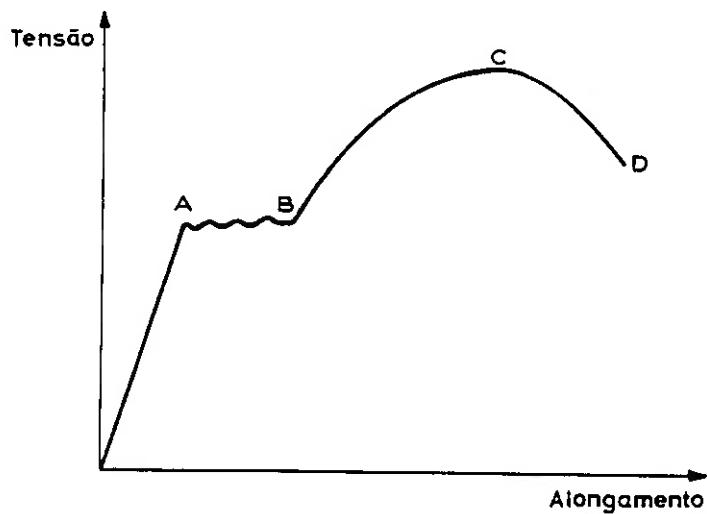


Fig.2 – Curva “tensão-alongamento”

Nesses diagramas devemos considerar duas zonas :

### 1º Zona

Nota-se inicialmente uma parte retilínea AO, ao longo da qual existe uma proporcionalidade entre os esforços e o alongamento (obedece, portanto, à lei de Hooke). É a parte dita de deformação elástica, durante a qual, ao suprimir-se a carga, o corpo de prova volta à sua dimensão inicial.

Esta parte da curva permite definir :

- o módulo de elasticidade ou módulo de Young, que é a tangente ao traço AO

$$E = \frac{\Delta F / S_0}{\Delta L / L_0} = L_0 / S_0 \times \Delta F / \Delta L$$

em que  $\Delta L$  é o acréscimo de alongamento correspondente ao acréscimo de força  $\Delta F$ , e :

$L_0$  - comprimento inicial

$S_0$  - secção inicial

- o limite elástico, que é a carga correspondente ao ponto acima do qual acaba a proporcionalidade entre esforços e alongamentos; este ponto é muitas vezes difícil de determinar, em virtude da imprecisão das medições do alongamento.

**2º Zona**

Quando o limite elástico é ultrapassado, entra-se numa região em que começam a aparecer as deformações plásticas, isto é, que já não desaparecem com a não aplicação da carga.

A fração de alongamento total do comprimento inicial, que é recuperada pela contração da peça de ensaio depois de retirada a carga de tração, representa o alongamento elástico; a fração de alongamento total que se mantém depois de retirada a carga constitui o alongamento permanente.

Como se depreende, o limite elástico tem uma importância particular para os construtores, pois indica um valor que não deve ultrapassar-se, sob pena de as peças se deformarem de uma maneira permanente. Tentar-se-á em seguida dar uma breve e sumária idéia dos fenômenos observados durante a realização do ensaio de tração.

Como se sabe, a deformação plástica de um cristal ocorre por escorregamento de um plano atômico sobre o outro, segundo planos e direções particulares. Na curva indicada na fig. 2, observa-se uma zona ondulada AB durante a qual o corpo de prova sofre um alongamento sem que a carga aplicada aumente. Esta zona, que corresponde ao afroxamento de tais planos de escorregamento, observa-se essencialmente para os aços macios, isto é, para aqueles em que o teor em carbono é inferior a 0,3%.

Para que tal escorregamento ocorra, é necessário que a tensão de corte num possível plano de escorregamento e direção de escorregamento pertencente a esse plano atinja um certo valor. Este valor, contudo, calculado para os cristais reais, tendo sido precisamente esta conclusão que levou à criação da teoria dos deslocamentos, a qual explica esta disparidade. Com efeito, logo que a tensão de corte atinja valores que podem ser ainda muito baixos, um deslocamento pode entrar em movimento e iniciar assim a deformação plástica, embora por vezes indetectável experimentalmente.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

As considerações anteriores explicam o andamento inicial da curva de tração dos metais em geral, em que a parte “retilínea”, que corresponde à deformação elástica, termina tanto mais depressa (e, portanto, um limite elástico mais pequeno) quanto mais lentamente for realizado o ensaio; na prática, essa lentidão depende da sensibilidade dos métodos de medida. Daqui se torna intuitiva a necessidade de especificação da velocidade a que se realiza o ensaio. Iniciando-se a deformação plástica, provoca-se um aumento da resistência à tração do material sujeito ao ensaio, aumento este a que se chama encruamento.

Compreende-se facilmente que o encruamento se dê, uma vez que os deslocamentos, movendo-se simultaneamente em planos de escorregamento diferentes, intersectando-se, originam “jogs” (ligações) que irão dificultar cada vez mais o movimento, o que equivale a dizer que a tensão necessária para continuar a deformação vai sendo cada vez maior.

Assim, no período plástico a deformação depende da velocidade do fenômeno de aumento da resistência à tração por deformação, ou seja, da taxa de encruamento, sendo a forma da curva dependente da relação entre esta taxa e a velocidade de redução da área do corpo de prova. Na realidade, enquanto o alongamento foi aumentando a área transversal do corpo de prova foi diminuindo, chegando um altura em que a velocidade de diminuição da seção excede a velocidade de aumento da resistência à tração por deformação, verificando-se assim a diminuição da tensão (não nos esqueçamos que esta tensão é tomada em relação à seção inicial do corpo de prova) com o alongamento. Nesta altura, a deformação torna-se localizada – aparece o fenômeno de estrição e a ruptura ocorre rapidamente. Observe a figura a seguir :

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

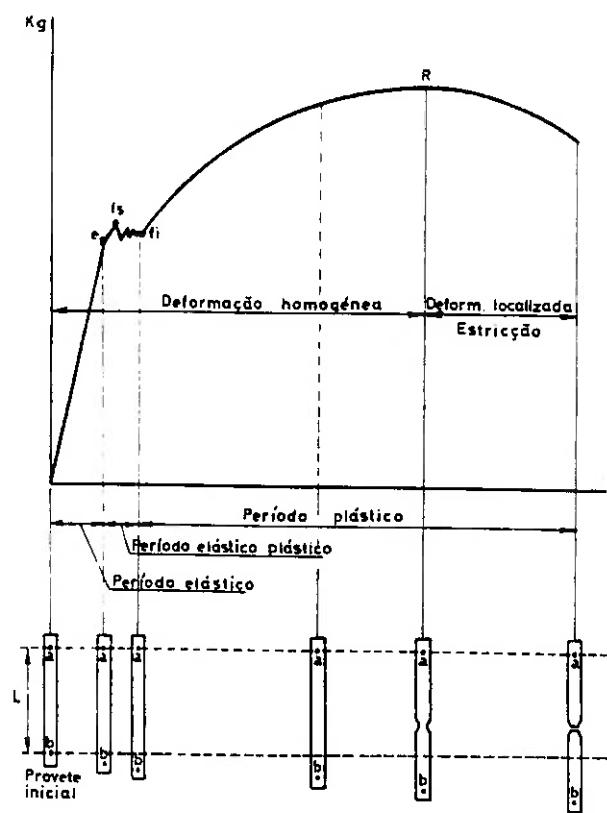


Fig.3 – Diagrama Tensão-deformação

Este diagrama observa-se mostra o caso da ruptura do corpo de prova se produzir depois da deformação plástica. Pode, no entanto, acontecer que a ruptura se dê depois da deformação elástica. Neste caso, a ruptura produz-se bruscamente, sem deformação aparente. Este tipo de ruptura produz-se nos metais pouco dúcteis (como, por exemplo, ferros fundidos), ou quando as suas estruturas estão em estado de tensão.

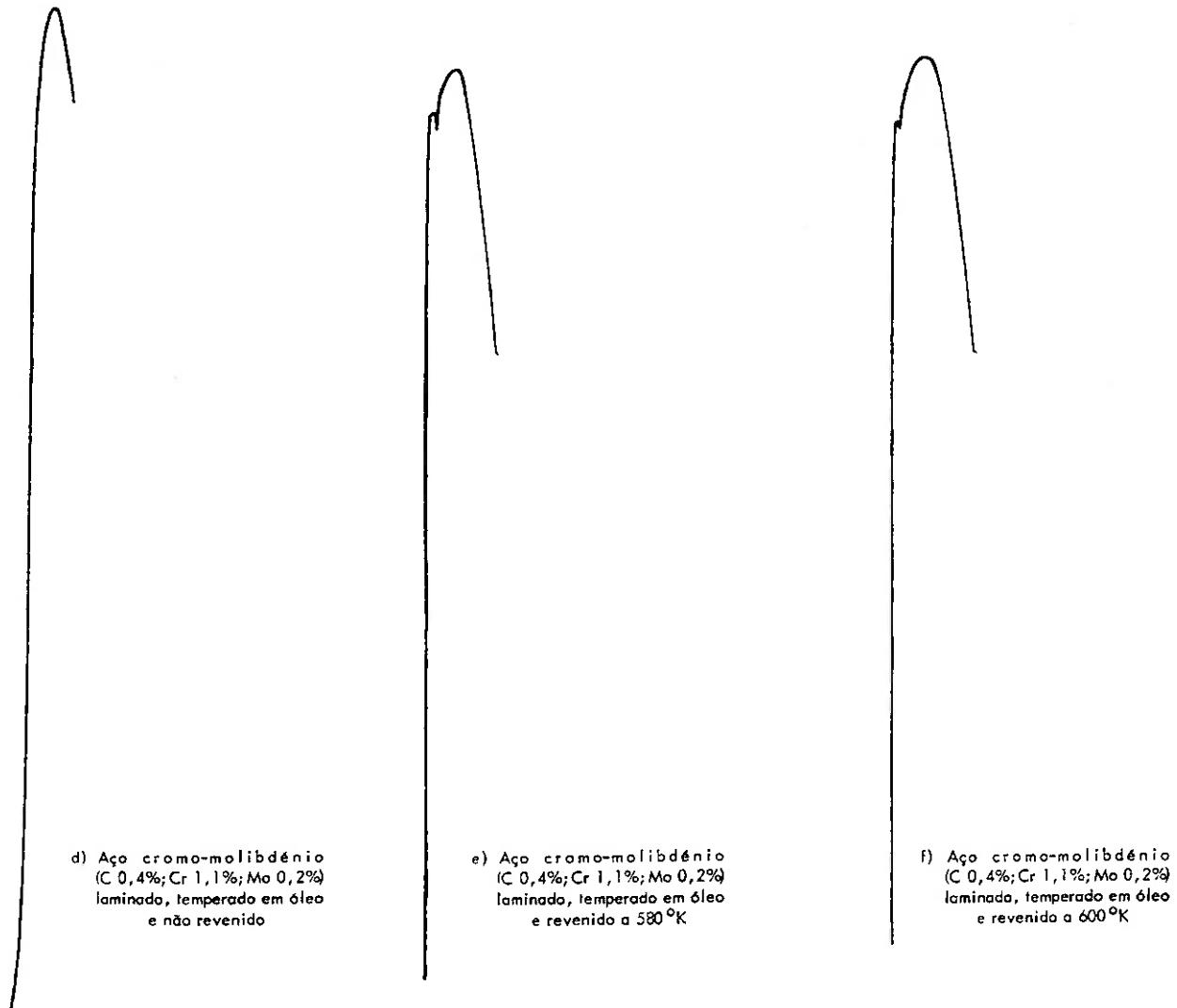
Durante todo o período de estrição, a solicitação deixa de ser uma tração puramente uniaxial. Estabele-se um regime complexo de ligações bi e triaxiais.

O alongamento é uma grandeza muito heterogênea, pois combina a deformação homogênea do corpo de prova durante a primeira fase do domínio plástico,

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

com a deformação local que se produz depois de a carga máxima ter sido atingida – portanto durante a estrição.

A seguir segue algumas curvas típicas do ensaio de tração:



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

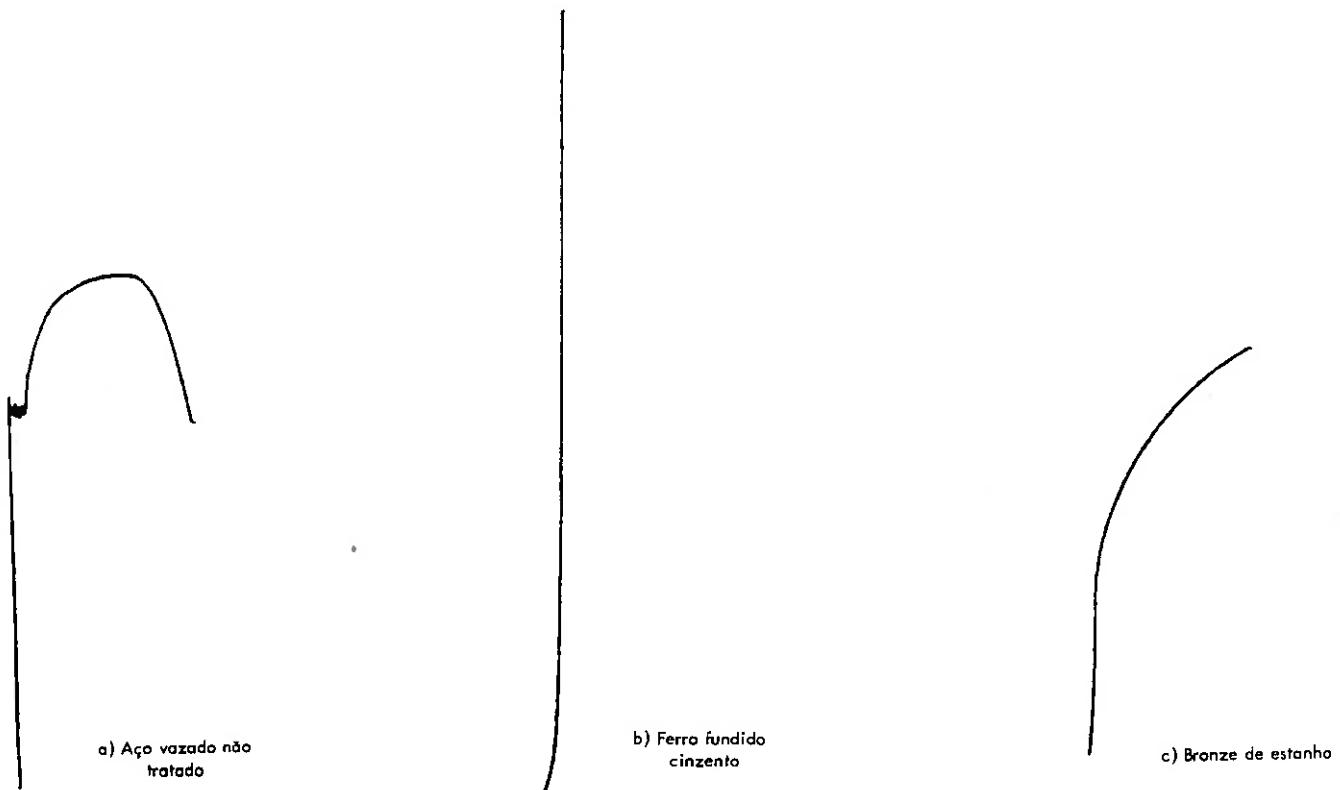


Fig.4 – Curvas Típicas do Ensaio de Tração

Podemos também observar os corpos de prova antes e depois do ensaio na seguinte figura :

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

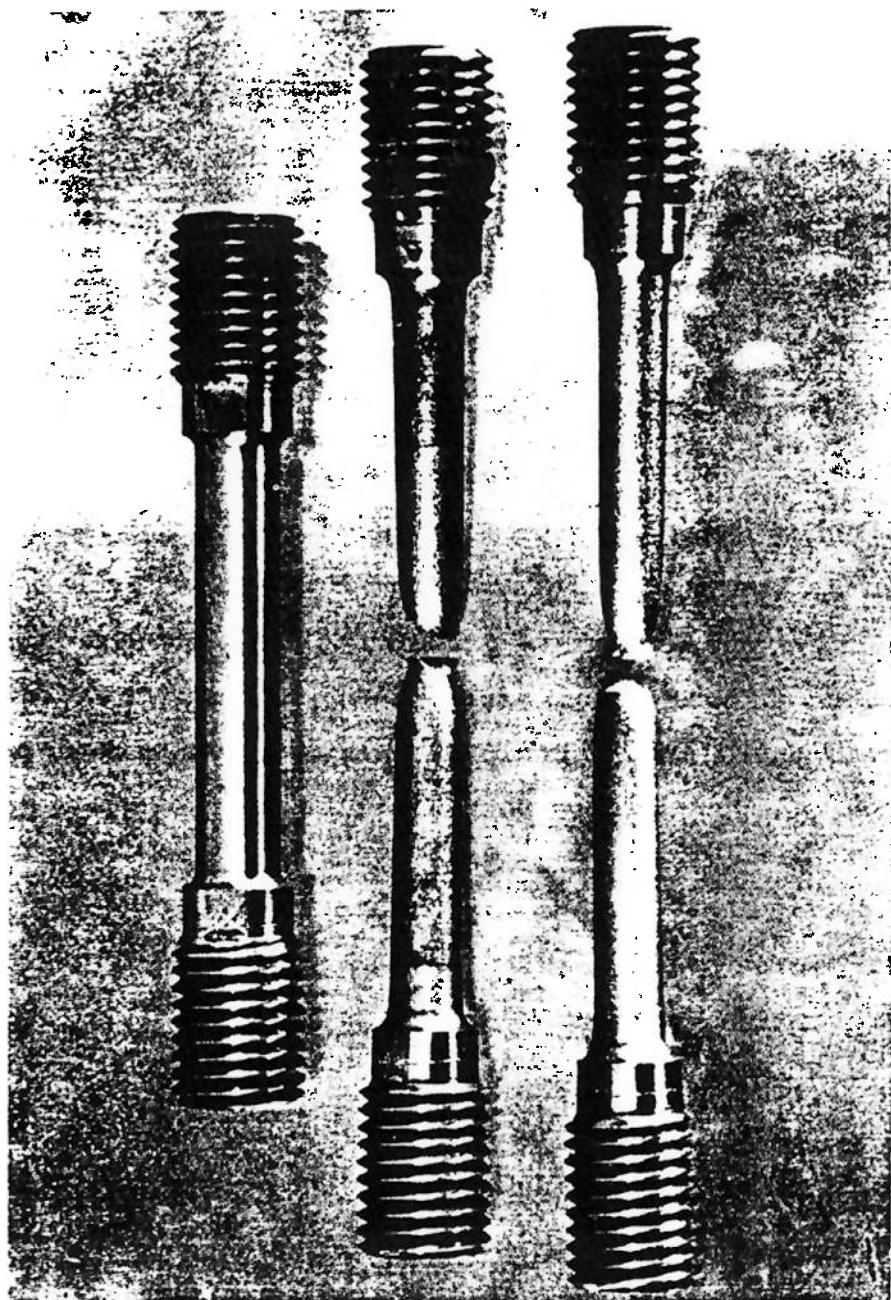


Fig. 5 – Corpo de prova antes e depois do ensaio de tração

## 5. Fundamentos Teóricos :

A máquina de ensaio de tração e torção tem como finalidade a determinação das propriedades mecânicas de diferentes ligas. Dessa forma, podemos determinar o comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos, a influência das condições de fabricação, de tratamento e da utilização dos equipamentos para assim, determinar o material e os processos envolvidos para sua fabricação que melhor se adaptam às necessidades de utilização.

As propriedades mecânicas constituem os característicos mais importantes dos metais para sua aplicação no campo da engenharia, visto que o projeto e a execução das estruturas metálicas, quer móveis, quer fixas, assim como a confecção dos componentes mecânicos são baseados no seu conhecimento.

As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos e correspondem às propriedades que, num determinado material, determinam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que se verifiquem deformações incontroláveis.

Esses esforços mecânicos podem ser os mais variados.

Eles podem significar a aplicação de uma carga de modo lento e gradual; neste caso a natureza do esforço é ‘estática’, como tração, compressão, dobramento, torção, etc.

A aplicação da carga pode ser feita de modo repentino, como o choque. Sua natureza é ‘dinâmica’.

Finalmente, os esforços podem ser repetidos, a carga variando repetidamente, seja em valor, seja em direção, como na ‘fadiga’.

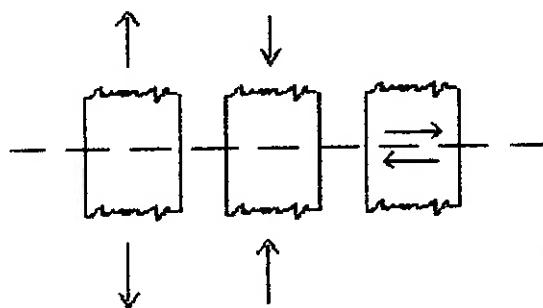
Daí a importância dos ‘ensaios mecânicos’, que permite uma melhor visão do comportamento dos metais quando sujeitos a esses esforços.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

Na determinação das propriedades mecânicas, aplicam-se cargas expressas em kgf. Como resultado dessa aplicação, ocorre uma distribuição interna de forças ou componentes de forças que pode resultar numa mudança na forma da peça submetida à carga. Define-se “tensão” como a intensidade dessas forças, correspondendo, portanto, à carga dividida pela secção transversal do corpo.

Os esforços podem ser de natureza estática, dinâmica ou repetidos caracterizando o fenômeno da fadiga. Este trabalho consiste de esforços cuja natureza é essencialmente dinâmica (o impacto de um martelo sobre uma estrutura conectada ao corpo de prova e responsável pela transmissão das forças).

O material estará sujeito aos três tipos básicos de tensão :



Tração      Compressão      Cisalhamento

- Tensão de Tração : há uma tendência de separação do material em duas partes, em relação ao plano de tensão;
- Tensão de Compressão : é o inverso da tração; as partes do material adjacentes ao plano de tensão tendem a comprimir-se uma contra a outra;

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

- Tensão de Cisalhamento : em que as duas partes tendem a escorregar uma sobre a outra;

Matematicamente, há somente dois tipos de cargas ou de tensões, pois a compressão pode se considerada como a versão negativa da tração.

“Deformação” é a mudança dimensional que se verifica no material como resultado da carga aplicada. Exprime-se quase sempre em porcentagens. Contudo, na torção por exemplo, a deformação está relacionada com o ‘ângulo de torção’, expresso em radianos.

“Resistência” é a carga ou tensão máxima suportada pelo material, dentro de determinadas condições; por exemplo, resistência elástica, resistência à carga máxima, resistência à ruptura, etc.

“Ductilidade” corresponde à capacidade de um material poder ser deformado apreciavelmente antes de romper. O aço de baixo carbono, por exemplo, é uma liga de grande ductilidade.

Os materiais “não- dúcteis” são chamados “frágeis”, sendo a “fragilidade” o característico correspondente. Exemplo: ferro fundido cinzento.

“Tenacidade” corresponde à quantidade de energia necessária para romper um material, podendo, portanto, ser medida pela quantidade de trabalho por unidade de volume necessário para levar o material à ruptura sob a ação de carga estática. A tenacidade pode ser expressa em Joules/m<sup>3</sup>.

Ao projetar-se uma estrutura ou um componente mecânico, depois de conhecidas as tensões às quais as peças estão sujeitas, lança-se mão de um ‘fator’ chamado ‘fator de segurança’, ou ‘coeficiente de segurança’, pelo qual é dividida a resistência adotada para o material escolhido.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

O ‘coeficiente de segurança’ é, portanto, um número empírico pelo qual a resistência do material é dividida de modo a obter-se uma tensão conservadora, por assim dizer.

O resultado desse quociente é chamado “tensão admissível de trabalho”.

São inúmeras as razões pelas quais a tensão de trabalho de um membro de uma estrutura ou de uma máquina deve corresponder a um valor inferior à resistência do material.

Em primeiro lugar, os materiais de construção, em particular, os metais, tendem a deteriorar-se em serviço, pela ação do meio ambiente. Em segundo lugar, ocorrem freqüentes variações na distribuição das tensões adotadas no projeto, além de surgirem ocasionalmente sobrecargas. Em terceiro, é difícil garantir-se perfeição na fabricação de uma determinada peça metálica, além de poderem ser introduzidas variações de tensões adicionais no transporte, montagem e instalação da máquina ou da estrutura.

Nessas condições, o comportamento do material pesquisado em laboratório de ensaios mediante a determinação de suas propriedades em amostras, pode divergir do seu verdadeiro comportamento na prática.

Os fatores ou coeficientes de segurança variam grandemente em função do tipo de carga, do tipo de material e das condições de serviço. Para materiais dúcteis que se deformam antes de romper, os seus valores variam de 1,5 a 4. Para materiais frágeis que rompem bruscamente, sem qualquer aparente deformação prévia, os coeficientes de segurança podem atingir valores de 5 a 8.

Em resumo, os membros de máquinas e estruturas, principalmente quando sujeitos a cargas estáticas, raramente rompem em serviço, graças ao coeficiente de segurança, a não ser que fiquem repentinamente sujeitos a uma carga accidental de considerável grandeza.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

No caso de partes móveis de máquinas, as falhas ocorrem mais freqüentemente pela presença de cargas dinâmicas ou cíclicas.

A determinação das propriedades dos materiais é feita por intermédio de ‘ensaios’; assim, ‘ensaios mecânicos’ tem por objetivo determinar as propriedades mecânicas.

Os ensaios visam não somente medir as propriedades propriamente ditas, como igualmente comparar essas propriedades em diversos materiais, constatar a influência das condições das condições de fabricação, de tratamentos e da utilização dos materiais e, finalmente, determinar qual o material que mais se recomenda para o uso em determinadas condições e se o material escolhido irá satisfazer às condições exigidas quando realmente aplicado na estrutura ou na máquina inteira.

Para ter-se o resultado mais representativo, o ensaio mecânico deveria ser realizado numa das peças produzidas. Isso é, às vezes, possível. Contudo, na maioria dos casos, não é praticável, por razões técnicas e econômicas. Lança-se mão, então, de uma amostra do material cujas propriedades se quer medir, de forma e dimensões especificadas. A essa amostra representativa do material dá-se o nome de “corpo de prova”.

Por outro lado, para que os resultados obtidos sejam comparáveis, é preciso que o ensaio seja realizado de acordo com determinadas “normas” sobre “corpos de prova padronizados”.

Finalmente, para que se chegue a uma conclusão quanto ao valor numérico obtido no ensaio, é necessário compará-lo com um valor predeterminado ou “especificado”.

A “especificação pode ser definida como uma tentativa do consumidor fazer chegar ao produtor suas exigências sob o ponto de vista de qualidade, permitindo que a aquisição do material correspondente seja feita dentro de verdadeiras bases técnicas.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

A especificação, além de abranger as propriedades mecânicas, pode abranger os característicos químicos, os característicos gerais, os métodos de fabricação, a forma, as dimensões e o acabamento das peças.

Essas especificações são estabelecidas por Associações Técnicas especializadas, reunindo produtores, consumidores e tecnologistas, tais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A elas compete elaborar igualmente as “normas” e os “métodos de ensaios”, de modo a permitir, como já foi citado, comparar os resultados obtidos nos diversos ensaios.

Os dados obtidos nos ensaios, para poderem ser melhor interpretados, devem ser, sempre que possível, submetidos a um tratamento estatístico, mesmo porque dificilmente se consegue, no mesmo material e nas mesmas condições de ensaio, resultados totalmente repetitivos. É claro que esse tratamento estatístico só é recomendável quando se tem disponível um grande número de dados, como ocorre no caso de ensaios de fadiga.

- Resistência à tração : quando se submete uma barra metálica a uma carga de tração, paulatinamente crescente, ela sofre uma deformação progressiva de extensão ou aumento de comprimento.

A relação existente entre a tensão aplicada – carga dividida pela área da secção transversal da peça que está sendo tracionada – e a deformação resultante pode ser mais facilmente acompanhada com assistência visual, na forma de um diagrama “tensão-deformação”, em que a tensão é lançada no eixo das ordenadas e a deformação no eixo das abscissas.

Os valores que permitem o traçado desse diagrama são obtidos submetendo-se o metal ao “ensaio de tração”.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

Essa máquina deve ser construída de tal modo que possibilite uma montagem adequada da peça a ser ensaiada, com o que se obtém maior precisão dos dados a serem levantados.

Em princípio, pois, a máquina de ensaio de tração deve ser dotada de um conjunto que permita a aplicação da carga, de dispositivos para pender a peça ou o corpo de prova e do extensômetro.

Para um ensaio de tração devemos considerar a conhecida lei de Hooke que estabelece que o aumento de comprimento de cada barra é sempre proporcional à tensão de tração aplicada, ou seja,

$$\Delta l = P \cdot l / A \cdot E$$

onde,

$l$  = comprimento da barra, em mm

$\Delta l$  = aumento de comprimento ou alongamento, em mm

$P$  = carga aplicada, em kgf

$A$  = área de secção transversal da barra, em  $mm^2$

$E$  = módulo de elasticidade

A fórmula indica igualmente que o alongamento é também proporcional ao comprimento da barra e inversamente proporcional à área da seção transversal da barra.

Indicando a relação  $P/A$  que exprime a tensão por  $\sigma$  (em Mpa ou Kgf/mm<sup>2</sup>) e a relação  $\epsilon/l$  que exprime o alongamento ou a deformação por  $\epsilon$  (em %), tem-se :

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

$$E = \sigma / \epsilon$$

que é a forma mais conhecida da lei de Hooke.

A lei de Hooke, entretanto, só é válida até um certo limite. Este trecho, por isso mesmo, é retilíneo.

O módulo de elasticidade depende das forças interatômicas e, embora variando com o tipo de ligação atômica, não é sensível a modificações estruturais. Assim, por exemplo, se num determinado tipo de aço, a resistência mecânica pode aumentar apreciavelmente por fatores que afetem sua estrutura, como tratamentos térmicos ou pequenas adições de elementos de liga, esses fatores praticamente não influem no módulo de elasticidade do material.

Os ensaios de torção são de fundamental importância para a fabricação de materiais que serão empregados como parafusos, rebites e vigas e ainda, eixos que estão sujeitos a cisalhamento torcional. Através deste ensaio podemos determinar rigidez torcional, o limite de escoamento sob torção, a resistência à torção e a deformação sob torção. Dispositivos para medir a deformação ou ângulo de torção são chamados 'tropômetros'. As principais equações envolvidas num ensaio de torção estão descritas abaixo :

$$M_t = \tau \cdot J_p / r$$

onde,

$\tau$  = tensão de cisalhamento em  $\text{Kgf/mm}^2$

$M_t$  = momento de torção em  $\text{Kgf/mm}$

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

$r$  = raio da secção transversal em mm

$J_p$  = momento polar de inércia da secção em  $\text{mm}^4$

para um corpo de prova cilíndrico,

$$J_p = \pi D^4 / 32$$

o módulo de rigidez é dado por :

$$G = \tau / \gamma \quad \text{onde,} \quad \gamma = \operatorname{tg} \theta = r \theta / L$$

Num ensaio de torção praticamente não ocorre redução de área. Geralmente admite-se para metais dúcteis, a resistência à torção é cerca de 75% da resistência à tração e para metais frágeis é aproximadamente 10 a 20% superior à resistência à tração.

## 6. Desenvolvimento e Teste :

A primeira fase de um projeto é o estudo da viabilidade, sendo considerada uma das fases mais importantes. Nesta fase faz-se a coleção e organização de informações visando a formulação do problema principal e a identificação das variáveis básicas, limitações e critérios. Depois elabora-se uma síntese de possíveis soluções e finalmente a avaliação das alternativas, tendo como resultado final um conjunto de soluções viáveis.

Assim sendo, a formulação do projeto com suas características e limitações, pode ser descrita da seguinte forma :

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

— Estrutura compacta, capaz de receber o impacto oriundo de uma massa em queda livre, transmitindo totalmente essa energia cinética para um corpo de prova, causando esforços torcionais e de tração.

— Presença de uma pressão externa (até 50 bar) agindo sobre o corpo de prova.

— Facilidade de montar e desmontar o equipamento

— Não causar nenhum momento fletor num corpo de prova

Atualmente, existem no mercado, equipamentos para a realização de testes dinâmicos de tração. Estes equipamentos realizam os esforços através da utilização da pressão hidráulica. Custam entre US\$200.000 e US\$300.000.

Já podem ser encontrados na literatura equipamentos para ensaio de tração de baixo custo através de impacto, porém, usando outros princípios de funcionamento. Citaremos a seguir alguns exemplos.

Em um laboratório suíço (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Section Technology of Metals/Joining, Ueberlandstr, 129, 8600 Dubendorf, Switzerland) foi desenvolvido um aparato para realizar tal teste, que podemos observar na figura abaixo :

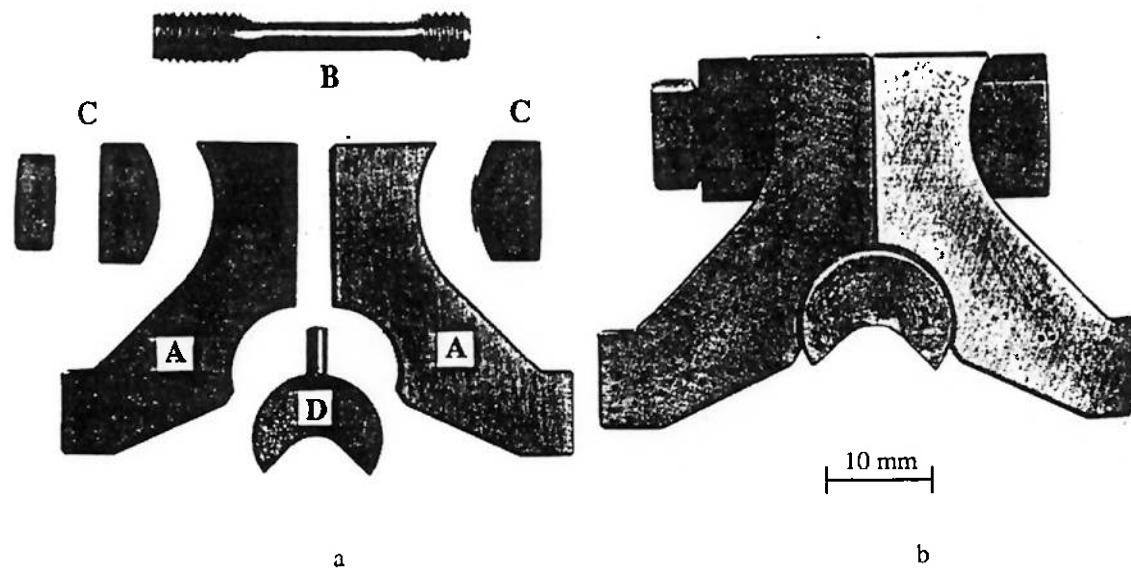


Fig.6 – Dispositivo para Ensaio de Tração

Tal equipamento funciona através impacto do martelo com a peça D, tensionando o corpo de prova, como observamos a seguir :

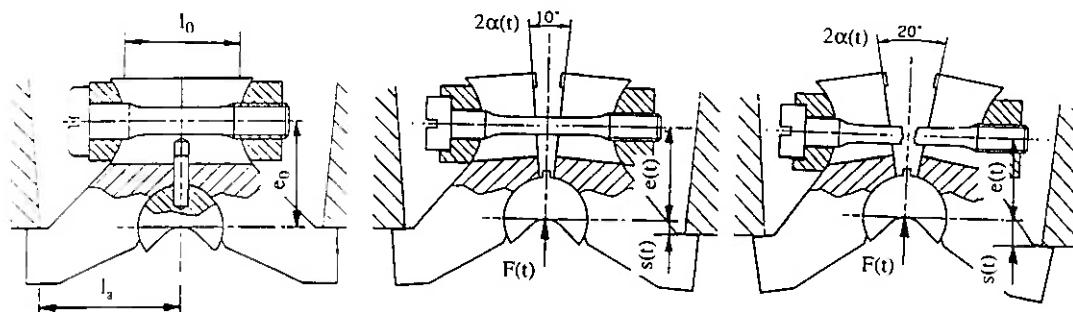


Fig.7 – Três posições sequenciais do Dispositivo

Este dispositivo provoca um momento fletor no corpo de prova devido ao atrito entre as peças C que servem para garantir a axialidade, escorregando em relação as

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

peças A. Uma outra desvantagem é o alto custo de fabricação dos corpos de prova devido a sua forma complexa.

Existem outros dispositivos que aproveitam a energia armazenada em disco de inércia para gerar o impacto, como vemos abaixo :

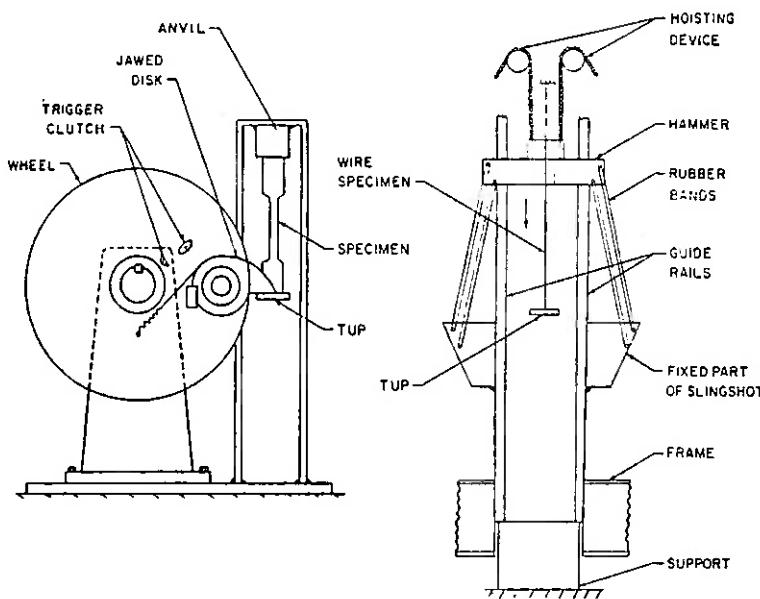


Fig.8 – Máquina de Impacto com energia armazenada em disco

Outros dispositivos foram criados para analisar a relação que existe entre baixas temperaturas e teste de tração.

Uma das primeiras propostas, que foi descartada, pois não havia axialidade desejada, é apresentada a seguir :

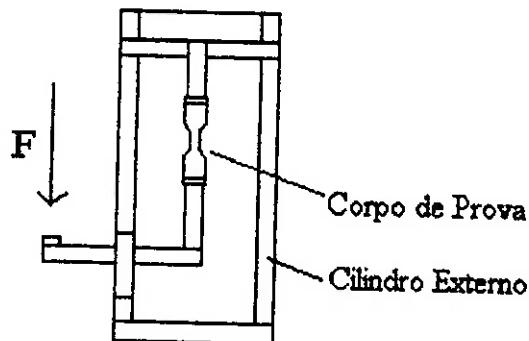


Fig.9 – Esboço de uma máquina de Tração sem axialidade

Cogitou-se também a transmissão da força através de cabos, porém, estes sofreriam uma deformação que absorveria energia não sendo apropriado para a proposta.

Uma outra idéia foi a de transmitir a força através de dutos hidráulicos. Esta forma facilitaria a divisão da força axial oriunda do impacto, em forças axial e tangencial (para obter a torção), porém, esta alternativa foi descarta devido à baixa resposta em freqüência que apresentaria comparativamente ao meio físico.

Surgiu então a idéia de justapor dois cilindros. Um externo que ficaria fixo ao chão e que guiaria um segundo cilindro, interno ao primeiro, que teria sua face superior servindo de suporte para o impacto do martelo. O volume interno ao cilindro menor se responsabilizaria pela câmara de óleo, responsável pela pressão sobre o corpo de prova. Dessa forma estaria resolvido o problema de se ter propagação de esforços até o corpo de prova, numa direção, que não fosse a direção axial.

Mas outro problema foi detectado, a câmara de pressão estando internamente ao cilindro menor causava uma força desbalanceada na direção axial, não possibilitando a equivalência da força fornecida pelo martelo e a força que estaria sendo repassada ao corpo de prova. Além disso, o fato de se ter a parte interna do cilindro como câmara de óleo envolveria um fluxo de óleo dentro do cilindro, dificultando tanto na montagem do

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

equipamento como na própria manutenção do mesmo. Sem falar na complexidade advinda de se trabalhar com uma fonte de pressão onde haveria um fluxo de fluido envolvido.

Por isso, optou-se pela criação de um terceiro cilindro, que estaria internamente aos demais, envolvendo apenas o corpo. Dentro dele estaria o óleo sobre pressão, separado de todas as demais peças do equipamento. A criação deste terceiro cilindro também facilita a montagem e desmontagem e pode ser descartado caso deseje-se ensaiar sem a presença da pressão externa.

Um esquema do dispositivo é apresentado a seguir :

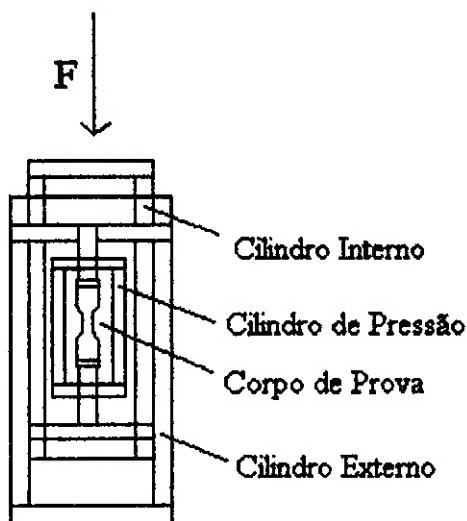


Fig.10 – Esboço de uma Máquina de Tração com os 3 Cilindros

O dispositivo constituiu-se de 3 cilindros concêntricos, sendo que o de menor diâmetro é responsável apenas por conter o óleo. O princípio de funcionamento constituiem ter os dois cilindros maiores com uma defasagem na sua altura, podendo correr livremente um dentro do outro. O cilindro menor recebe a carga do martelo. O corpo de

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

prova está ligado inferiormente ao cilindro interno e superiormente ao cilindro externo. Assim sendo, quando o cilindro interno tenta iniciar um movimento de translação internamente ao cilindro externo, traciona a peça.

Durante a execução dos desenhos de fabricação, observou-se que existia uma força resultante da pressão hidráulica. Esta força era resultado do fato que uma das pontas das hastes estava sujeita à pressão e a outra não. Podemos observar no esquema abaixo tal força.

Pressão Atmosférica (F1)



Haste ligando o corpo de prova dentro do cilindro ao exterior.

Pressão interna câmara de pressão (150bar) (F2)

Fig.11 – Esquema da parte superior da câmara de pressão

$$P = 150 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 10^2 = 314 \text{ mm}^2 = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$F_1 = P \times A = 1 \times 3,14 = 3,14 \text{ Kgf}$$

$$F_2 = 150 \cdot 3,14 = 471 \text{ Kgf}$$

$$\text{Resultante} = F_2 - F_1 = 468 \text{ Kgf}$$

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

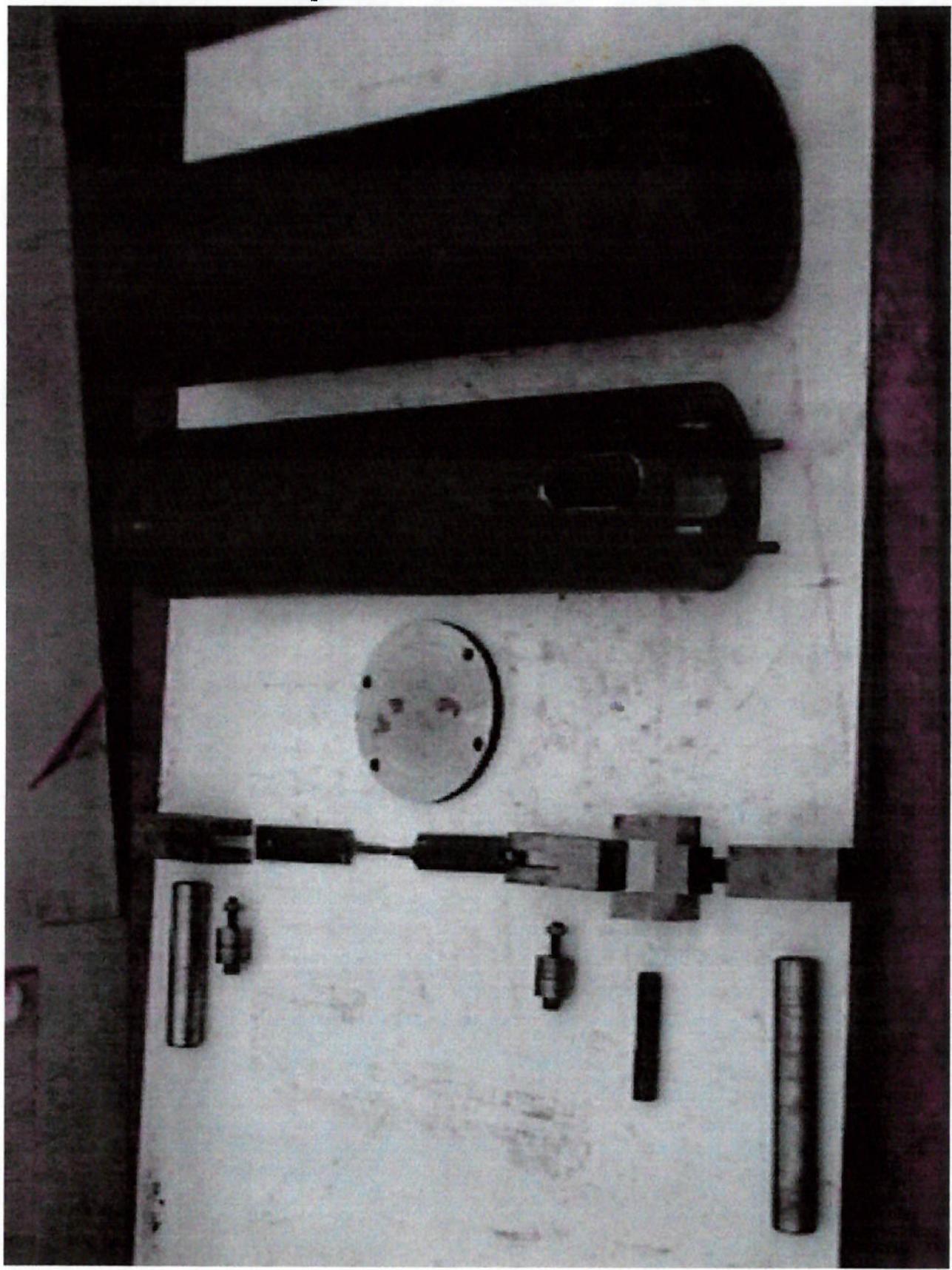
Esta resultante acabou inviabilizando o projeto pois a pré carga decorrente na seção do corpo de prova era muito alta, como podemos observar a seguir :

$$A_{MIN} = 3,14 \cdot 2,5^2 = 19,63 \text{ mm}^2$$

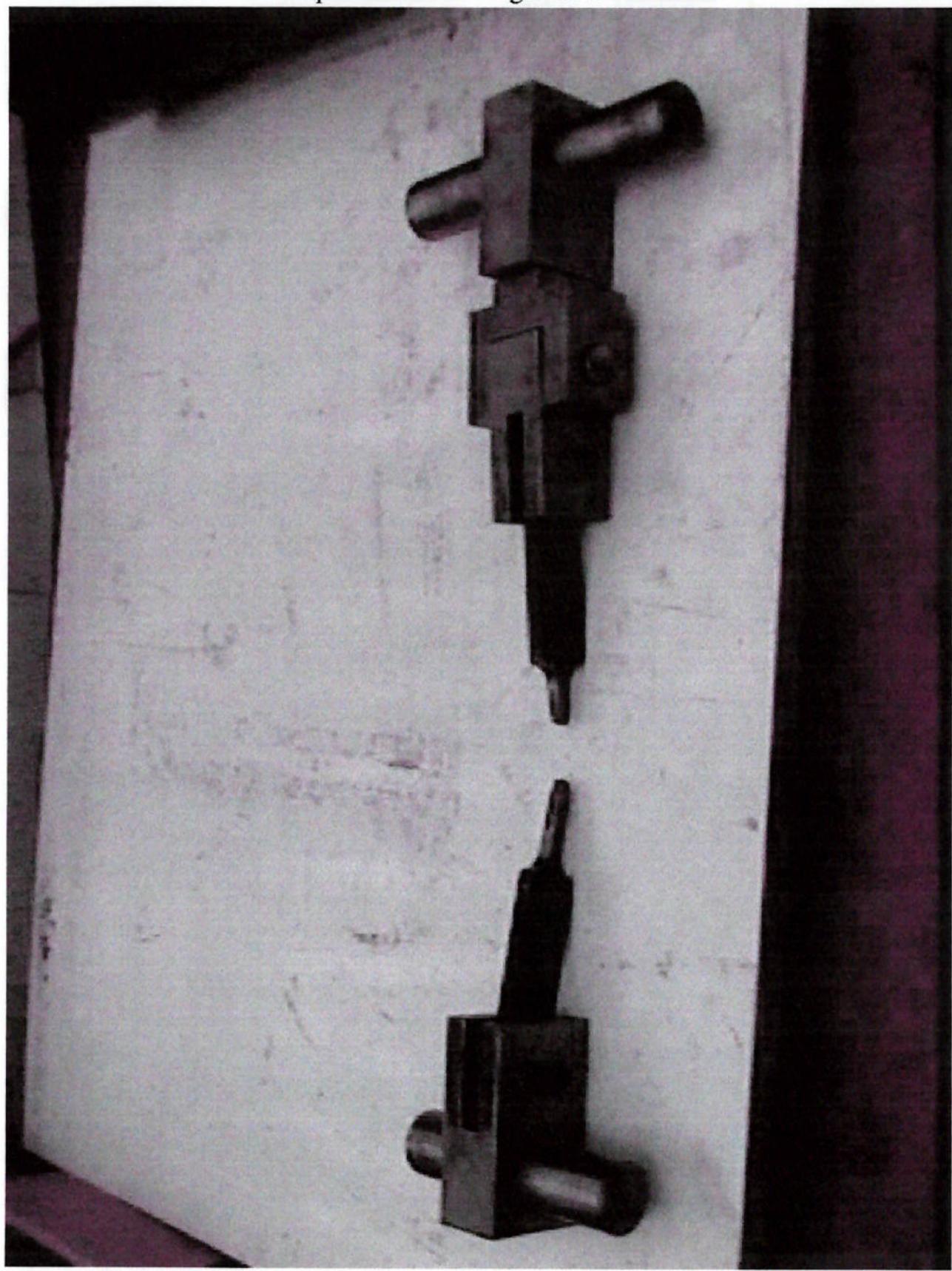
$$\sigma = F/A = 468/19,63 \cdot 10^{-2} = 2.384 \text{ Kgf/cm}^2 = 238 \text{ MPa}$$

O dispositivo foi inteiramente construído no oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo com as máquinas e ferramentas disponíveis nessa oficina mesmo. A seguir, estão algumas fotos das peças do dispositivo para ensaio de tração que foi construído :

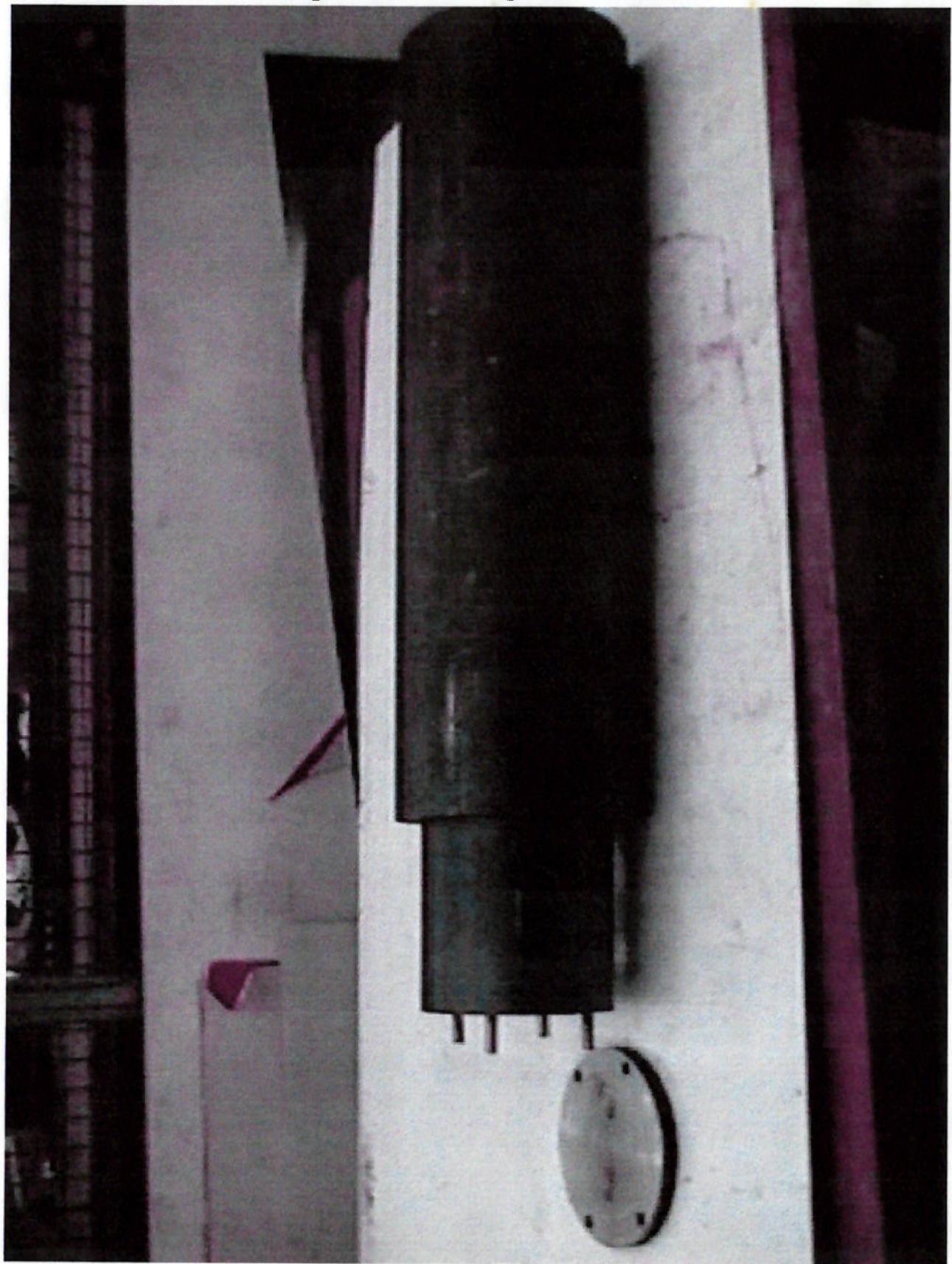
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica



Depois da construção do dispositivo realizou-se um teste em uma prensa hidráulica num corpo de prova que tinha um comprimento inicial de 250mm e obteve-se o seguinte gráfico :

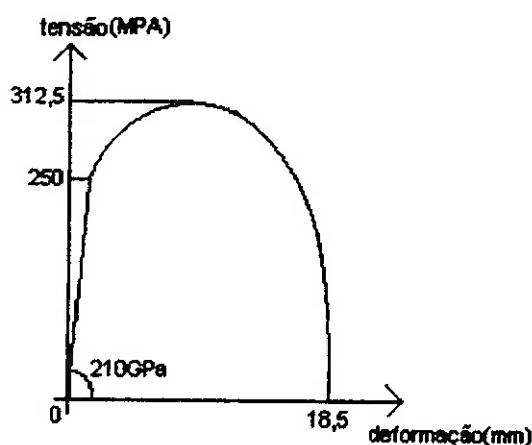


Fig.12 – Gráfico Tensão-Deformação do Teste

## 7. Conclusão :

O relatório apresentou sucintamente o que foi desenvolvido durante todo o projeto da máquina de ensaio de tração e torção sob pressão. O resultado foi uma máquina de tração, muito embora para que se tenha um ensaio de torção basta tornar o entalhe do cilindro interno circular. O dispositivo de pressão não foi possível devido a dificuldades técnicas como já fora mencionado. Muitas alternativas foram elaboradas desde o início do projeto, sendo que a maioria delas foram descartadas por não atender os requisitos básicos de um ensaio de tração adequado. Após a conclusão do projeto executivo procedeu-se a construção do equipamento que se deu na própria oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo. Embora o equipamento tenha sido elaborado para funcionar com a queda de um martelo sobre si, os testes foram realizados numa prensa

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Mecânica

hidráulica onde pode-se determinar uma curva alongamento x pressão, como dito anteriormente.

**8. Referências Bibliográficas :**

- Tecnologia Mecânica / Vicente Chiaverini – 2º ed. – São Paulo : McGraw-Hill, 1986;
- Ensaios Mecânicos dos Metais – princípios, definições, técnicas de ensaio e normas – autores : Maria Fernanda Lino Pires e Antônio Guilherme Pinheiro – do Instituto Nacional de Investigações Industriais;
- Contribuição para a Revisão do Método Brasileiro para Ensaio de Tração de Materiais Metálicos – autor : João Gustavo Haenel – do Instituto de Pesquisas Técnicas;
- Metodologia de Projeto – apostila do curso de PMC475 de engenharia mecânica da Universidade de São Paulo;

**Desenho de Conjunto do Dispositivo para Ensaio de Tração**

