

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

Propriedades mecânicas dos
materiais cíclicamente deformados
por flexo-tração

Autora: Antônio Eustáquio de Melo Pertence
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Setembro/1987

Antônio Eustáquio de Melo Pertence

Propriedades mecânicas dos materiais cilicamente deformados por flexo-tração

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia Física.

Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
1987

AGRADECIMENTOS

A realização, principalmente da parte experimental de uma tese, exige o envolvimento e dedicação de muitas pessoas.

Dentre todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da presente tese, gostaria de destacar o Professor Paulo Roberto Cetlin por seu efetivo apoio na condução da tese, o Engenheiro Leopold Marcel Ghislain Lejeune pela dedicação e boa vontade na construção do dispositivo de flexo-tração, o Professor Dácio Rabello Itabayana pelas importantes informações para o desenvolvimento do projeto, o Professor Haroldo Vinagre Brasil pelo apoio e incentivo e o Professor Dilermando Luiz Pazzini pela valiosa ajuda na confecção das amostras.

A todos, o meu agradecimento pelo trabalho e dedicação prestados; com todos, compartilho os frutos da tese.

Antônio E. M. Pertence

agosto /1987

SUMÁRIO

Página

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
CAPÍTULO III	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	41
CAPÍTULO IV	RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
CAPÍTULO V	SUGESTÕES PARA TESES FUTURAS	132
CAPÍTULO VI	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

Resumo?
Abstract?

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I - INTRODUÇÃO

I.1 - Importância das Propriedades Mecânicas e seus Controles em Operações de Conformação Mecânica a Frio

I.1.1 - A operação de conformação mecânica

Pode-se definir a operação de conformação mecânica como um processo de deformação plástica através do qual o volume e a massa do metal são conservados.

Esta operação de conformação mecânica poderá ser realizada de múltiplas formas, porém, sempre será possível classificar esta operação num dos seguintes processos⁽¹⁾:

Processo do tipo compressão direta

Processo de compressão indireta

Processo do tipo trativo

Processo de dobramento

Processo de cisalhamento

A laminação e o forjamento são exemplos do processo do tipo compressão direta que se caracteriza pela aplicação direta de esforços sobre a superfície do material, de forma tal que o fluxo de escoamento do material se dá perpendicularmente à direção de compressão.

Por sua vez, a trefilação de barras e tubos, extrusão e embutimento são exemplos característicos do processo de compressão indireta, onde há geralmente forças de origem trativa aplicada ao material fazendo com que haja uma compressão indireta entre este último e a matriz.

Um caso típico do processo de conformação do tipo trativo, é o estiramento onde se conforma o material, geralmente chapas metálicas finas, sobre a matriz através de forças trativas.

O dobramento envolve a aplicação de momentos fletores à chapa, enquanto o processo de cisalhamento envolve a aplicação de for-

ças cisalhantes como no corte de chapas⁽¹⁾.

A figura I.1 ilustra esquematicamente estes processos.

I.1.2 - Conformação mecânica a frio e a quente

A conformação mecânica pode ser basicamente realizada em duas condições de temperatura que irão definir a operação como uma conformação a frio ou como uma conformação a quente.

Quando o material é conformado a frio, este apresenta um encruamento ou seja, passa a se ter uma maior resistência a deformação. O aumento da temperatura favorece a queda da resistência deste metal frente à deformação, provocando assim um amaciamento.

Uma operação de conformação será a quente se for efetuada numa dada temperatura em que ocorre um amaciamento relativamente rápido após o encruamento por deformação⁽²⁾.

I.1.3 - Influência da conformação mecânica sobre as propriedades dos materiais.

A conformação mecânica tem grande influência sobre as propriedades dos materiais, sendo que esta influência é controlada pela temperatura de trabalho, a velocidade de deformação, e intensidade e distribuição de deformação na peça⁽²⁾.

Como já foi dito na conformação mecânica a frio proporciona-se um encruamento, significando em última análise, aumento na resistência ou dureza e uma diminuição da ductilidade⁽¹⁾.

Quanto maior a velocidade de deformação maiores os acréscimos de resistência ou dureza e decréscimos na ductilidade.

A capacidade do material sofrer uma conformação a frio é limitada pela ocorrência de fratura⁽²⁾. Assim a deformação a frio excessiva pode acabar por fraturar o material antes de se conseguir a forma e dimensões finais⁽¹⁾.

Quando se desejam grandes reduções por conformação a frio lança-

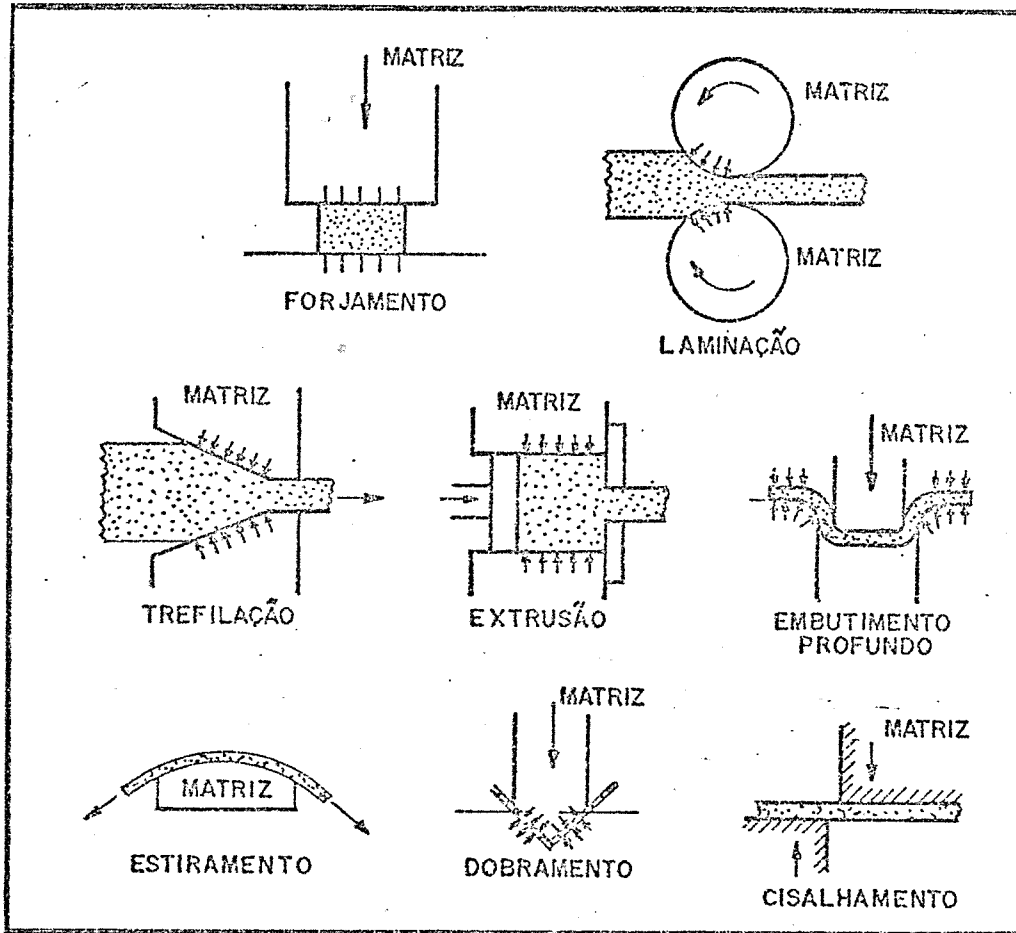


Figura I.1 - Processos de conformação mecânica (1)

-se mão de operações de trabalho a frio conduzidas em diversas e etapas, realizando-se recozimentos intermediários com o intuito de amolecer o material encruado e restituir-lhe a ductilidade.

Observe-se que a cada recozimento o material deve estar em condições de prosseguir as deformações a frio⁽¹⁾. } Deve significar?

Embora a necessidade de recozer aumente o custo da conformação mecânica a frio, estas etapas intermediárias podem ser indispensáveis. É pois de grande interesse que se obtenham opções para estas etapas intermediárias no sentido de serem realizadas a frio.

I.1.4 - Controle de propriedades mecânicas dos materiais

O controle de propriedades mecânicas dos materiais por conformação mecânica possui grande importância. Isto pode ser ilustrado para o caso em que se utilizando operações de laminação ou forjamento elimina-se defeitos tais como bolhas e porosidades presentes em lingotes melhorando assim a ductilidade e a tenacidade à fratura. Além disso muitos produtos guardam a melhoria de suas propriedades no controle do encruamento durante o processo ou na taxa de deformação aplicada⁽¹⁾.

I.2 - Análise da Deformação em Operações de Conformação Mecânica que Apresentam Estiramento e Deformação Cíclica

Um dos processos de conformação mecânica onde há possibilidade de ter-se deformação por estiramento conjuntamente com deformação cíclica é a operação de trefilação.

Como foi visto a trefilação é um processo de conformação mecânica a frio do tipo compressão indireta⁽¹⁾ que consiste basicamente em obrigar a passagem do material por uma matriz cônica caracterizada por um semi-ângulo (α), através de um processo de tração realizado sobre o material no lado da saída da matriz. Cada operação de trefilação denomina-se passe de trefilação.

Define-se a redução de área (r) num passe de trefilação como sendo a razão entre a diferença das áreas antes e após a trefilação e a área da seção antes da trefilação. Como o volume se conserva,

a uma dada variação da área durante o passe de trefilação corresponde uma variação correspondente de comprimento⁽²⁾. A figura I. 2 ilustra o processo de conformação mecânica por trefilação.

A existência da deformação por estiramento pode ser facilmente explicada pela presença da força trativa que age no sentido de deformar o material à tração provocando o estiramento do mesmo.

A deformação cíclica está diretamente ligada ao fato de que o material, principalmente na periferia da seção, é obrigado a percorrer uma trajetória particular, imposta pela presença geométrica da matriz à medida em que o processo tem andamento⁽²⁾.

Se analisarmos um pequeno bloco de material na periferia da seção que está sendo trefilado, podemos observar que tudo se passa como se este bloco sofresse um processo de dobramento/cisalhamento na entrada e saída da matriz de tal forma que o dobramento/cisalhamento na saída é realizado no sentido oposto ao dobramento/cisalhamento na entrada, caracterizando assim uma certa deformação cíclica, uma vez que a direção e sentido do movimento da operação de conformação mecânica em questão se mantêm antes e depois da passagem pela matriz.

Evidentemente este efeito de dobramento/cisalhamento será mais relevante na periferia da seção diminuindo sua influência à medida que se aproxima o centro⁽²⁾.

A figura I.3 mostra esquematicamente os conceitos expostos acima considerando as várias posições assumidas por estes blocos durante a operação de trefilação.

I.3 - Conformação por Deformação Cíclica e Conformação por Deformação Monotônica (tração pura).

Na operação de conformação mecânica por trefilação considerando-se um pequeno bloco do material situado na periferia da seção, devido ao fato deste bloco ser obrigado a percorrer uma trajetória particular imposta pela presença da matriz e esta influência geométrica sob a trajetória do bloco ser cada vez menor à medida que aproximamos do centro da seção, haverá uma maior deformação na pe

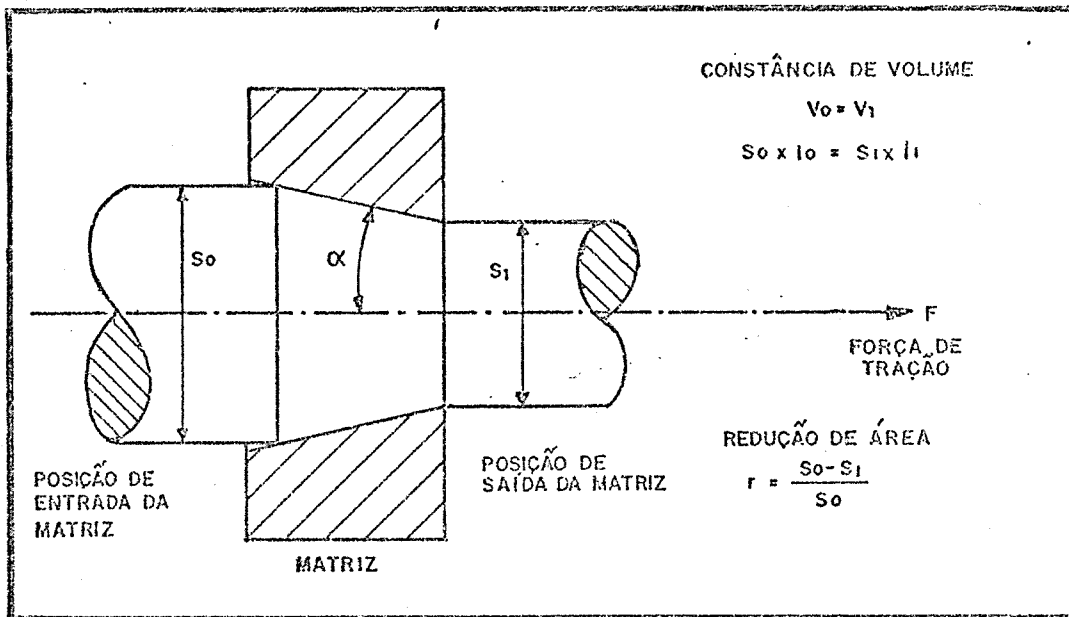


Figura I . 2 - Material sendo conformado num passe de trefilação.

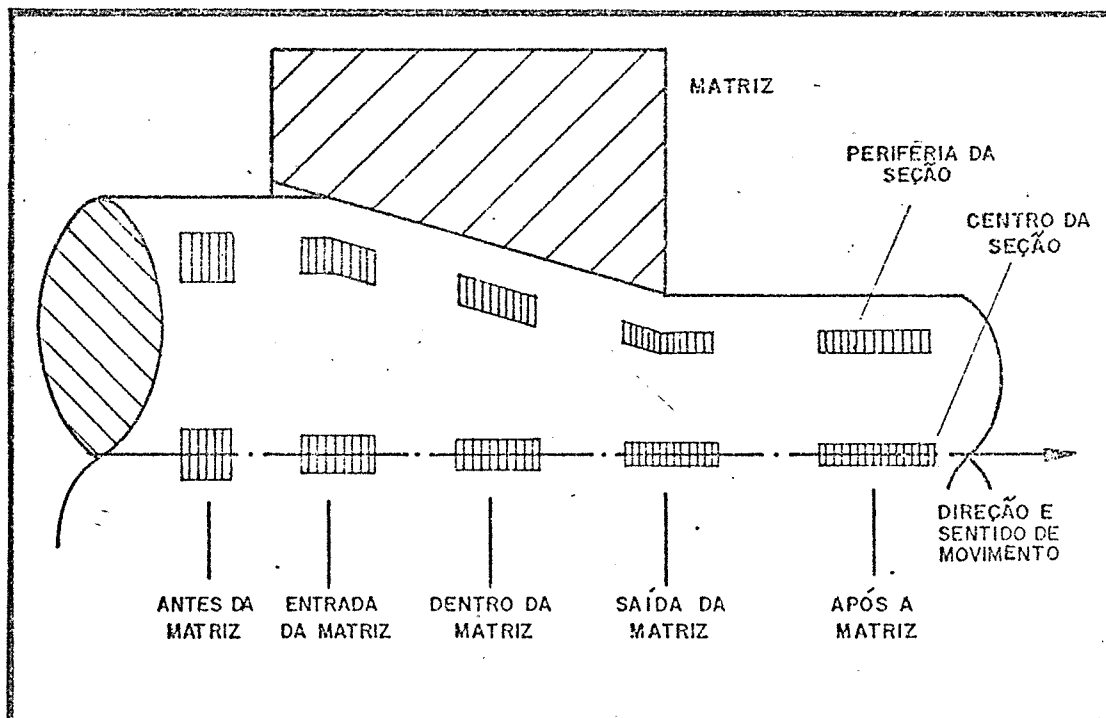


Figura I . 3 - Várias posições dos blocos da periferia e do centro da seção durante um passe de trefilação.

riferia da seção do que no centro da mesma, ou seja, será obtida uma deformação não homogênea⁽²⁾.

De qualquer forma tomando-se um valor médio de deformação ($\bar{\epsilon}$) para a seção considerada, este será superior ao valor de deformação conseguido numa tração pura (ϵ) em condições equivalentes para um passe de trefilação. A figura I.4 ilustra esquematicamente os fatos acima citados.

Não estava claro o que é a deformação média } Bem nice.

Outro fato importante é que quando consideram-se menores reduções de área em um passe de trefilação, a relação entre a deformação média calculada para a trefilação e a deformação obtida na tração pura cresce, ou seja, a relação ($\bar{\epsilon}/\epsilon$) cresce⁽²⁾.

Desta forma se é realizada uma série de passes leves (menor redução de área por passe) de tal forma que a redução de área seja igual a correspondente redução de área em um só passe pesado (maior redução de área por passe), é de se esperar que a sequência de passes leves apresentará uma relação ($\bar{\epsilon}/\epsilon$) final maior do que se for aplicado um só passe pesado para um mesmo material.

Associando-se o aumento da relação ($\bar{\epsilon}/\epsilon$) com o aumento da resistência do material⁽³⁾ pelo exposto acima, o material apresentará uma maior resistência pela sequência de passes leves do que pela operação em um só passe pesado. No entanto a realidade tem mostrado que isto nem sempre acontece. A figura I.5 ilustra um caso real⁽³⁾.

O que se pode concluir desta discussão é que na realidade a existência de um processo por conformação cíclica implica em aspectos peculiares que fogem à lógica adotada aos processos de conformação monotônica.

I.4 - Objetivo do Presente Trabalho

O objetivo deste trabalho é a avaliação das propriedades mecânicas de um dado metal submetido ao processo de flexo-tração.

A flexo-tração assemelha-se bastante ao caso de estiramento e deformação cíclica (dobramento/cisalhamento) relacionado à opera -

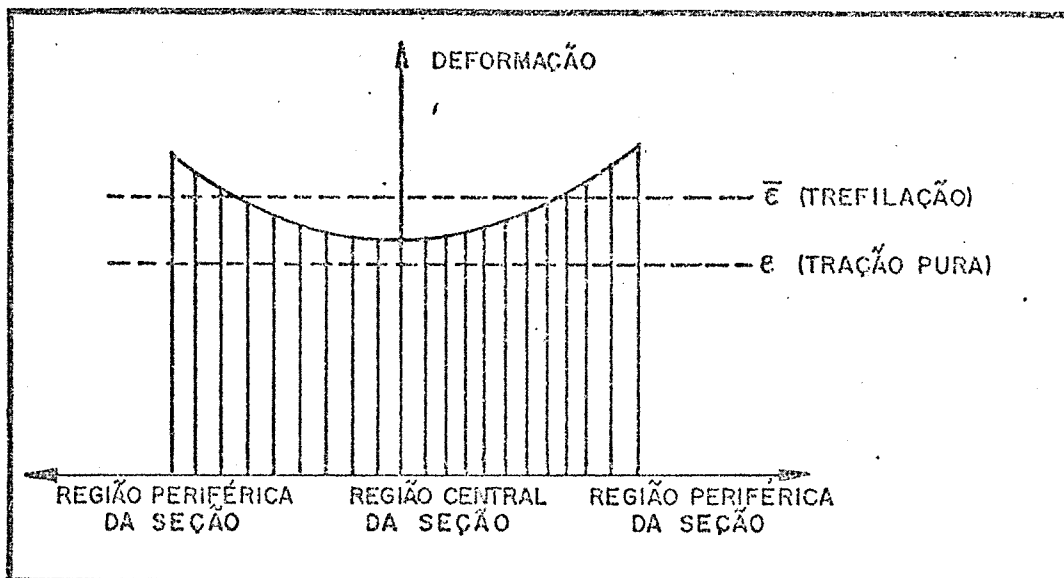


Figura I . 4 - Variação esquemática da deformação em relação a periferia e o centro da seção.

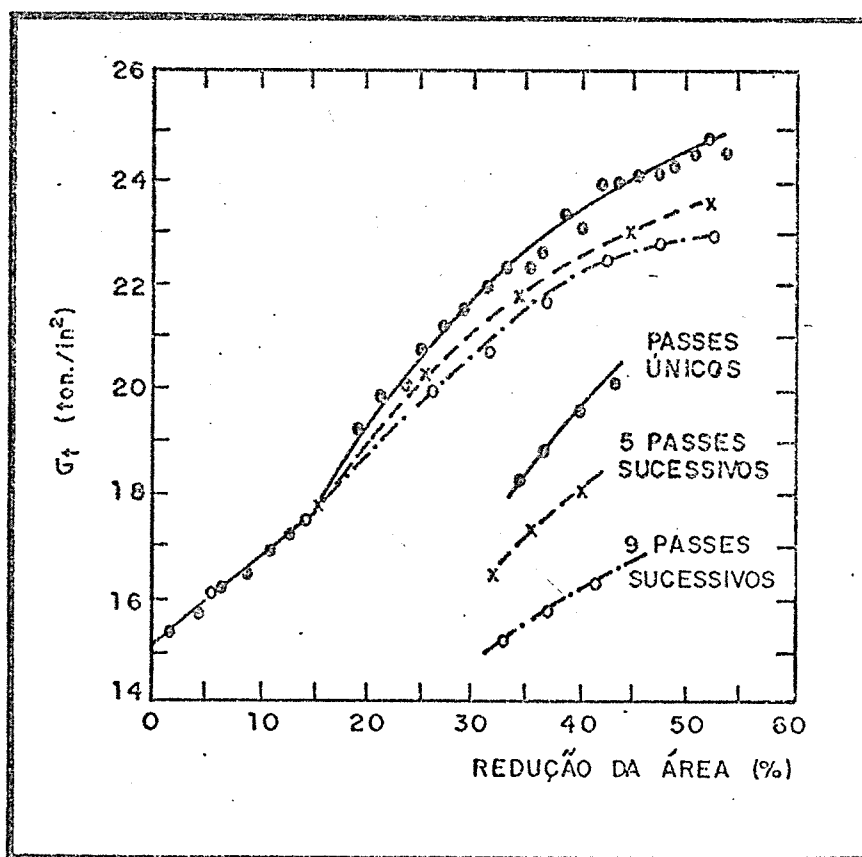


Figura I . 5 - Variação do limite de resistência à tração do cobre com a sequência de passe (3)

ção de trefilação.

Os resultados obtidos nesta avaliação, poderão talvez serem utilizados posteriormente no sentido de se definir novos processos, com o uso da deformação cíclica, objetivando-se obter propriedades mecânicas definidas do material.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente serão relatadas informações básicas sobre o comportamento dos metais e ligas sob deformação plástica cíclica^(4,5) e posteriormente os aspectos gerais de deformação de metais submetidos ao processo de dobramento^(1,6,7).

II.1 - Comportamento dos Metais e Ligas sob Deformação Plástica Cíclica

II.1.1 - Noções básicas

II.1.1.1 - Deformação elástica - Deformação plástica

A deformação elástica é a deformação na qual a amostra readquire sua forma e tamanho original após retirada dos esforços.

A deformação plástica é a deformação na qual a amostra não mais readquire sua forma e tamanho originais após retirada dos esforços.

A parte da deformação total relativa à deformação elástica será sempre recuperada pela amostra após retirada das cargas.

II.1.1.2 - Deformação cíclica - Deformação monotônica

A deformação cíclica é decorrente da aplicação alternada de esforços de natureza oposta, objetivando criar alternadamente deformações de direções contrárias.

A deformação monotônica é decorrente da aplicação contínua crescente de um esforço de mesma natureza objetivando criar deformações em uma única direção.

II.1.1.3 - Ciclo de deformação - Amplitude de deformação^(4,5)

O ciclo de deformação pode ser encarado como um programa de tensão-deformação, realizado quando se promove uma deformação cíclica. Um ciclo de deformação é representado pelo carregamento num dado sentido, seguido do descarregamento e carregamento no sentido oposto ao primeiro e após o descarregamento final. Os valores

extremos de tensão e deformação correspondem aos picos de tensão e picos de deformação. Observe-se que a aplicação de 1/4 do ciclo de deformação corresponde a ter-se uma deformação monotônica.

A amplitude de deformação pode ser tomada como sendo a variação completa da deformação total num dado ciclo de deformação. Evidentemente pode-se tomar também, apenas a variação completa da deformação plástica indicando assim a amplitude de deformação plástica.

A figura II.1 mostra graficamente os conceitos acima.

II.1.1.4 - Deformação cíclica acumulada⁽⁵⁾

A deformação cíclica acumulada pode ser dada pelo somatório das amplitudes de deformação a cada ciclo de deformação.

Pode-se trabalhar com amplitude de deformação total ou amplitude de deformação plástica.

II.1.1.5 - Ciclo de deformação transitório - Ciclo de deformação estabilizado. Valor de tensão a cada ciclo.

O ciclo de deformação transitório é caracterizado por ser diferente do ciclo de deformação anterior e posterior a este.

O ciclo de deformação estabilizado é caracterizado por ser igual ao ciclo de deformação anterior e posterior a este.

O valor da tensão a cada ciclo pode ser calculado a partir da variação entre o último pico de tensão do ciclo anterior e o primeiro pico de tensão do ciclo presente (modo 1)⁽⁴⁾.

No caso do primeiro ciclo de deformação como não há pico de tensão do ciclo anterior, multiplica-se o valor do primeiro pico de tensão do ciclo de deformação por dois. Outro modo é considerar o próprio valor do pico de tensão a cada ciclo de deformação (modo 2)⁽⁵⁾. Neste caso há possibilidade de usar este modo tanto para ciclos de deformação transitório como estabilizados. A figura II.2 mostra esquematicamente, através de algumas das possibilidades, os conceitos acima.

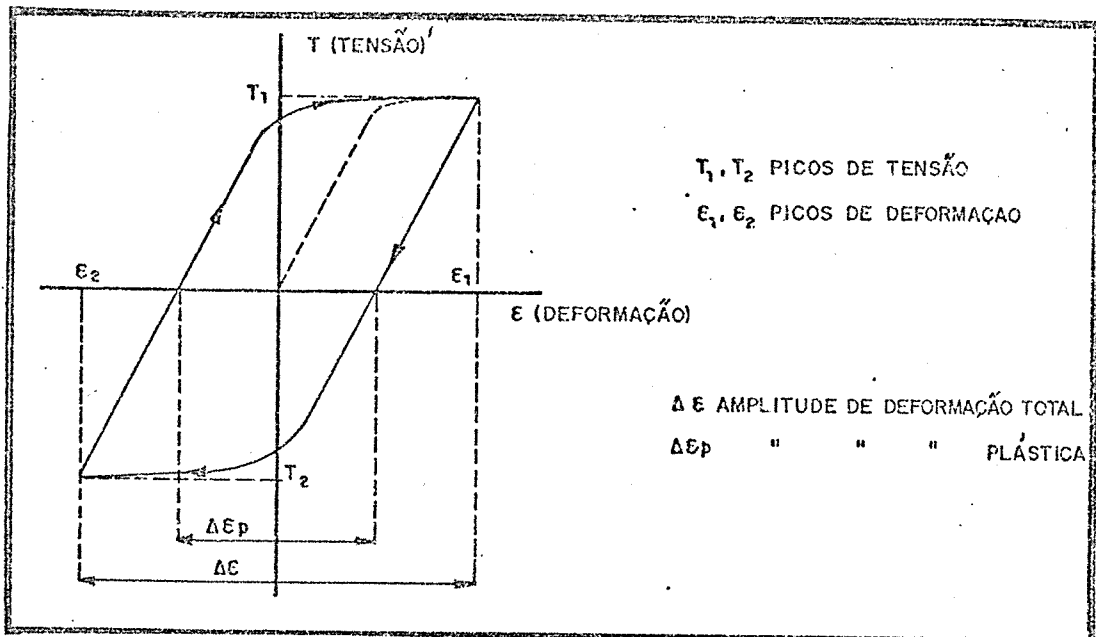


Figura II.1 - Ciclo de deformação esquemático.

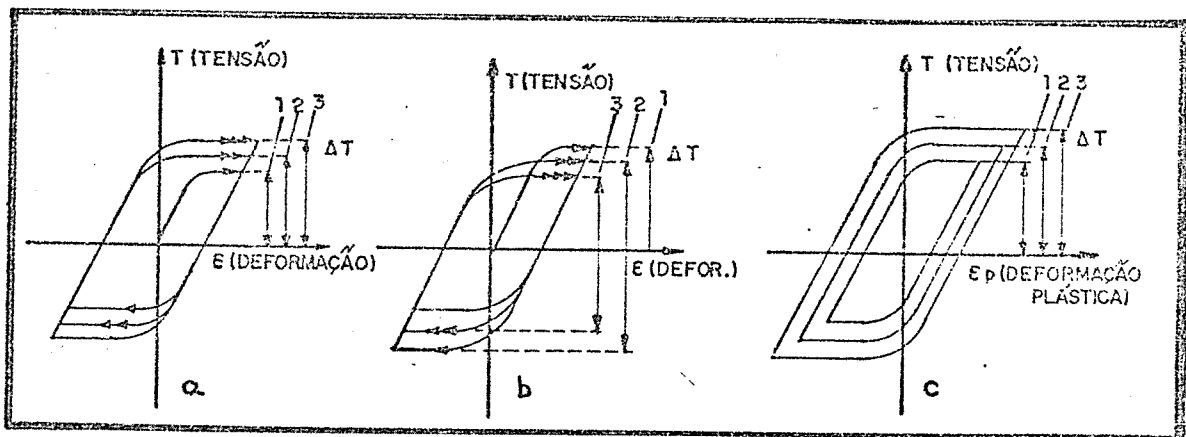


Figura II.2 - Medida da tensão a cada ciclo em alguns tipos de ciclos de deformação

- ciclos de deformação transitório esquemático - valor de tensão a cada ciclo modo 2
- ciclos de deformação transitório esquemático - valor de tensão a cada ciclo modo 1
- ciclos de deformação estabilizado esquemático - valor de tensão a cada ciclo modo 2.

II.1.1.6 - Material recozido - Material prē-deformado - Material como recebido

O material é dito recozido quando a amostra passa por um processo de retirada de praticamente toda a influência de tratamentos ^{mecânicos} anteriormente impressos no material. X

O material é dito prē-deformado quando a amostra passa por um processo, antes da ciclagem, em que apenas apresenta uma prē-deformação a frio de valor conhecido.

O material é dito como recebido quando for testado sem que tenha sido empregado qualquer meio para diminuir alguma influência dos tratamentos aplicados para a sua obtenção.

II.1.2 - Experiências realizadas

II.1.2.1 - Introdução

Tem sido feitas experiências com metais e ligas sob deformações cíclica de tração-compressão, considerando vários metais tais como: alumínio, cobre, aço de baixo carbono, aço inoxidável etc. As amostras tem sido utilizadas em vários estados: recozidos, prē-deformados monotonicamente em vários graus de deformação ou mesmo como recebidas, utilizando-se ainda várias condições de temperatura ^(4,5).

II.1.2.2 - Obtenção de curvas de tensão x número de ciclos ou curvas tensão x deformação cíclica acumulada

Para cada condição imposta de: material, estado em que se encontra e temperatura de teste, procura-se avaliar os valores da tensão a cada ciclo de deformação, tomando-se várias amplitudes de deformação. Desta forma traçam-se curvas tensão x número de ciclos ⁽⁴⁾ ou curvas tensão x deformação cíclica acumulada ⁽⁵⁾. A figura II.3 mostra esquematicamente a obtenção destas curvas e figura II.4a,b e figura II.5 indicam alguns exemplos reais para alguns materiais.

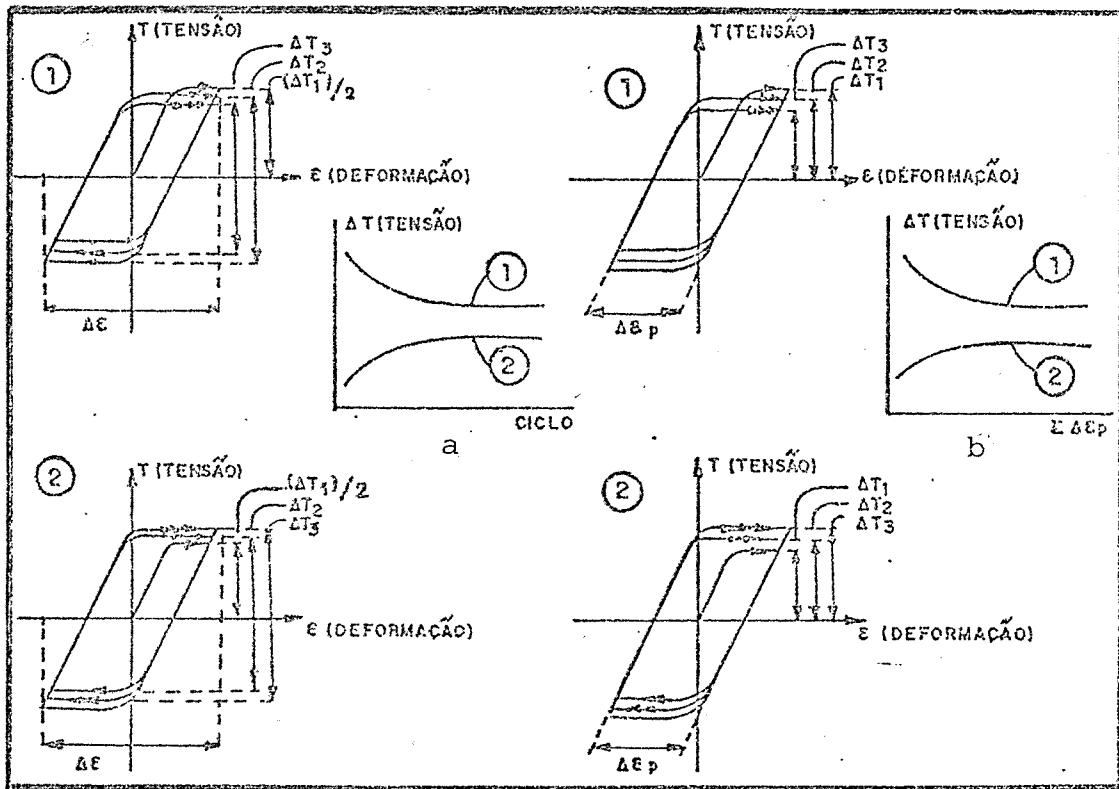


Figura II.3 - Procedimento para obtenção de curvas tensão x nº de ciclos ou curvas tensão x deformação cíclica acumulada.

(4)

a) curvas tensão x nº de ciclos (esquemática)

b) curvas tensão x deformação cíclica acumulada ou curvas tensão x deformação cíclica de endurecimento (esquemática) (5)

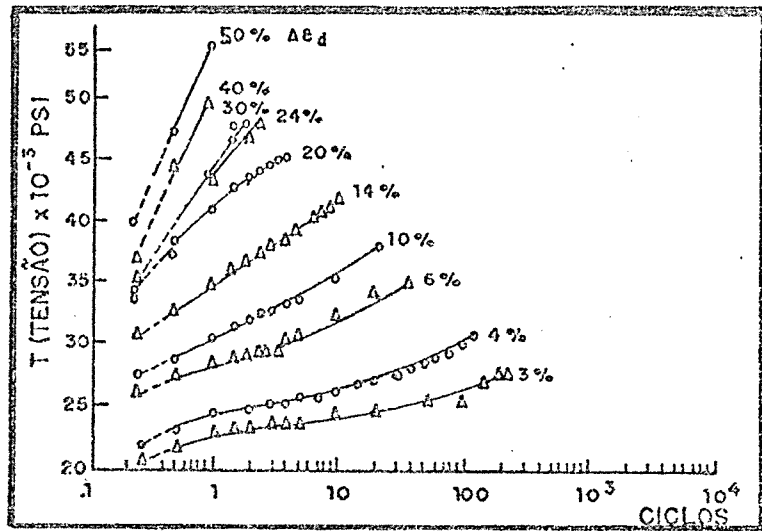


Figura II.4.a - Curvas tensão x nº de ciclos para o alumínio 2 S recozido para várias amplitudes de deformação (4)

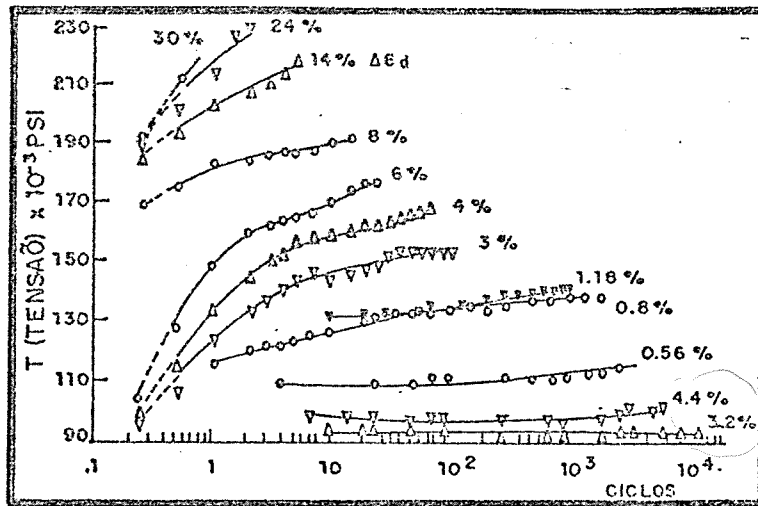


Figura II.4.b - Curvas tensão x nº de ciclos para o aço baixo carbono 1018 recozido para várias amplitudes de deformação (4)

200 0,99 2 0,32%?

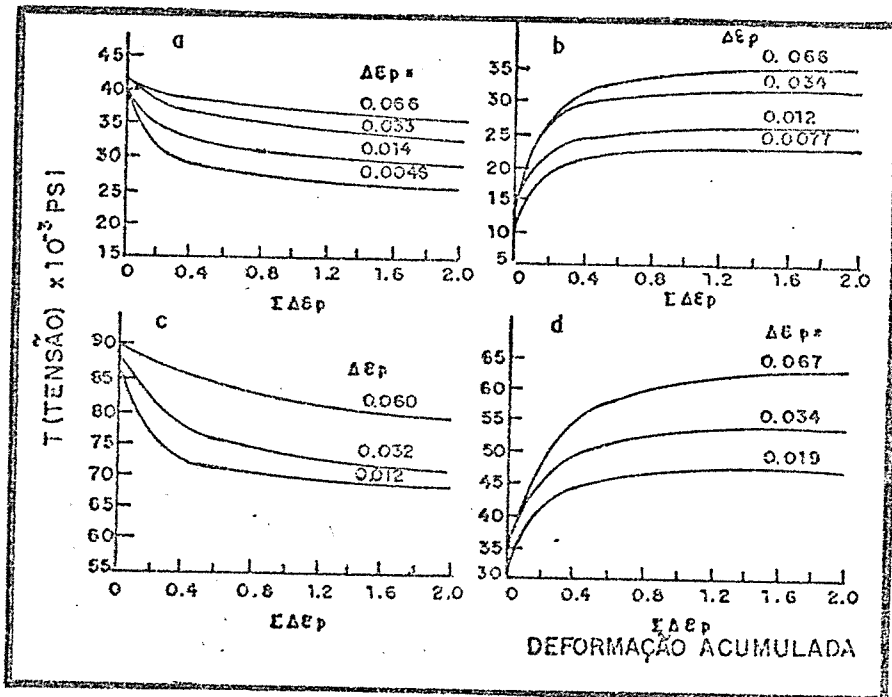


Figura II.5 - Curvas tensão x deformação acumulada para várias amplitudes de deformação (5) nas seguintes situações:

- Cobre pré-deformado monotonicamente de 23% em diâmetro;
- Cobre recozido;
- Liga de cobre 7,5% alumínio pré-deformado monotonicamente de 5% em diâmetro;
- Liga de cobre 7,5% alumínio recozido.

Obs.: Estas curvas são também chamadas curvas tensão x deformação cíclica de endurecimento e amolecimento.

II.1.2.3 - Comparação da deformação cíclica e deformação monotônica

Os dados e curvas tensão x deformação cíclica obtidas podem ser usadas como base para a construção de curvas tensão x deformação monotônica como indicado esquematicamente na figura II.6.a⁽⁴⁾. A figura II.6.b ilustra a possibilidade de comparar curvas tensão x deformação cíclica extraídas a partir dos ciclos de deformação estabilizados e curvas tensão x deformação monotônica⁽⁵⁾.

II.1.3 - Metais e ligas sob deformação cíclica

II.1.3.1 - Influência dos parâmetros estado do material e amplitude de de deformação

Pode-se destacar que basicamente para materiais inicialmente recozidos haverá um endurecimento sob deformação cíclica, tanto mais significativo quanto maior a amplitude de deformação. Por outro lado materiais pré-deformados monotonicamente apresentam um amolecimento que será mais acentuado quanto menor a amplitude de deformação^(4,5). A figura II.7.a,b ilustra alguns casos reais.

Em particular pode-se avaliar a influência da pré-deformação analisando que o efeito do amolecimento se dará desde que a amplitude de de deformação imposta esteja abaixo do valor da pré-deformação considerada⁽⁴⁾ como indica a figura II.8 a .

Pode-se considerar o caso onde se tenha aplicado uma pré-deformação monotônica oposta à subsequente deformação cíclica, por exemplo, deformando-se a tração e ciclando-se inicialmente por compressão. Aplicando-se uma amplitude de deformação cíclica maior que a pré deformação, o material sofrerá inicialmente um amolecimento como se desfazendo este pré-encruamento e posteriormente apresentam um endurecimento⁽⁴⁾ a figura II.8.b,c indica este fato.

II.1.3.2 - Influência do parâmetro temperatura.

Em se tratando da temperatura de teste pode-se dizer que evidentemente os valores de tensão encontrados serão sensíveis a este pa-

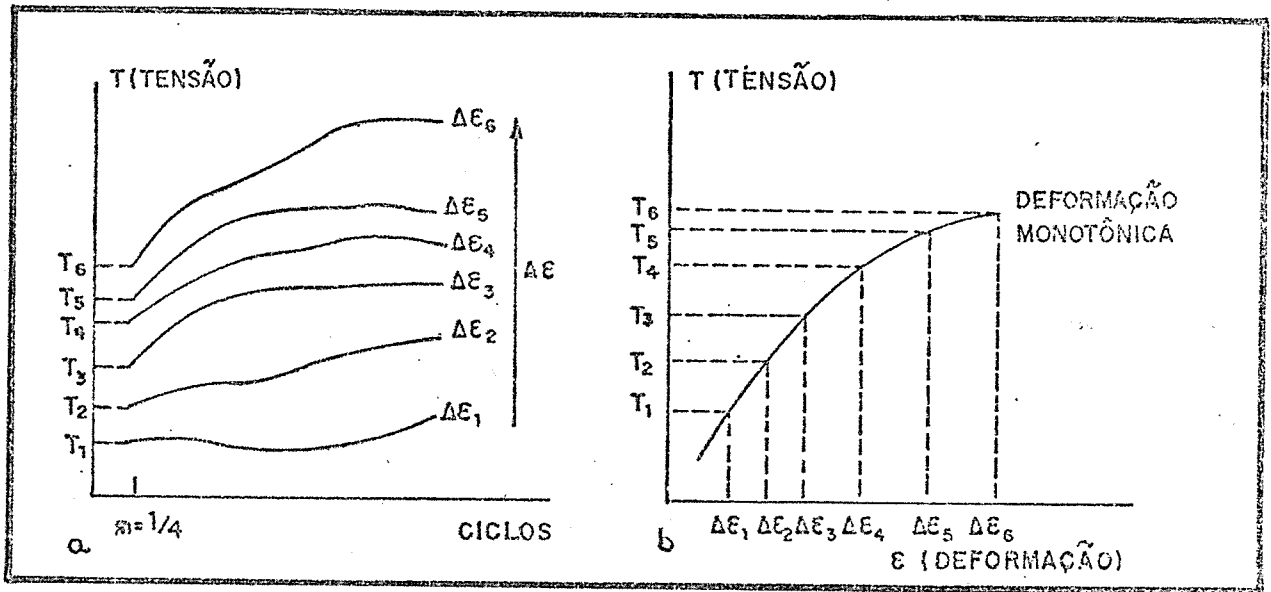


Figura II.6.a - Procedimento para obtenção da curva tensão x deformação monotônica através de curva tensão x número de ciclos para várias amplitudes de deformação total.

- a) Curvas esquemáticas tensão x nº de ciclos para várias amplitudes de deformação total (4)
- b) Curva tensão x deformação monotônica retirada a partir de 1/4 do ciclo.

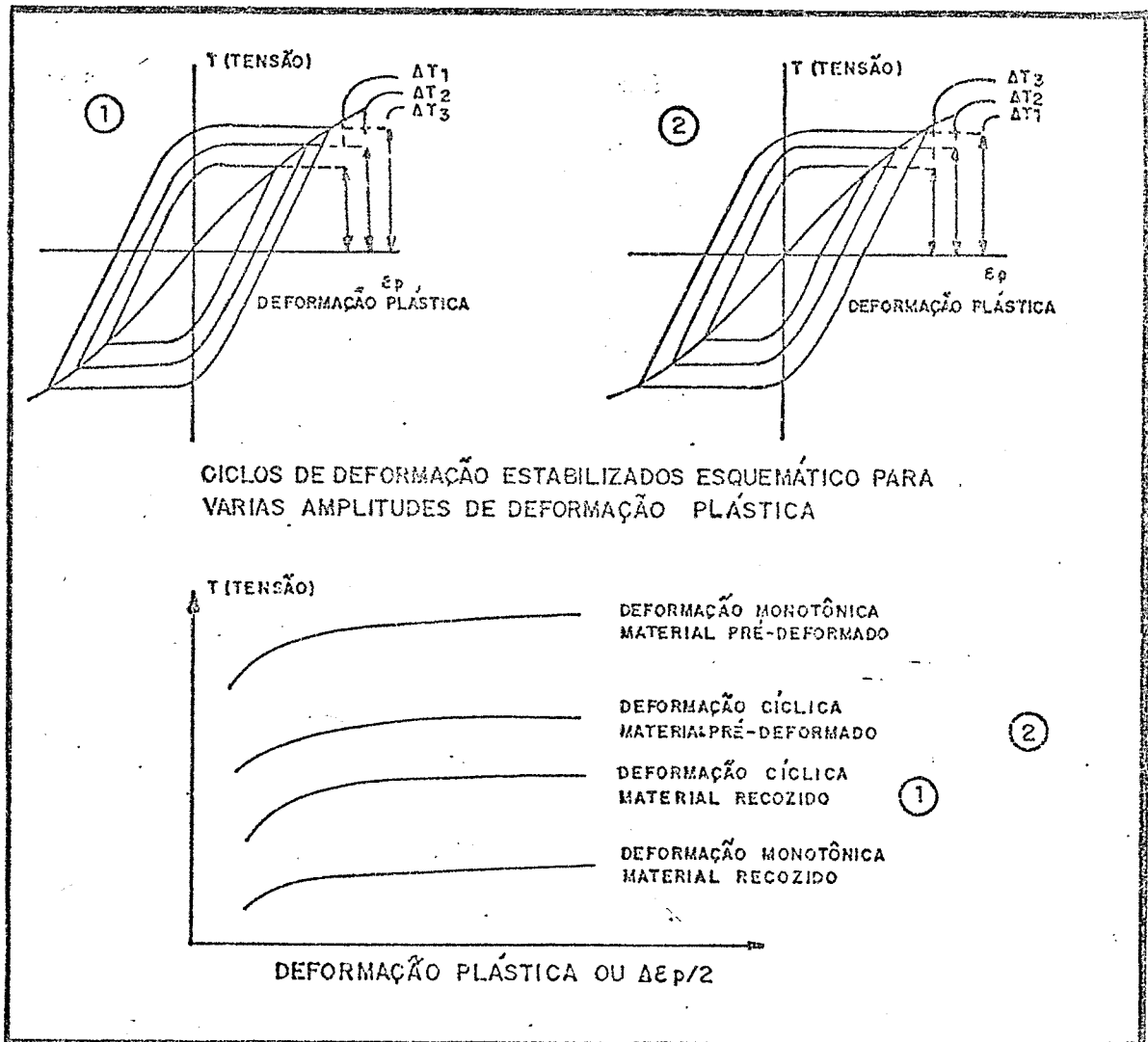


Figura II.6.b - Procedimento para comparação entre a curva tensão x deformação cíclica ⁽⁵⁾ e curva tensão x deformação monotônica (esquemática).

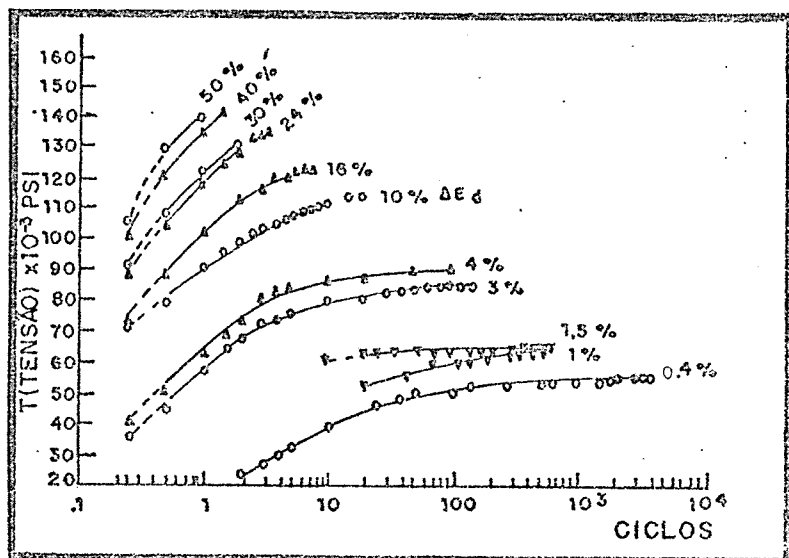


Figura II.7.a - Curvas tensão x número de ciclos para várias amplitudes de deformação (4)

material: Cobre OFHC recozido

Observe-se que o aumento da amplitude de deformação total indica um endurecimento.

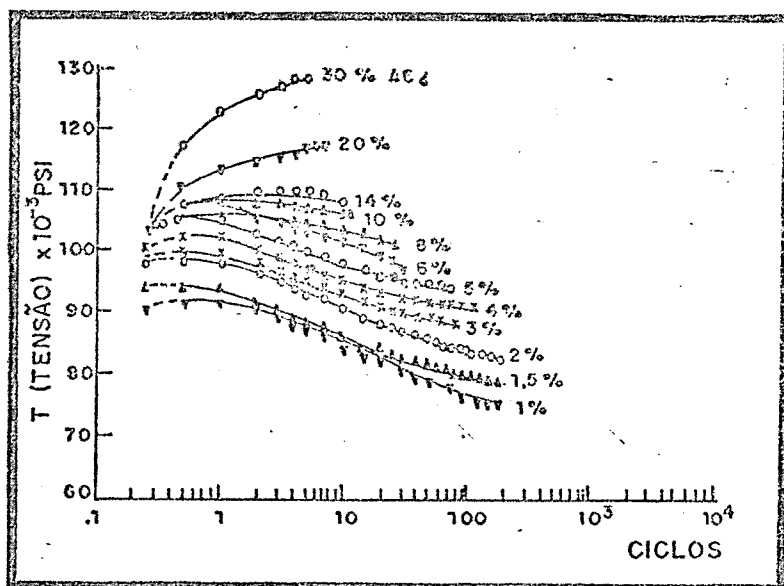


Figura II.7.b - Curvas tensão x número de ciclos para várias amplitudes de deformação (4)

material: Cobre OFHC pré-deformado monotonicamente de 33 1/3% por compressão

Observe-se que a diminuição da amplitude de deformação total indica um amolecimento.

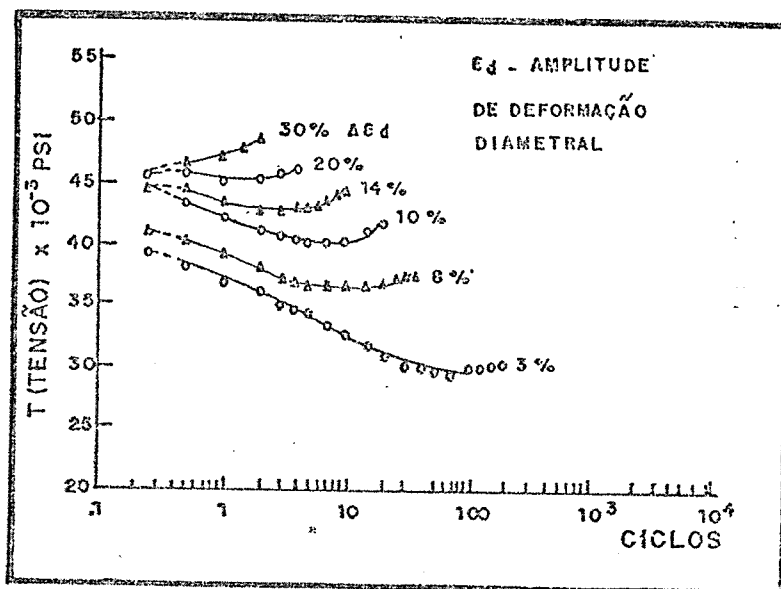


Figura II.8.a - Curvas tensão x número de ciclos para várias amplitudes de deformação diametral (4)
material: Alumínio 2S pré-deformado monotonicamente por compressão de 20%.

Observe-se que a medida que se impoem uma amplitude de deformação maior que a pré-deformação monotônica passa-se de uma tendência de amolecimento para tendência de endurecimento.

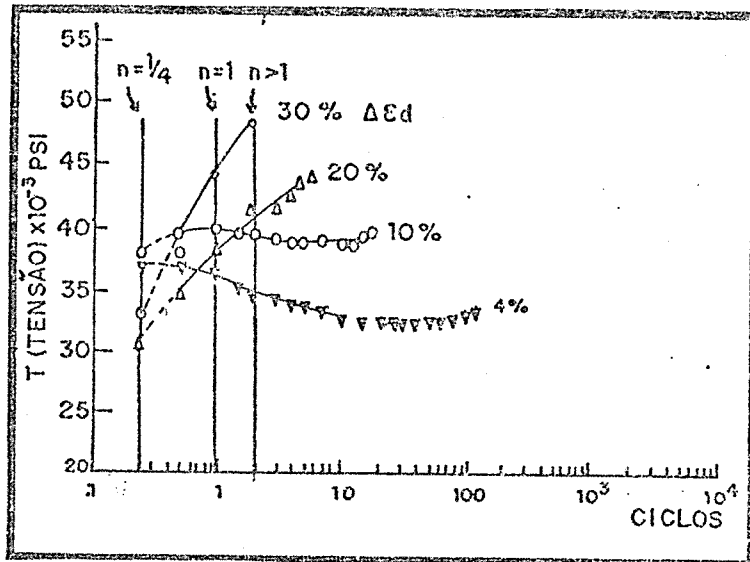


Figura II.8.b - Curvas tensão x de ciclos para várias amplitudes de deformação. Material: Alumínio 2S pré-deformado monotonicamente de 10% em tração e ciclado subsequentemente por compressão inicial (4)

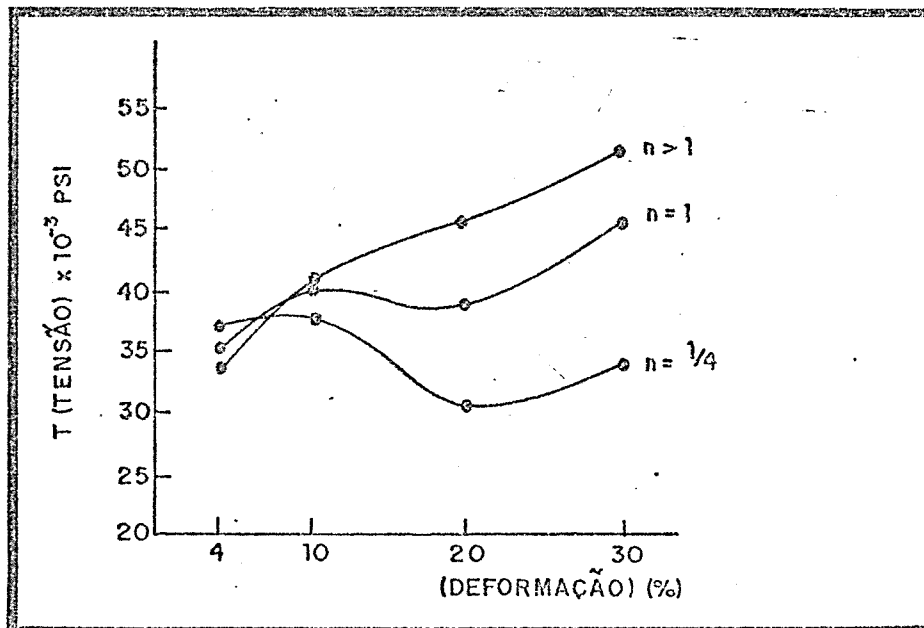


Figura II.8.c - Curva esquemática tensão x deformação mostrando o comportamento do alumínio 2S pré-deformado monotonicamente de 10% em tração e ciclado subsequentemente por compressão inicial ao longo do ciclo ; figura retirada de dados da figura II-8.b

râmetro, ou seja para temperaturas mais baixas os valores das tensões serão mais altas e para temperaturas mais altas os valores das tensões serão mais baixas⁽⁵⁾ (figura II.9.a,b). Além disso, se se consideramos metais com alta energia de falha de empilhamento que foram pré-deformados de grande quantidade a uma temperatura T_1 e subsequentemente ciclados a uma temperatura $T_2 < T_1$, haverá a possibilidade de endurecimento mesmo considerando amplitudes de deformação cíclica abaixo da pré-deformação monotônica⁽⁵⁾. A figura II.10 demonstra este fato.

II.1.3.3 - Influência dos parâmetros: regime transitório e regime de saturação

É evidente destacar que este comportamento de amolecimento ou endurecimento sob deformação não constitui um fenômeno independente do tempo, muito antes, constitui um comportamento transitório que em geral se completa em alguns ciclos, ou seja a taxa de amolecimento ou endurecimento vai diminuindo^(4,5).

Em consequência a esta fase transitória se instala uma fase de saturação onde as características do metal tendem para um valor fixo⁽⁵⁾. É a deformação cíclica estabilizada.

É bastante importante observar que se considerar-se um dado material, partindo-se de estados diferentes tais como recozido e pré-deformado monotonicamente, e aplicando-se uma mesma deformação plástica cíclica nos dois casos, se poderá atingir o mesmo estado de saturação final^(4,5).

Tal coincidência de estados finais de saturação acontece nos metais com alta energia de falha de empilhamento, indicando que estes estados são atingidos independentemente da história anterior. Já nos metais com baixa energia de falha de empilhamento não se atingirá esta coincidência uma vez que estes estados de saturação final são funções das histórias anteriores^(4,5).

A figura II.11 indica esquematicamente estes fatos e as figuras II.12, a,b,c,d,e,f mostra casos concretos.

Deve-se ainda ressaltar que boa parte destes dados foi obtida, em

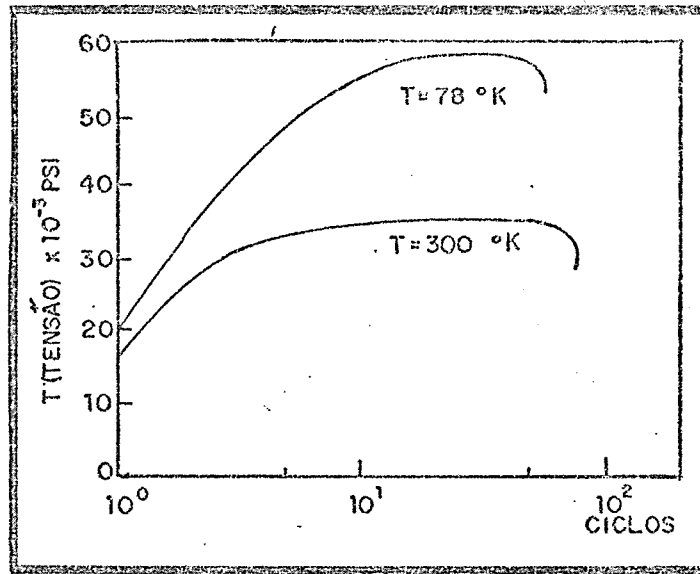


Figura II.9.a - Efeito da temperatura na curva de endurecimento cíclico para o cobre ⁽⁵⁾. Amplitude de deformação plástica $\Delta\epsilon_p = 0,063$

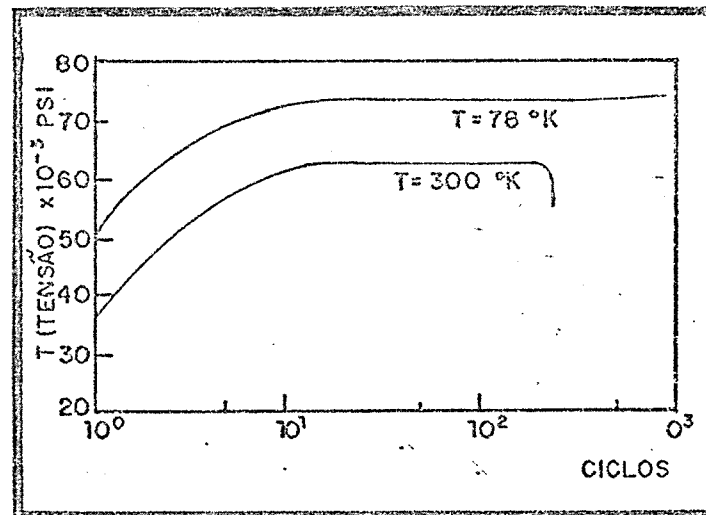


Figura II.9.b - Efeito de temperatura na curva de endurecimento cíclico para o cobre - 7,5% alumina ⁽⁵⁾. Amplitude de deformação plástica $\Delta\epsilon_p = 0,066$.

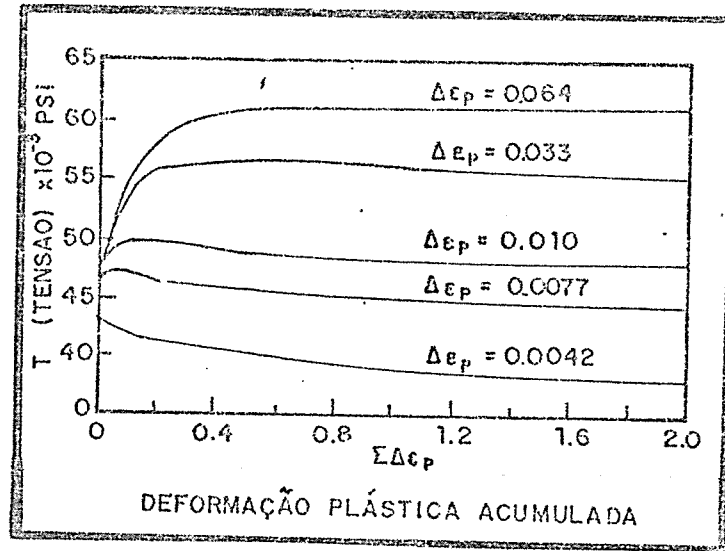


Figura II.10 - Curvas tensão x deformação plástica acumulada para o cobre pré-deformado monotonicamente de 5% a temperatura ambiente e posteriormente ciclado a temperatura inferior a 78°K (5).

Observe-se que mesmo a pequenas amplitudes de deformação plástica existe a tendência do endurecimento.

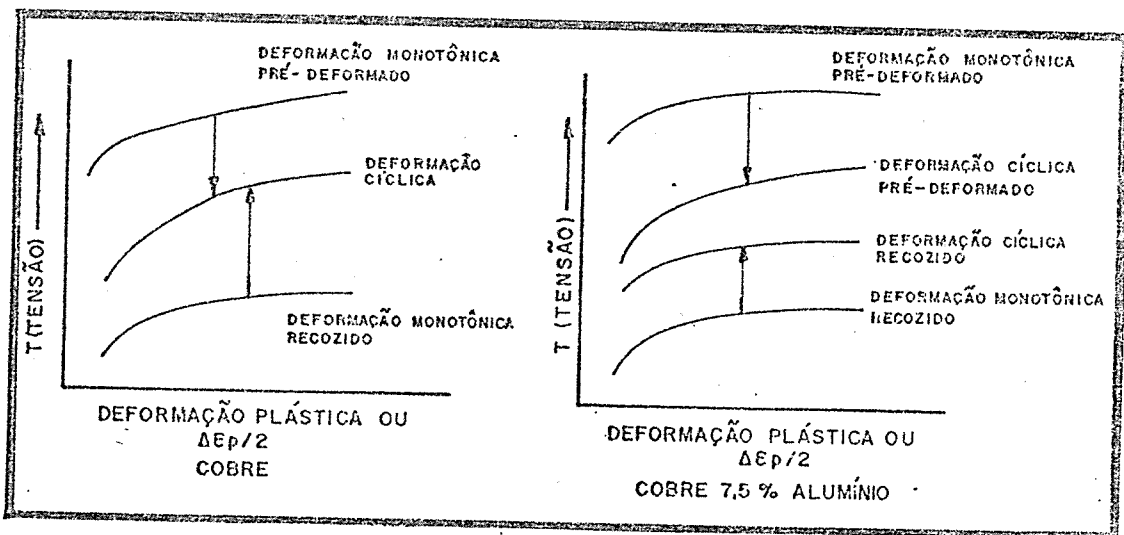


Figura II.11 - Curvas tensão x deformação esquemática para situação cíclica e monotônica, indicando os estados finais de saturação após ciclagem, partindo-se da condição pré-deformada ou recozido para o Cobre e Cobre 7,5% Alumínio (5).

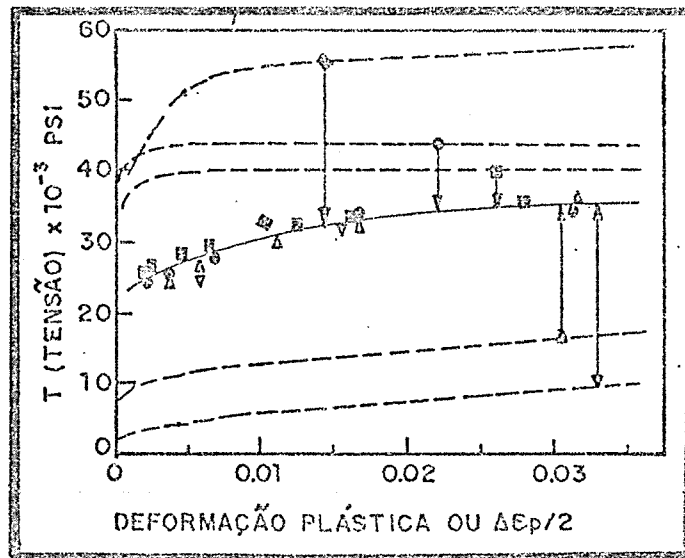


Figura II.12.a - Curvas tensão x deformação para situação cíclica e monotônica do cobre a 300K (temperatura ambiente) ⁽⁵⁾
 (—) cíclico (---) monotônico

Condições iniciais:

- △ Reozido 1 hora 450°C
- ▽ Reozido 1 hora 740°C
- ▲ Reozido 24 horas 450°C
- 5% de redução diametral
- 23% de redução diametral
- ◆ Reozido (△) então pré-deformado 50% em tração a 78°K

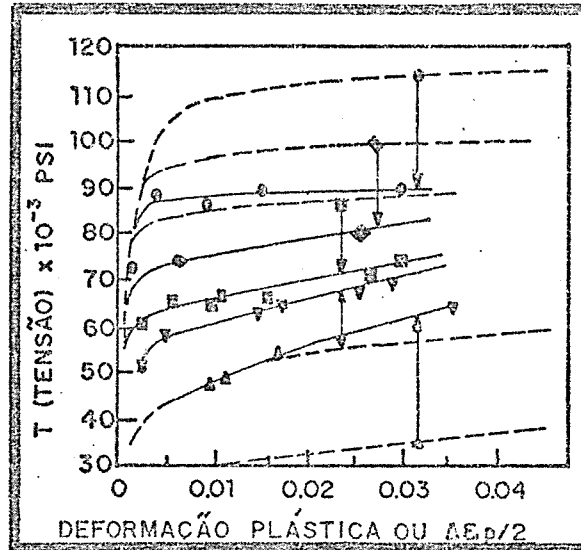


Figura II.12.b - Curva tensão x deformação cíclica e monotônica do cobre 7,5% alumínio a 300K (temperatura ambiente) (5)

(—) cíclico (---) monotônico

Condições iniciais:

- ▲ Reozido 24 horas 550°C
- ▼ Reozido 1 hora 500°C
- 5% de redução diametral
- ◆ 15% de redução diametral
- 23% de redução diametral

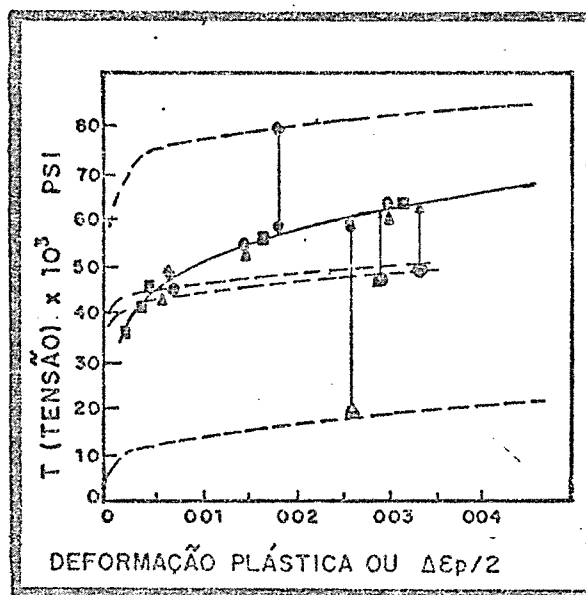


Figura II.12.c - Curva tensão x deformação cíclica e monotônica do cobre a 78K (5)

(—) cíclico (---) monotônico

Condições iniciais:

- ▲ Recozido 1 hora 450°C
- 5% redução diametral
- 23% redução diametral
- ◆ Pré-deformação 50% em tração a 78K

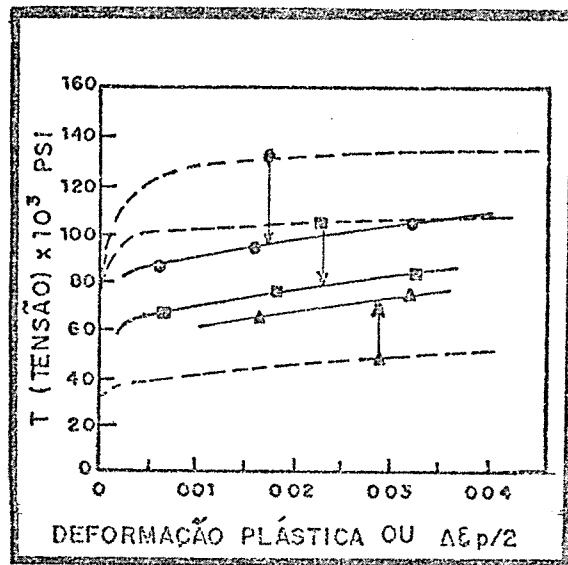


Figura II.12.d - Curva tensão x deformação cíclica e monotônica do cobre 7,5% alumínio a 78K (5)
 (—) cíclico (---) monotônico

Condições iniciais:

- ▲ Reozido 24 horas 550^oC
- 5% redução diametral
- 23% redução diametral

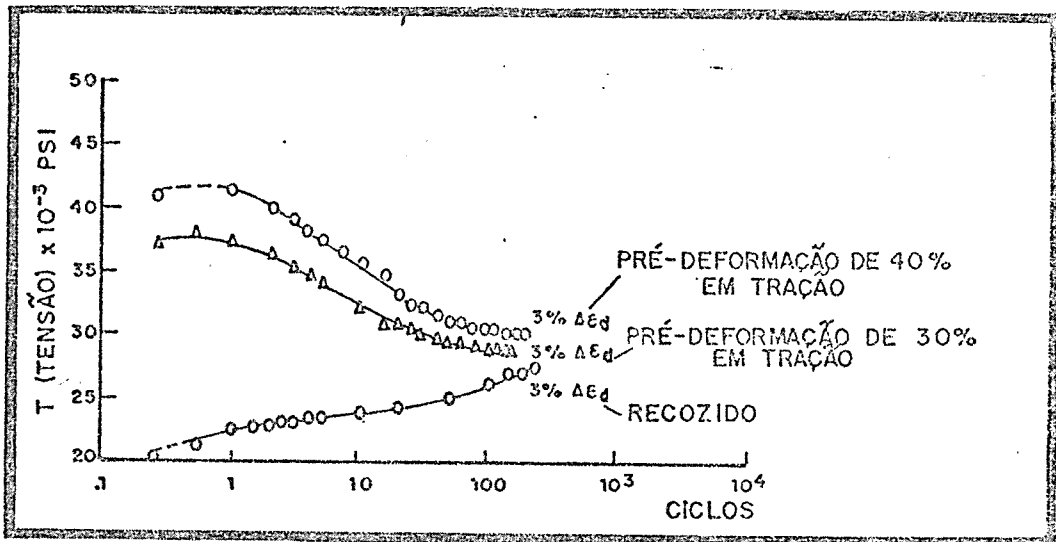


Figura II.12.e - Curva tensão x nº de ciclos para o Alumínio 2S ciclado com a mesma amplitude de deformação ϵ_d total (3%) partindo-se de três diferentes condições iniciais indicando a tendência de se ter o mesmo estado de saturação final (4)

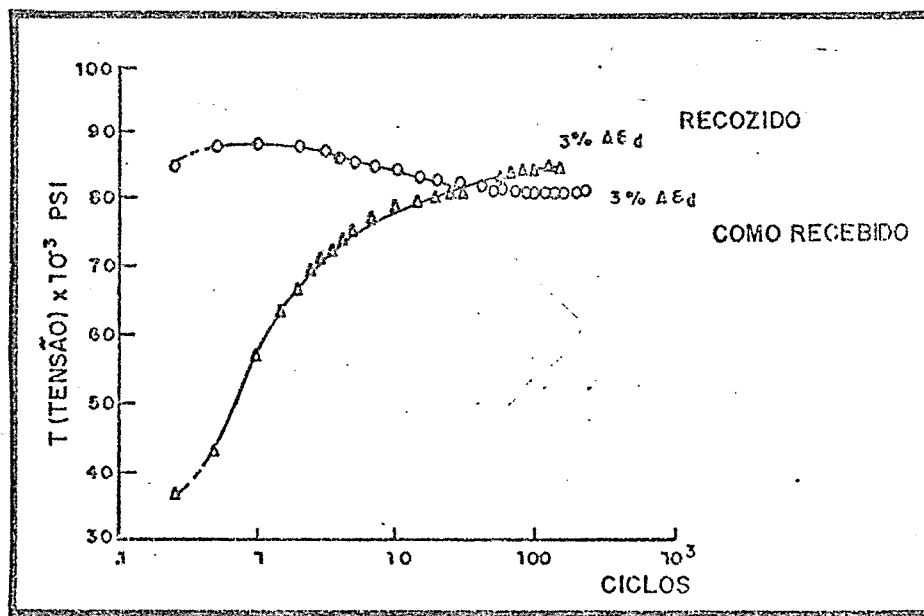


Figura II.12.f - Curva tensão x nº de ciclos para o cobre OFHC ciclado com a mesma amplitude de deformação ϵ_d total partindo-se de diferentes condições iniciais e indicando a tendência de se ter o mesmo estado de saturação final (4).

experiências que visaram a melhoria do comportamento de materiais à fadiga. Assim o comportamento do material só poderá ser analisado até que haja fratura por fadiga.

II.2 -- Aspectos Gerais de Deformação de Metais Submetidos ao Processo de Dobramento

II.2.1 - Noções básicas

II.2.1.1 - Cutelo - Ângulo de abraçamento

O cutelo pode ser definido como um sólido de revolução utilizado como matriz para o processo de dobramento. É caracterizado por um raio de curvatura ou dobramento (R) definido na superfície concava ou interna de dobramento. O ângulo de abraçamento (α) corresponde ao ângulo de contato entre a amostra e o cutelo.

II.2.1.2 - Deformação radial - Deformação circunferencial - Deformação transversal

A deformação das amostras no processo de dobramento se processa de forma tridimensional embora seja possível em certos casos praticamente eliminar a deformação em alguma direção.

No caso da amostra em forma de fita, fica fácil eleger as três direções de deformação: a deformação radial relacionada a espessura (h), a deformação circunferencial ou longitudinal ligada ao comprimento e a deformação transversal referente a largura da amostra (b).

No caso de amostras com seção redonda (arame) fica caracterizada apenas a direção de deformação referente ao comprimento ou seja a deformação longitudinal⁽⁶⁾.

II.2.1.3 - Região de deformação nula

No processo de dobramento a amostra apresenta uma linha, área ou região (N) onde a deformação é nula.

Tal região se justifica pelo fato de que no dobramento a superfí-

cie interna (côncava) sofre compressão enquanto a superfície externa (convexa) sofre tração, sendo pois, necessário a existência de um ponto de transição entre os esforços contrários⁽¹⁾. A figura II.13 indica estes conceitos.

II.2.1.4 - Passo - Flexa

Apresentando-se um processo de dobramento com a utilização de vários cutelos pode-se considerar o passo (P) como sendo a distância entre centros de dois cutelos consecutivos projetada segundo a direção longitudinal (\vec{B}) da amostra e a flexa (H) como sendo a distância entre a face interna e a face externa da fita dobrada em dois cutelos consecutivos projetada segundo a direção perpendicular à direção longitudinal da amostra⁽⁷⁾. A figura II.14 mostra os parâmetros acima.

II.2.2 - Processo de dobramento

O dobramento é um processo de conformação que basicamente transforma segmentos retos em curvos. Através do dobramento é possível transformar-se chapas, placas arames, etc. em calhas, tambores, a néis etc., Ou seja, é possível obter-se um elemento definido, parte de algum equipamento⁽¹⁾.

Além disso o dobramento pode ser utilizado em outras circunstâncias, como no desempenamento de chapas ou na decapagem mecânica de arames para trefilação. Nestes casos o dobramento apresenta um aspecto cíclico.

II.2.2.1 - Dobramento de chapas finas

De acordo com a teoria de dobramento, considerando-se chapas de pequena espessura, a região neutra se dará na região central da espessura da chapa de forma que a deformação trativa circunferencial na superfície convexa será igual à deformação circunferencial de compressão na superfície côncava.

Uma vez que no dobramento plástico o volume é constante, a existência de deformação circunferencial é acompanhada da deformação radial e transversal. A deformação circunferencial convencional

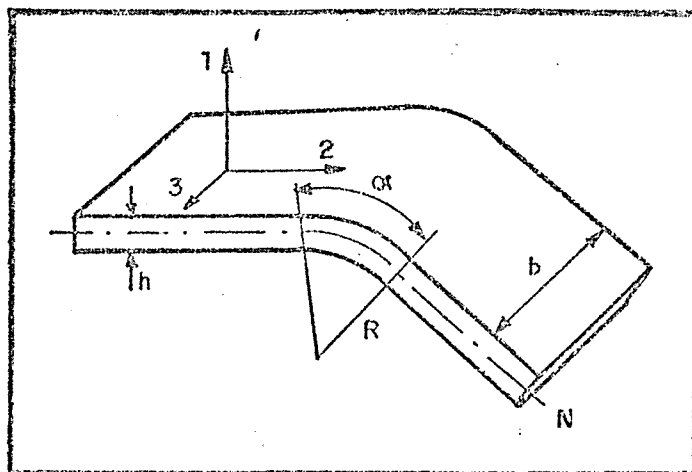


Figura II.13 - Processo de dobramento para amostra em forma de fita

- h - espessura da amostra
- b - largura da amostra
- N - região de deformação nula
- α - ângulo de abraçamento
- R - raio de curvatura ou dobramento
- 1 - direção da deformação radial
- 2 - direção da deformação circunferencial ou longitudinal
- 3 - direção da deformação transversal

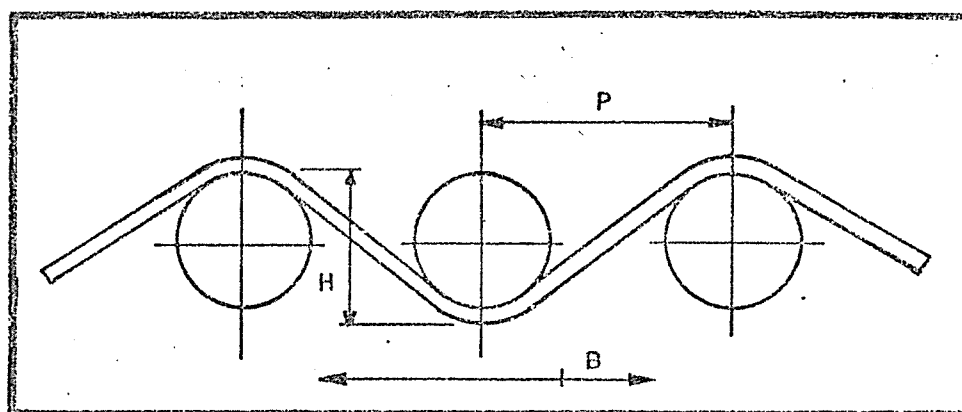


Figura II.14 - Processo de dobramento com a utilização de vários cutelos

- P - passo H - flexa B - direção longitudinal

que ocorre nas superfícies internas e externas neste caso é dada para seguinte equação II-1 :

$$e = h/(D + h) \quad (\text{II.1})$$

Sendo (h) a espessura da chapa e o (D) o diâmetro do cutelo.

Os resultados experimentais mostram que a deformação circunferencial na superfície de tração é consideravelmente maior do que aquela indicada na equação acima a medida que a espessura cresce considerando-se um mesmo cutelo, enquanto que a deformação na superfície de compressão não difere muito⁽¹⁾.

II.2.2.2 - Tipos de dobramento

A observação do processo de dobramento tem indicado que a deformação circunferencial não é uniforme ao longo do comprimento de dobramento sendo que o perfil da deformação é indicado pelo o tipo de dobramento⁽⁶⁾.

A figura II.15 indica três tipos de dobramento⁽⁶⁾. O tipo (a) seria aquele obtido a partir da aplicação de um momento fletor puro. Tal sistema de dobramento seria o ideal pois a deformação circunferencial apresenta-se praticamente uniforme ao longo do comprimento do dobramento porém, o equipamento necessário é extremamente complexo. No tipo (b) e (c) o dobramento é feito a partir do uso de cutelo sendo que no tipo (b) o dobramento é feito do centro para as extremidades e no tipo (c) o dobramento se realiza de uma extremidade ao centro e até a outra extremidade.

Nos dois tipos observa-se uma distribuição não uniforme da deformação circunferencial com um perfil peculiar a cada caso.

II.2.2.3 - Parâmetros que influenciam no valor da deformação por dobramento

Além dos aspectos que influenciam no comportamento do perfil de deformações ao longo do ângulo de abraçamento, existem parâmetros cuja variação influenciam diretamente os valores destas deformações.

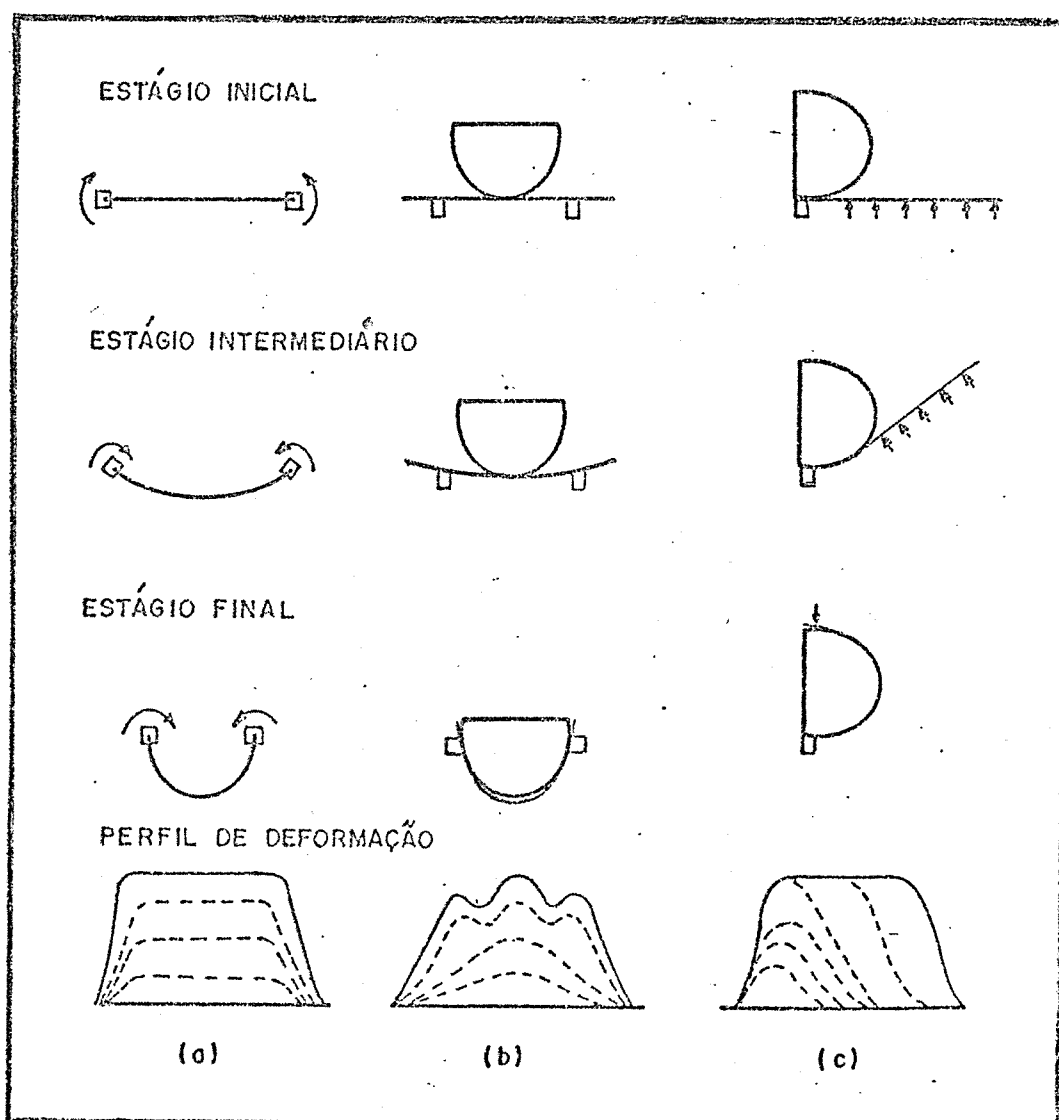


Figura II.15 - Tipos de dobramento e perfis de deformação.

- a) dobramento da amostra por momento fletor puro
- b) dobramento por flexão em cutelo da amostra bi-apoiada
- c) dobramento por flexão em cutela da amostra fixada na extremidade

Experiências realizadas⁽⁷⁾ com arames de aço processados em decapadores mecânicos cujo sistema de dobramento se assemelha ao da figura II.14 mostraram relações entre vários parâmetros tais como a flexa (H), o diâmetro (D), número de cutelos (n) e o alongamento ou deformação global (γ).

Tal alongamento pode ser atribuído ao esforço de tração necessário para o movimento do arame em relação decapador mecânico e a própria amplitude de deformação circunferencial aplicada.

As figuras II.16, II.17, II.18, mostram as relações encontradas⁽⁷⁾.

Observa-se que o alongamento cresce com o aumento da flexa e por conseguinte do ângulo de abraçamento. Este crescimento dar-se-á de forma quase linear até o ponto onde a flexa torna-se igual ao diâmetro do cutelo. A partir daí o alongamento é aproximadamente constante⁽⁷⁾.

Este fenômeno pode ser interpretado a partir do fato de que o raio de curvatura do arame (ρ), com a evolução da flexa, acaba por assumir um valor constante próximo ao valor do raio de curvatura do cutelo (R)⁽⁷⁾.

Por outro lado à medida em que se cresce o diâmetro do cutelo o alongamento do arame diminui considerando-se a mesma flexa e o mesmo número de cutelos (n)⁽⁷⁾.

Já no caso de variar-se o número de cutelos à medida que este parâmetro aumenta o alongamento também aumenta⁽⁷⁾.

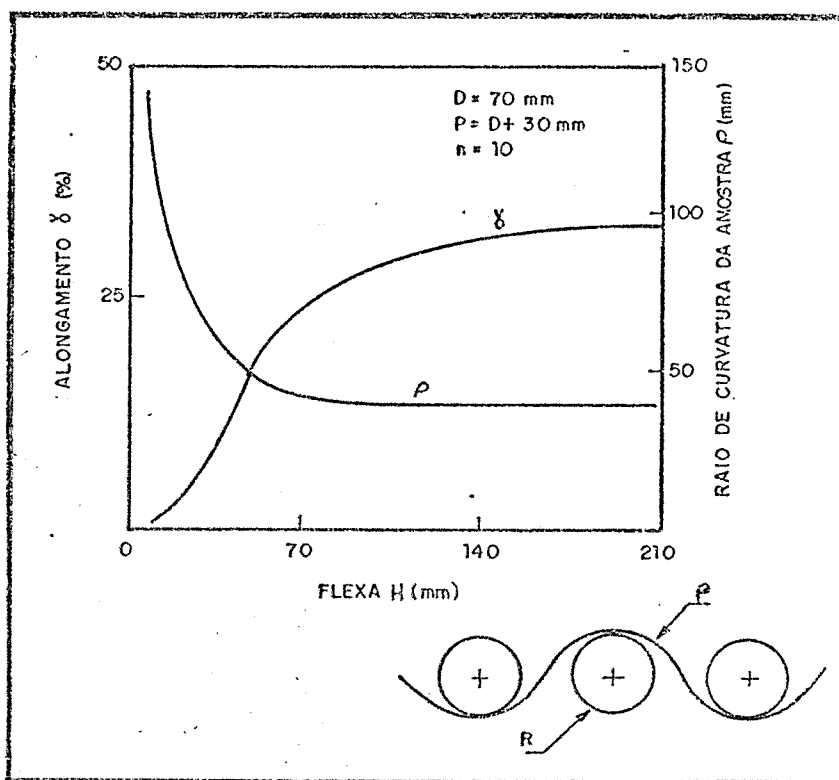


Figura II.16 - Relação entre a flexa e o alongamento

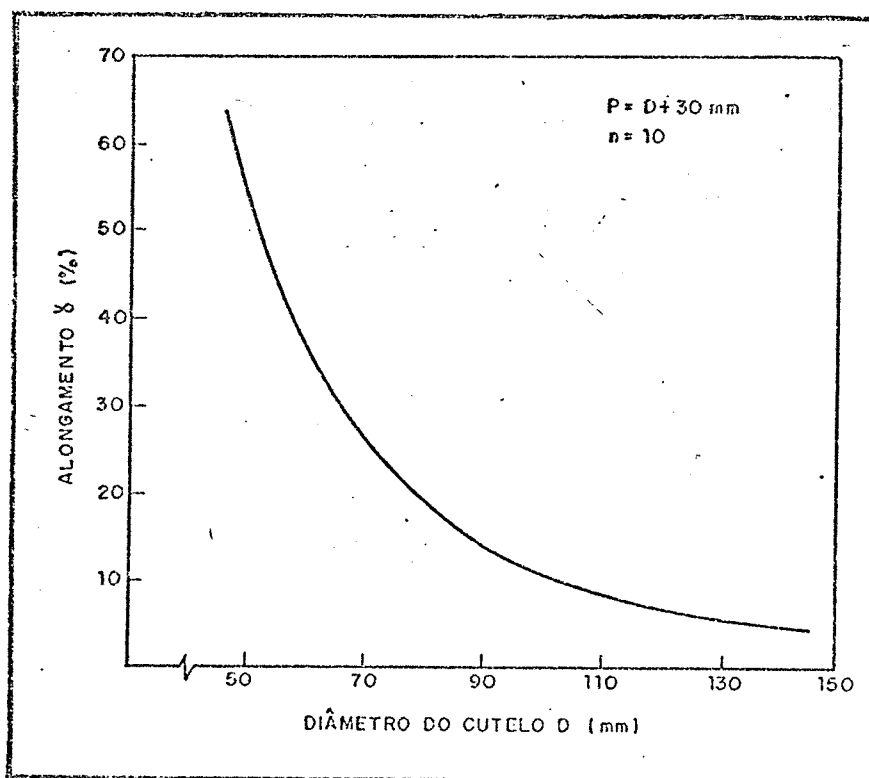


Figura II.17 - Relação entre o diâmetro do cutelo e o alongamento

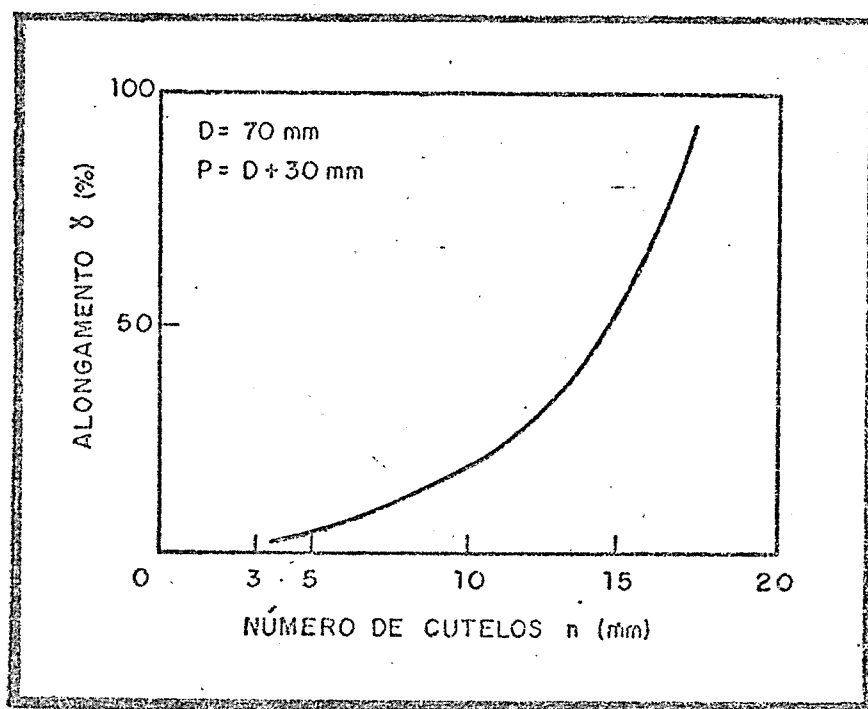


Figura II.18 - Relação entre o número de cutelos e o alongamento

CAPÍTULO III - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

III - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

III.1 - Introdução

Procurar-se-á dar uma visão completa de todas as fases desenvolvidas durante a tese, mostrando as dificuldades encontradas e as razões pelas quais foram tomadas todas as opções.

Para maior compreensão dos fatos considerar-se-ão os seguintes itens: ④

Dados Básicos da Experiência

O dispositivo de Flexo-Tração

Deformação Monotônica

Deformação Cíclica por Flexo-Tração

Plano Geral de Experiências

É bom ressaltar-se que na realidade os dados reunidos em cada item não são isolados ou aconteceram na seqüência exposta. Na realidade, cada passo concluído serviu de base para as devidas correções no planejamento dos passos seguintes da experiência.

III.2 - Dados Básicos da Experiência

O trabalho de tese pretendeu estudar o comportamento de um dado material, num dado estado metalúrgico, quando deformado ciclicamente por flexo-tração para uma determinada amplitude de deformação cíclica.

Para tanto foram consideradas propriedades como limite de resistência à tração, alongamento percentual e dureza do material nos estados recozido e pré-deformado monotonicamente, antes e após o processamento de ciclagem.

Para se cumprir tal propósito foi necessário a observação, estudo e definição de vários pontos.

Estes pontos são colocados de forma didática através dos seguintes itens:

Material a ser utilizado ,

Tipo de pré-deformação monotônica

Amplitude de deformação cíclica adotada

Alguns equipamentos necessários

Experiências auxiliares

Dimensões da amostra para flexo-tração

Definição de uma operação ou ciclo

Estados metalúrgicos escolhidos para o processamento por ciclagem

Tipos de tração aplicáveis

Número de ciclos a serem realizados

III.2.1 - Material a ser utilizado

O material escolhido foi o Alumínio comercialmente puro liga 1100 (2S) com as seguintes características⁽⁸⁾:

Composição química 99,00%Al; 0,20%Cu; 0,05%Mn; < 1% Fe+Si; 0,10%T e 0,15% outros

Temperatura de fusão: 642°C

Temperatura de recozimento: 345°C

A escolha deste material se deve aos seguintes fatores:

O Alumínio 2S já tinha sido utilizado em trabalhos anteriores da referência bibliográfica^(4,5).

As opções comerciais do Alumínio, quanto a quantidade, variedade e preço eram mais razoáveis do que de outros metais tais como o cobre.

O uso de um metal de menor resistência à deformação como o Alumínio propiciava menores esforços atuantes sob o dispositivo de flexo-tração. Assim os pontos críticos do projeto do dispositivo de flexo-tração foram mais facilmente contornados.

Foram considerados ainda os seguintes critérios:

Todas as amostras deveriam ser retiradas de uma só peça. A forma

final das amostras para ciclagem deveria ser a de uma barra chata ou fita, pois isto em outras razões simplificaria a construção do dispositivo de flexo-tração. *entre* *frase sentido* ?

Já se previa a necessidade de se promover grandes deformações monotônicas, o que implicaria na necessidade de espessuras iniciais maiores.

Atendendo-se a estes fatores e de acordo com os dados comerciais fez-se a opção pela compra de uma chapa de alumínio com as seguintes dimensões:

2 metros de comprimento, 1 metro de largura e 3/4" de espessura, chapa esta obtida por processo de laminação.

III.2.2. - Tipo de pré-deformação monotônica

Optou-se por uma pré-deformação monotônica por laminação uma vez que havia equipamento disponível (laminador) e se poderia promover grandes deformações. Além disso era um tipo de processo utilizado industrialmente.

III.2.3 - Amplitude de deformação cíclica adotada

A amplitude de deformação foi definida como o valor máximo atingido pela deformação circunferencial na superfície tratada.

Considerou-se que a amplitude de deformação cíclica estaria relacionada ^(a) deformação total ou seja deformação plástica e elástica ^(b) uma vez que toda e qualquer medida da amplitude de deformação cíclica seria feita com a amostra no dispositivo de flexo-tração ou seja ^(c) durante o processo. ^(d)

Por sua vez, tanto a deformação monotônica por laminação quanto a deformação global que porventura existisse devido a passagem da amostra pelo dispositivo de flexo-tração, estariam relacionadas a deformação plástica pois qualquer medida somente seria feita após os respectivos processamentos.

Procurou-se adotar um valor de referência para a amplitude de deformação cíclica e para tanto tinha-se como base a teoria de do-

bramento de chapas finas⁽¹⁾.

Assim, neste particular, foi arbitrado um cutelo de diâmetro igual a 30 mm que serviria para o dobramento de uma fita com espessura de 5 mm, atingindo-se uma amplitude máxima de deformação cíclica, segundo a equação II.1, de 14% nos dois lados da fita⁽¹⁾.

Evidentemente estes valores não foram escolhidos somente a luz do estudo da amplitude de deformação cíclica, mas procurou-se atender também outros pontos, tais como a confecção das amostras para ensaios de tração, e o projeto do dispositivo de flexo-tração.

É bom ressaltar ainda que desde o início se considerou o valor de 14% da amplitude de deformação cíclica apenas como um número básico para a fixação de uma determinada amplitude de deformação, devido às discrepâncias existentes entre a teoria e a realidade.

III.2.4 - Alguns equipamentos necessários

Para que fosse possível o desenvolvimento da tese, foi indispensável a utilização de alguns equipamentos e dentre estes destacamos; o forno tubular (ver item II.5.4 Obtenção das amostras), onde promoveu-se o recozimento das amostras de ciclagem e o banco de trefila (ver item III.5.5.1 Operação do dispositivo de flexo-tração), onde adaptou-se o dispositivo de flexo-tração.

Estes equipamentos influenciaram a tese em várias etapas uma vez que era necessário observar suas capacidades, como o curso e a capacidade de carga do banco de trefila, espaço disponível, faixa de temperatura do forno tubular, etc.

III.2.5 - Experiências auxiliares

Observou-se desde o início que seria necessária a execução de duas experiências auxiliares: Levantamento das propriedades do material recozido e deformado monotonicamente, por laminação e Investigação da deformação circunferencial^(1,6).

III.2.5.1 - Levantamento das propriedades do material recozido e deformado monotonicamente por laminação

Obteve-se amostras do material no estado recozido e promoveu-se a laminação de amostras em vários graus de deformação, conseguindo-se em seguida dados referentes ao limite de resistência à tração, alongamento percentual e medida de dureza (ver item II.4.2 Deformação monotônica - Obtenção das amostras).

Destas experiências extraíram-se os seguintes pontos:

- Dados experimentais confiáveis para comparação com dados conseguidos com as amostras deformadas ciclicamente.
- Desenvolvimento de um procedimento, para manipulação das amostras, a ser utilizado quando da confecção das amostras para deformação cíclica.
- Dados relativos à ordem de grandeza dos esforços atuantes sobre o dispositivo de flexo-tração, portanto dados de projeto.

Subsídios para se evitar que a amostra se rompesse por tração durante o processo de ciclagem.

III.2.5.1 - Investigação da deformação circunferencial

Embora a teoria de dobramento de chapas finas fornecesse subsídios para a fixação de uma determinada amplitude de deformação, era necessário verificar como a deformação se processava em torno do cutelo de dobramento.

Para tanto tinha-se como referência o trabalho de G.S. Sangahl Jr, E.L. Aul e G. Sachs⁽⁶⁾.

Procurou-se desenvolver uma experiência através de um dispositivo auxiliar de medição da deformação circunferencial adaptado ao dispositivo de flexo-tração.

Esta medição da deformação estava relacionada em última análise ao tipo de dobramento realizado e ao ângulo de dobramento alcançado⁽⁶⁾.

Procurava-se atingir um ponto de funcionamento do dispositivo de flexo-tração onde fosse possível atingir a amplitude de deformação cíclica (deformação circunferencial) desejada ao longo de um setor da amostra dobrada, sobre o cutelo. (ver item III.5 Deformação cíclica por flexo-tração).

III.2.6 - Dimensões das amostras para flexo-tração

A escolha das dimensões das amostras para flexo-tração foi na realidade feita a partir do compromisso de fatores até certo ponto conflitantes.

Deveria-se atender a amplitude de deformação cíclica desejada através da escolha adequada da espessura (h).

Procurava-se atenuar, dentro do possível, a variação da largura (deformação transversal) quando do processamento por flexo-tração e para tanto, tomou-se a relação empírica da largura (b) igual a dez vezes a espessura (h).

A amostra deveria ter, após o processamento por ciclagem, tamanho e forma adequados para extrair-se um corpo de prova para ensaio de tração segundo norma ABNT⁽⁹⁾.

Era necessário que as dimensões escolhidas fossem compatíveis com o processo geral de usinagem para obtenção das amostras.

Deveria-se ter um comprimento (l) mínimo da amostra para obter-se o processamento correto, ao mesmo tempo que era necessário compatibilizar o comprimento com o curso máximo do banco de trefila e o espaço útil de recozimento do forno tubular.

A secção transversal (bxh) da amostra deveria ser capaz de suportar o processo de ciclagem sem se romper por tração e não poderia provocar uma força de tração (esforço necessário para a passagem da amostra pelo dispositivo de flexo-tração) acima da capacidade do banco de trefila (ver item III.5 Deformação cíclica por flexo-tração).

A figura III.1 mostra a forma básica da amostra de flexo-tração.

III.2.7 - Definição de uma operação ou ciclo

O conceito de uma operação ou ciclo foi determinada naturalmente pelo próprio processo intrínseco de ciclagem utilizado.

A idéia de ciclo ou operação estava associada ao fato de que, se uma determinada área de fita analisada, apresentasse uma dada sequência de solicitações num ciclo, no ciclo seguinte esta mesma área analisada, deveria ser solicitada por uma sequência de solicitações inversa a primeira.

III.2.8 - Estados metalúrgicos escolhidos para o processamento por ciclagem

Procurou-se trabalhar basicamente com amostras no estado recozido e pré-deformado monotonicamente por laminação. A questão colocada foi a escolha dos graus de pré-deformação para as amostras de ciclagem.

Inicialmente optou-se por uma pré-deformação monotônica igual a amplitude de deformação cíclica e uma pré-deformação monotônica acima da amplitude de deformação cíclica.

Com o desenvolvimento da tese observaram-se complicações para a escolha de uma pré-deformação monotônica igual a amplitude de deformação cíclica, devido ao fato de não ter-se entre outras coisas, o valor exato da amplitude de deformação cíclica e também devido ao fato de ter-se dificuldades para a confecção das amostras de ciclagem. (ver item III.5 Deformação cíclica por flexo-tração)

III.2.9 - Tipos de tração aplicáveis

Além da aplicação do esforço de tração necessário para passagem da amostra pelo dispositivo de flexo-tração, também conhecido como esforço de tração à frente, era possível ter-se o esforço de tração à ré cujo ponto de aplicação seria oposto ao do esforço de tração à frente e se oporia a passagem da amostra pelo dispositivo de flexo-tração.

Porém não foi aplicada a tração a ré devido os seguintes motivos: Não se tinha idéia como seria a propagação do esforço de tração a ré ao longo da amostra quando da passagem no dispositivo de flexo tração.

O uso da tração a ré fatalmente provocaria um aumento no esforço de tração a frente. Além disso não tinha-se nenhum parâmetro teórico confiável que desse com precisão o valor de tração a frente. Tudo isso tornava mais crítica a possibilidade da amostra romper-se por tração de uma maneira ou de outra.

Estudo feitos mostraram que o uso de tração a ré além de ser uma variável a mais no processo, implicaria num maior grau de complexidade no processamento de ciclagem e no projeto do dispositivo de flexo-tração (ver Capítulo V Sugestões para teses futuras).

III.2.10 - Número de ciclos a serem realizados

Restava a fixação do número de ciclos a serem realizados em cada caso.

Para tanto era necessário estabelecer algum parâmetro como responsável pela fixação do número de ciclos.

Inicialmente pensou-se em utilizar como parâmetro o conceito de regime de saturação^(4,5) ou seja a existência de um ponto onde as propriedades do material não mais se modificariam, independentemente da continuidade do processo de ciclagem.

Porém neste caso haviam algumas dificuldades: a incerteza de ter-se realmente um regime de saturação e a possibilidade de poder atingi-lo (número de ciclos muito grande).

Além do mais, neste caso qualquer teste das propriedades do material seria feita após o processamento de ciclagem não havendo possibilidade para reutilização da amostra.

Desta forma ponderou-se não fixar a priori o número de ciclos realizados, optando-se por um monitoramento durante o processo de ciclagem, das maneiras que se mostravam mais significativas tais

como: força de tração (tração à frente) e variação de espessura a cada ciclo ou evidências que indicassem ruptura por esforço de tração na amostra.

III.3 - O Dispositivo de Flexo-Tração

III.3.1 - Introdução

O projeto e construção do dispositivo de flexo-tração foi encarado desde o início como parte importante no desenvolvimento, visto que a viabilidade das experiências dependia em grande parte do bom desempenho e funcionalidade do dispositivo.

Procurou-se projetar um dispositivo que fosse de construção simples, robusta e atendesse aos pré-requisitos existentes.

Fez-se também o estudo de outros dispositivos mais sofisticados com acionamento elétrico e hidráulico, presença da tração a ré, etc. (ver Capítulo V Sugestões para teses futuras). Porém estes estudos indicaram dificuldades no desenvolvimento destes projetos notadamente no aspecto econômico.

É bom salientar ainda que foi necessário ter-se experiência anterior na área de Projetos de Máquinas, uma vez que não sendo uma construção convencional, o projeto do dispositivo apresentou poucos dados sobre os esforços atuantes e a própria dinâmica da tese indicou várias alterações ao longo do processo de construção.

III.3.2 - Alguns parâmetros

Na figura III.2 indicam-se alguns parâmetros construtivos importantes para o projeto do dispositivo de flexo-tração, os quais tiveram referência no trabalho de Sudo, Chuzo, Takatani, Masui e Nagai⁽⁷⁾.

A flexa (H) tornou-se um parâmetro fundamental na medida em que se determinava um ponto de funcionamento do dispositivo que propiciava a obtenção da amplitude de deformação cíclica desejada. Além do mais constituiu-se num parâmetro de fácil medida o que evi

tou dificuldades como a medida de ângulo de abraçamento da fita sobre o cutelo (D).

O passo (P) foi tomado como sendo o diâmetro (D) acrescido de 30 mm. A medida do parâmetro (P) foi considerada desta forma não só pela referência em trabalho anterior⁽⁷⁾, mas porque se apresentou favorável em termos construtivos e de funcionamento.

III.3.3 - Esquema do dispositivo de flexo-tração

A figura III.3 mostra a planta esquemática do dispositivo de flexo-tração.

Apontam-se a seguir as principais partes do dispositivo de flexo-tração bem como a função de cada uma no sistema.

O dispositivo apresenta um sistema para flexão constituído de um cutelo central móvel (1) e dois cutelos laterais fixos (2) além de dois cutelos auxiliares laterais fixos (3) que têm a função de ajudar na execução da flexão.

É relevante lembrar que nenhum cutelo tem movimento de rotação uma vez que as formas construtivas seriam mais complexas. A necessidade de se usar materiais para os cutelos que resistissem ao desgaste devido a fricção com a amostra não foi fundamental uma vez que o material da amostra foi alumínio e o número de testes limitado.

O movimento do cutelo central era feito pela porca de movimentação (5) que transladava a barra roscada (4) solidaria ao cutelo central; sendo guiada pelo suporte (6) soldada a placa base (12).

Para que houvesse maior funcionalidade colocou-se uma arruela lisa de encosto (18) trabalhando entre a porca de movimentação e o suporte, e todo o sistema foi lubrificado a graxa.

Este sistema de movimentação do cutelo central embora fossem bastante simples era capaz de determinar a posição que o cutelo central deveria ter para promover-se a amplitude de deformação cíclica desejada, usando como parâmetro a flexa (H), medida em voltas da

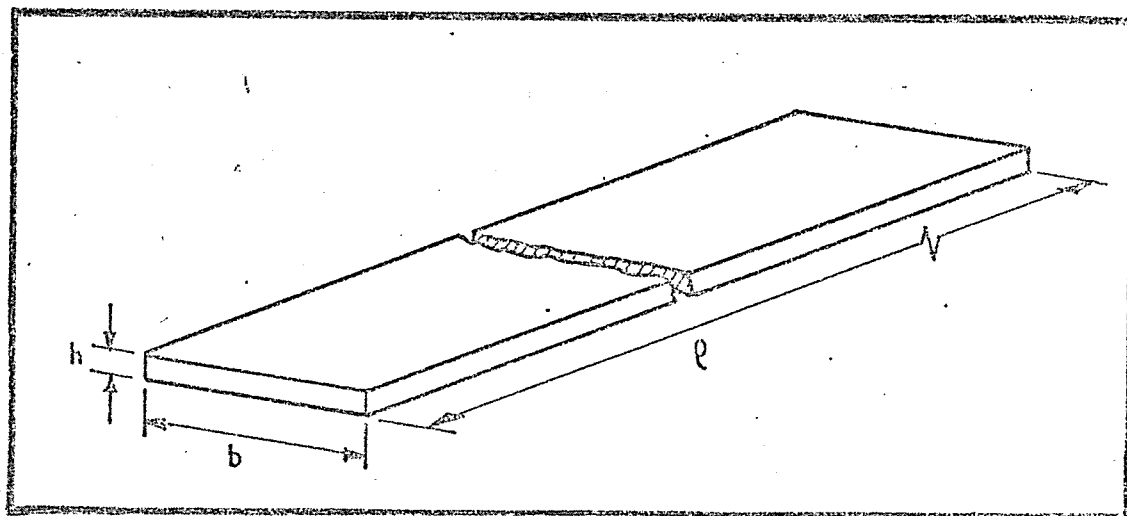


Figura III.1 - Forma básica da amostra de flexo-tração

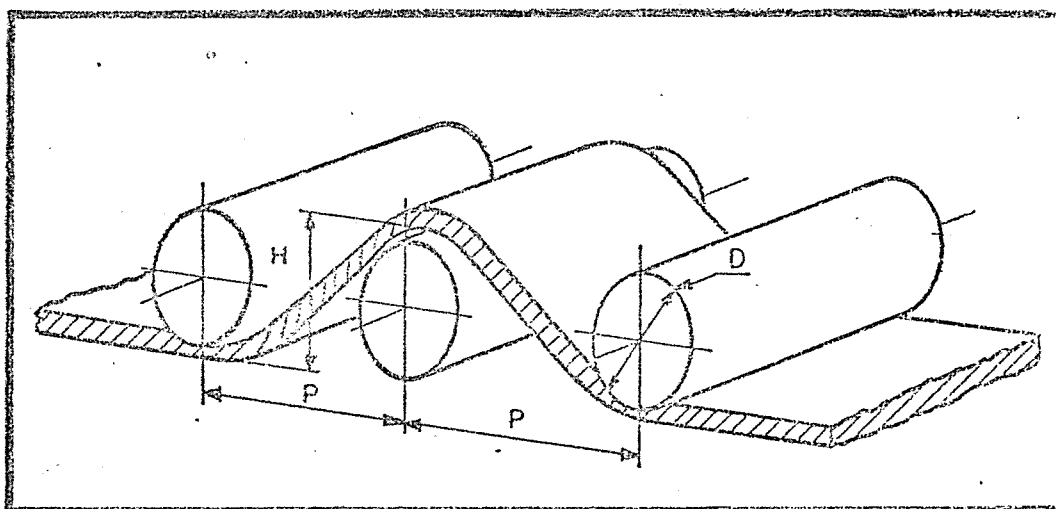


Figura III.2 - Parâmetros construtivos do dispositivo de flexo-tração

D - Diâmetro do cutelo ou rolo

P - Passo

H - flexa

porca de movimentação ou seja em múltiplos do passo da rosca utilizada (diâmetro nominal 3/4", 10 fios por polegada de medida passo = 2,54 mm).

Os cutelos laterais e os cutelos auxiliares foram fixados a sub-placas inferiores (8) através de solda e estas por sua vez foram fixadas a placa base por meio de parafusos (9).

Para não ter-se esforços de cisalhamento sob os parafusos e para guiar o posicionamento das sub-placas inferiores sobre a placa base optou-se pela colocação de barras de encosto (10) soldadas diretamente na placa base.

O intuito básico deste sistema de fixação era ter-se a possibilidade de utilizar a mesma placa base para outros espaçamentos de cutelos (passo P), outras dimensões de amostras, etc.

Para maior rigidez do sistema de flexão adotou-se também uma sub-placa superior (11) que fixava os cutelos laterais e auxiliares através de parafusos (19), sendo pois removível para maior funcionalidade.

Para evitar danos ao sistema de movimentação do cutelo central criou-se uma guia inferior caracterizada por um canal inferior (20) formado pelas duas sub-placas inferiores e uma guia superior caracterizada por um canal superior formado por duas barras de guia (7) soldadas à sub-placa superior.

O dispositivo de flexo-tração foi provido também de uma placa de apoio (13) para o caso de engripamento da amostra ou mesmo para sua retirada do dispositivo.

O movimento da placa de apoio era do mesmo tipo do movimento do cutelo central ou seja, a porca de movimentação (15) transladava a barra roscada (14) solidária à placa de apoio e guiada pelo suporte (21) soldado a placa base. Da mesma forma, para o maior funcionalidade colocou-se uma arruela lisa de encosto (22) trabalhando entre a porca de movimentação e o suporte, e todo sistema foi lubrificado a graxa.

O acoplamento do dispositivo de flexo-tração e o banco de trefila tinha como função não só suportar o dispositivo mas também de posicioná-lo em relação ao banco.

O acoplamento foi feito com duas buchas adaptadoras (17) fixadas por parafuso ao banco de trefila nas quais se ancaixavam pinos guias (16), que por sua vez, eram ligados a placa base através dos suportes (6,21). Assim a montagem e desmontagem do dispositivo se tornaria fácil.

Proveram-se os dois lados do dispositivo de pinos guia para que a montagem fosse mais funcional. As figuras III.4, III.5, III.6, III.7, III.8 e III.9 indicam alguns aspectos construtivos mencionados acima.

III-3.4 - Acessórios do dispositivo de flexo-tração

Dois acessórios foram utilizados junto ao dispositivo de flexo-tração: o dispositivo auxiliar de medição da deformação circunferencial e a garra de tração da amostra.

III-3.4.1 - Garra de tração da amostra

Foi desenvolvida nos moldes construtivos das garras de máquina para ensaio de tração com o sistema de mordentes planos em cunha e suas dimensões eram compatíveis com as das amostras em questão.

Foi fixada uma célula de carga que por sua vez estava solidária ao cursor móvel do banco de trefila, promovendo assim o movimento de passagem da amostra pelo dispositivo de flexo-tração. A figura III.10 mostra a garra mencionada acima.

III-3.4.2 - Dispositivo auxiliar de medição da deformação circunferencial

A figura III.11 indica esquematicamente o dispositivo auxiliar de medição, cujo funcionamento se baseou no seguinte princípio:

A barra roscada (1) foi montada sobre o cutelo central (2) mantendo em relação a este o movimento de rotação.

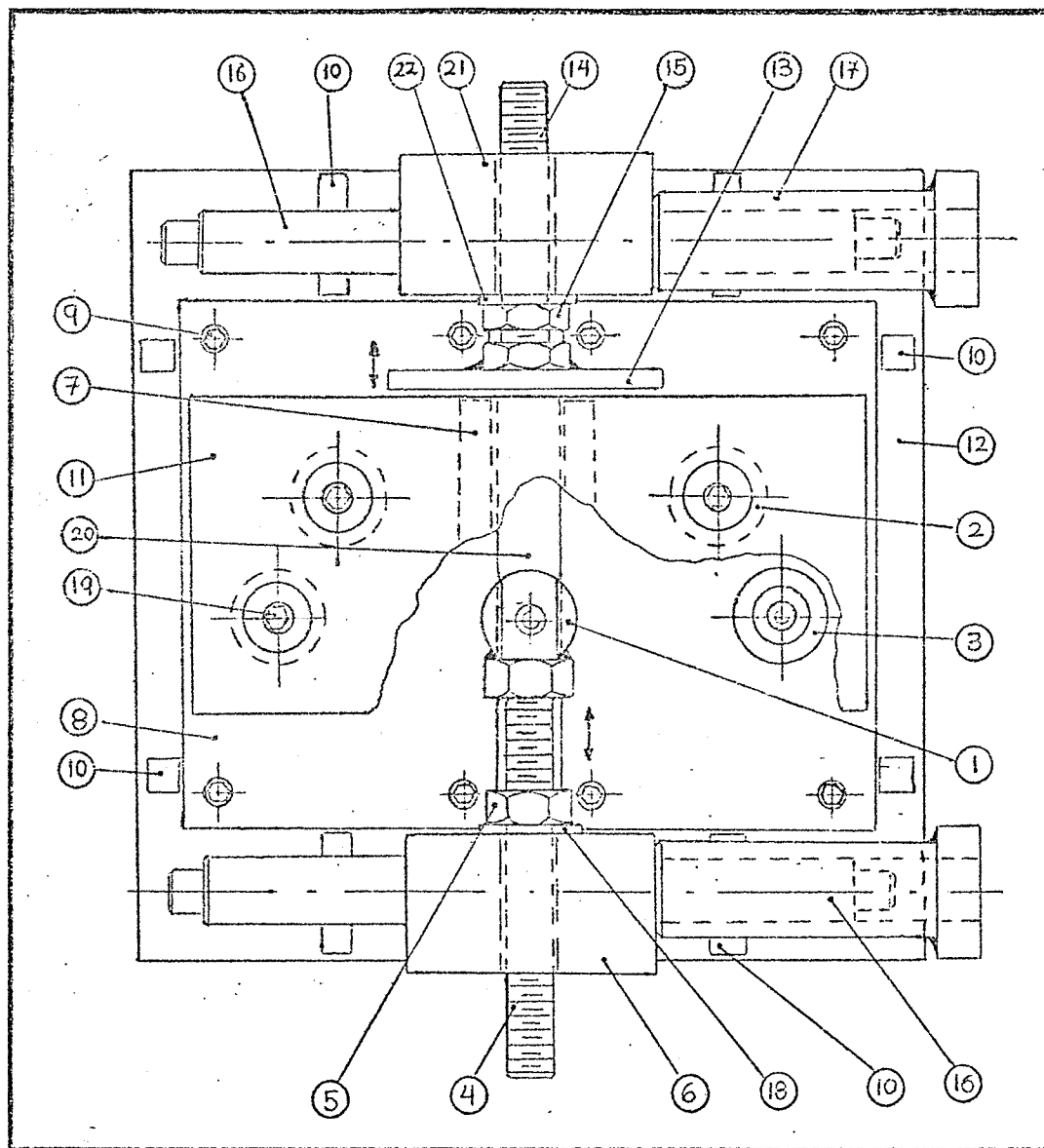
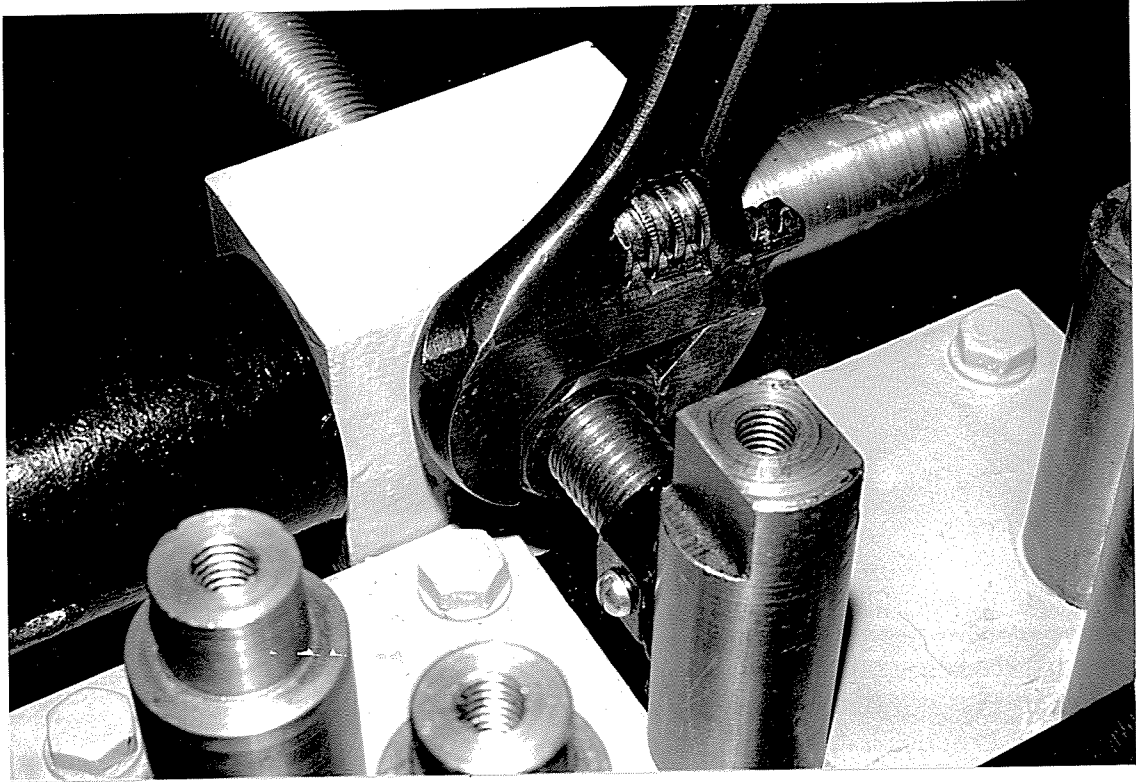


Figura III.3 - Planta esquematica do dispositivo de flexo-tração

A designação dos números está na folha seguinte

Figura III.3 Designação dos números

- 1.- cutelo central movel
- 2 - cutelo lateral fixo
- 3 - cutelo auxiliar fixo
- 4 - barra roscada do cutelo central
- 5 - porca de movimentação do cutelo central
- 6 - suporte da barra roscada do cutelo central
- 7 - barra de guia da sub-placa superior
- 8 - sub-placa inferior
- 9 - parafuso de fixação da sub-placa inferior
- 10- barra de encosto
- 11- sub-placa superior
- 12- placa base
- 13- placa de apoio
- 14- barra roscada da placa de apoio
- 15- porca de movimentação da placa de apoio
- 16- pino guia
- 17- bucha adaptadora
- 18- arruela de encosto do cutelo central.
- 19- parafuso de fixação da sub-placa superior
- 20- canal inferior de guia do cutelo central
- 21- suporte da barra roscada da placa de apoio
- 22- arruela de encosto da placa de apoio



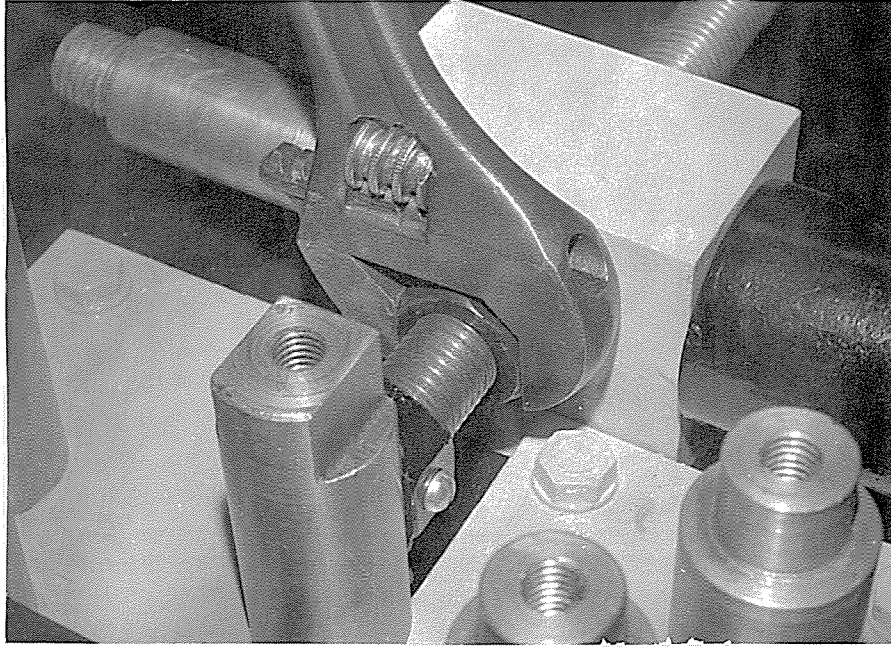
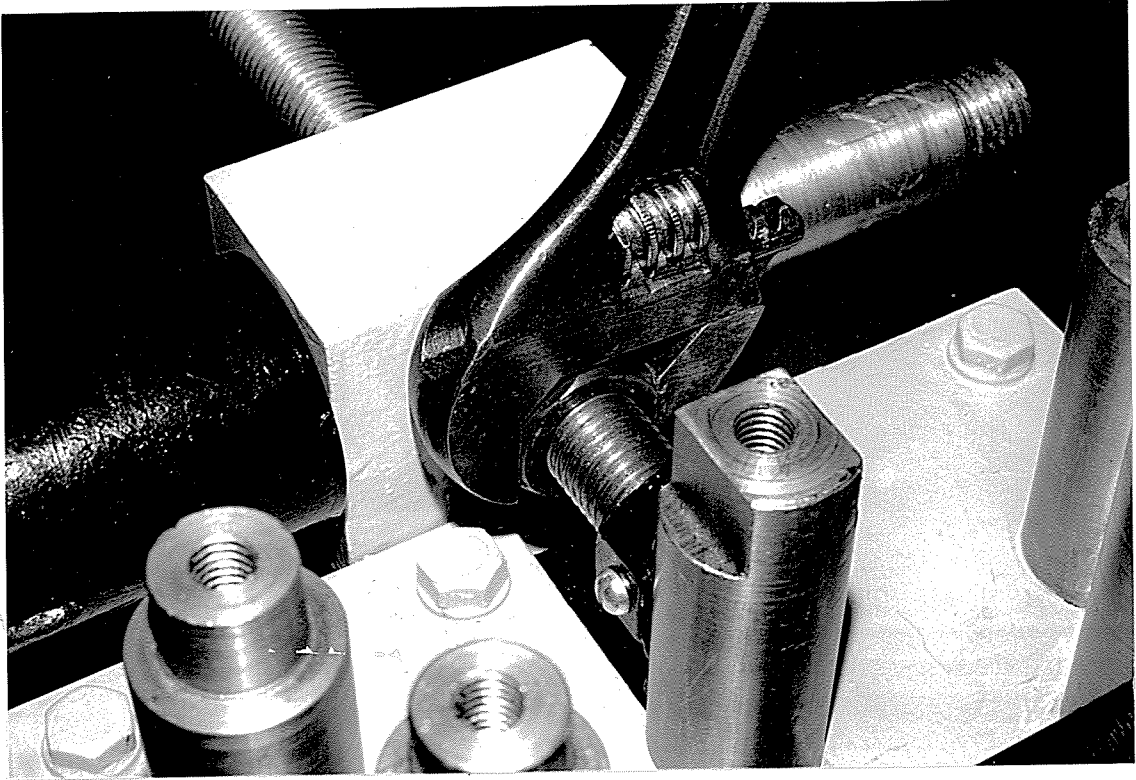


Figura III.4 - Visão do sistema de movimentação do cutelo central

Figura III.3 Designação dos números

- 1.- cutelo central movel
- 2 - cutelo lateral fixo
- 3 - cutelo auxiliar fixo
- 4 - barra roscada do cutelo central
- 5 - porca de movimentação do cutelo central
- 6 - suporte da barra roscada do cutelo central
- 7 - barra de guia da sub-placa superior
- 8 - sub-placa inferior
- 9 - parafuso de fixação da sub-placa inferior
- 10- barra de encosto
- 11- sub-placa superior
- 12- placa base
- 13- placa de apoio
- 14- barra roscada da placa de apoio
- 15- porca de movimentação da placa de apoio
- 16- pino guia
- 17- bucha adaptadora
- 18- arruela de encosto do cutelo central.
- 19- parafuso de fixação da sub-placa superior
- 20- canal inferior de guia do cutelo central
- 21- suporte da barra roscada da placa de apoio
- 22- arruela de encosto da placa de apoio



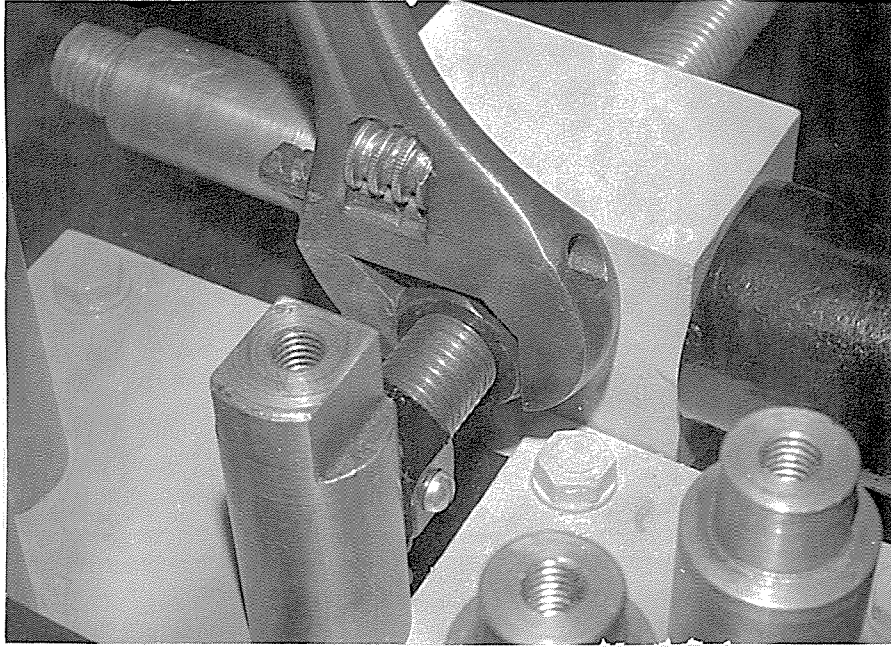
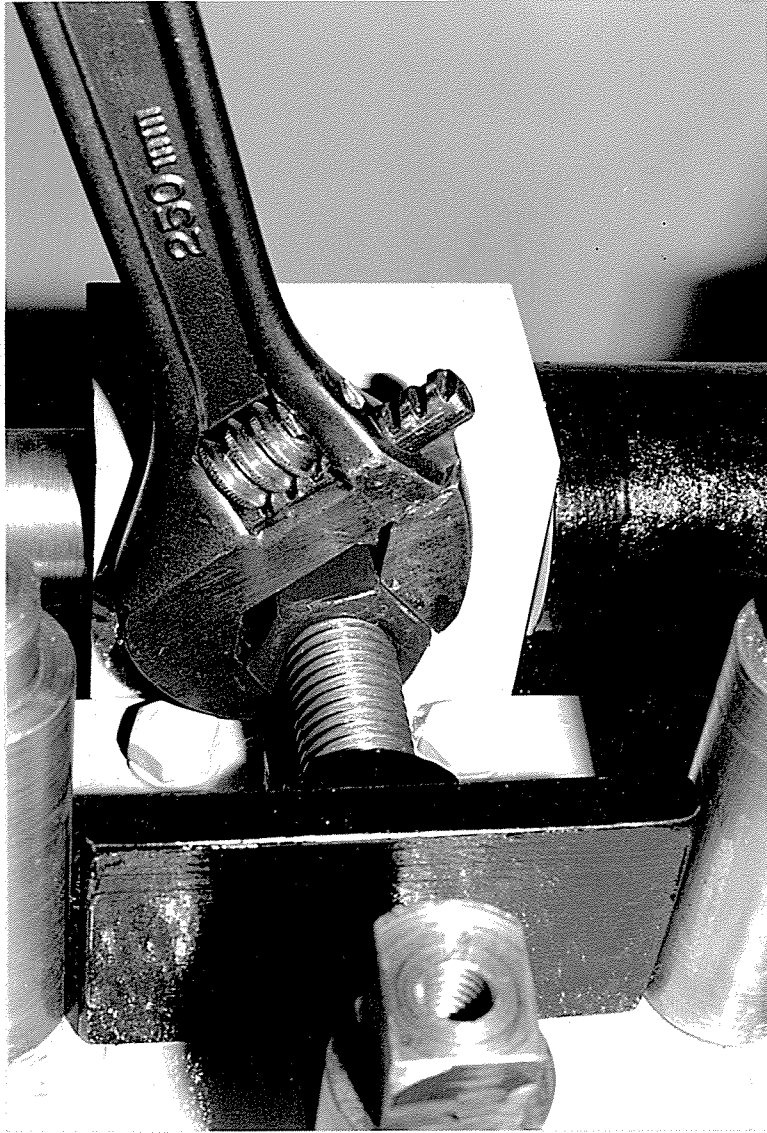


Figura III.4 - Visão do sistema de movimentação do cutelo central



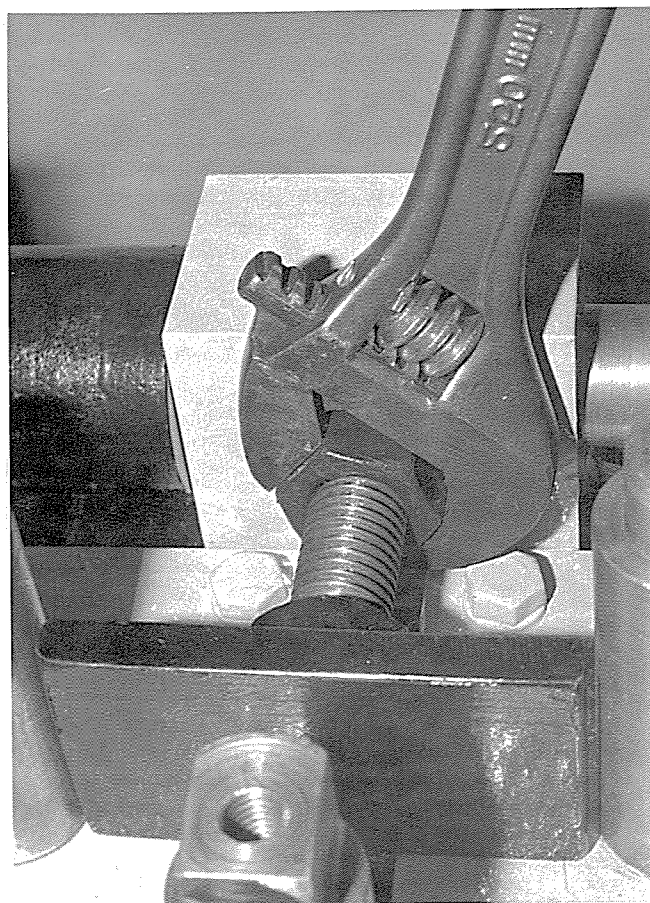
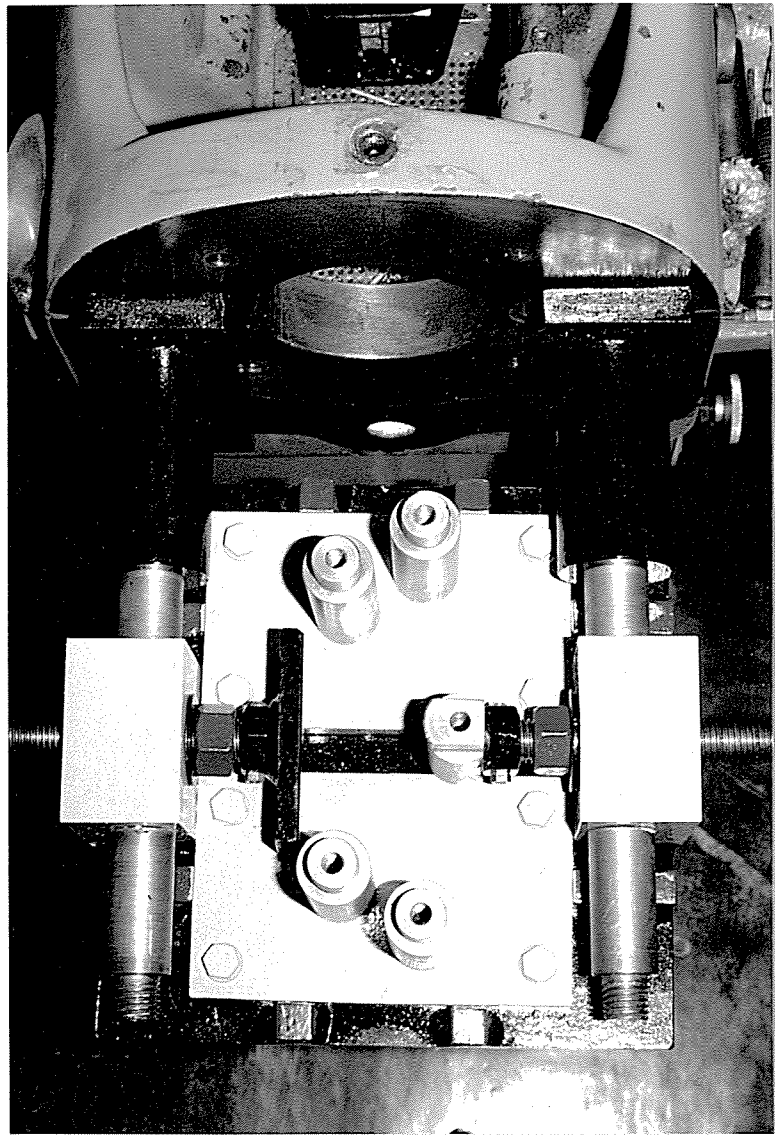


Figura III.5 - Visão do sistema de movimentação da placa de apoio



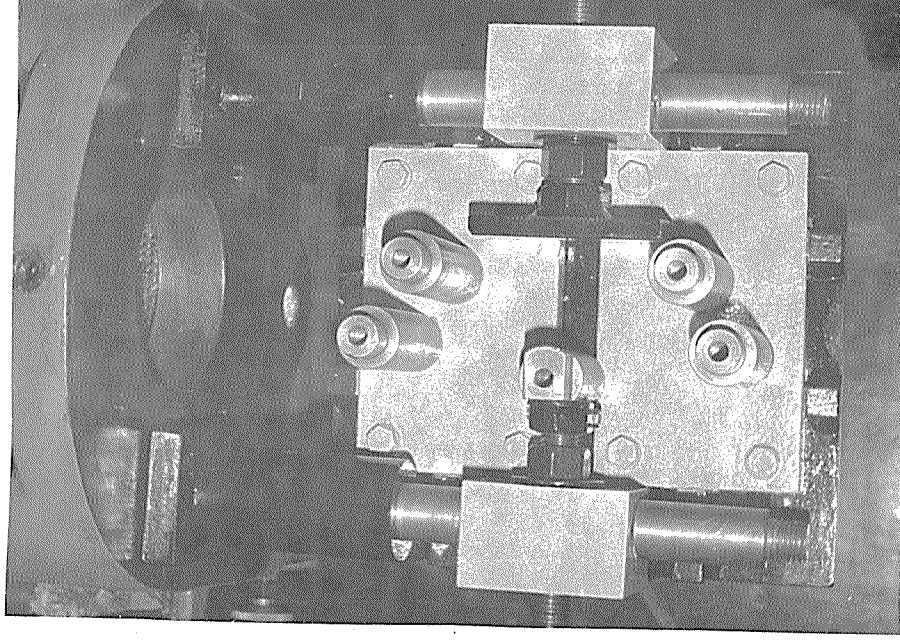
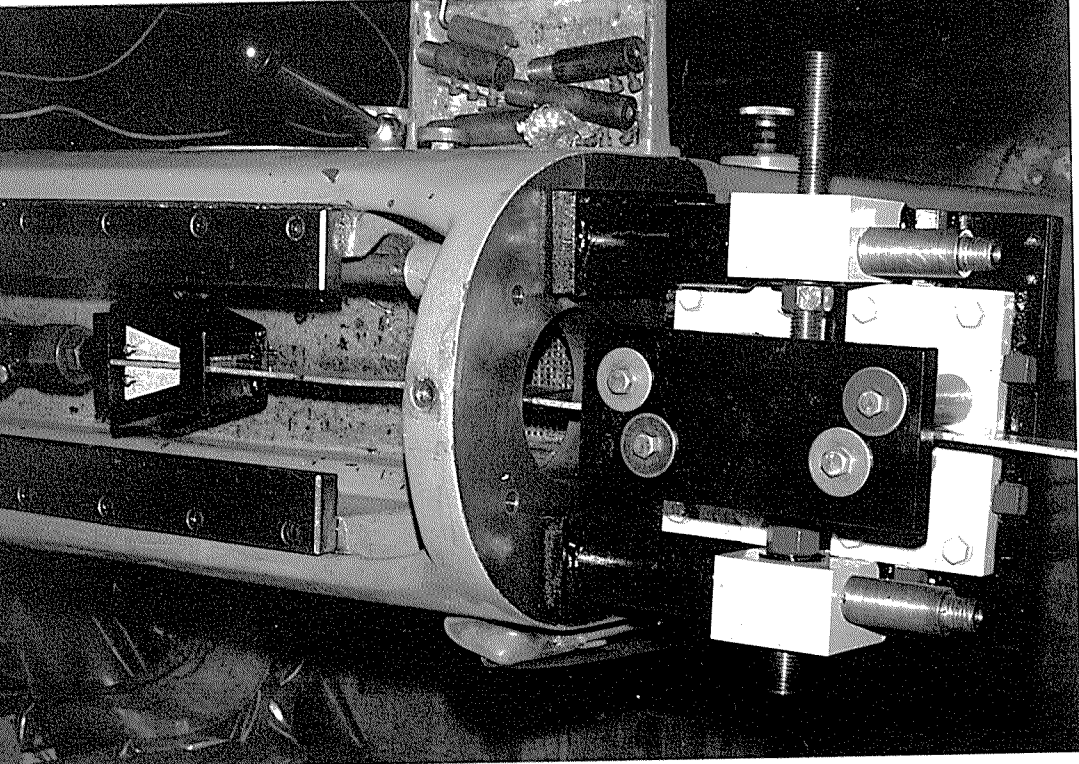


Figura III.6 - Visão da montagem do dispositivo
no banco de trefila



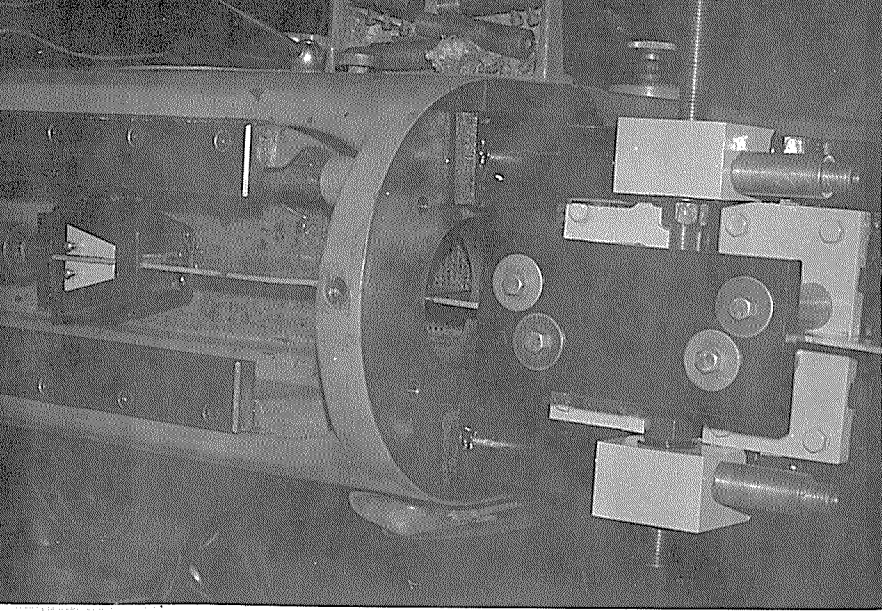
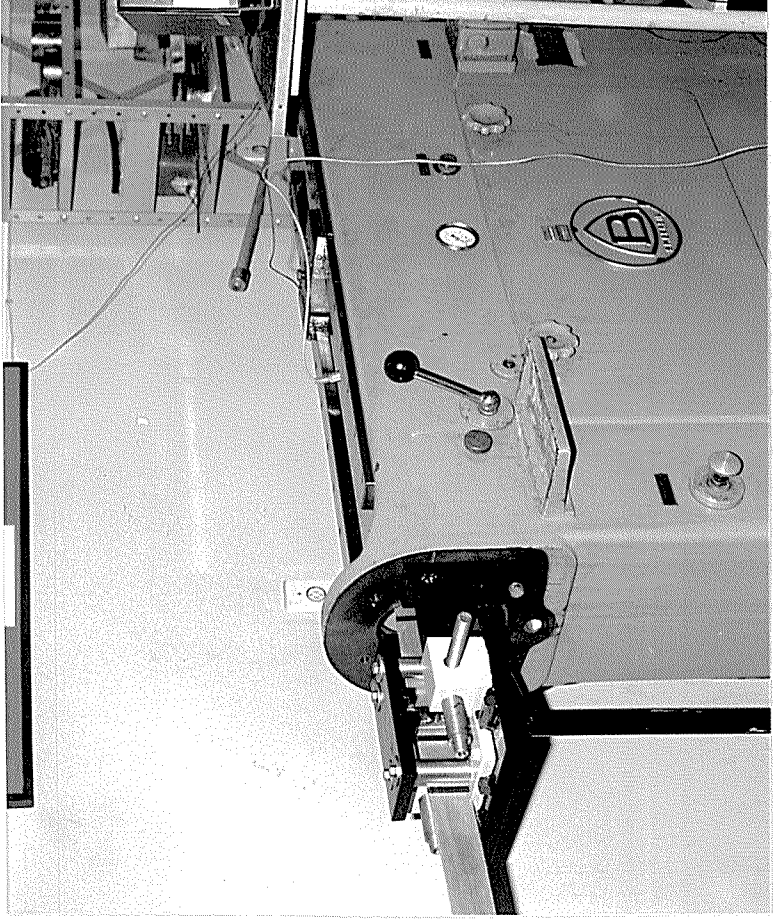


Figura III.7 - Visão do dispositivo de flexo-tra superior



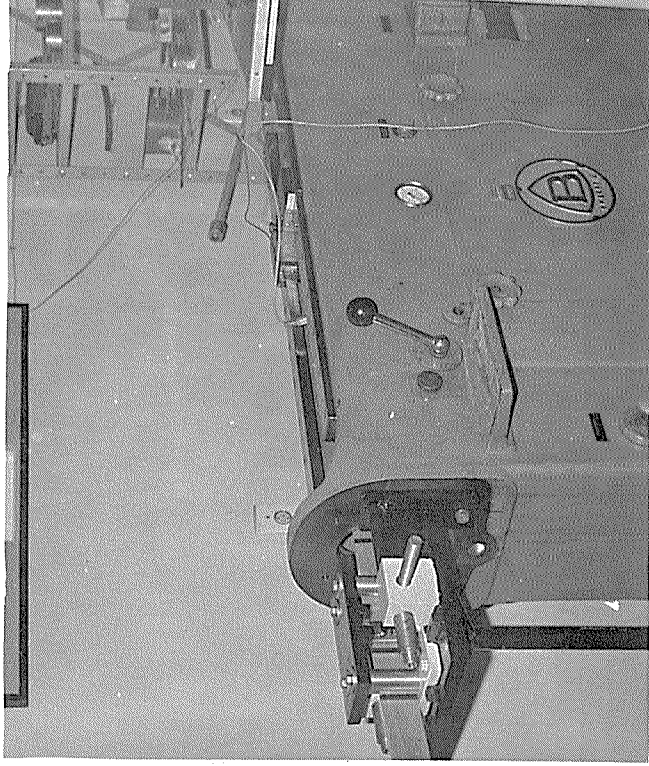
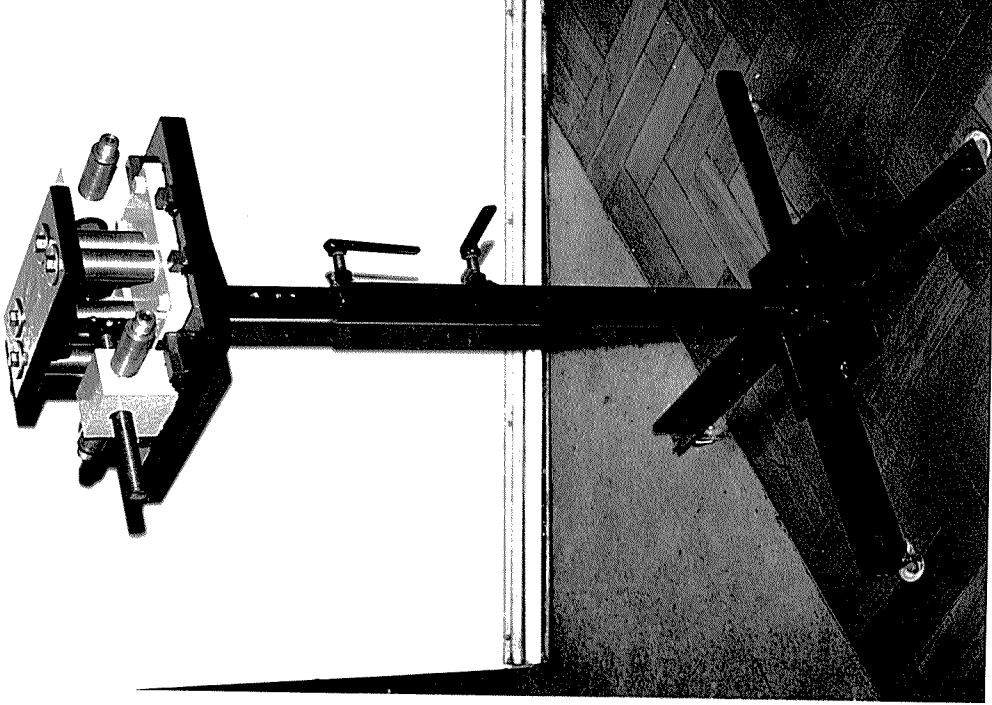


Figura III.8 - Visão global do dispositivo montado em trepida



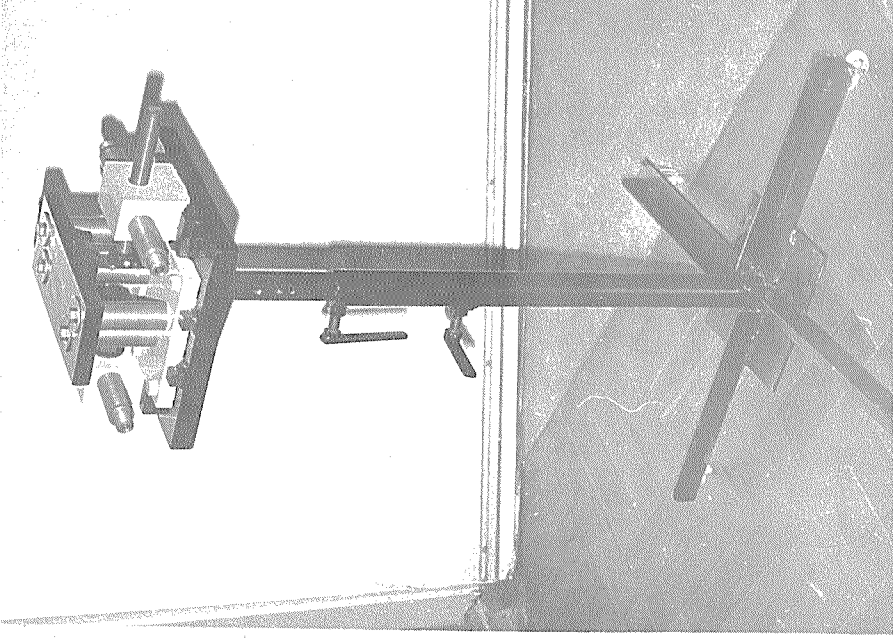
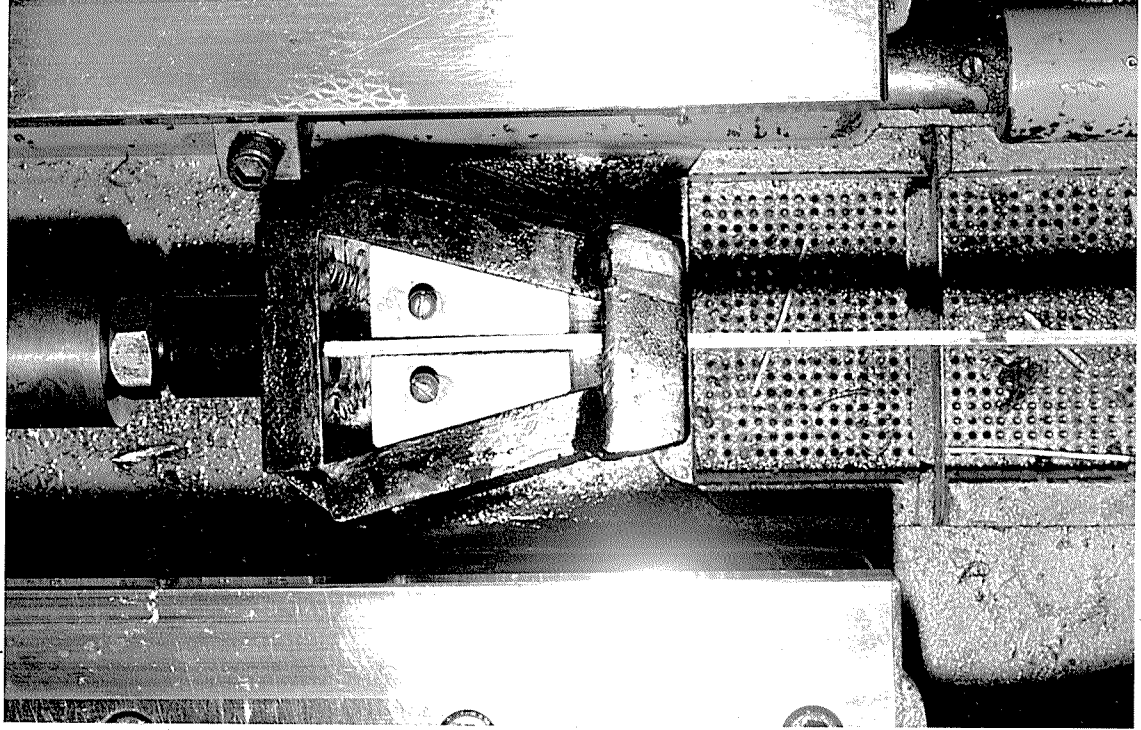


Figura III.9 - Visão global do dispositivo sobre



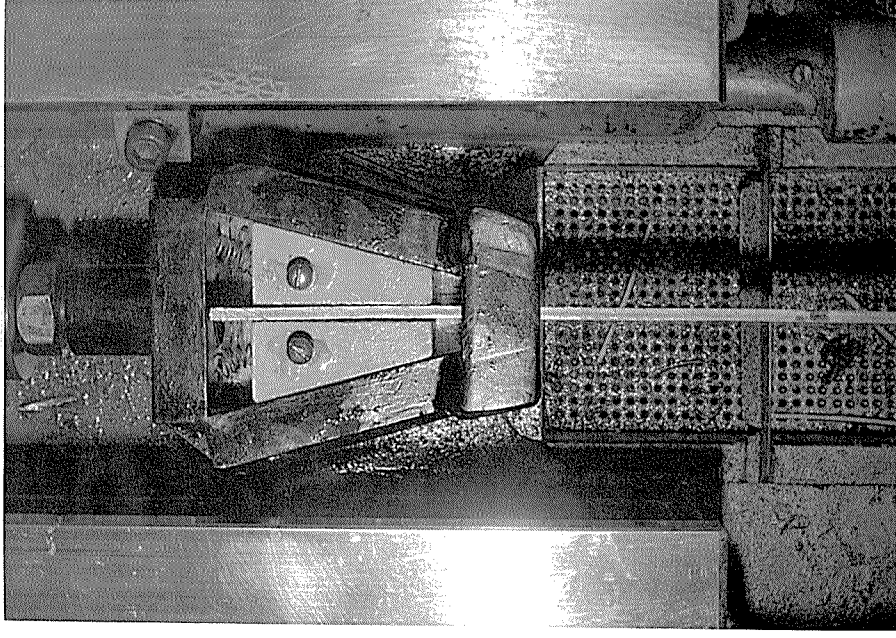


Figura III.10 - Vista da garra de tração montada
fila

de translação.

Para evitar que houvesse qualquer fator que interfundionamento ou na relação entre os movimentos mola de compressão (3) que, comprimida sobre o a porca de regulagem (4), retirava a folga entre o cutelo central.

No dispositivo utilizou-se da relação entre este no sentido de que a cada volta ou rotação completa da transladava a medida de um passo da rosca ut

Sendo a amostra (5) convenientemente traçada com intervalos eram previamente conhecidos, quando e mação, foi possível através do ponteiro (6) solid cada percorrer a trajetória circular entre duas vas.

Este movimento de rotação transformando-se em moção foi captado pelo relógio comparador (7) qu to cuja sensibilidade é da ordem de centésimos d (0,01mm).

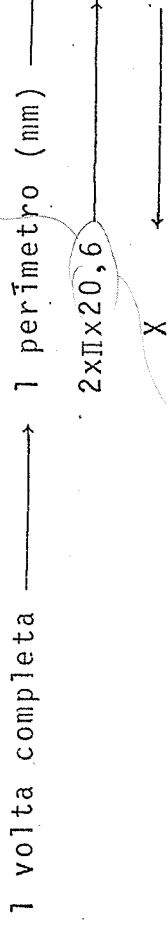
Assim, a partir das medidas do relógio comparado estabelecer-se o comprimento entre duas linhas c o processo e portanto avaliar o percentual de de rencial⁽¹⁾. A figura III.12 indica a montagem re

A seguir indica-se a sistemática para a medida d cunferencial.

Considere-se o seguinte caso:

0 passo da barra roscada será: $p = 25,4/16 = 1,6$

Por regra de três teremos:



0 valor de x será $\approx 17,1$ mm

*Este seria o comprimento
máximo, e não no sup*

A deformação circunferencial (deformação convencional) do cutelo, no lado tracionado será:

$$e = \frac{17,1 - 15}{15} \times 100\% \approx 14\%$$

Evidentemente que a sistemática empregada apresenta crepâncias uma vez que as medidas dependem da haste e a espessura da amostra vai variando com o flexo-tração.

Porém, pela simplicidade e pelo nível de confiabilidade, tal sistemática se tornou bastante razoável.

A medida de folga entre a ponta do ponteiro e a do com o uso de um calibre de folga.

III-3.5 - Funcionamento do dispositivo de flexo-

A figura III.13 indica esquematicamente o conjunto do dispositivo de flexo-tração e o banco de trefilação.

0 dispositivo de flexo-tração (1) conectado ao banco

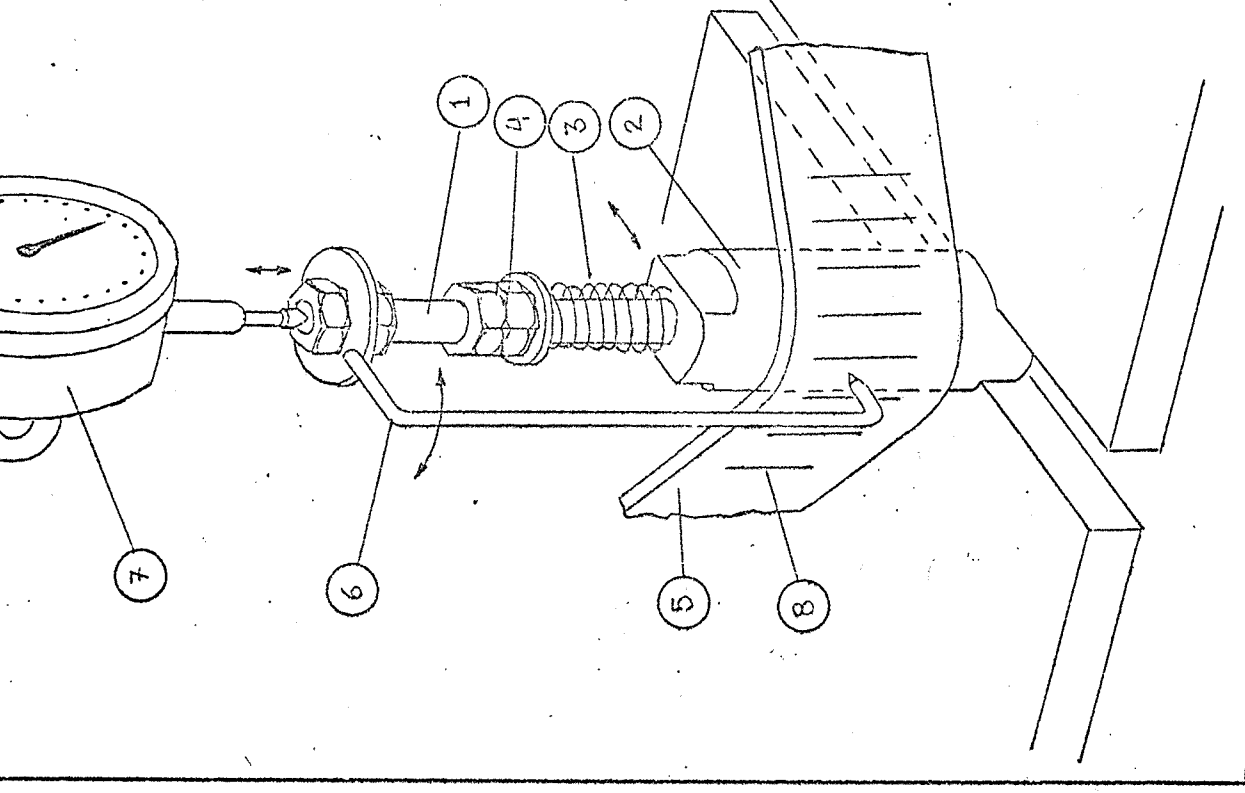
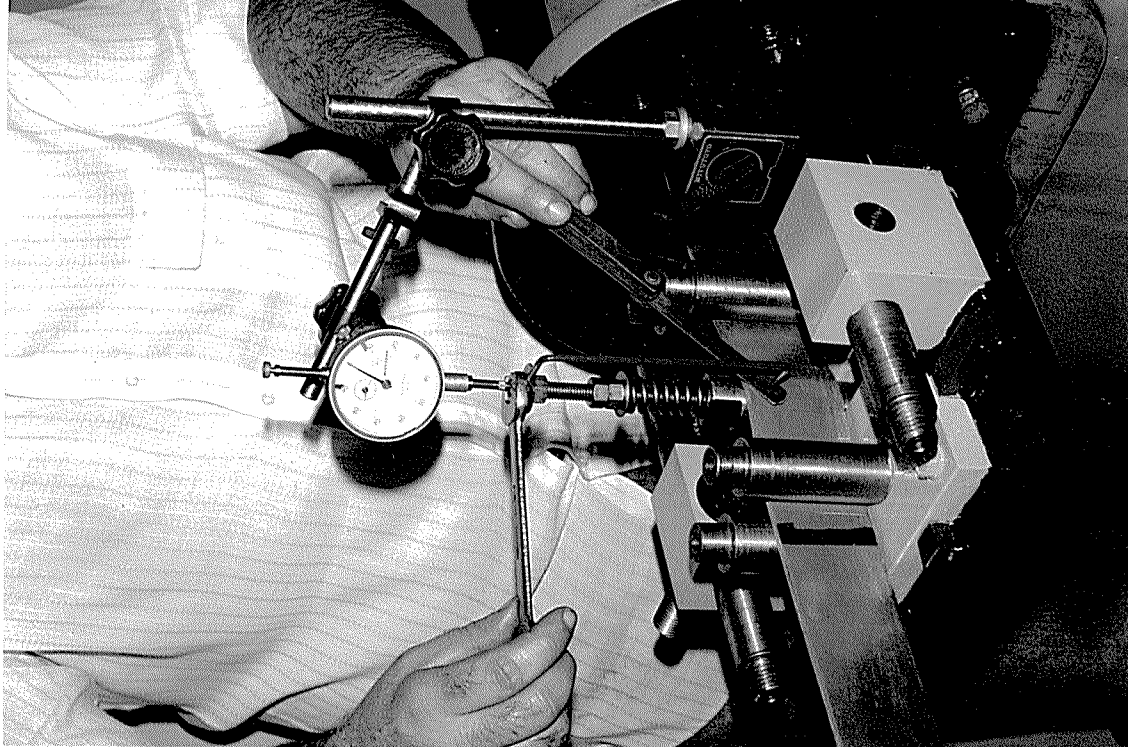


Figura III.11 - Dispositivo auxiliar de medição cunferencial

- 1 - barra roscada
- 2 - cutelo central
- 3 - mola de compressão
- 4 - porca de regulagem



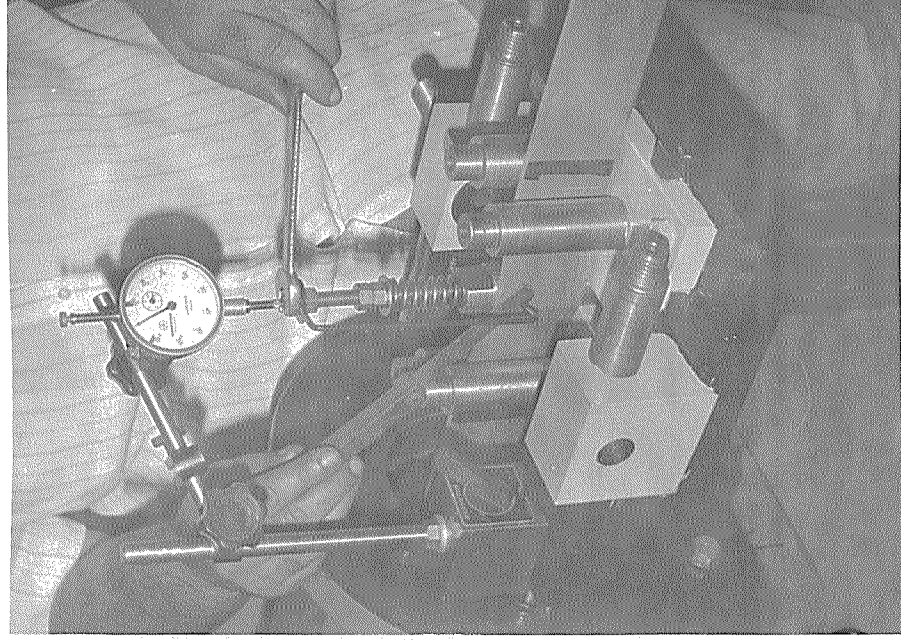


Figura III.12 - Vista do dispositivo auxiliar de formação circunferencial

completando assim um ciclo de flexo-tração.

Para minimizar os esforços da passagem da amostra de flexo-tração esta foi lubrificada com graxa.

Para que fosse possível o comportamento cíclico seus lados ou faces identificados (lado I, lado II) ocupada no ciclo presente por um lado era trocado no ciclo seguinte.

III.4 - Deformação Monotônica

III.4.1 - Introdução

Uma vez que se buscava a comparação de propriedades de resistência, alongamento percentual e dureza de amostras pré-deformadas monotonicamente por laminação ou processamento de ciclagem foi necessário o processamento completo destas propriedades.

O fato de não haver dados confiáveis na literatura com clareza as propriedades nas condições impostas de se ter conhecimento desta propriedade numa forma possível e a vantagem de desenvolver-se um procedimento para a manipulação das amostras visando a comparação para deformação cíclica, foram fatores decisivos para a realização dos experimentos de deformação monotônica.

As deformações monotônicas por laminação foram realizadas em graus, sendo desde a deformação nula (material não deformado) até um valor de 70% de deformação convencional.

III.4.2 - Obtenção das Amostras

Os corpos para ensaio de tração deveriam ser tracionados na direção original de laminação da chapa. Desta forma, foi retirada de uma tira com as seguintes dimensões 3/4".

Para tanto foi necessário a utilização de uma tesoura que é um equipamento geralmente usado em chapas e que é basicamente feito através do movimento de

A tesoura em questão tinha capacidade de corte de até 2 metros de comprimento e 1" de espessura.

Especial atenção foi tomada em relação a folga da tesoura para se evitar ao máximo que a tira se retorcida. A figura III.14 indica o exposto a

A tira foi cortada então em 10 pedaços de 200mm de comprimento tal forma que cada parte da amostra tinha as seguintes dimensões 200mm x 100mm x 3/4".

Como desejava-se conseguir amostras em vários graus de laminação por laminação optou-se pela seguinte

Todas as amostras teriam a mesma espessura final recomendada para corpos de prova para ensaio de tração norma ABNT⁽⁹⁾.

As amostras seriam primeiramente usinadas em suas extremidades para obter as mesmas espessuras, em seguida seriam recozidas no sentido longitudinal para qualquer trabalho de deformação anterior e laminação para a mesma espessura final.

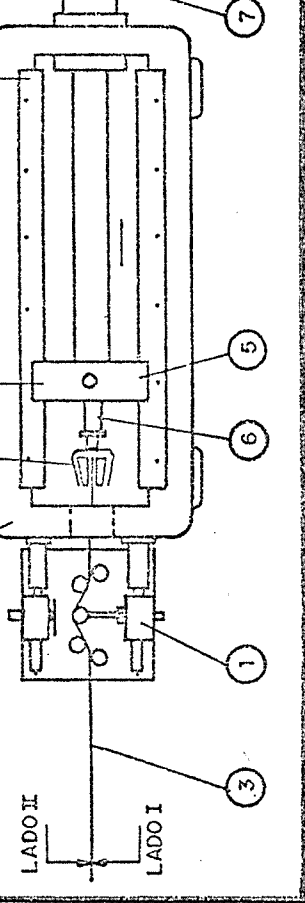


Figura III.13 - Esquema do conjunto de montagem de flexo-tração e o banco de tr

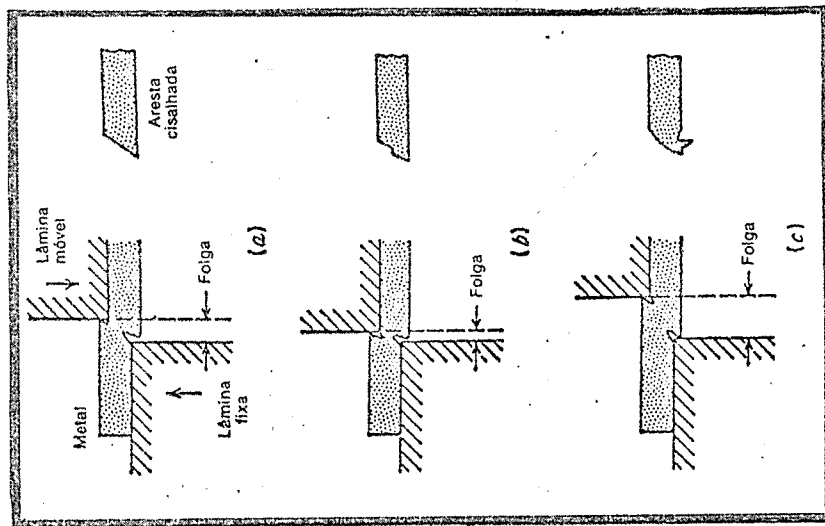


Figura III.14 - Corte da chapa de alumínio na t
 a) folga adequada
 b) folga insuficiente

Os valores são de deformação convencional considerável e a deformação ocorrida na largura foi desprezível.

O valor de 16,8mm foi a espessura máxima possível desse retirar os efeitos do retorcimento das amostras no corte na tesoura hidráulica.

Uma das dificuldades encontradas na usinagem foi a obtenção das amostras principalmente quando estas apresentavam mais finas apresentando assim deformações elásticas e muitas variações de espessura devido ao erro de medição nas faces da amostra.

A figura III-15 indica a solução adotada que foi um dispositivo de faceamento em torno (1) adaptado a um torno universal (2) promovendo o faceamento por torneamento.

A placa de alumínio (200mm x 100mm x 3/4") (4) + dispositivo de faceamento por um parafuso (5) na região de faceamento da periferia para o convencional.

Para a usinagem da região central o parafuso foi substituído por 2 alças de fixação (6) na região periférica.

Assim usinou-se um lado e posteriormente o outro lado da placa de alumínio até atingir-se a espessura desejada. Assim a placa de alumínio a manter um contato íntimo com a placa plana do dispositivo que havia sido previamente montada no torno, desta forma conseguiu-se eliminar as variações de espessuras.

Número da amostra	Espessura nominal de usinagem (mm)	Espessura nominal de laminação (mm)	Grau pr
1	5.0	—	0 (
2	5.5	5.0	
3	6.0	5.0	
4	6.5	5.0	
5	7.1	5.0	
6	8.3	5.0	
7	10.0	5.0	
8	12.5	5.0	
9	16.8	5.0	

Quadro III.1 - Espessuras alcançadas pelas amos
usinagem de suas faces e as defo
nicas atingidas após a laminação

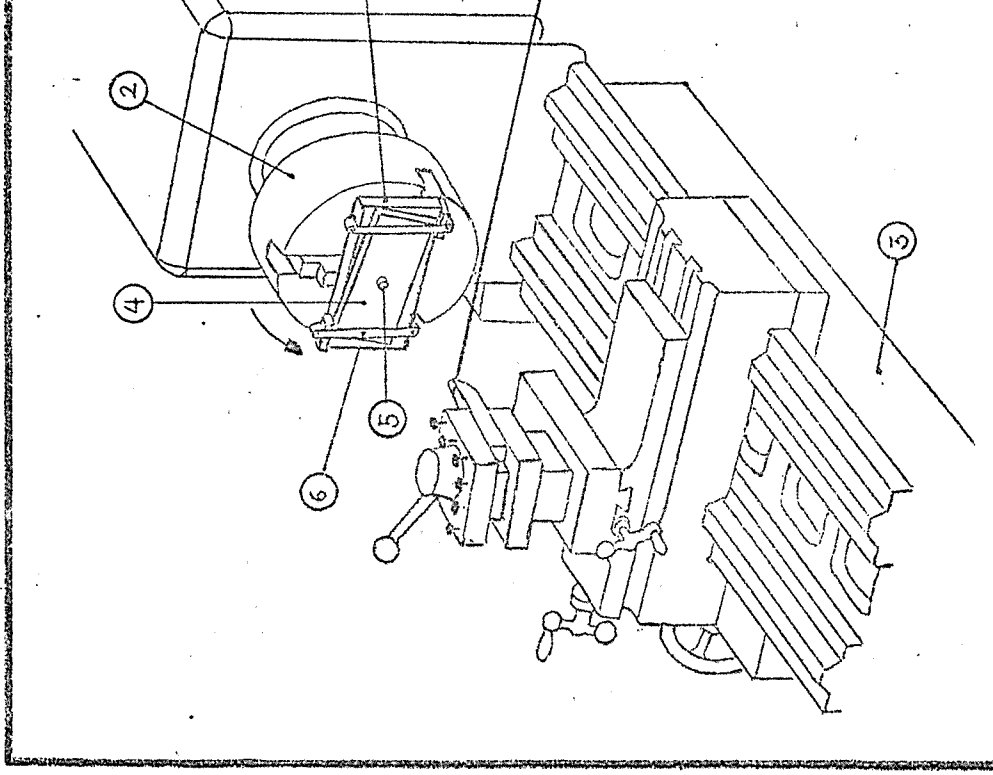


Figura III.15 - Montagem do dispositivo de faceamento universal

- 1 - dispositivo de faceamento em universal
- 2 - placa de 3 castanhas auto ce universal
- 3 - tórno universal
- 4 - placa de alumínio
- 5 - parafuso de fixação
- 6 - alças de fixação

Posteriormente a operação de usinagem, a etapa zimento de todas as amostras para que se pudes trabalho de deformação anterior.

Neste sentido utilizou-se um forno de mufla da controlador eletrônico, usando-se ainda um termel com junta fria calibrada.

A temperatura escolhida para o recozimento foi temperatura para o recozimento fosse de 345°C (8 temperatura deveu-se ao fato de que esta era a registrada no controlador do forno tubular que te utilizado para o recozimento das amostras pa clica e evidentemente o processo por princípio tivo.

A temperatura medida no centro do forno apresen entre 495°C e 510°C.

Procurou-se inicialmente homogeneizar o forno a se as amostras a temperatura de recozimento dur te 1 hora e 30 minutos e promoveu-se o resfriam chadas de um dia para o outro num período em to figura III.16 mostra a montagem utilizada.

A etapa seguinte foi proceder-se à laminação da a amostra recozida a qual, já havia atingido o necessário.

Para tanto lançou-se mão do laminador de labora Fröhling, duo não reversível com capacidade de cidade de laminação 12,5m/min e rolos para lami 200 mm.

Desta forma foi possível atender-se as condições

As amostras com maior grau de deformação tiveram os bastantes aumentados, sendo então cortadas num (200 mm).

As variações verificadas na largura foram desprezíveis e as variações encontradas na espessura e no comprimento

A etapa final para a obtenção das amostras foi o ensaio de tração e dureza.

Por definição inicial em cada placa de alumínio foram preparados dois corpos para ensaio de tração segundo os ensaios de dureza seriam realizados em pedacinhos convenientemente escolhidos. A figura III.17 mostra a disposição dos corpos de prova na placa de alumínio.

Para retirar os corpos de prova e também no sentido contrário o mais possível as dimensões, lançou-se o corpo de prova fresado como indica a montagem da figura III.18.

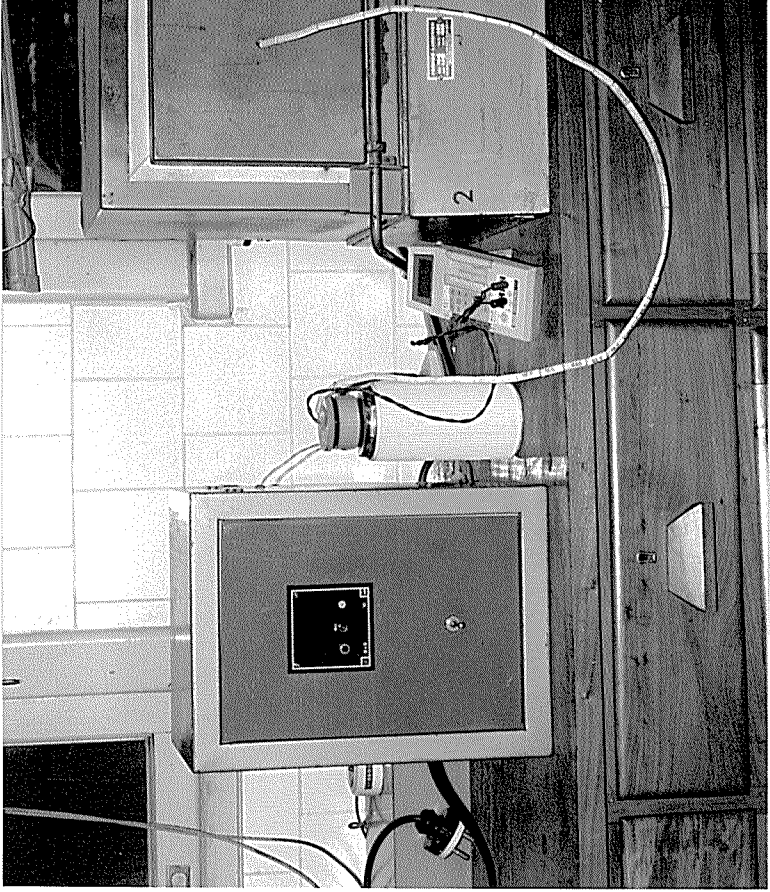
Tal gabarito consistia de duas placas de aço (1) e guias (2) fixavam sobre a mesa de uma fresadora uma pilha de placas de alumínio (4).

Com a ajuda de uma fresa de topo (5) e avanços de corte adequados, promoveu-se a usinagem dos corpos de prova, conseguindo-se assim uma equalização bem de suas dimensões

Posteriormente os corpos de prova para ensaio de tração e dureza de alumínio foram separados através da operação

Número do passe	Espessura inicial (mm)	Espessura final (mm)	Número de lamina passes
1	16.8	12.5	9
2	12.5	10.0	9,8
3	10.0	8.3	9,8
4	8.3	7.1	9,8,7
5	7.1	6.5	9,8,7
6	6.5	6.0	9,8,7,6
7	6.0	5.5	9,8,7,6
8	5.5	5.0	9,8,7,6

Quadro III.2 - Programa de passes para laminação tendido



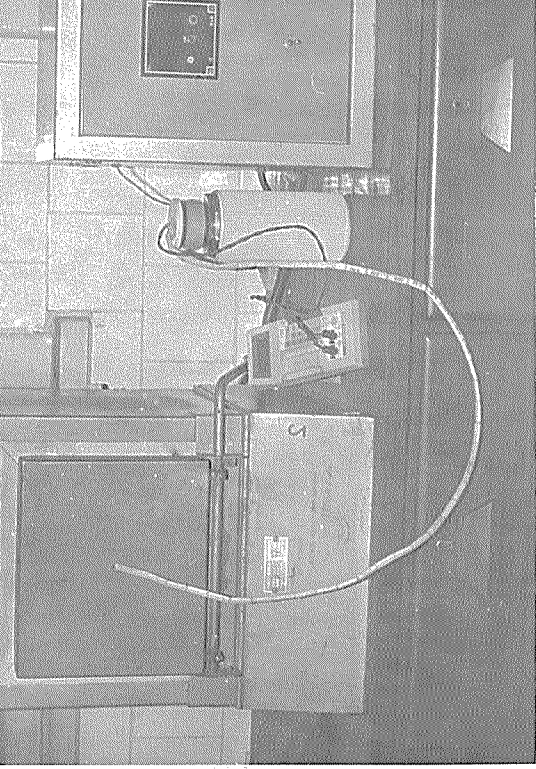


Figura III.16 - Montagem para o recozimento das
formação monotônica

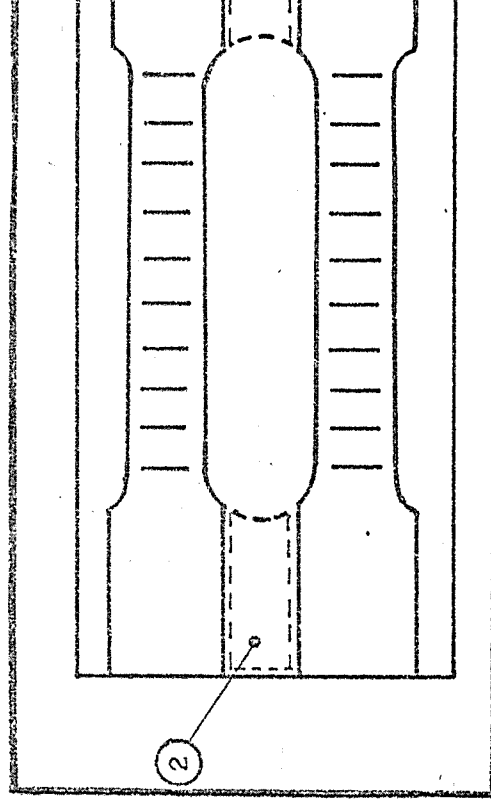


Figura III.17 - Disposição dos corpos para ensa
reza na placa de alumínio

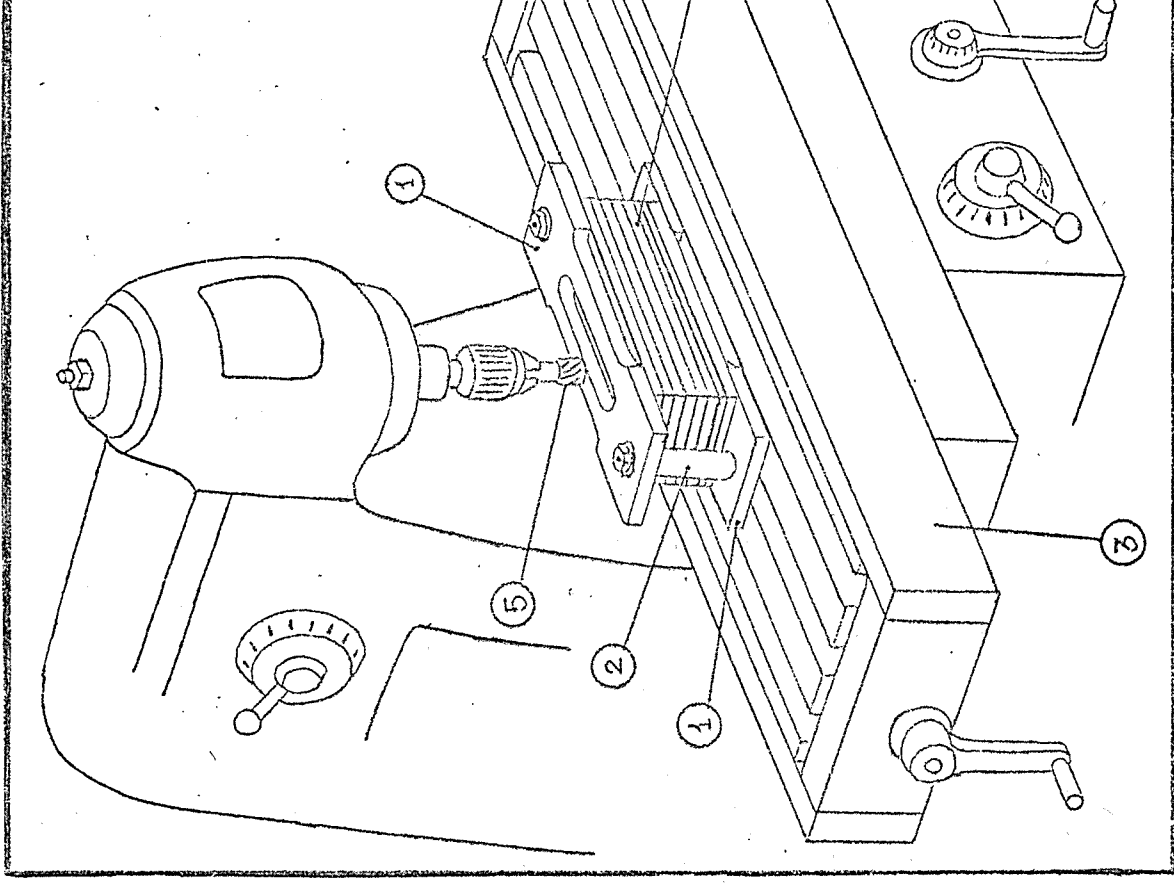


Figura III.18 - Montagem do gabarito para retirar
prova

1 - placa de aço

2 - guias das placas de aço

3 - fresadora universal

4 - placas de alumínio

mente lixados até o grau que possibilitasse as

III.4.3 - Testes realizados

Foram realizados testes para a medida do limite tração, dureza e alongamento percentual nas várias postas. (ver item IV.2 Resultados da deformação

Os ensaios de tração foram realizados em máquina de 10000 kgf e os ensaios de dureza em máquina da marca Gnehn Horgen conforme procedimentos (10).

A dureza escolhida foi a Vickers (5 kgf) por apr sensibilidade de medida ao longo da faixa de tes alongamento percentual foram feitas em 5Ø direta mostra traçada (9,10).

De qualquer forma, os valores encontrados foram os indicativos da literatura (8).

III.5 - Deformação Cíclica por Flexo-tração

III.5.1 - Introdução

Neste item procurar-se-á desenvolver todas as fa deformação cíclica como a obtenção das amostras flexo-tração.

Na obtenção das amostras para deformação por fle rou-se repetir o processo usado na obtenção da a mação monotônica no sentido de ter-se os mesmos

III.5.2 - Dimensões das amostras para flexo-tra

Considerando-se as razões já citadas (ver item das amostras para flexo-tração e o item III.4.2 mostras), a espessura escolhida (h) foi de 5mm e outras razões a amplitude de deformação cíclica

A largura (b) tomada como sendo dez vezes a espessura (50mm, propiciava por exemplo a possibilidade de prova de tração.

O comprimento (l) ficou em torno de 850mm, função do banco de trefila e do espaço útil de recozimento lar.

III-5.3 - Estados metalúrgicos das amostras de f

Usaram-se amostras recozidas e pré-deformadas em tração.

As imprecisões na medida da amplitude de deformação e dificuldades na confecção das amostras levaram a

Foram produzidas quatro amostras de cada estado

III.5.4 - Obtenção das amostras

A primeira fase evidentemente foi a retirada de fitas do restante da placa de alumínio. Estas seguintes dimensões: 60mm x 1000mm x 3/4".

A estratégia usada foi a mesma ou seja utilizou-

A fase seguinte seria a usinagem das faces das sendo que, no caso das amostras a serem apenas sura era de 5mm e no caso das amostras a serem por laminação a espessura era de 16,8mm.

Novamente foram enfrentados problemas de fixação mação elástica) das amostras, principalmente qu nor espessura.

Neste caso pelo próprio tamanho das amostras não tilização do dispositivo de faceamento em torno

Lançou-se mão de um novo dispositivo de faceamer niversal esquematizado na figura III.19.

A cantoneira (1) foi fixada a mesa da fresadora do previamente fresada para receber a fita de al

Fixadores ajustáveis (4) comprimiam a fita de al cantoneira através de lâminas (5), promovendo as sicionamento.

A operação de faceamento por fresamento em ambas tas, foi realizada com a utilização de uma fresa ria (6) até atingir-se a espessura desejada.

Digno de nota foi o levantamento das velocidades ços além da eficiência na fixação das partes que ram para um bom acabamento superficial e para qu praticamente variações na espessura das amostras

Para o caso das amostras a serem recozidas, post nagem das faces, promoveu-se o ajuste da largura

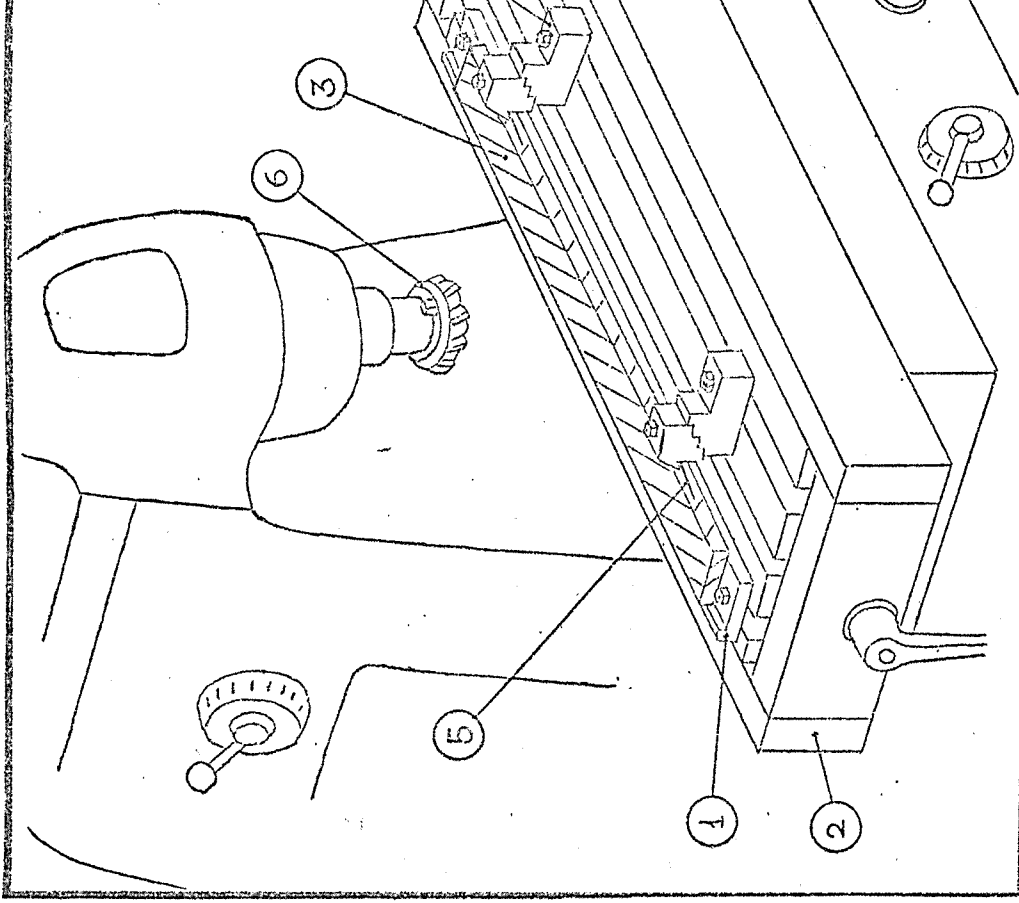


Figura III.19 - Montagem do dispositivo de facea
ra universal

- 1 - cantoneira fresada
- 2 - mesa da fresadora universal
- 3 - fita de alumínio

Levantamento realizado com o uso de termo-par e junta fria mostrou a existência de um comprimento em torno de 700mm (3 zonas), valor este s no caso.

Foram constatadas variações de até 10°C entre o comprimento útil, sendo que as temperaturas sempre superiores.

Os procedimentos para o recozimento foram os mesmos de deformação monotônica. Procurou-se realizar o recozimento de 700mm tomados a partir de uma das partes. A temperatura medida no centro do forno tubular variou entre 495°C a 505°C. As figuras III.20 e III.21 estão expostos acima.

Neste ponto as fitas de alumínio com espessura de 4mm se prontas para o processamento por flexo-tração. No caso da fita de alumínio a ser pré-deformada após a usinagem das faces, esta foi partida em 4 partes com comprimento de 250mm.

Foram então as partes completamente recozidas, na mesma maneira que as fitas anteriores, procedimento até a espessura de 5mm no mesmo programa de deformação monotônica.

Assim o comprimento alcançado pelas fitas laminares de 840mm e só então promoveu-se o ajuste da lamina fresamento em pacote.

Neste caso também a variação da largura encontra



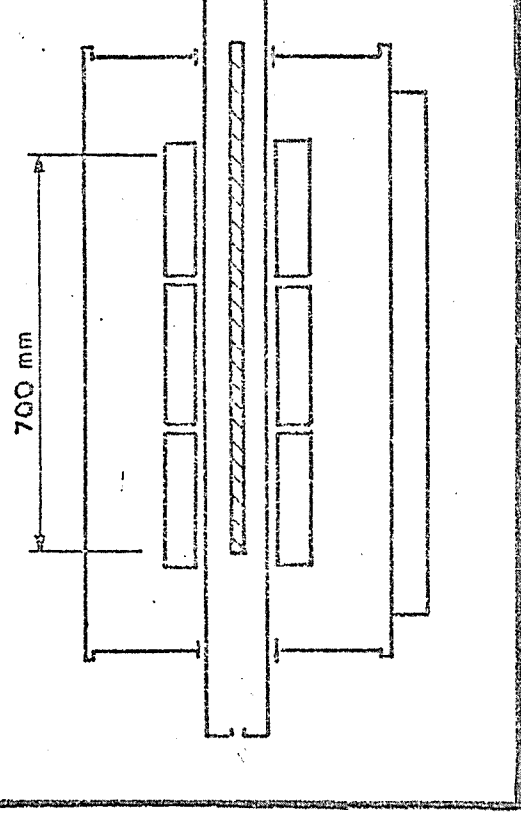


Figura III.20 - Comprimento útil de recozimento da ponta da fita de alumínio

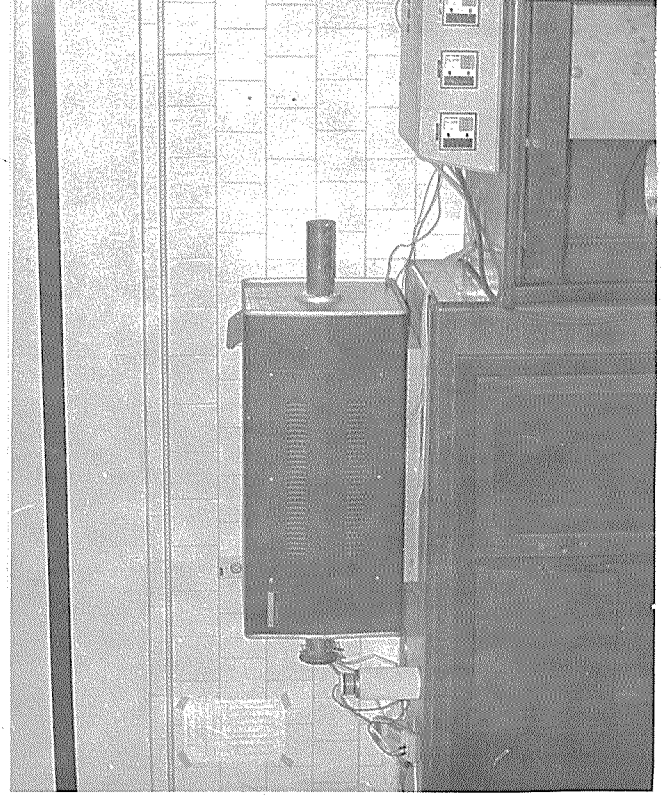


Figura III.21 - Vista global do forno tubular p

III.5.5.1 - Operação do dispositivo de flexo-tração

Como já foi visto (ver item III.3.5) o Dispositivo de Flexo-tração - Funcionamento do dispositivo de Flexo-tração de flexo-tração consistia na passagem da fita do dispositivo de flexo-tração.

Para que fosse possível o comportamento cíclico faces ou lados identificados, sendo montados alternadamente no ciclo.

O sistema motor na operação foi realizado pelo motor elétrico constituído a partir de um brochadeira da marca "Eletrol" com velocidade máxima de 6000 kgf, velocidade de operação de 9000 min, velocidade de retorno fixa de 9m/min. e curso de 100 mm.

No circuito de força entre a garra mecânica que segurava o alumínio e o cursor móvel do banco de trefilação havia uma carga que por sua vez foi ligada a uma Ponte de medição em kgf os esforços de tração durante a operação de flexo-tração.

III.5.5.2 - Amostra de flexo-tração

Além de serem identificadas as faces da amostra, foram consideradas 4 regiões como indica a figura III.22.

A região (A) corresponde ao espaço entre a ponta da garra na garra mecânica e o ponto de saída do dispositivo de flexo-tração não sofreu o processamento de flexo-tração e

central móvel.

A região(C) corresponde a área onde se deu o processo de tração completo, propriamente dito. Os corpos ensaiados de tração, alongamento percentual e duração dos desta região.

A região(D) corresponde a parte final da fita de tração sofreu o processamento de flexo-tração parcial a amostra não chegou a sair do dispositivo. Sua função ter as condições de deformação durante o processo (C) além de medidas da amplitude de deformação cíclica.

III.5.5.3 - 0 experimento

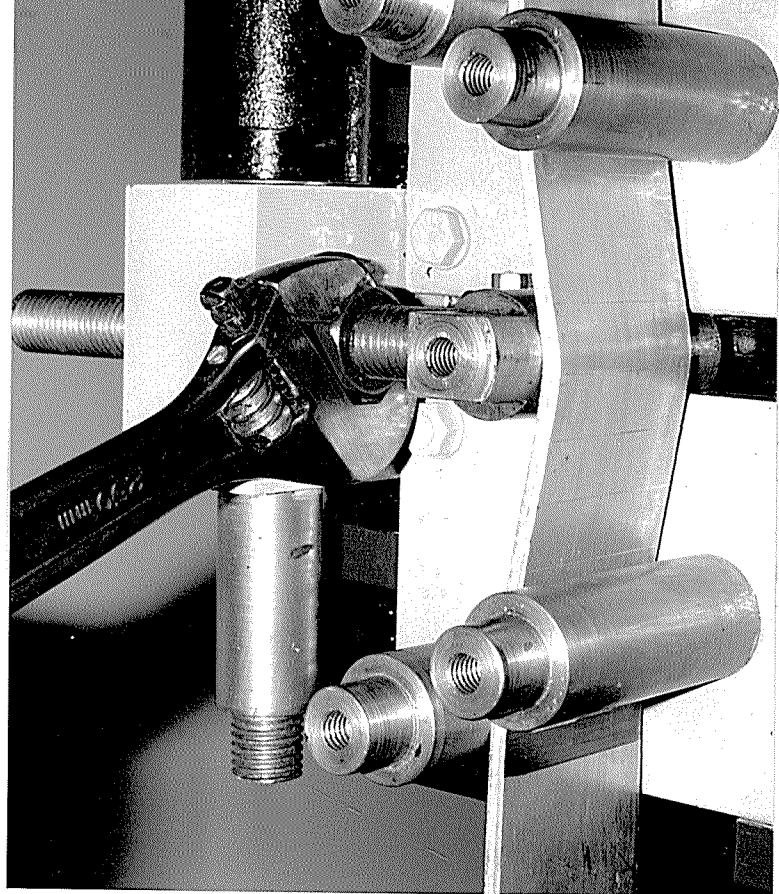
A primeira decisão considerada foi a de tomar-se estado recozido e outra no estado laminado em 700°C da caso 2 ciclos de deformação por flexo-tração.

No entanto em ambas os casos era necessário que o deslocamento no sentido de ter-se a amplitude de deformação desejada.

Para tanto nas duas amostras as regiões(B) e (D) foram separadas em intervalos entre linhas de 15mm.

Em cada caso montada a amostra e observada a operação do sistema ou seja movimentos da fita sem flexão para evitar interferências; promoveu-se a montagem do dispositivo de medição da deformação circunferencial.

Com o dispositivo de flexo-tração posicionado sobre a amostra.



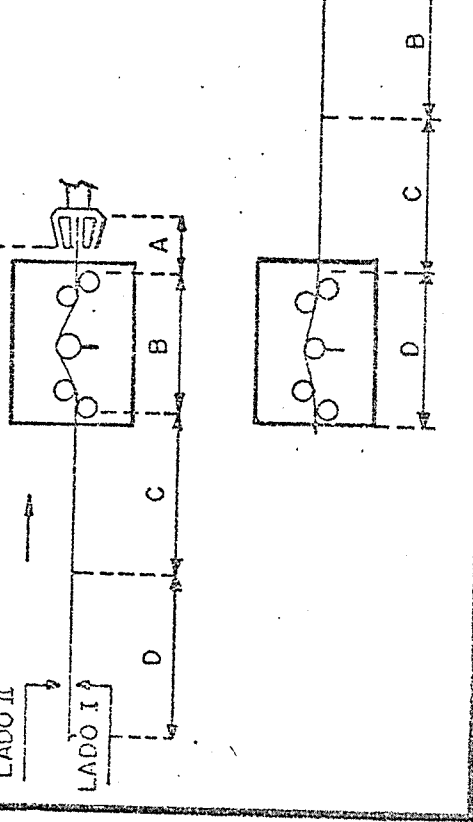


Figura III.22 - Regiões da amostra de flexo-tra

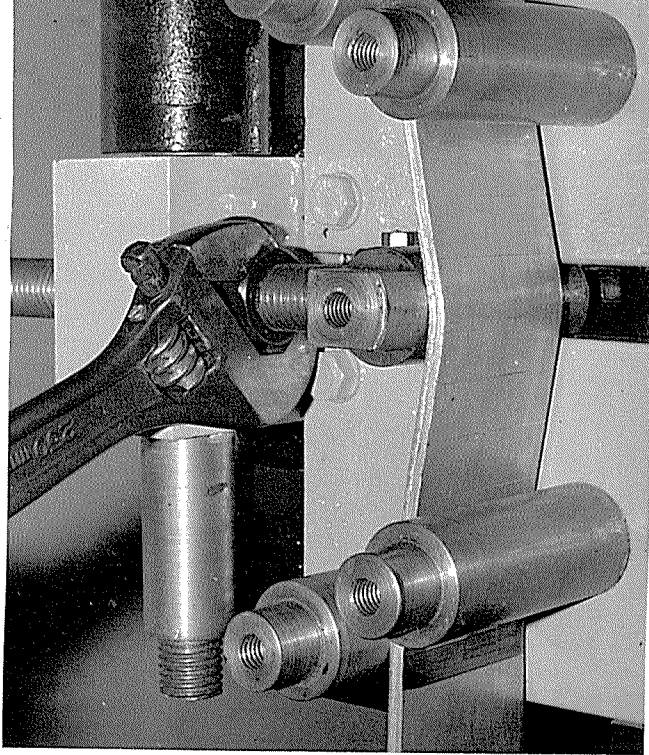


Figura III.23 - Vista da deformação circunferen
movimentação do cutilo central

ma volta de porca de movimentação ou seja um parâmetro (p = 2,54mm).

Na 1ª fase não foi possível obter-se medidas de deflexão (H); a trajetória do ponteiro é trita.

Já na 2ª fase as medidas foram realizadas sem maiores dificuldades; a amostra adaptava-se bem ao cutelo promovendo um deslocamento longo da superfície de contato cutelo-amostra.

Na 3ª fase aumentando-se o ângulo de dobramento (H), observou-se que a deformação agora continuava na área central de contato do cutelo-amostra caracterizada por uma deformação localizada e inviabilizando as medidas com o dispositivo auxiliar.

Felizmente as medidas de deformação circunferencial foram obtidas com o valor 8p (8x2,54 = 20,32mm) no ponto de operação para que obtivesse a amplitude máxima desejada (14%).

A sistemática utilizada para a medida da deformação circunferencial foi a mesma apresentada no item III-3.4.2 - Medição da deformação circunferencial.

Determinado o ponto de operação (flexa H) do dispositivo auxiliar de medição de deformação circunferencial foi retirada e recolocada a sub-placa superior da amostra foram engraxadas para melhor deslizamento.

Procedeu-se a operação com uma velocidade de translação.

ra das amostras não havia uma certeza absoluta.

Além disto velocidades maiores acarretariam dife-
renças entre os acionamentos do banco de trefila-
mento da evolução da força de tração na ponte d

Em compensação o uso de velocidades menores, de
regulagem do banco de trefila (válvula regulado-
riam provocar em alguns casos o movimento desco-
môvel o que também não seria desejável além de
to longo.

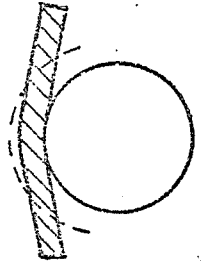
Após a operação, ao final do curso, o dispositi-
vado sobre a região (D) também previamente traçad-
entre linhas de 15mm.

Pretendia-se medir a amplitude de deformação
sub-placa superior e a remontagem do dispositiv-
ção da deformação circunferencial.

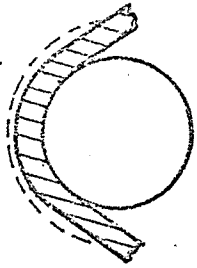
Esta verificação da deformação circunferencial s-
vez que o processo inicial de dobramento foi est-
mostra parada e o cutelo movendo-se e agora, na
de trefila, o processo de dobramento era dinâmico
lo fixo, posicionado e a amostra transladando-s

A figura III-25 mostra as duas situações, ou seja
estático e o dobramento dinâmico.

Após a retirada da sub-placa superior observou-s-
uma deformação descentrada ou seja o dobramento
cutelo central se dava após a linha de simetria



1ª FASE



2ª FASE



3ª

Figura III-24 - Evolução da deformação circunferencial de flexão-tração

--- trajetória do ponteiro do diâmetro para medida da deformação

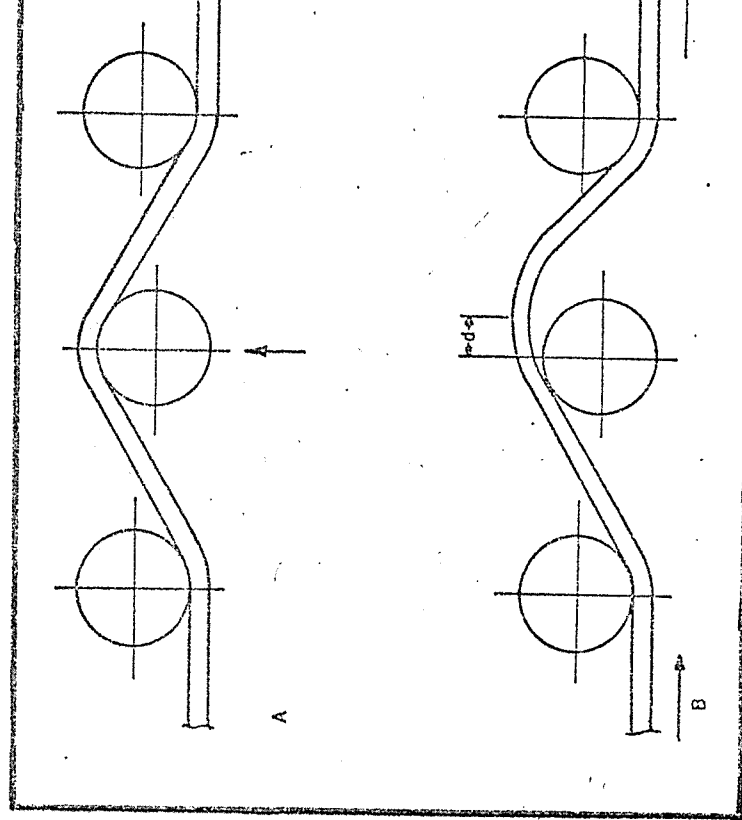


Figura III-25 - Situações de dobramento

A - dobramento estático

B - dobramento dinâmico

cura maior que o raio de curvatura do proprio c
uma amplitude de deformação menor do que a defor
ocasião do dobramento estático.

Não era possível mais utilizar-se o dispositivo
ção da deformação circunferencial devido a desce

Para se fazer uma avaliação da deformação circun
da no dobramento dinâmico, lançou-se mão do segu

Já que a região onde se localiza a deformação de
D) estava previamente traçada, marcou-se cuidado
fita adesiva o novo intervalo entre linhas.

Retirando a fita adesiva e fazendo-se a medida l
obteve-se uma deformação circunferencial também
de deformação dinâmica da ordem de 10%.

A possibilidade de aplicar um dobramento estátit
maior no sentido de se obter uma deformação dinã
foi considerada pois na evolução de tal dobramen
atingir-se a 3ª fase.

Desta forma tomou-se este esquema para a operaã
cíclica.

A cada ciclo promoveu-se o dobramento estático c
8p trasladando-se a fita pelo dispositivo a vel
min. Monitorou-se as operações através do acompan
tração e medidas de espessura e largura da amost
cada ciclo, (ver item IV.3.1 Dados do monitoram
de flexo-tração).

do-se a possibilidade da realização de um número maior de ciclos (B) no ponto de contato com o cutelo cal.

Para contornar-se o problema tomou-se a seguinte solução: a aplicação da flexa (movimento do cutelo central) também um movimento de translação na amostra a estudar. Assim era possível aplicar-se a flexa e realizar o maior número de ciclos.

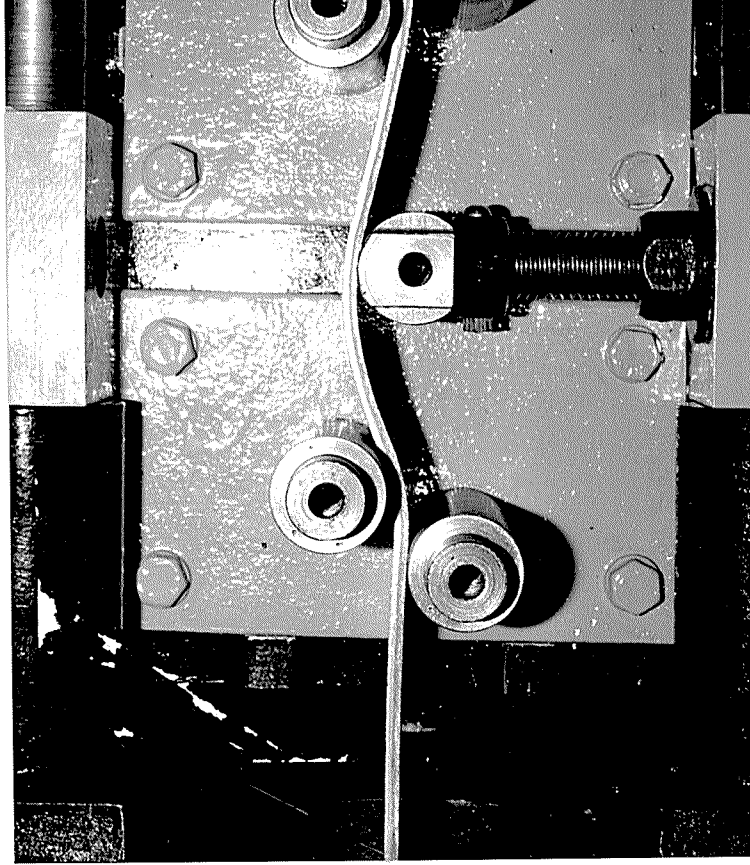
A figura III.26 indica esquematicamente os aspectos dos processamentos. As figuras III.27 e III.28 mostram alguns resultados obtidos anteriormente.

Após os processamentos foram retiradas das amostras as partes úteis (regiões C) através de operação manual.

Utilizou-se novamente o gabarito fresado em montado da figura III-18, para a confecção de uma amostra de cada condição de ciclagem. Foram retiradas também as amostras para os ensaios de dureza.

Os corpos de prova para tração e dureza foram ajustados na forma anteriormente vista para a deformação monostática. O limite de resistência a tração, dureza e alongamento foram determinados nas mesmas máquinas. Os dados foram normalizados (9,10).

2 - Dados do processamento de flexo-tração).



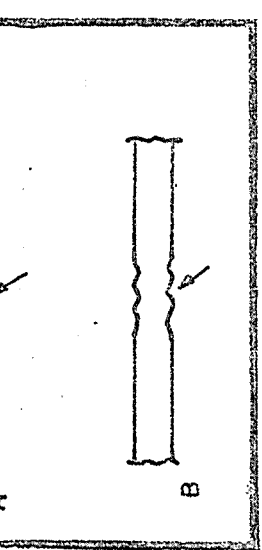
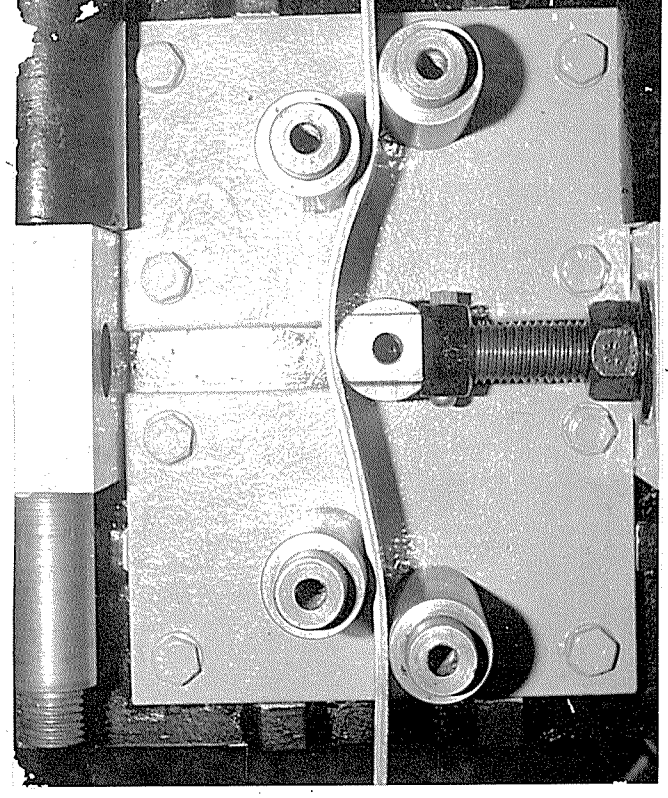
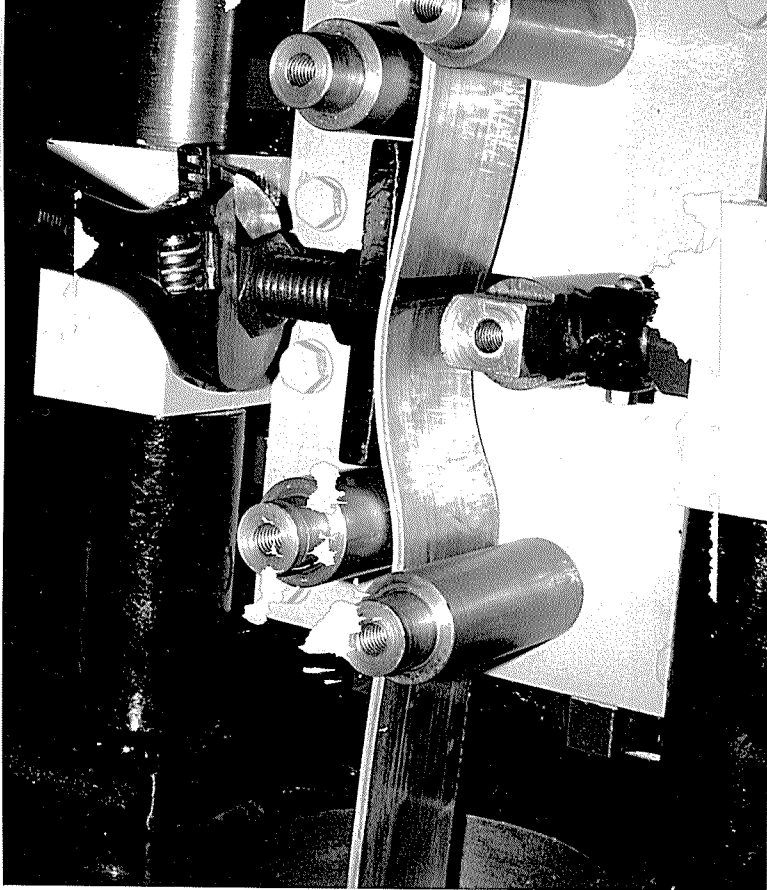


Figura III.26 - Enfraquecimento da amostra na região de contato com o cutelo central

- A - dobramento estatico sem movimento
- B - dobramento estatico com movimento





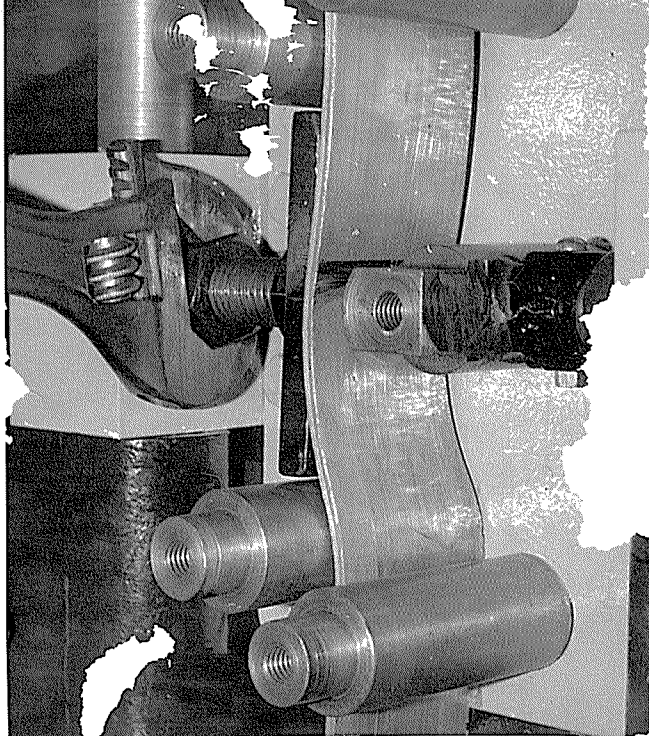


Figura III.28 - Aplicação da placa de apoio prom
mação extra para a retirada da a

za e alongamento percentual antes e após a operação de ciclagem.

Número de ciclos: amostras de flexo-tração recozida; 2,4,6,12 ciclos, amostras de flexo-tração pré-deformada em 70% por laminação 2,4,6 ciclos (ver item IV,3.1 Dados do monitoramento de processo de flexo-tração).

Monitoramento: força de tração, espessura, largura e aspectos de ruptura da amostra verificados a cada ciclo.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

2
AO



IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1 - Introdução

Neste capítulo apresentam-se basicamente os resultados obtidos para os ensaios de tração e dureza nos vários estados metalúrgicos.

IV.2 - Resultados da Deformação Monotônica

O quadro IV.1 indica os resultados encontrados para os ensaios. São valores médios calculados a partir das medidas. Os gráficos IV.1, IV.2, IV.3 indicam as faixas de variação encontradas em função do grau de deformação convencional por laminação.

Como já foi dito anteriormente, as variações de largura durante a laminação foram desprezíveis. Desta forma o cálculo do grau de deformação foi realizado considerando-se apenas as variações de espessura.

Usaram-se instrumentos como paquímetro e o micrômetro para as medidas lineares tais como espessuras, larguras, etc.

IV.3 - Resultados da Deformação Cíclica por Flexo-Tração

IV.3.1 - Dados do monitoramento do processo de flexo-tração

Os quadros IV.2 e IV.3 e os gráficos IV.4, IV.5, IV.6, IV.7 indicam os dados do monitoramento do processo de flexo-tração.

O número de ciclos realizados, como já foi visto no item III.2.10 Número de ciclos a serem realizados, foi basicamente escolhido em função do monitoramento.

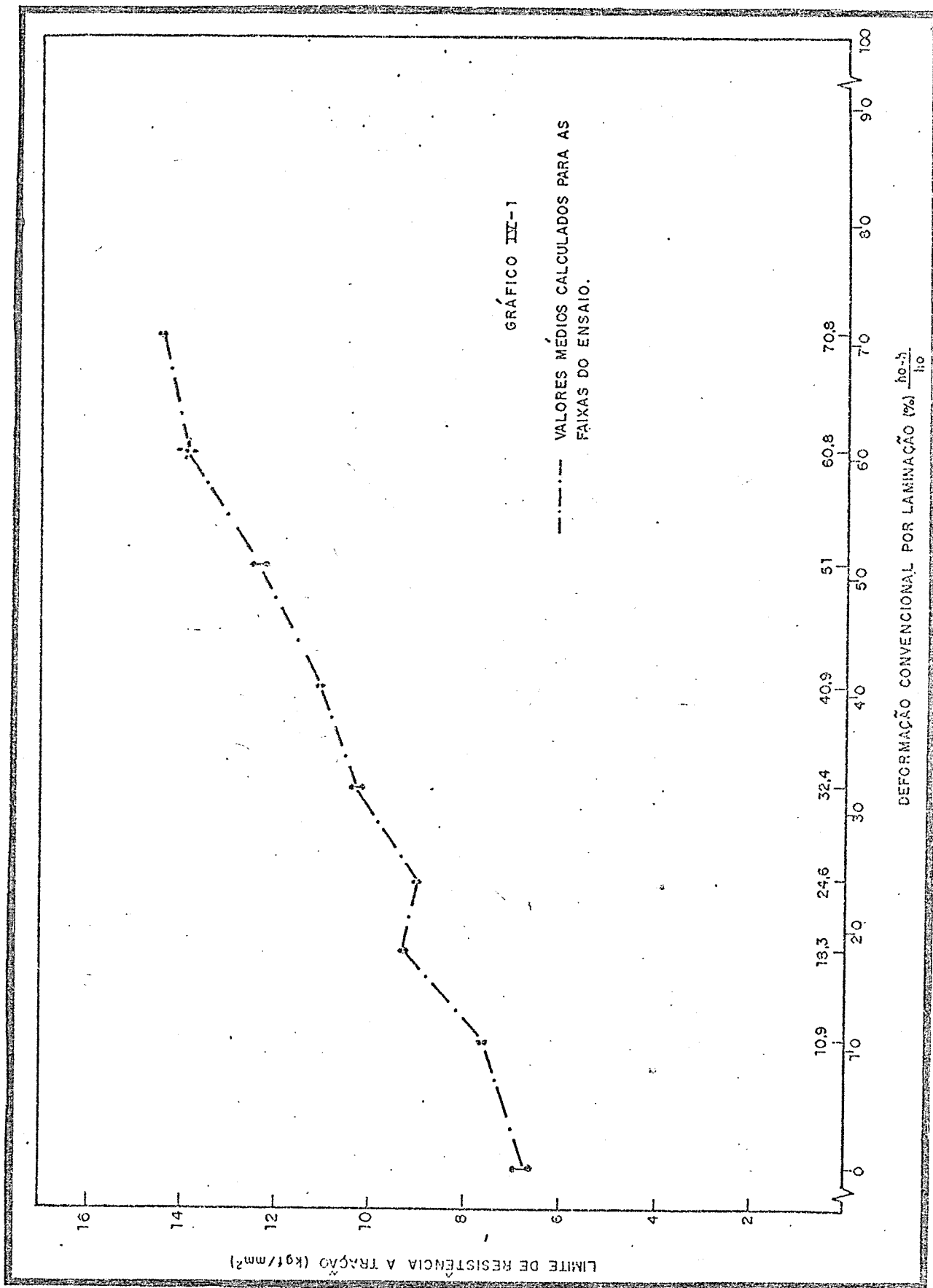
Das oito amostras disponíveis, uma das amostras pré-deformadas em 70% por laminação foi perdida nas primeiras tentativas e não foi repostada devido as dificuldades de obtenção.

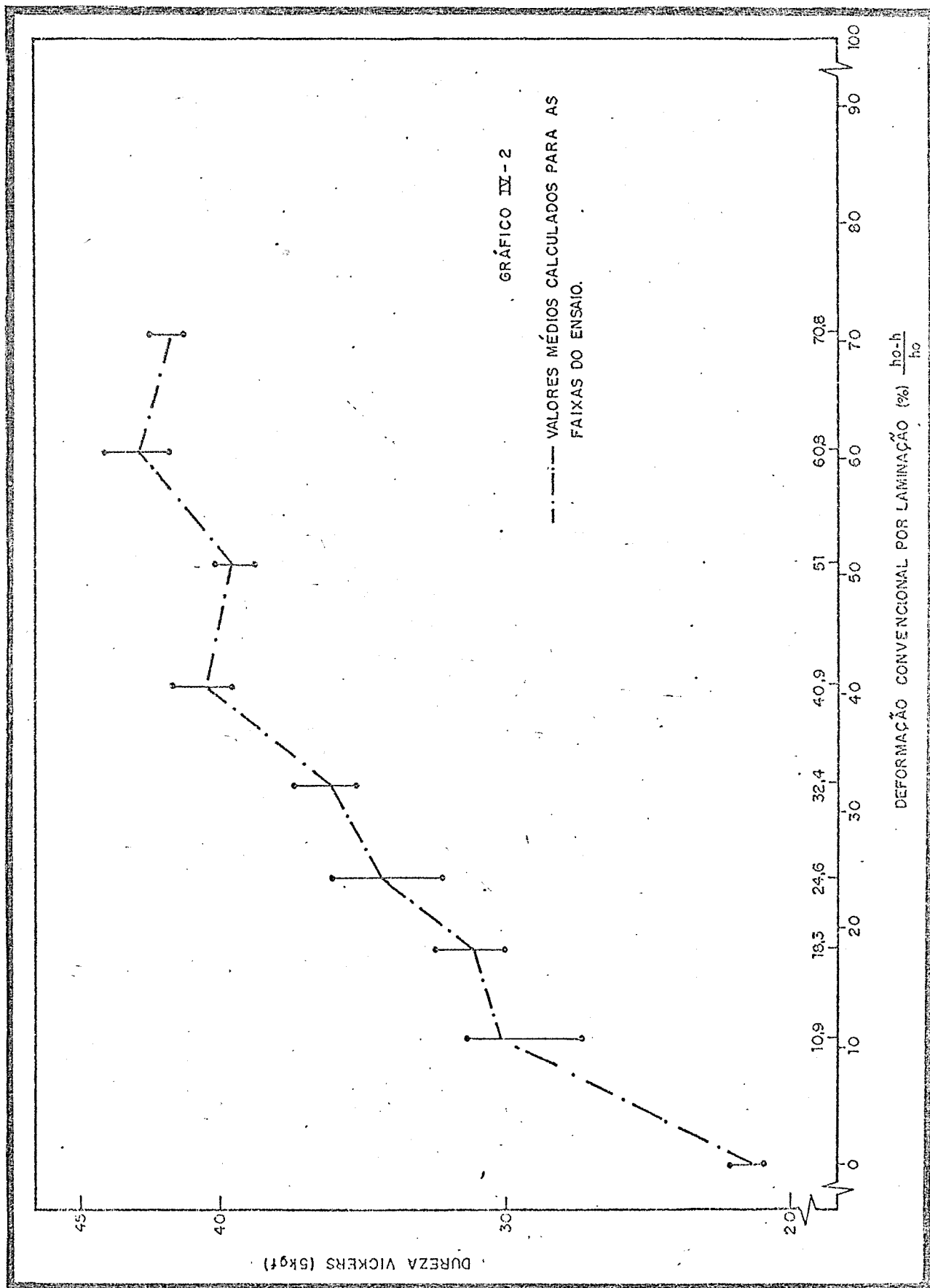
É importante salientar que os valores da espessura e da largura indicados a cada ciclo são na realidade dados calculados principalmente a partir dos valores medidos ao longo da parte útil (região C).

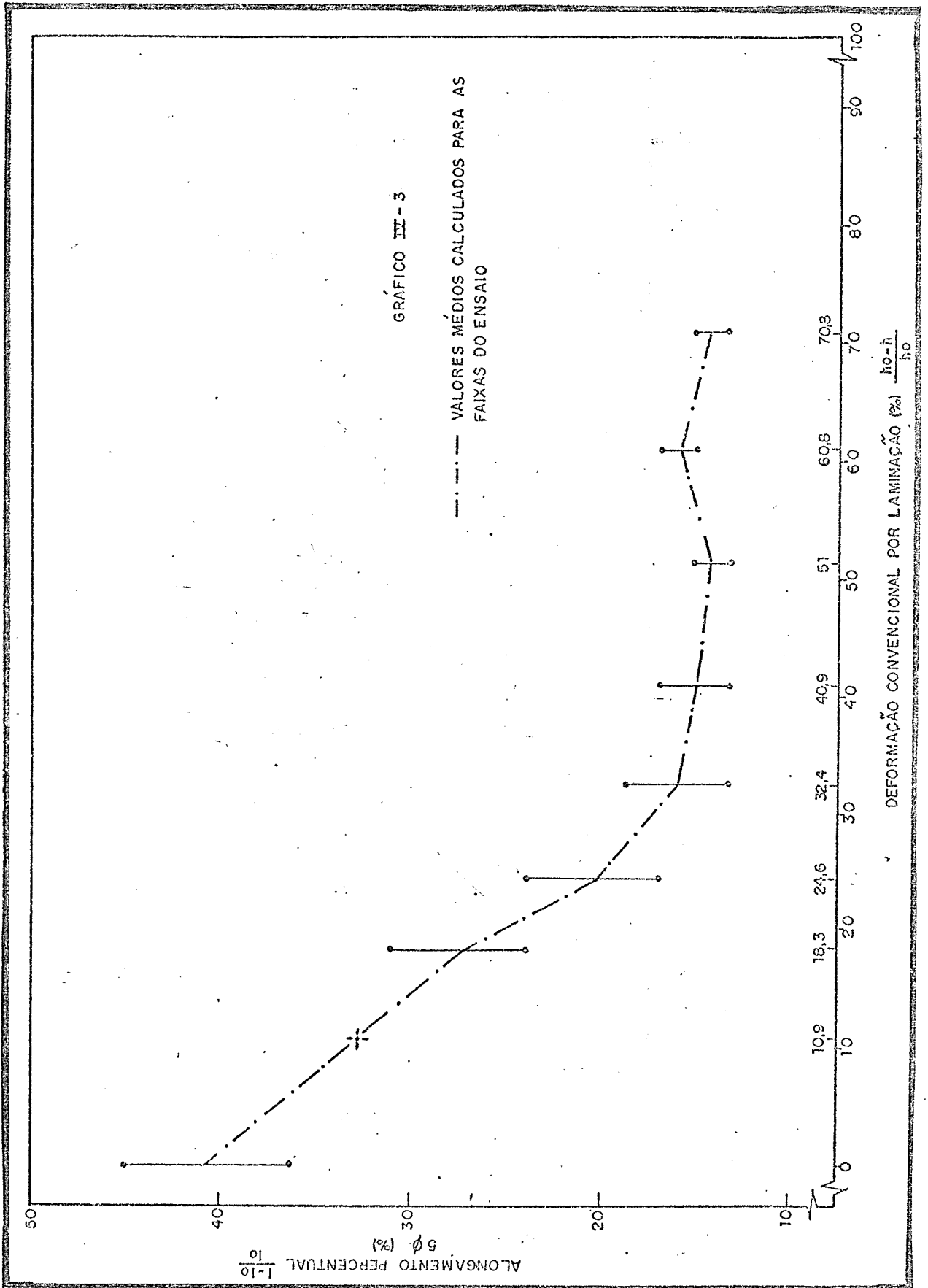
Número da amostra	Espessura de usinagem (mm)	Espessura de laminação (mm)	Deformação convencional atingida (%)	Limite de resistência a tração (Kg/mm ²)	Dureza Vickers (5Kg _f)	Alongamento percentual 5 ϕ (%)
1	5.0	—	0 (recozido)	6.8	21.6	40.7
2	5.5	4.9	10.9	7.7	30.2	32.7
3	6.0	4.9	18.3	9.3	31.2	27.4
4	6.5	4.9	24.6	9.0	34.4	20.3
5	7.1	4.8	32.4	10.3	36.3	16.0
6	8.3	4.9	40.9	11.0	40.5	15.1
7	10.0	4.9	51.0	12.4	39.7	14.2
8	12.5	4.9	60.8	13.2	42.9	15.9
9	16.8	4.9	70.8	14.4	41.9	14.2

Quadro IV.1 - Resultados encontrados na deformação monotônica

Obs: Os dados do limite de resistência, dureza e alongamento percentual são valores médios calculados para as faixas dos ensaios.







Amostra	Número do ciclo	Lado	Espessura h (mm)	Largura b (mm)	Força de tração F (Kgf)	Tensão de tração T (Kgf/mm ²)	Descentragem d (mm)
2 ciclos	0	—	5.0	50.1	—	—	11.0
	1	I	4.8	50.0	870	3.63	
	2	II	4.6	49.8	800	3.49	
4 ciclos	0	—	5.0	50.0	—	—	12.5
	1	I	4.8	49.8	880	3.68	
	2	II	4.7	49.6	840	3.60	
	3	I	4.5	49.5	790	3.55	
	4	II	4.4	49.4	610	2.81	
6 ciclos	0	—	5.0	50.1	—	—	10.0
	1	I	4.8	50.0	930	3.88	
	2	II	4.6	49.8	720	3.14	
	3	I	4.5	49.6	670	3.00	
	4	II	4.4	49.5	560	2.57	
	5	I	4.3	49.2	520	2.46	
	6	II	4.2	49.1	490	2.38	

Quadro IV.2 - Dados do monitoramento das amostras pré-deformadas por laminação

grau de deformação 70,2%

amplitude de deformação estática \approx 14%

amplitude de deformação dinâmica \approx 10%

flexa 8 passos

velocidade de teste 1,5 m/min

tensão de tração $T = F/(hxb)$

Amostra	Número do ciclo	Lado	Espessura h (mm)	Largura b (mm)	Força de tração F (Kgf)	Tensão de tração T (Kgf/mm ²)	Descentragem d (mm)
2 ciclos	0	—	5.0	49.8	—	—	12.5
	1	I	4.8	49.5	320	1.35	
	2	II	4.6	49.4	360	1.58	
4 ciclos	0	—	5.0	49.9	—	—	12.0
	1	I	4.8	49.7	360	1.51	
	2	II	4.6	49.5	410	1.80	
	3	I	4.5	49.4	320	1.44	
	4	II	4.3	49.3	350	1.65	
6 ciclos	0	—	5.0	49.9	—	—	12.5
	1	I	4.8	49.7	340	1.43	
	2	II	4.6	49.4	360	1.58	
	3	I	4.5	49.2	270	1.22	
	4	II	4.3	49.1	310	1.47	
	5	I	4.2	49.0	290	1.41	
	6	II	4.1	48.9	270	1.35	
12 ciclos	0	—	5.0	49.9	—	—	12.5
	1	I	4.7	49.7	340	1.46	
	2	II	4.6	49.4	360	1.58	
	3	I	4.4	49.3	370	1.71	
	4	II	4.3	49.2	270	1.28	
	5	I	4.2	49.0	320	1.55	
	6	II	4.1	48.9	260	1.30	
	7	I	4.0	48.8	270	1.38	
	8	II	3.9	48.7	230	1.21	
	9	I	3.8	48.5	180	0.98	
	10	II	3.7	48.4	240	1.34	
	11	I	3.6	48.3	200	1.15	
12	II	3.5	48.2	210	1.24		

Quadro IV.3 - Dados do monitoramento das amostras recozidas
 amplitude de deformação estática $\approx 14\%$
 amplitude de deformação dinâmica $\approx 10\%$
 flexa 8 passos
 velocidade de teste 1,5 m/min
 tensão de tração $T = F/(hxb)$

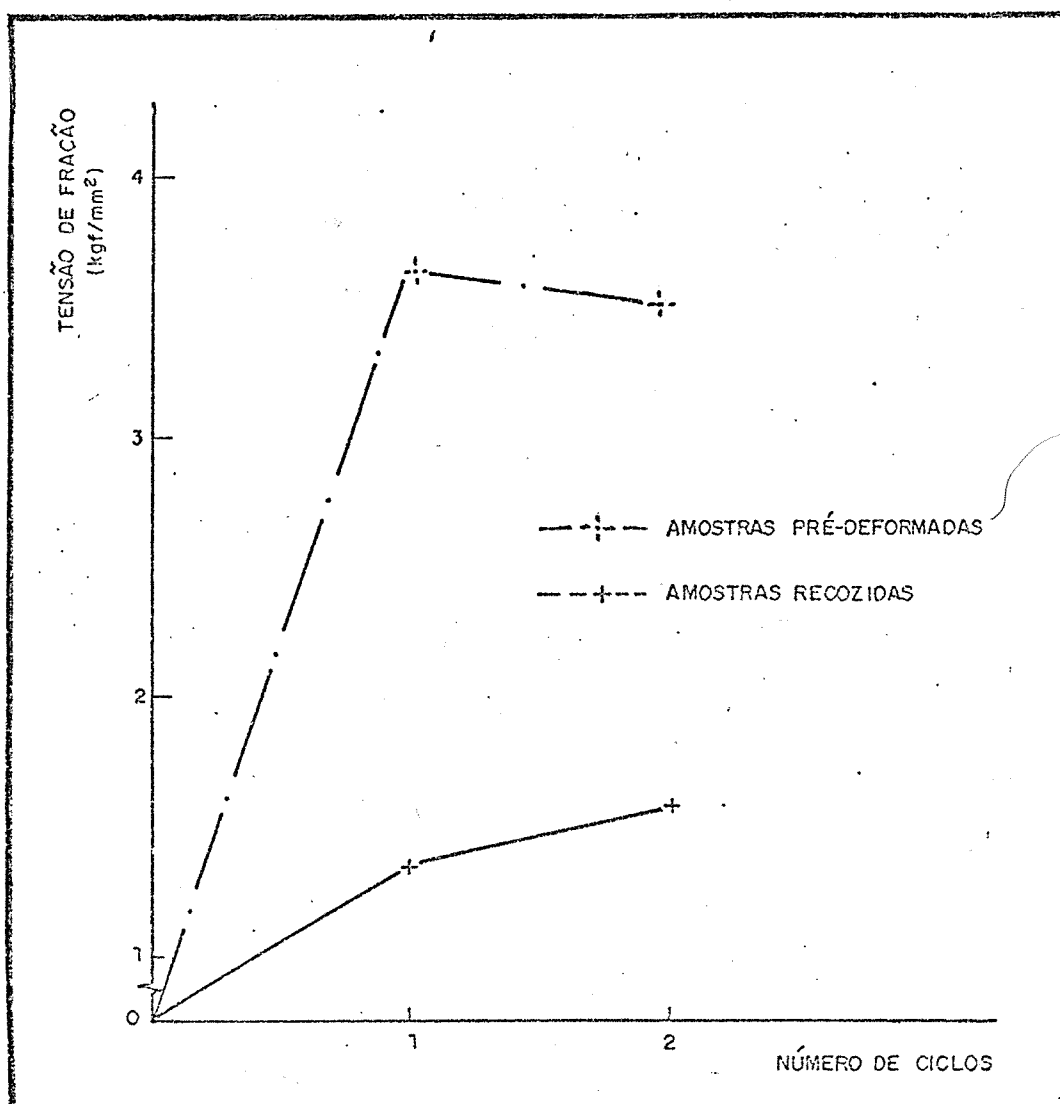


Gráfico IV.4 - Tensão de tração em função do número de ciclos (caso de 2 ciclos)

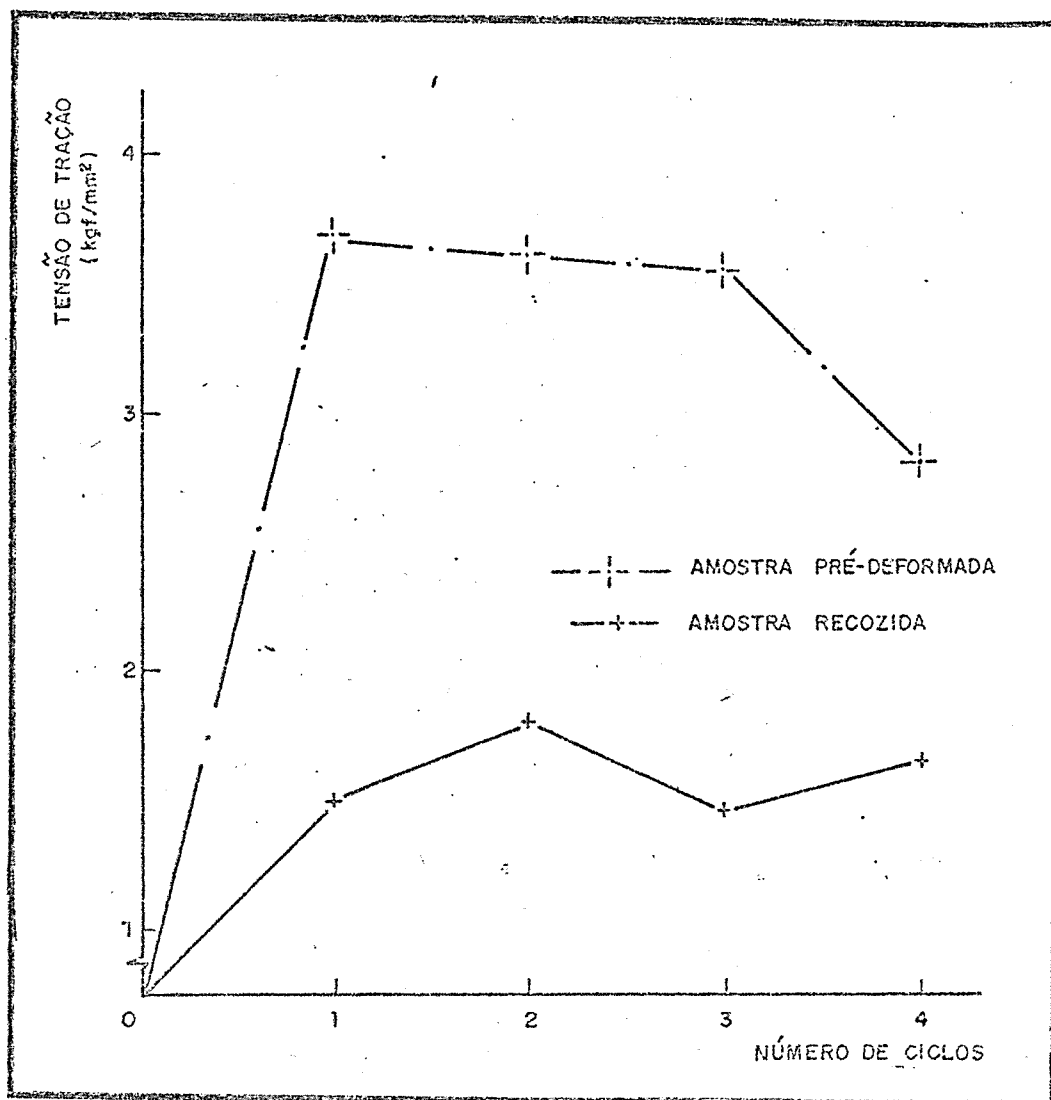


Gráfico IV.5 - Tensão de tração em função do número de ciclos
(caso de 4 ciclos)

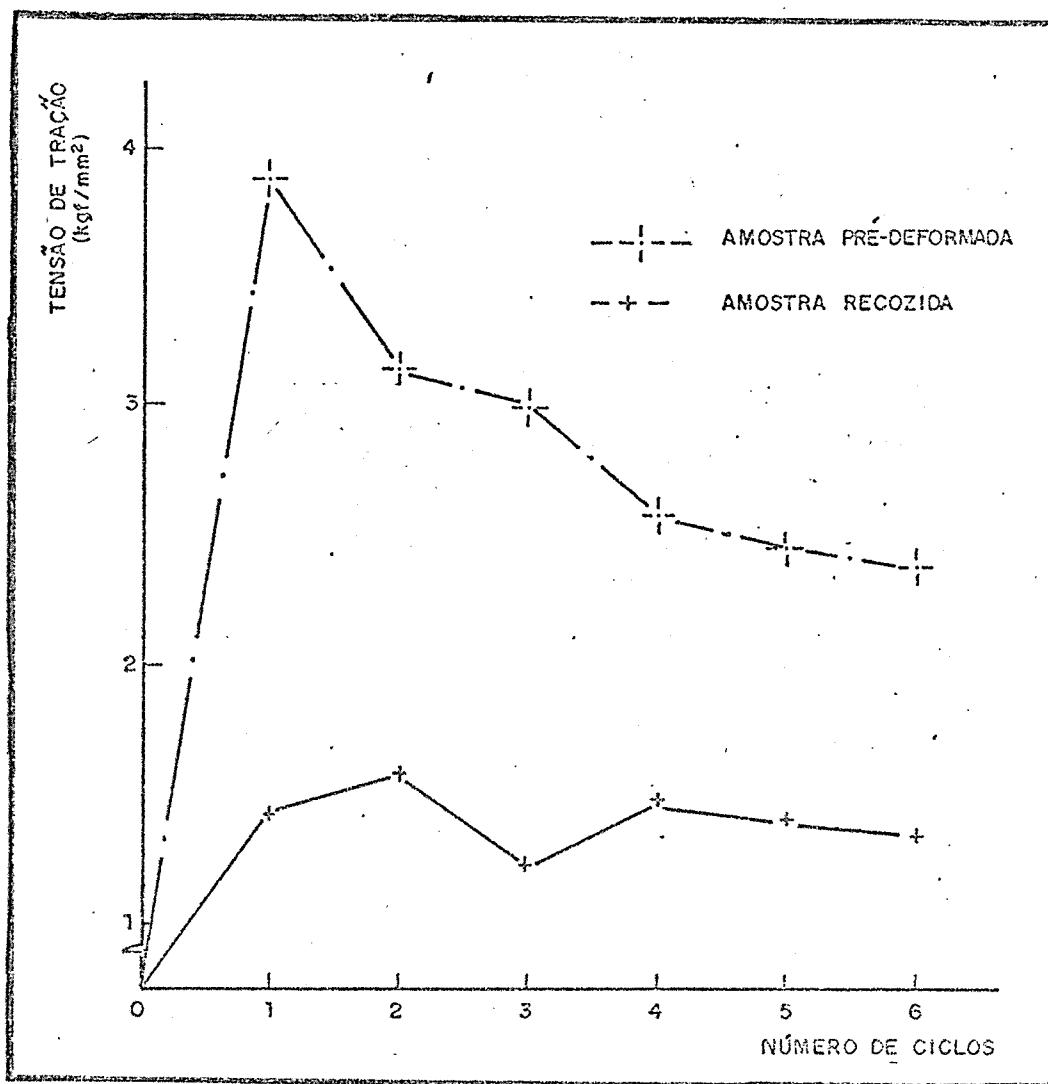


Gráfico IV.6 - Tensão de tração em função do número de ciclos (caso de 6 ciclos)

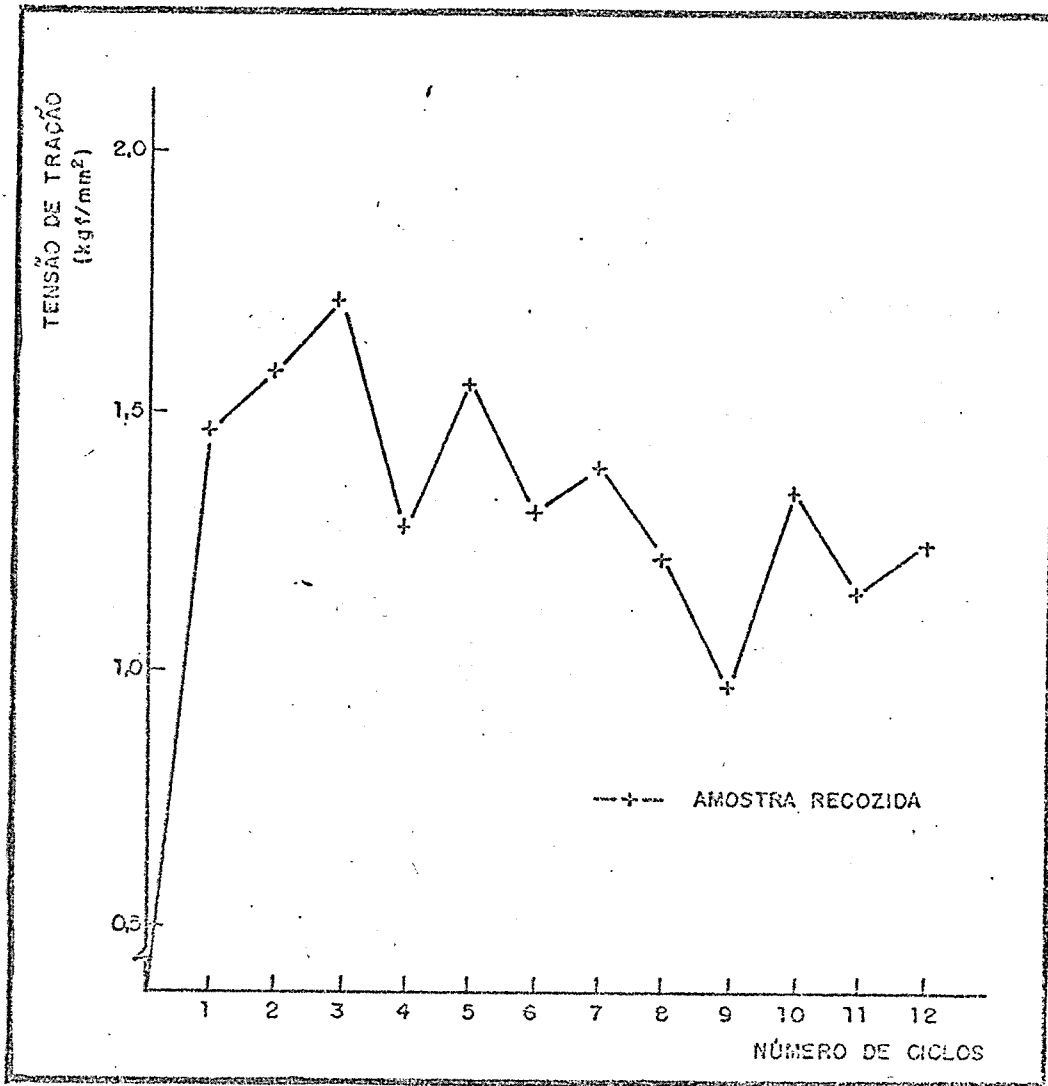


Gráfico IV.7 - Tensão de tração em função do número de ciclos (caso de 12 ciclos)

A figura IV.1 indica esquematicamente as tendências da variação de espessura e largura normalmente encontradas na parte útil e adjacências.

Da mesma forma os valores da força de tração, foram tomados quando do processamento da parte útil.

Observou-se normalmente uma força maior no início, estabilizando-se um pouco abaixo durante o processamento (parte útil) e declinando no final.

Diferentemente dos processos de laminação foi registrada uma variação significativa da largura a cada ciclo de flexo-tração.

Digno de nota foi o aspecto superficial tipo "casca de laranja" apresentado pelas amostras recozidas quando do processamento por flexo-tração. *e porque?*

IV.3.2 - Dados do processamento de flexo-tração

O quadro IV.4 e os gráficos IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12 e IV.13 indicam os resultados obtidos para as medidas do limite de resistência à tração, dureza e alongamento percentual para as amostras de flexo-tração em função do número de ciclos.

Nos gráficos os valores das propriedades acima mencionadas para as amostras não cicladas (zero ciclos), foram retirados do quadro IV.1.

Observe ainda que no caso das amostras laminadas há uma pequena discrepância, uma vez que as amostras para deformação monotônica atingiram 70,8% de deformação e as amostras para flexo-tração 70,2% de deformação convencional.

Foram utilizados as mesmas máquinas e procedimentos da deformação monotônica para a realização dos testes nos materiais ciclicamente processados por flexo-tração.

É importante salientar que foram considerados os aspectos necessários para que houvesse a equivalência dos ensaios realizados an-

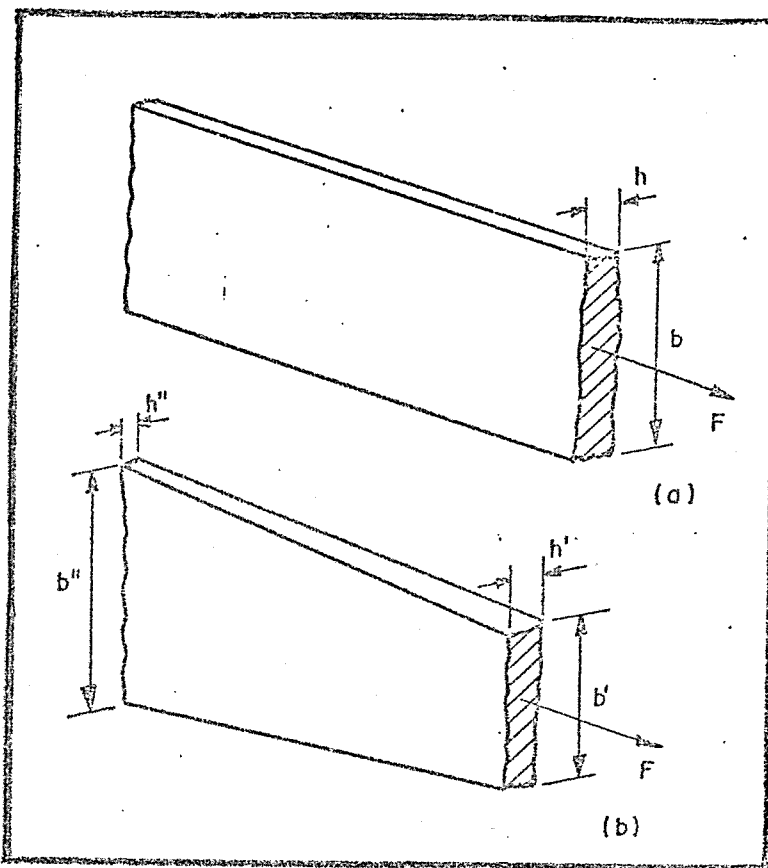


Figura IV.1 - Tendência na variação da espessura e largura da fita de alumínio

- antes do processamento por flexo-tração
- após o processamento por flexo-tração

Amostra	Número de ciclos	Limite de resistência a tração (Kgf/mm ²)	Dureza Vickers (5Kgf)	Alongamento percentual 5 ϕ (%)
recozida	2	7.8	30.7	33.8
	4	8.0	31.8	29.4
	6	8.1	30.7	34.6
	12	8.6	30.1	31.6
laminada em 70%	2	13.8	42.4	14.6
	4	13.5	41.4	13.1
	6	13.1	40.0	16.0

Quadro IV.4 - Resultados encontrados no processamento cíclica por flexo-tração

Obs: Os dados da dureza são valores médios calculados para as faixas dos ensaios

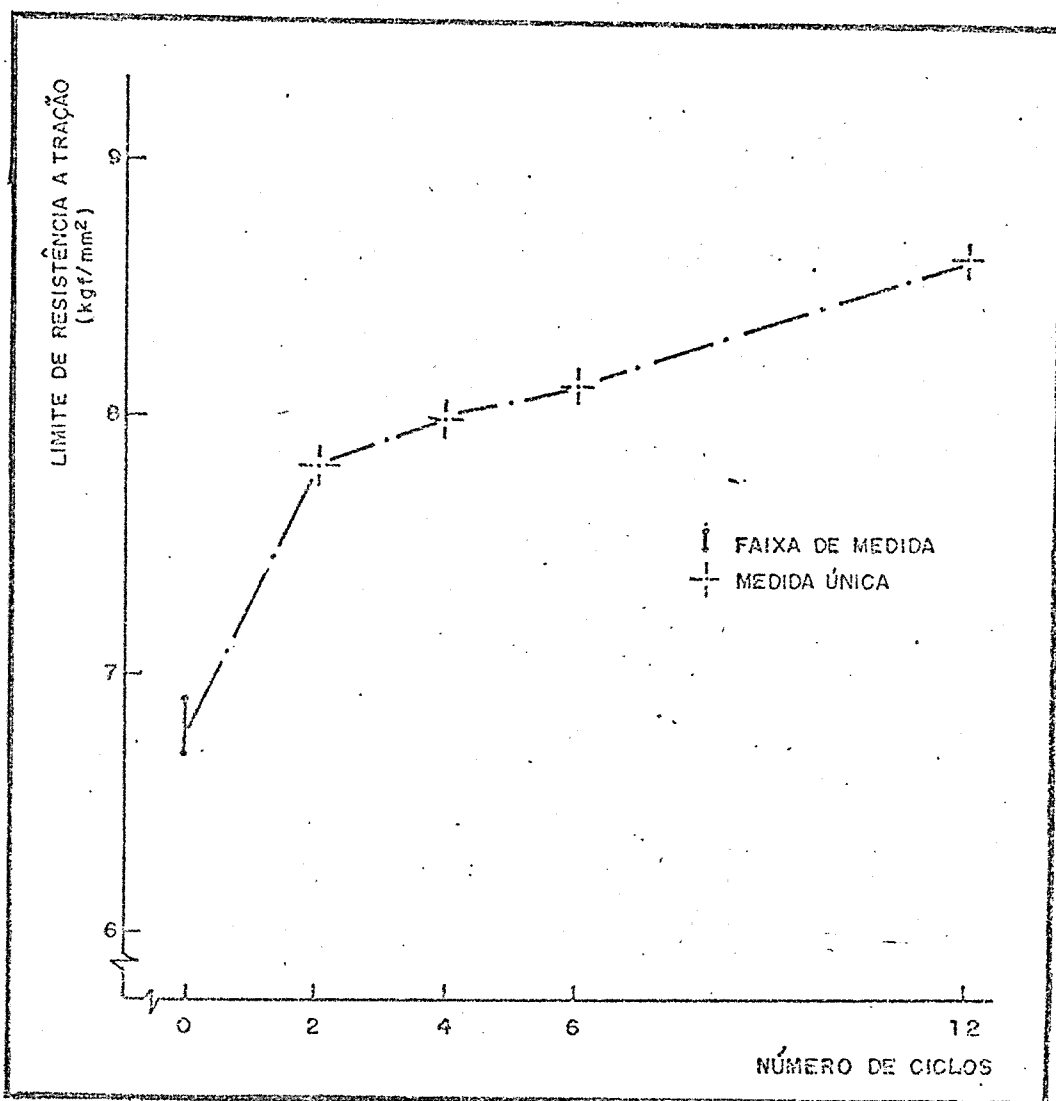


Gráfico IV.8 - Limite de resistencia a tração em função do número de ciclos para amostras recozidas

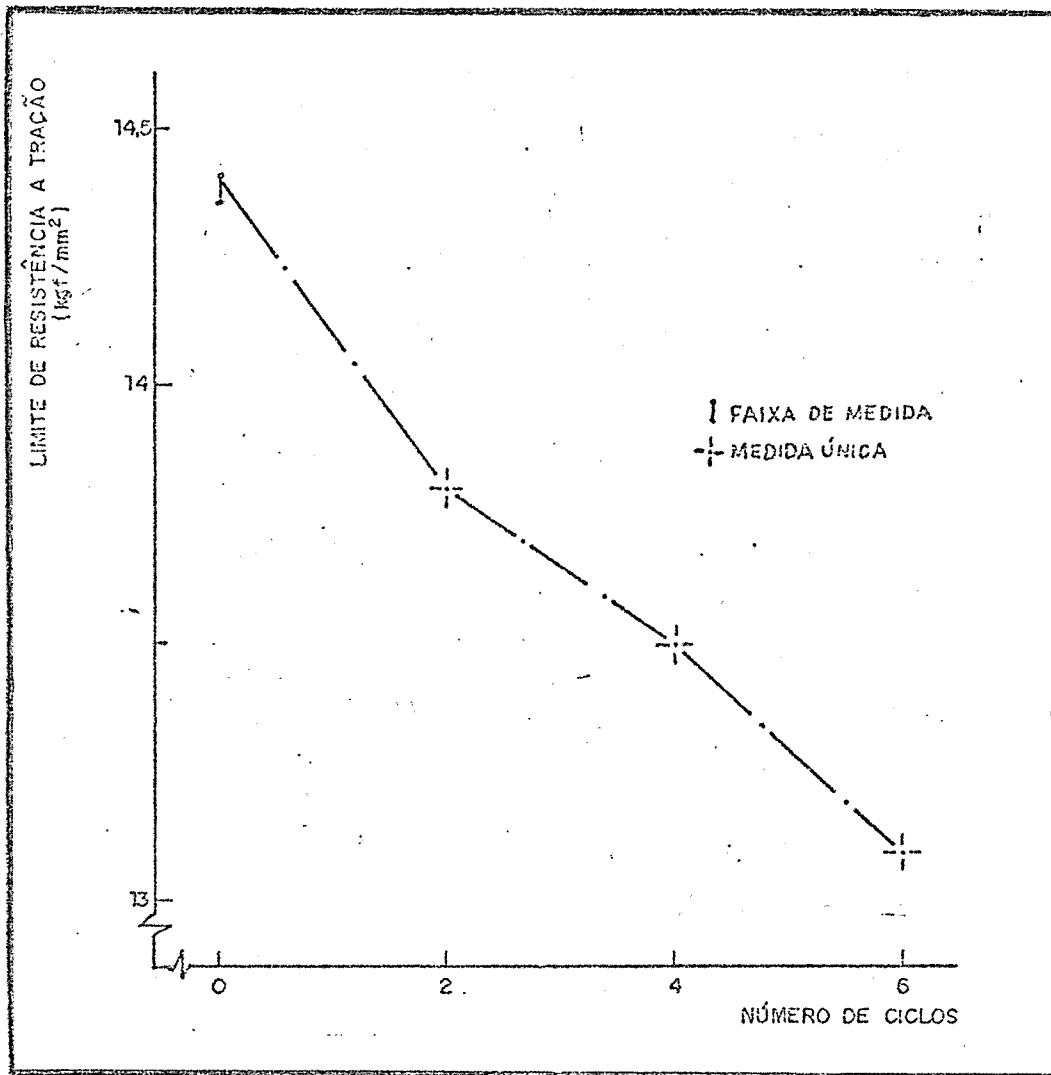


Gráfico IV.9 - Limite de resistência a tração em função do número de ciclos para amostras pré-deformadas por laminação em 70%

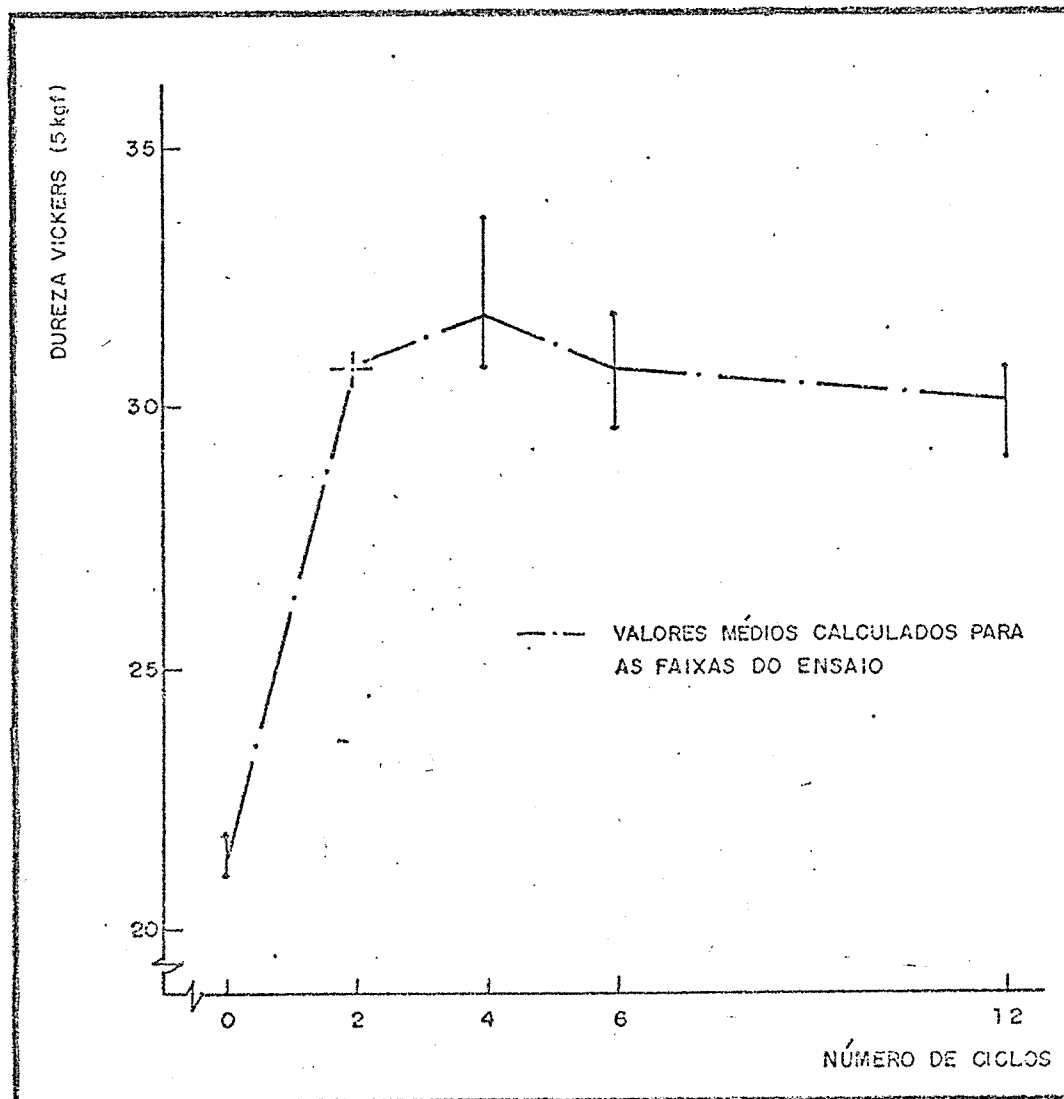


Gráfico IV.10 - Dureza em função do número de ciclos para amostras recozidas

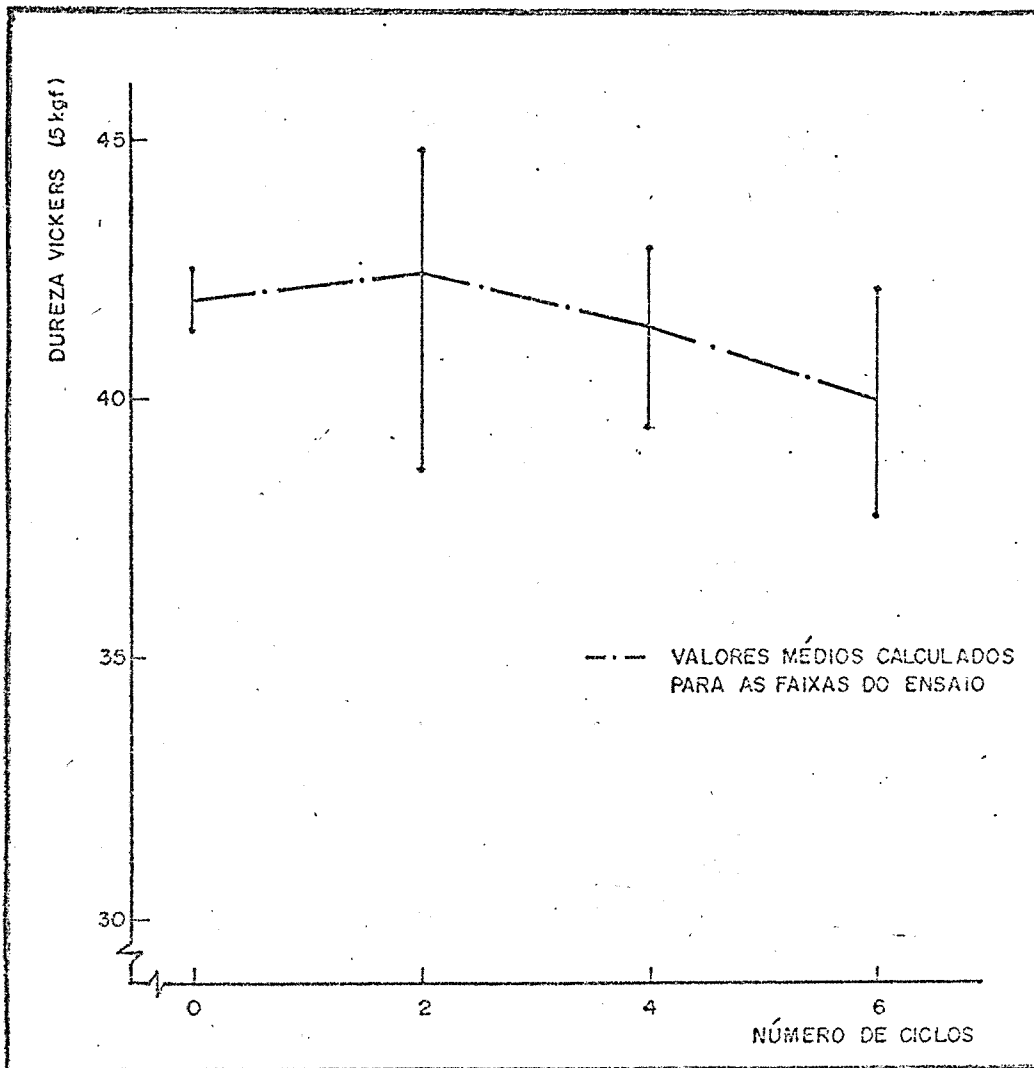


Gráfico IV.11 - Dureza em função do número de ciclos para amostras pré-deformadas por laminação em 70%

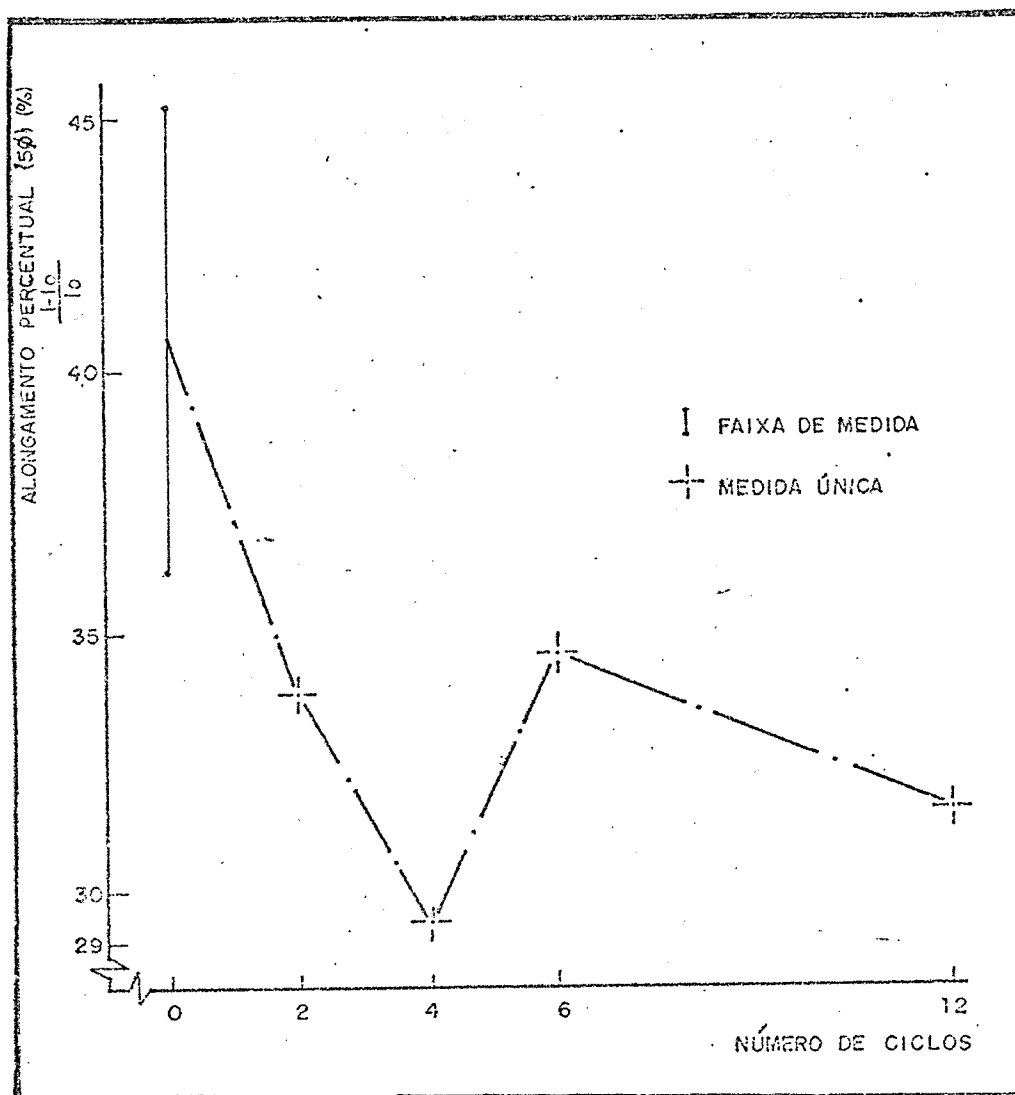


Gráfico IV.12 - Alongamento percentual em função do número de ciclos para amostras recozidas

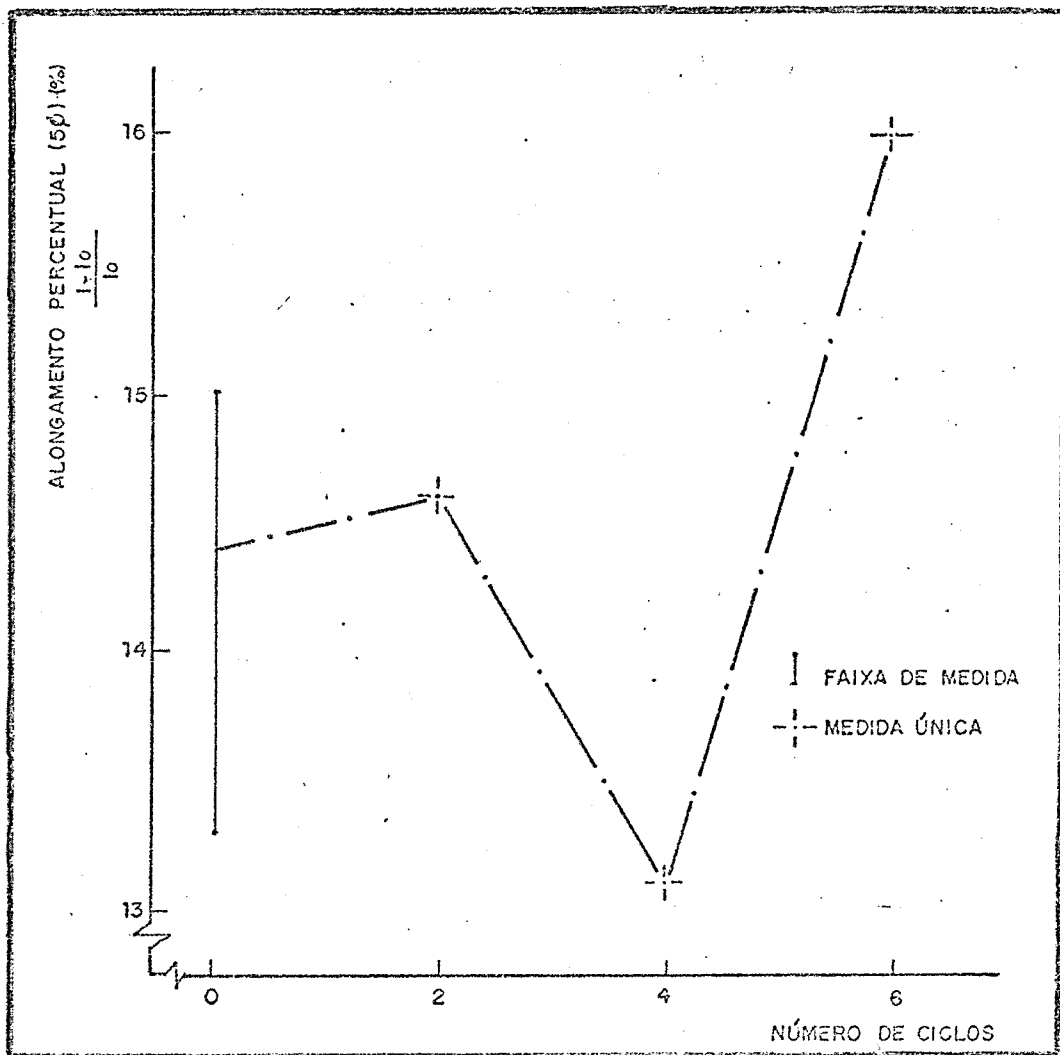


Gráfico IV.13 - Alongamento percentual em função do número de ciclos para amostras pré-deformadas por laminação em 70%

tes e apos o processamento de flexo-tração⁽¹⁰⁾.

IV.4 - Discussão dos Resultados

IV.4.1 - Discussão dos dados de deformação monotônica

Uma análise global das variações do limite de resistência à tração, dureza e alongamento percentual com o grau de deformação por laminação denotam um comportamento convencional.

Assim há um crescimento do limite de resistência à tração, um aumento da dureza e um decréscimo do alongamento percentual com o aumento da deformação convencional por laminação.

IV.4.2 - Discussão dos dados de monitoramento

Observa-se de imediato que há efetivamente um processo de deformação plástica a cada ciclo de flexo-tração como indicam os dados de largura e espessura.

Analisando-se tais dados pode-se observar uma tendência de maior deformação nas amostras recozidas à medida da evolução dos ciclos de flexo-tração.

O gráfico IV.14 indica o grau de deformação convencional em função do número de ciclos para amostras recozidas e pré-deformadas por laminação.

O fato acima induz a idéia da existência de "cedagem" do sistema como um todo, onde amostras com uma história anterior de maior encruamento se deformam menos por flexo-tração, nas mesmas condições.

Para a força de tração das amostras pré-deformadas por laminação, verifica-se uma diminuição dos valores a cada ciclo em todos os casos. Tal fato indicaria a diminuição da resistência à deformação por flexo-tração, porém, a seção a ser deformada a cada ciclo também diminui.

Podemos então lançar mão do conceito de tensão de tração que cor-

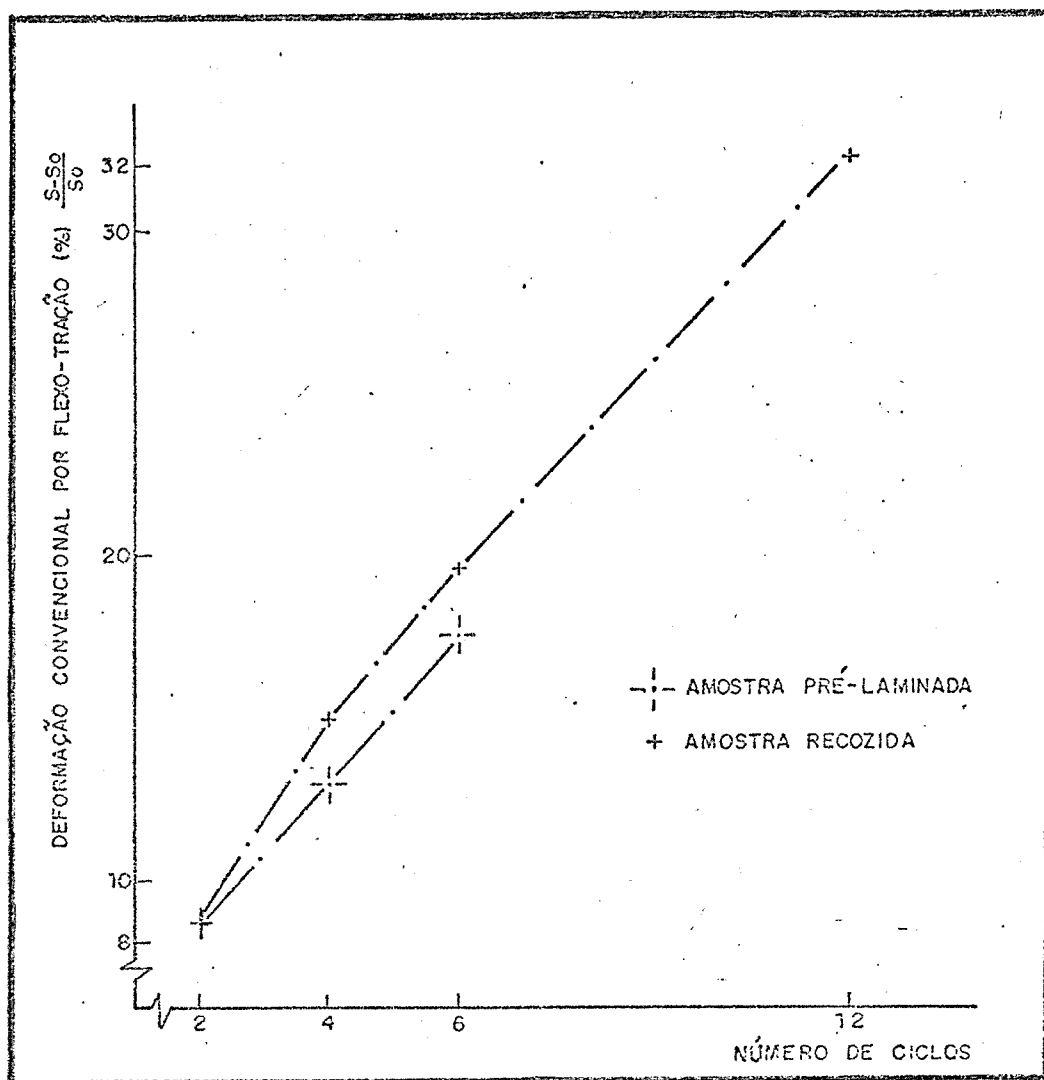


Gráfico IV.14 - Deformação convencional por flexo-tração em função do número de ciclos

responderia a tensão média de tração atuante numa dada seção da região útil (região C), durante o processamento logo após a passagem da mesma pelo dispositivo. Esta tensão seria calculada pela razão entre a força de tração e a seção da amostra após o processamento por flexo-tração no ciclo considerado.

Considerando-se que a tensão de tração representaria um indicador da resistência à deformação por flexo-tração, pode-se dizer que no caso presente há sempre uma diminuição da resistência à deformação por flexo-tração a cada ciclo.

No caso da força de tração das amostras recozidas, nota-se um aumento inicial dos valores, seguido de um declínio de forma oscilatória. Isto pode também ser constatado observando-se os valores da tensão de tração, principalmente no que diz respeito aos casos de maior número de ciclos (6 e 12 ciclos).

Este comportamento não demonstra de maneira clara o aumento ou diminuição da resistência à deformação por flexo-tração. De qualquer forma a cada ciclo a seção a ser deformada também diminui.

A análise dos valores de descentragem também não indicam grandes diferenças entre as amostras recozidas e pré-deformadas por laminação. Os valores da descentragem a cada ciclo não foram possíveis (ver item III.5.5.3 0 experimento).

IV.4.3 - Discussão dos dados da deformação por flexo-tração

Embora tenha-se normalmente apenas um valor para cada ensaio numa dada situação, é possível indicar-se algumas tendências.

No caso das amostras recozidas as tendências, são de aumento do limite de resistência a tração, aumento inicial seguido de pequeno declínio da dureza e diminuição do alongamento percentual.

No caso das amostras pré-deformadas por laminação, registra-se as tendências de queda do limite de resistência a tração e da dureza e crescimento do alongamento percentual.

É importante observar que tais fatos tem correspondência com os

resultados encontrados por Coffin & Tavernelli⁽⁴⁾ e Feltner & Laird⁽⁵⁾, principalmente no caso das amostras pré-deformadas por laminação.

IV.4.4 - Comparação entre resultados da deformação monotônica e os resultados da deformação por flexo-tração

É possível com os dados obtidos fazer-se algumas comparações entre os comportamentos do material antes e após o processamento por flexo-tração.

Para que se possa realizar estas comparações, é necessário utilizar-se um padrão de deformação, ao qual seja possível converter estados triaxiais de deformação diferentes como é o caso da laminação e da flexo-tração⁽¹⁾.

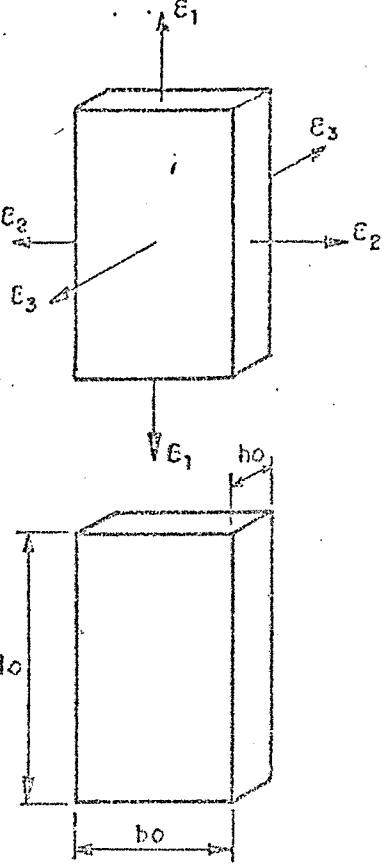
Usaremos, desta forma, o conceito de deformação efetiva através qual é possível converter-se o valor da deformação obtida em qualquer processo, no correspondente valor em tração pura⁽¹⁾.

Uniformizando-se os graus de deformação numa mesma "escala" é possível pois fazer-se comparações.

O quadro IV.5 indica o formulário básico para o cálculo da deformação efetiva. Os quadros IV.6, IV.7 mostram os resultados obtidos na deformação monotônica por laminação e na deformação cíclica por flexo-tração em função dos valores de deformação efetiva.

Os gráficos IV.15, IV.16, IV.17 mostram o comportamento do material frente a deformação monotônica por laminação e a deformação cíclica por flexo-tração e os gráficos IV.18, IV.19, IV.20 indicam o comportamento do material deformado monotonicamente por laminação e posteriormente ciclado por flexo-tração.

Embora tenha-se obtido um número pequeno de dados acerca das propriedades das amostras frente ao processamento por flexo-tração, a observação do material, que partindo de um mesmo estado metalúrgico (recozido), é processado monotonicamente por laminação ou ciclicamente por flexo-tração, indica a existência de caminhos diferentes para as duas situações.



DEFORMAÇÃO EFETIVA

$$\epsilon_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2}$$

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

TRAÇÃO PURA $\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\frac{1}{2} \epsilon_1$

$$\epsilon_0 = \epsilon_1 \quad \epsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0}$$

LAMINAÇÃO $\epsilon_3 = -\epsilon_1 \quad \epsilon_2 = 0$

$$\epsilon_0 = 1,155 \epsilon_1 \quad \epsilon_1 = \ln \frac{h_0}{h}$$

FLEZO-TRAÇÃO $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

$$\epsilon_0 = 1,155 [\epsilon_2^2 + \epsilon_2 \epsilon_3 + \epsilon_3^2]^{1/2}$$

$$\epsilon_2 = \ln \frac{b_0}{b} \quad \epsilon_3 = \ln \frac{h_0}{h}$$

Quadro IV.5 - Formulário básico para o cálculo da deformação efetiva

Número da amostra	Espessura de usinagem (mm)	Espessura de laminação (mm)	Deformação efetiva atingida (%)	Limite de resistência a tração (Kg/mm ²)	Dureza Vickers (5KgF)	Alongamento percentual 5 ϕ (%)
1	5.0	---	0 (recozido)	6.8	21.6	40.7
2	5.5	4.9	13.3	7.7	30.2	32.7
3	6.0	4.9	23.4	9.3	31.2	27.4
4	6.5	4.9	32.6	9.0	34.4	20.3
5	7.1	4.8	45.2	10.3	36.3	16.0
6	8.3	4.9	60.9	11.0	40.5	15.1
7	10.0	4.9	82.4	12.4	39.7	14.2
8	12.5	4.9	108.2	13.2	42.9	15.9
9	16.8	4.9	142.3	14.4	41.9	14.2

Quadro IV.6 - Resultados encontrados no processamento monotônico em função de deformação efetiva

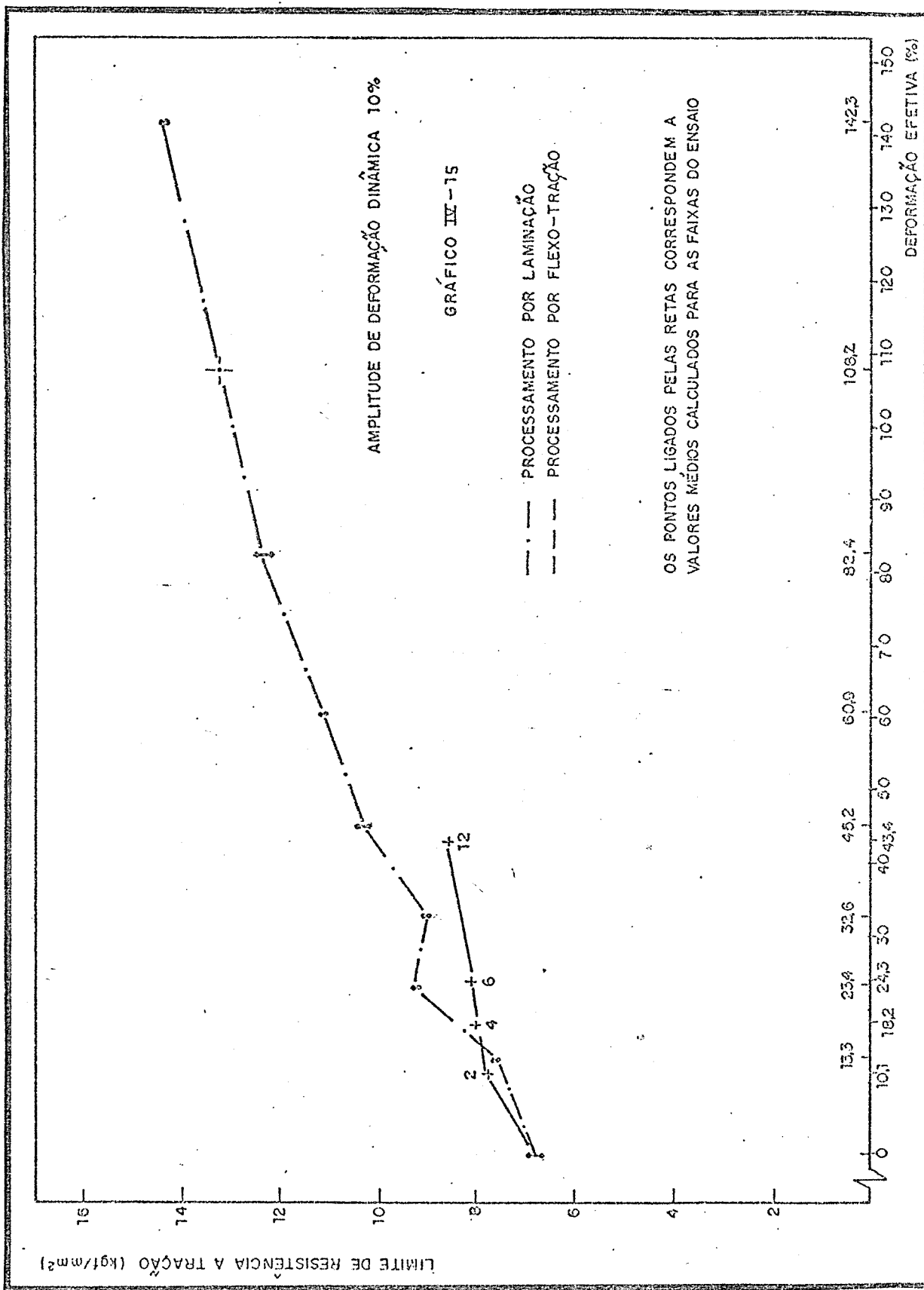
Obs: Os dados do limite de resistência, dureza e alongamento percentual são valores médios calculados para as faixas dos ensaios

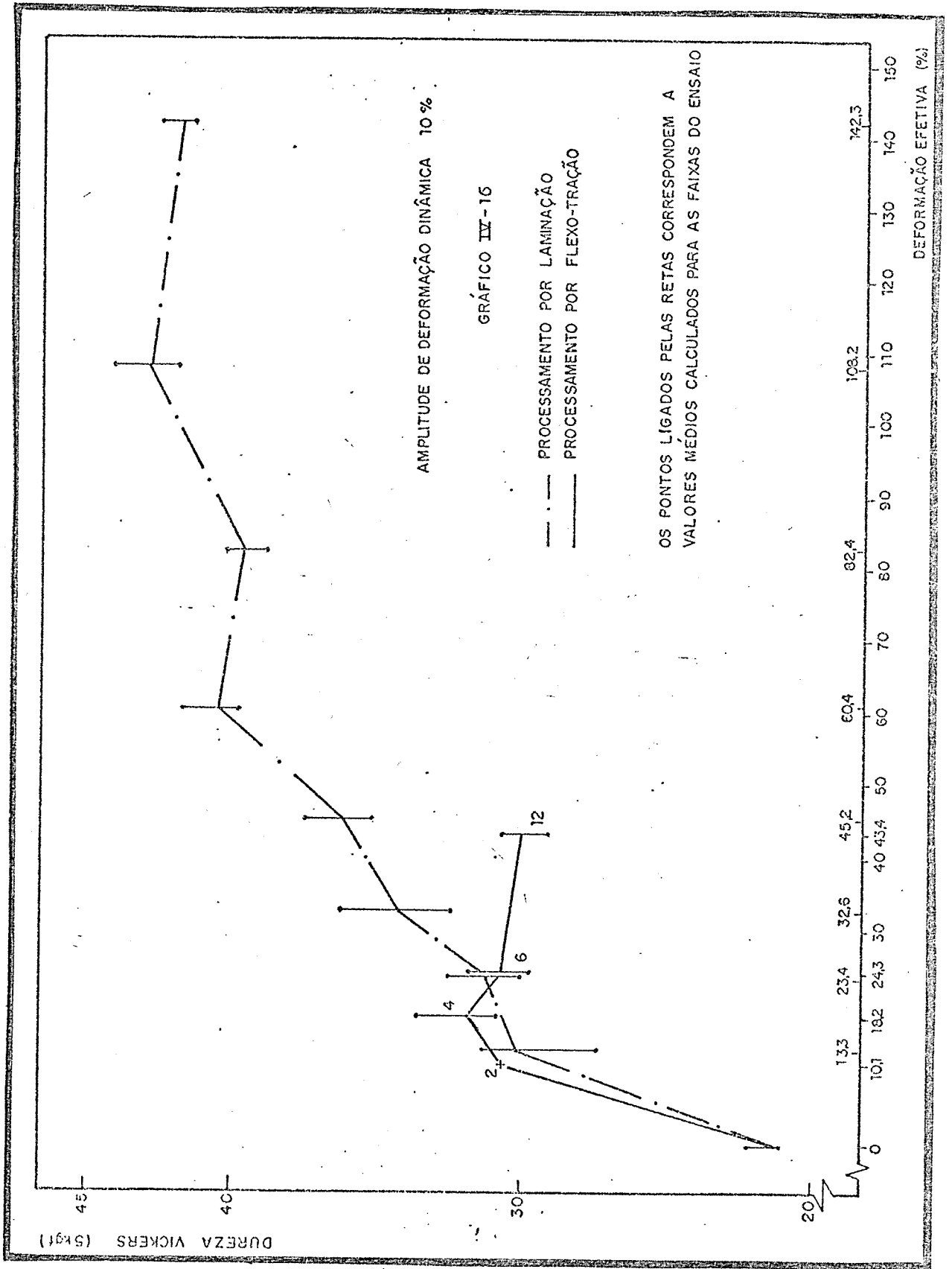
Amostra	Número de ciclos	Deformação efetiva atingida (%)	Limite de resistência a tração (Kgf/mm ²)	Dureza Vickers (5Kgf)	Alongamento percentual 5 ϕ (%)
recozida	2	10.1	7.8	30.7	33.8
	4	18.2	8.0	31.8	29.4
	6	24.3	8.1	30.7	34.6
	12	43.4	8.6	30.1	31.6
laminada em 70%	2	10.0	13.8	42.4	14.6
	4	15.5	13.5	41.4	13.1
	6	21.4	13.1	40.0	16.0

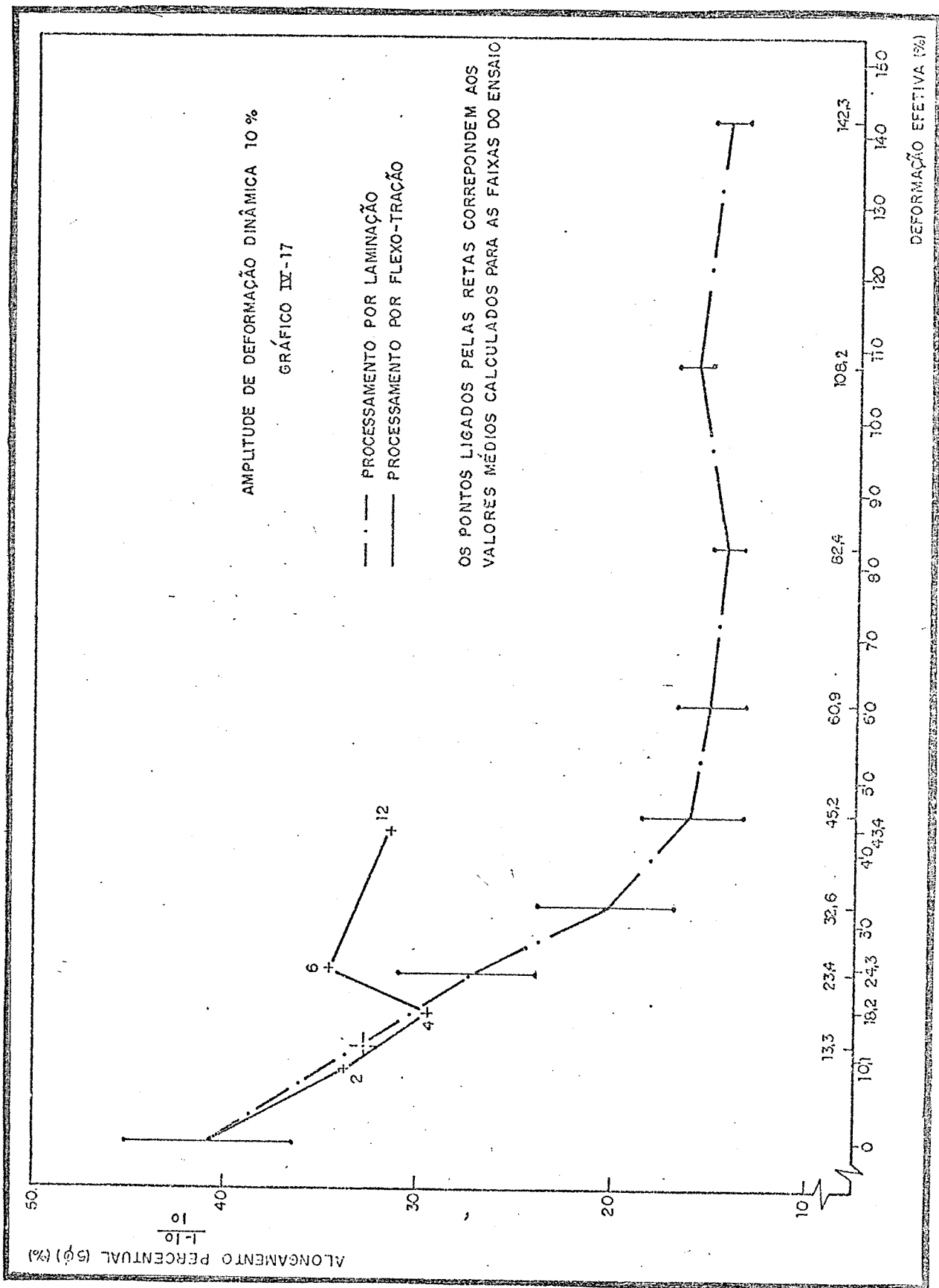
Quadro IV.7 - Resultados encontrados no processamento cíclico por flexo-tração em função da deformação efetiva

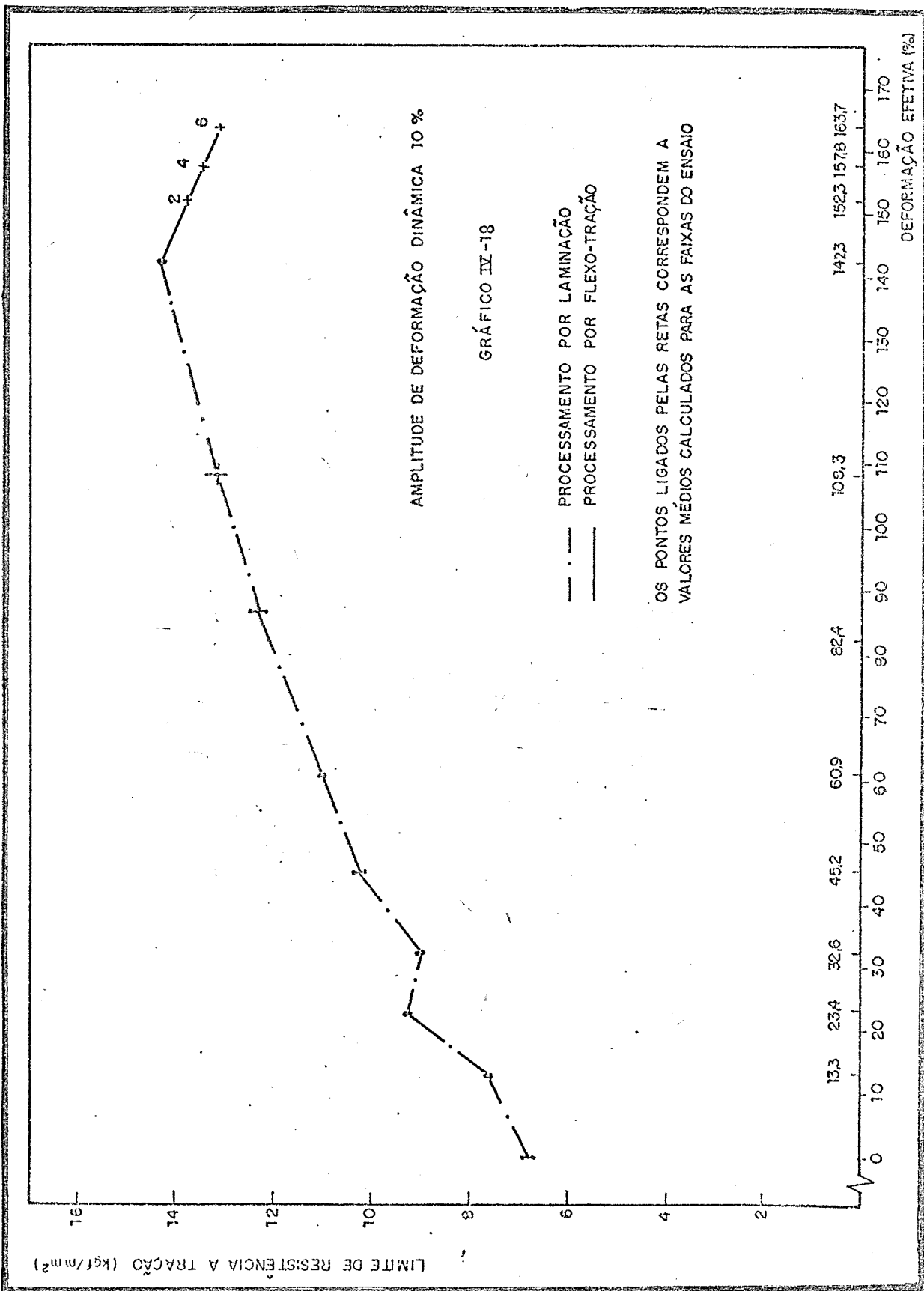
Obs: Os dados de dureza são valores médios calculados para as faixas dos ensaios

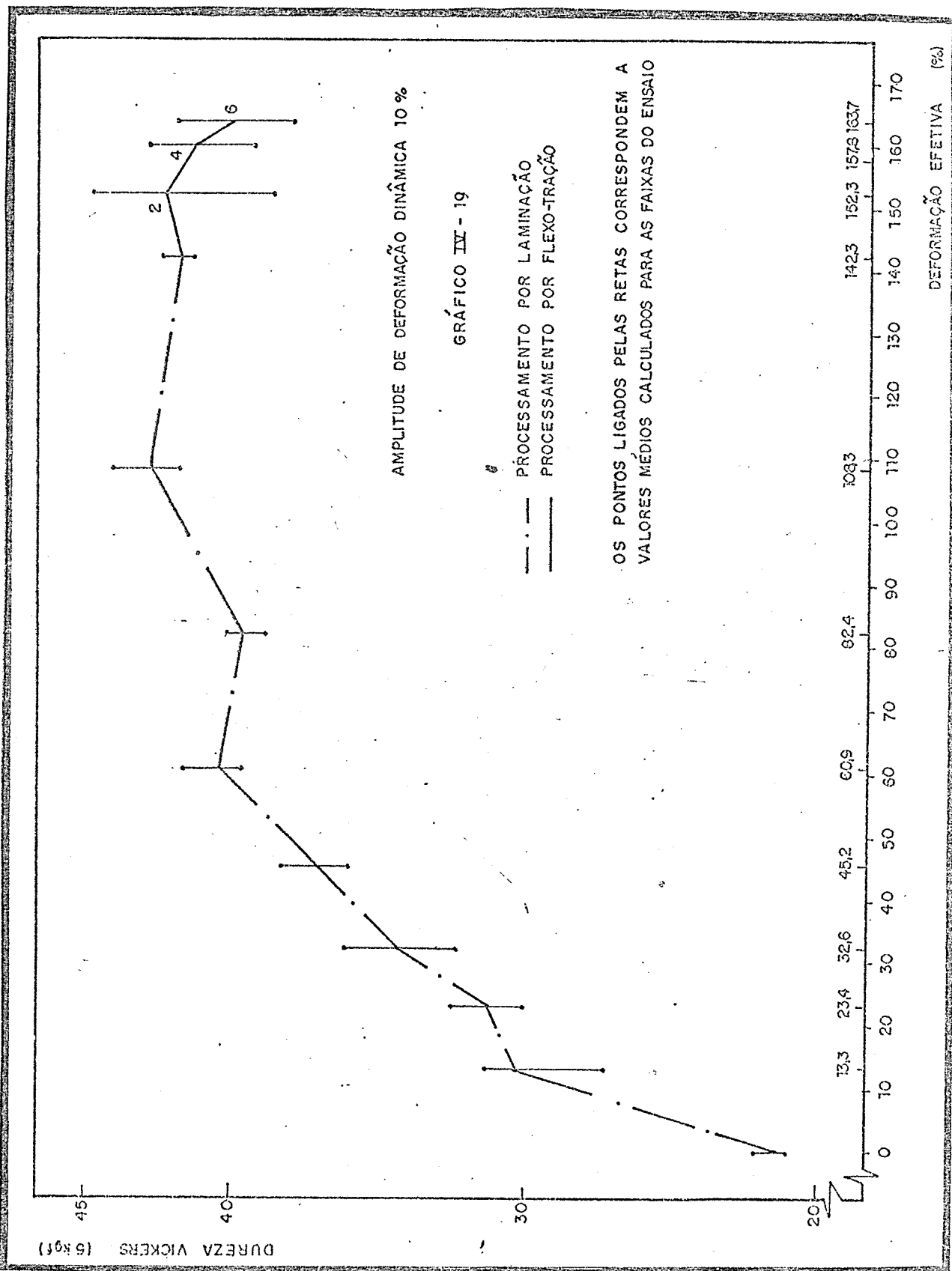
Para maior precisão no cálculo da deformação efetiva, os valores foram obtidos através do somatório da deformação efetiva a cada ciclo (passagem da fita) nos vários casos

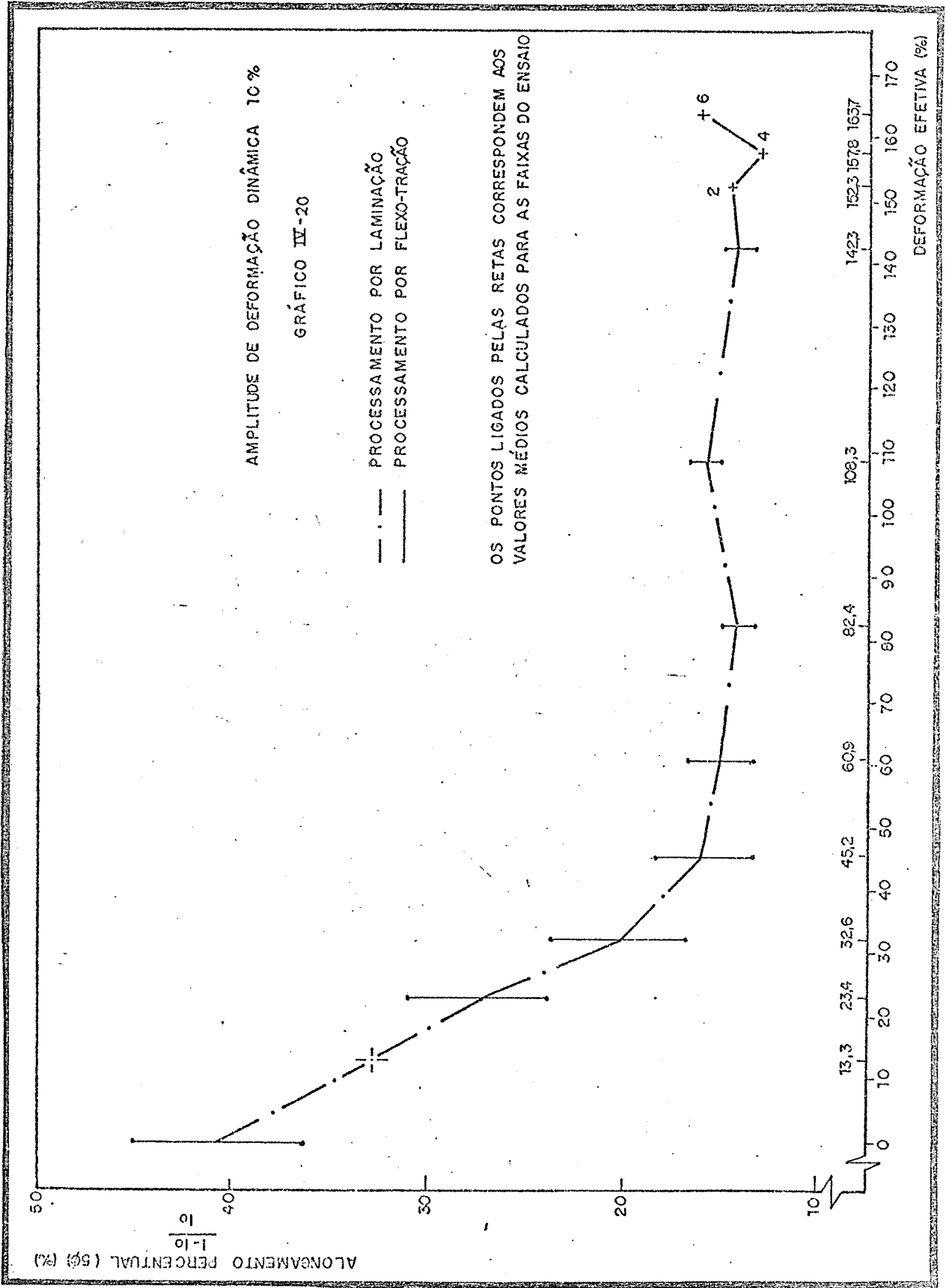












Para o limite de resistência a tração em ambos os casos, os valores crescem, porém o crescimento no caso da flexo-tração é mais modesto, ou seja, para um mesmo grau de deformação pode-se obter um valor menor para a flexo-tração do que para a laminação.

O mesmo acontece em relação a dureza onde, embora haja também um crescimento em ambas as situações, os valores de dureza obtidos da flexo-tração tendem a ser menores em relação aos valores da laminação, à medida do aumento do grau de deformação.

Já no caso do alongamento percentual a queda dos valores com o aumento da deformação para o processamento por laminação não é acompanhada no caso da flexo-tração cujos os valores diminuem de forma menos acentuada.

Assim, para um dado grau de deformação é possível ter-se um alongamento percentual maior no caso da flexo-tração do que aquele encontrado para a laminação.

Quando considera-se o caso do material que foi deformado monotonicamente por laminação e posteriormente ciclado por flexo-tração observa-se uma tendência de inversão de comportamento quando da mudança do tipo de processamento.

O material que apresentava um aumento do limite de resistência à tração e da dureza com o crescimento da deformação, passa a esboçar uma tendência inversa, ou seja, uma queda de dureza e do limite de resistência à tração.

Da mesma forma o alongamento percentual que diminuía com a variação crescente da deformação principia a aumentar.

Conclui-se que as tendências gerais de encruamento/amaciamento indicadas na literatura para deformação cíclica por tração/compressão^(4,5), são válidas para o caso da deformação por flexo-tração.

IV.5 - Conclusões

Embora tenham-se obtidos poucos dados sobre os ensaios das amostras deformadas ciclicamente por flexo-tração, e apesar de todas as limitações impostas pelos erros experimentais, fica claro que o comportamento do material frente ao processo de flexo-tração não se enquadra nos padrões convencionais.

O material sofrendo um processo de flexo-tração, quando comparado com ele próprio sofrendo um processamento convencional como a laminação, apresenta propriedades mecânicas que refletem um menor grau de encruamento nas mesmas condições de grau de deformação.

O material mesmo sendo extensamente deformado por laminação e só depois ciclado por flexo-tração parece tender a recuperar-se, a diminuir seu grau de encruamento mesmo continuando a ser deformado.

Este comportamento é basicamente oposto ao comportamento obtido nos processos de deformação convencional onde o aumento do grau de deformação implica necessariamente no aumento do grau de encruamento a frio.

Assim, tornam-se necessários maiores e mais profundos estudos para que se possa melhor balisar, explicar e quantificar este fenômeno atípico demonstrado pelo material frente ao processamento por flexo-tração.

Berenice

Não souber oferecer uma explicação. Na sua cabeça, o que se passa?

CAPÍTULO V - SUGESTÕES PARA TESES FUTURAS

V - SUGESTÕES PARA TESES FUTURAS

V.1 - Introdução

Apresentam-se aqui algumas sugestões para o desenvolvimento de sis temas de movimentação automática e semi-automática do dispositivo de flexo-tração com possibilidade de aplicação de tração a rê.

Tais sugestões representam uma síntese das idéias ventiladas quando da etapa de concepção do dispositivo de flexo-tração. A viabilidade destas sugestões é bastante razoável.

V.2 - Duas Sugestões

As figuras V.1 e V.2 indicam duas montagens utilizando-se o banco de trefila.

No caso da figura V.1 observa-se um esquema de montagem visto de cima onde a fita (1) permanecendo parada, é flexo-tracionada através da passagem do dispositivo (2) num movimento de vai e vem. O sistema de movimentação é basicamente constituído pelo quadro suporte (3), porca (4) e parafuso de transmissão (5), redutor (6), motor (7), etc.

Este sistema pode ser facilmente automatizado através do uso de comando elétrico com inversão da rotação do motor e consequente inversão do sentido do movimento. A regulagem de velocidade de movimentação poderá ser conseguido por controle do motor ou pelo uso de variadores de velocidade junto ao redutor.

O banco de trefila (8) no caso, se presta para criar um esforço que propicie a existência de tração a rê. Isto é possível devido ao fato de que o banco de trefila tem regulagem contínua da força de tração F e mantém constantemente a fita tracionada de um mesmo valor apesar do possível aumento de comprimento da mesma.

O processamento se dará um comprimento igual ao curso (C), função do tamanho do parafuso de transmissão.

É importante que seja reservado um comprimento de folga (S) para o

possível aumento da fita e manutenção do esforço de tração.

Observando-se a figura IV.2 nota-se que o esquema de montagem tem grande semelhança com o esquema anterior, porém para que o dispositivo (2), se movimente em relação a fita (1) é utilizado um cilindro hidráulico (3) acionado por bomba manual (7) ou elétrica. Colocando-se alternadamente o cilindro na posição (A) ou (B) e com a ajuda de calços (4) é possível promover-se o movimento alternativo.

Neste caso temos um sistema caracteristicamente semi-automático cuja regulagem da velocidade do movimento se torna mais complexa.

Nesta montagem foi também colocada a opção de se fazer uso de cutelos rotativos, cujo sincronismo de rotação seria feito através do uso de rodas dentadas (5) solidárias aos cutelos, engrenadas sobre uma corrente de rolos fixa (6), de tal forma que quando o dispositivo sofresse translação as rodas dentadas seriam obrigadas a rodar e portanto também os cutelos.

A tração a ré seria obtida também com o banco de trefila, na qual a montagem seria fixada, através da força de tração (F).

O curso de ciclagem será (C) e deverá haver um comprimento de folga (S) para o possível aumento de comprimento da fita e manutenção do esforço de tração.

As possibilidades reais destas duas sugestões estarão condicionadas evidentemente a um projeto mais detalhado, porém o uso de tais montagens propiciaria a realização de grande número de ciclos e portanto um maior número de dados com conseqüente aumento dos conhecimentos sobre a deformação cíclica por flexo-tração.

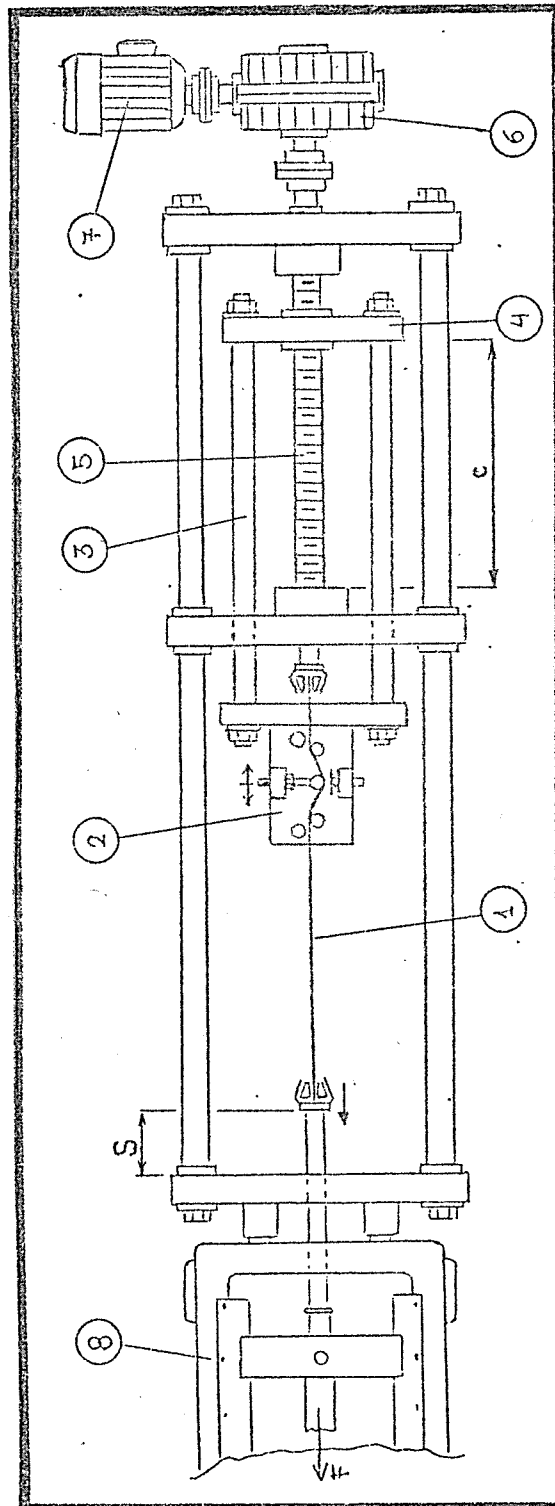


Figura V.2 - Esquema de montagem com transmissão mecânica

- 1 - fita 2 - dispositivo de flexo-tração 3 - quadro suporte
 4 - porca 5 - rosca 6 - motor 7 - motor 8 - banco de trefila
 F - força de tração C - curso S - comprimento de folga

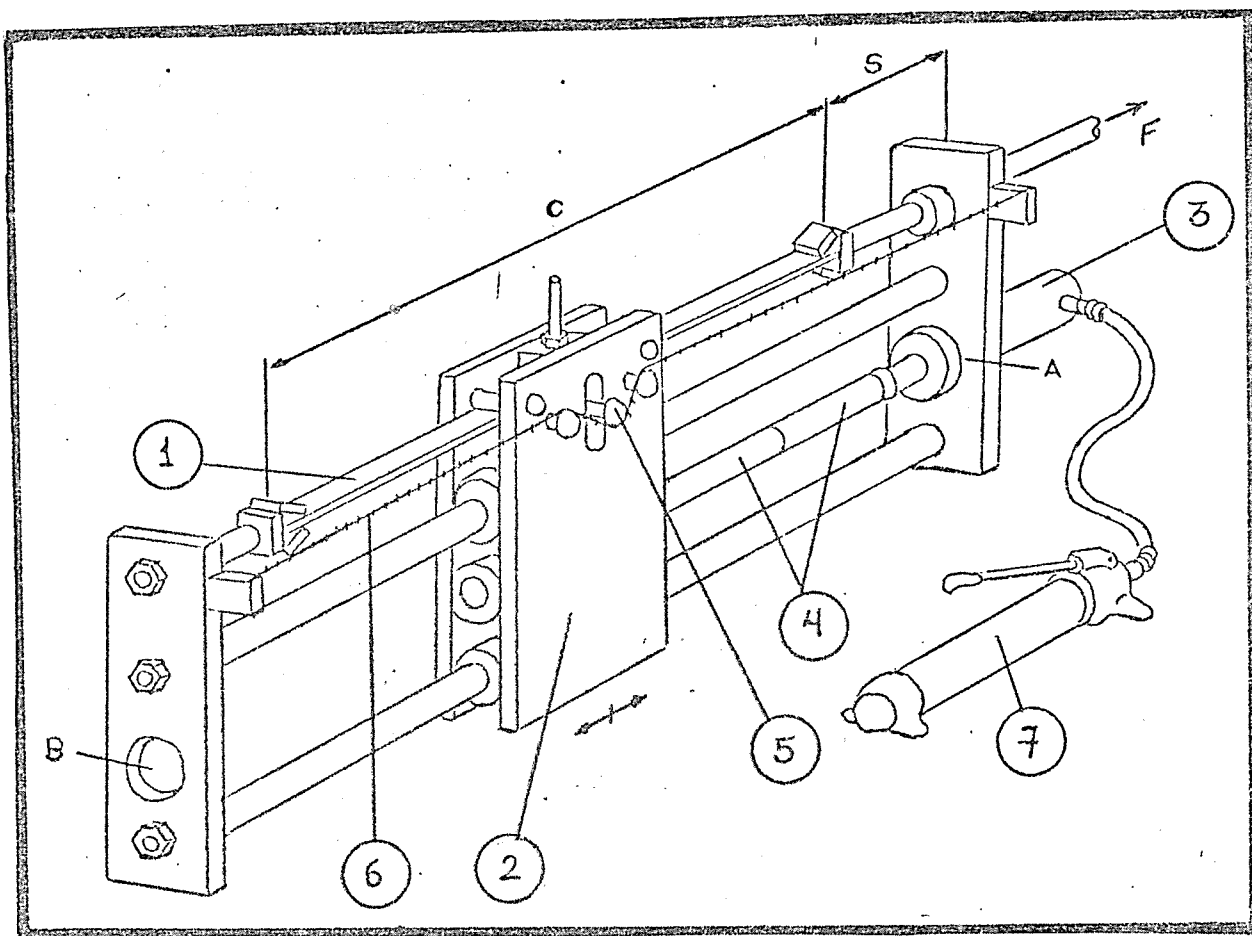


Figura V.2 - Esquema de montagem com transmissão hidráulica

1 - fita 2 - dispositivo de flexo-tração

3 - cilindro hidráulico 4 - calços

5 - roda dentada 6 - corrente de rolos

F - força de tração C - curso 7 - bomba

S - comprimento de folga

A,B - furos de encaixe do cilindro

CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1)- DIETER, G.E.; Metalurgia Mecânica, Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Koogan S.A., 1981, Capítulo 15, item 15.1, 15.4; Capítulo 20, item 20.4.
- (2)- HELMAN, H. & CETLIN, P.R.; Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Koogan S.A., 1983, Capítulo 4, item 4.2; Capítulo 6, item 6.1, 6.2; Capítulo 8, item 8.15.
- (3)- ALKINS, W.E.; Experiments in Wire Drawing Parte II. Notes on the relation between reduction in area by cold drawing and tensile strength of H.C. Copper. Journal Institute Metals. 46:304-312, 1931.
- (4)- COFFIN, Jr. L.F. & TAVERNELLI, J.F.; The Cyclic Straining and Fatigue of Metals, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 215: 794-807, October, 1959.
- (5)- FELTNER, C.E. & LARID, C.; Cyclic Stress-Strain Response of F.C.C. Metals and Alloys I. Phenomenological Experiments, Acta Metallurgica 15: 1621-1632, October, 1967.
- (6)- SANGDAHL, G.S., Jr. AUL, E.L. & SACHS, G.; An Investigation of the Stress and Strain States Occurring in Bending Rectangular Bars, Journal of Exp. Stress Analysis 6: 1-18, 1948.
- (7)- SUDO, C; TAKATANI, M, MASUL, T. & NAGAI, H.; Study of Roll Bending Descaler on Steel Wire, Wire Journal: 74-79, December, 1980.
- (8)- ASM Metals Handbook Properties and Selection of Metals, vol. 1, 1980, Properties of Wrought Aluminum Alloys: 936.
- (9)- ABNT. NBR-6673 - Produtos Planos de Aço - Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração. Método de Ensaio, Julho 1981.
- (10)- SOUZA, S.A.; Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1974, Capítulo 2, item 2.2.4 (j); Capítulo 3, item 3.2.3.
- (11)- BACKOFEN, W.A.; Deformation Processing, Reading Massachusetts, Ed. Addison Wesley, 1972, Cap. 3.