

OBTENÇÃO DAS LINHAS DE MÁXIMA TENSÃO DE CISALHA-  
MENTO NA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS COM AU-  
XÍLIO DO PROCESSO VISIOPLÁSTICO.

Renato Koji Yuki

01/74

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA  
UNICAMP

U N I C A M P  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIV. EST. DE CAMPINAS  
— BIBLIOTECA —  
CENTRO DE TECNOLOGIA

## AGRADECIMENTOS

Expresso aqui os meus agradecimentos aos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Prof.Dr. OTTO ALFREDO REHDER, pela eficiente orientação e apoio à realização deste trabalho.

Ao Prof.Dr. DINO FERRARESI, Diretor do Centro de Tecnologia da UNICAMP, pela utilização dos laboratórios.

Ao aluno Monitor MINORU ODA, pelo auxílio nos programas computacionais.

Colaboraram com este trabalho :

Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

FEMAQ - Fundação Engenharia Máquinas Ltda.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

### R E S U M O

Neste trabalho, o autor apresenta um estudo para a obtenção do campo das linhas de máxima tensão de cisalhamento em ensaios de compressão de metais através de punções rígidos e paralelos, utilizando para tal a gravação de reticulados. Foram feitas, então, comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e os preditos pelos estudos matemáticos, justificando-se assim a aplicação do método estudado.

### A B S T R A C T

In this work, the author presents a study about the obtention of slip-lines fields in plane compression testings made with rigid and parallel punches , by using a grid of lines inscribed on the specimens. Comparisons were made between the experimental and analytical results, verifying the application of the method studied.

## I N D I C E

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. INTRODUÇÃO E OBJETIVO .....                                                               | 01 |
| II. PROBLEMA GERAL DA PLASTICIDADE .....                                                     | 02 |
| II.1- CORPO RÍGIDO PERFEITAMENTE PLÁSTICO.....                                               | 03 |
| II.2- CRITÉRIOS DE ESCOAMENTOS .....                                                         | 05 |
| II.3- EQUAÇÕES DA PLASTICIDADE .....                                                         | 09 |
| II.4- PROBLEMA GERAL DA PLASTICIDADE .....                                                   | 10 |
| II.5- MÉTODOS DE SOLUÇÃO .....                                                               | 11 |
| III. MÉTODO DE SOLUÇÃO ATRAVÉS DAS LINHAS DE MÁXIMA TEN-<br>SÃO DE CISALHAMENTO .....        | 12 |
| III.1- GENERALIDADES E HIPÓTESES DO MÉTODO .....                                             | 12 |
| III.2- EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS .....                                                           | 14 |
| III.3- PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS LINHAS .....                                             | 16 |
| III.4- OBTENÇÃO DOS CAMPOS DAS LINHAS DE FLUÊNCIA..                                          | 18 |
| III.5- CAMPO PADRÃO DAS LINHAS DE FLUÊNCIA .....                                             | 18 |
| III.6- PROGRAMAS COMPUTACIONAIS .....                                                        | 20 |
| IV. PROCESSO VISIOPLÁSTICO NA OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DO<br>CAMPO DAS LINHAS DE FLUÊNCIA ..... | 23 |
| IV.1- INTERPRETAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS RETICULADOS.                                         | 23 |
| IV.2- OBTENÇÃO DIRETA DAS DIREÇÕES DAS LINHAS DE<br>FLUÊNCIA .....                           | 25 |
| V. DESCRIÇÃO DA PARTE EXPERIMENTAL .....                                                     | 27 |
| V.1- O MÉTODO DE DEFORMAÇÃO .....                                                            | 28 |
| V.2- CORPO DE PROVA E PUNÇÕES .....                                                          | 30 |
| V.3- OS SISTEMAS DE GRAVAÇÃO DOS CÍRCULOS .....                                              | 32 |
| V.4- OS ENSAIOS DE COMPRESSÃO .....                                                          | 37 |
| V.5- OS SISTEMAS DE MEDIDAS .....                                                            | 40 |
| VI. RESULTADOS OBTIDOS .....                                                                 | 43 |
| VI.1- RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....                                                         | 44 |
| VI.2- RESULTADOS DOS CÁLCULOS NUMÉRICOS .....                                                | 56 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| VII. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....    | 67 |
| VII.1- DESVIOS APRESENTADOS .....   | 68 |
| VII.2- DESVIO COMPARATIVO .....     | 68 |
| VIII. CONCLUSÕES .....              | 75 |
| IX. SÍMBLOS UTILIZADOS .....        | 78 |
| X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 81 |
| XI. APÊNDICES .....                 | 84 |

## I. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Na conformação plástica dos metais, os tratamentos analíticos para a determinação dos parâmetros tem-se desenvolvido nos últimos anos, e um dos métodos de solução que tem-se destacado é o método das linhas de máxima tensão de cisalhamento, também chamadas de linhas de fluência, linhas de deslizamento ou "slip-lines".

O método constitui-se de uma solução aproximada e simples para os complexos problemas onde a deformação plástica é o principal mecanismo de transformação de um sólido de uma forma geométrica em outra.

O sucesso do método consiste fundamentalmente no estabelecimento correto do campo das linhas de fluência para a região do corpo que é deformado plasticamente. As determinações analíticas destas linhas são complexas e trabalhosas, assim os pesquisadores admitem hipóteses simplificadoras que devem ser analisadas, para comprovar a aplicabilidade do método em casos reais. Muitos problemas reais foram resolvidos, por este método, com boa aproximação dos resultados obtidos analiticamente e os obtidos experimentalmente como mostrou R. Hill [1], E.G. Thomsen [2] e S. Kobayashi [3] para alguns processos de deformações.

Portanto, o objetivo do presente trabalho tem por finalidade desenvolver um método experimental para a determinação do campo das linhas de fluência para um processo de deformação e testar a validade da solução analítica aproximada, com o auxílio de um programa computacional. Também procura-se comparar os campos propostos por outros pesquisadores com os obtidos neste trabalho.

## II. PROBLEMA GERAL DA PLASTICIDADE

A teoria da plasticidade é o estudo das formulações matemáticas das tensões e das deformações, bem como de suas relações, de um sólido sendo deformado no regime plástico.

Assim, é necessário, como na teoria da elasticidade, estabelecer as equações do estado de tensões, deformações e suas relações para determiná-los.

A descrição matemática das deformações plásticas dos metais são mais complexas do que as das elásticas, pois envolvem transformações irreversíveis das deformações e dependem das propriedades mecânicas dos materiais, sendo muito difícil descrever por um caminho puramente matemático, rigoroso, o comportamento de um metal sendo deformado plasticamente. A teoria toma então algumas vezes como ponto de início, dados obtidos experimentalmente e ainda geralmente, são feitas suposições para a obtenção das soluções. É importante notar que deve-se analisar a validade destas simplificações, através de uma verificação dos resultados obtidos experimentalmente.

No presente trabalho a variável tempo não foi incorporada - nos conceitos matemáticos da plasticidade dos metais.

A teoria descrita é somente válida para as temperaturas nas quais os fenômenos térmicos em geral podem ser desprezadas. Pois as tensões necessárias para existir um fluxo plástico a uma dada temperatura - não é uma função simples da razão de deformação e da distorção[1]. O sólido é suposto homogêneo e isotrópo. Os efeitos da anelasticidade dos materiais, tais como o efeito de Bauschinger e o efeito de histerese nos carregamentos e descarregamentos, são desprezados.



## II.1. CORPO RÍGIDO PERFEITAMENTE PLÁSTICO

Um aspecto que deve-se observar são os casos onde parte do corpo escoou e parte do corpo não passou do regime elástico, isto é, quando a deformação no regime plástico é da ordem da deformação no regime elástico, as equações neste caso são bastante complexas e as soluções completas são dificilmente obtidas. Nos casos onde a deformação plástica são grandes comparadas com as deformações elásticas, pode-se desprezar as deformações elásticas simplificando o problema.

Assim são idealizadas as relações tensão x deformação, com a finalidade de simplificar as soluções matemáticas e é bom frisar que deve-se determinar a validade das aproximações feitas e do seu campo de aplicação. Abaixo são relacionados 5 casos de simplificação diagrama tensão x deformação :

a) material perfeitamente elástico

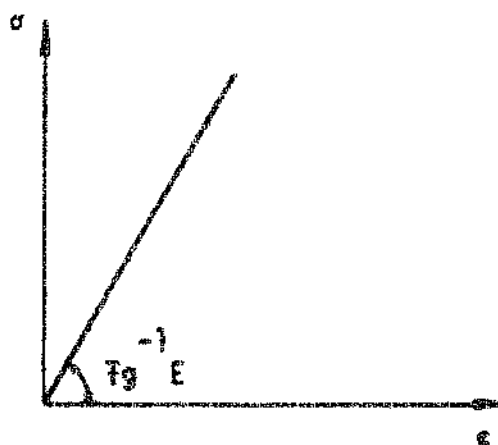


Fig. 1-a

b) material elástico, perfeitamente plástico

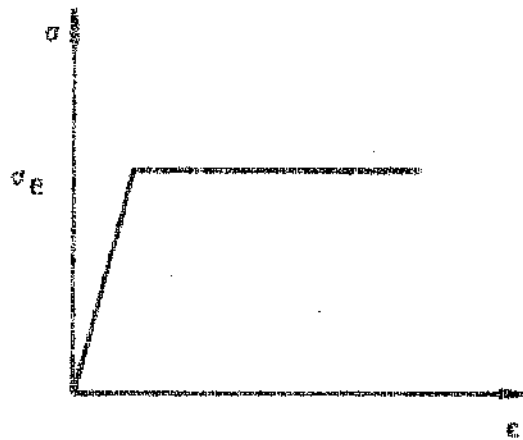


Fig. 1-b

c) material rígido, perfeitamente plástico

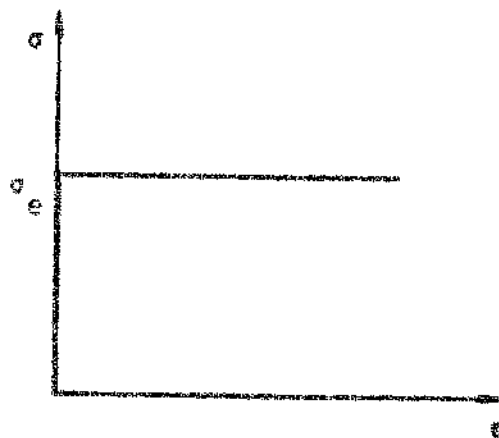


Fig. 1-c

d) material rígido, com encruamento linear

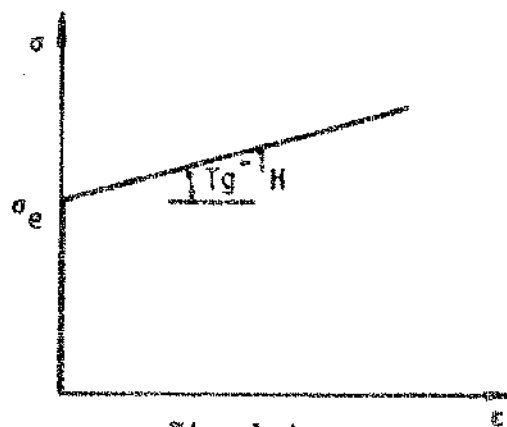


Fig. 1-d

e) material elástico, com encruamento linear

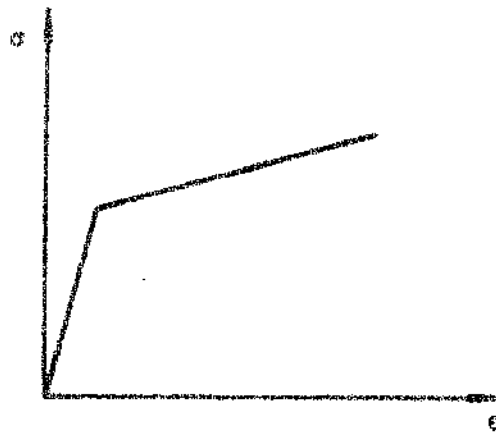


Fig. 1-e

## 11.2. CRITÉRIO DE ESCOAMENTO

O critério de escoamento é uma hipótese com respeito ao limite de elasticidade de um sólido sujeito a qualquer estado de tensões. A validade de qualquer critério proposto deve ser verificada pela experimentação.

Supondo-se que o material do sólido seja isotrópico, o escoamento plástico dependerá somente da magnitude das três tensões principais e portanto qualquer critério de escoamento deve ser uma função dessas tensões :

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = c \frac{te}{\sigma_1}$$

Ou ainda para que a função seja independente dos sistemas de referências, pode-se expressá-la em função dos invariantes do tensor de tensão :

$$f(I_1, I_2, I_3) = c \frac{te}{\sigma_1}$$

onde :

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$$

$$I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

Uma simplificação que pode-se introduzir na função escoamento é o fato verificado experimentalmente que o escoamento plástico é independente da componente hidrostática de tensão :  $\sigma_m = -p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$  e só depende da componente desviadora de tensão :  $\sigma'_1 = \sigma_1 - \sigma_m$  ,  $\sigma'_2 = \sigma_2 - \sigma_m$  e  $\sigma'_3 = \sigma_3 - \sigma_m$  . Isto pode ser facilmente visualizado pelos círculos de Mohr, indicando que o limite de elasticidade é independente das posições dos círculos ao longo do eixo das tensões normais  $\sigma$ , mas dependente dos tamanhos absolutos dos círculos.

Então a função escoamento se reduz a :

$$f(I'_2, I'_3) = C \frac{te}{\dots}$$

onde :

$$I'_1 = 0 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$$

$$I'_2 = -(\sigma'_1\sigma'_2 + \sigma'_2\sigma'_3 + \sigma'_3\sigma'_1)$$

$$I'_3 = \sigma'_1 \sigma'_2 \sigma'_3$$

Estas funções para os critérios de escoamentos podem ser representados geometricamente , resultando superfícies de escoamentos.

Por exemplo, um ponto P de coordenadas  $(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3)$  na superfície de escoamento é visto na figura 2. Este ponto corresponde a um ponto do corpo que está em escoamento plástico.

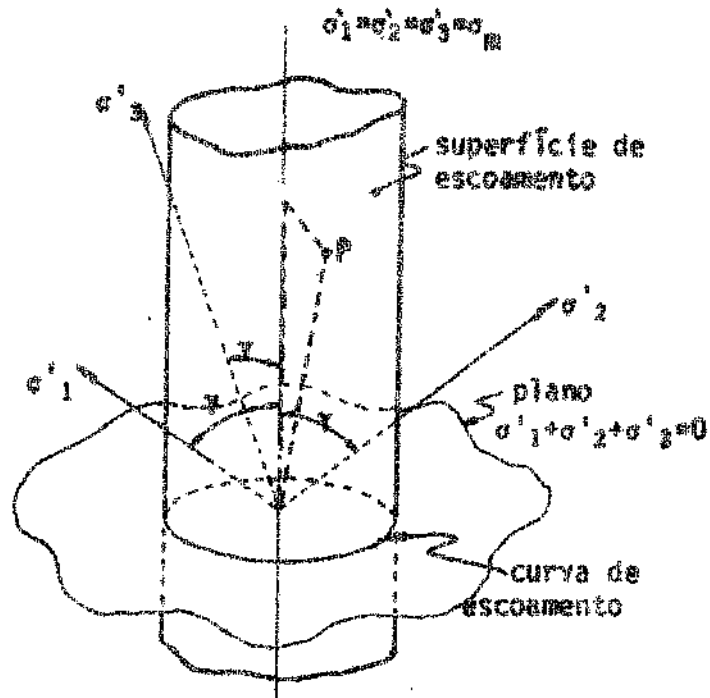


Fig. 3

Existem assim diferentes critérios de escoamento propostos, como funções específicas da função de escoamento  $f(I'_2, I'_3) = c^{te}$ , e aqueles que mais se aproximam dos dados obtidos experimentalmente são o critério de Tresca e o critério de Huber, Hencky e Mises [4] .

O critério de Tresca propõe que o escoamento ocorrerá quando a máxima tensão de cisalhamento atingir um certo valor crítico  $K_1$  .

Portanto :

$$\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) = K_1 = c^{te}$$

onde :

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

O critério de Huber, Hencky e Mises propõe que o escoamento ocorrerá quando a energia de distorção alcançar um valor crítico  $K_2$ .

Portanto :

$$I'_2 = K_2 = c \frac{te}{\gamma} \quad \text{ou desenvolvendo :}$$

$$\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} = 6 K_2^2$$

Outros critérios de escoamentos são possíveis de serem determinados a partir da função de escoamento. Devem ser aplicáveis para quaisquer combinações de tensões, e as constantes de escoamento  $K_1$  e  $K_2$  dos critérios podem ser relacionadas as grandezas de escoamento do estado simples ou uniaxial de tensões  $Y$ .

O critério de escoamento de Huber-Hencky e Mises tem mostrado excelentes resultados com a experimentação para vários metais dúcteis, pois como mostrou W. Lode, o critério de Tresca falha devido a sua independência em relação a tensão intermediária  $\sigma_2$  o que foi também demonstrado pelo trabalho de Taylor e Quinney [5] mostrado abaixo :

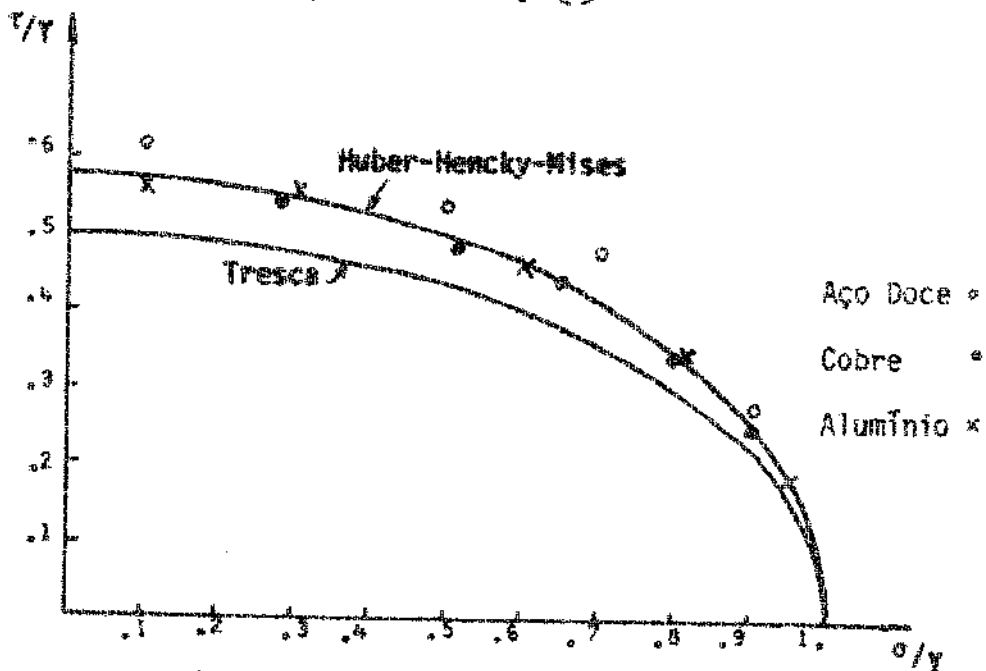


Fig. 4

Um melhoramento no critério de Huber-Hencky e Mises poderá ocasionalmente ser obtido pela adição de um termo corretivo devido a negligência da invariante  $I'_3$ , mas em vista de outras suposições que são feitas tais como a do corpo plástico ideal, este termo dificilmente merecerá mérito nas aplicações práticas.

### 11.3. EQUAÇÕES DA PLASTICIDADE

Após atingir a condição de escoamento supõe-se que o sólido siga as formulações teóricas das deformações plásticas.

Uma relação genérica entre as tensões e as deformações para a solução dos problemas de conformação plástica dos metais foi sugerida por M. Levy e posteriormente por R. Mises, definida como a equação fundamental da plasticidade.

A formulação de Levy-Mises estabelece que o incremento da deformação total instantânea  $d\epsilon$  é proporcional a tensão desviadora  $\sigma'$ , sendo expressa por :

$$\frac{d\epsilon_x}{\sigma'_x} = \frac{d\epsilon_y}{\sigma'_y} = \frac{d\epsilon_z}{\sigma'_z} = \frac{d\gamma_{yz}}{\tau_{yz}} = \frac{d\gamma_{zx}}{\tau_{zx}} = \frac{d\gamma_{xy}}{\tau_{xy}} = d\lambda$$

onde  $d\lambda$  é o fator de proporcionalidade conhecido como "módulo de plasticidade". A teoria de Levy-Mises utiliza o incremento da deformação total e não o incremento da deformação plástica, assim as equações são válidas para materiais ideais onde a deformação elástica é praticamente nula, correspondente ao material rígido cujo diagrama tensão x deformação, simplificado (figura 1-c e figura 1-d).

Uma complementação da teoria de Levy-Mises é a teoria proposta por L. Prandtl e A. Reuss que diz que o incremento da deformação

plástica instantânea  $d\epsilon^p$  é proporcional a tensão desviadora  $\sigma'$ , e expressa na forma :

$$\frac{d\epsilon_x^p}{\sigma'_x} = \frac{d\epsilon_y^p}{\sigma'_y} = \frac{d\epsilon_z^p}{\sigma'_z} = \frac{d\gamma_{xy}^p}{\tau_{xy}} = \frac{d\gamma_{yz}^p}{\tau_{yz}} = \frac{d\gamma_{zx}^p}{\tau_{zx}} = d\lambda$$

onde  $d\lambda$  é o fator de proporcionalidade, já visto para as equações de Levy-Mises.

Note que, a teoria de Prandtl-Reuss leva em conta só a parte plástica da deformação, sendo que a deformação total seria então a soma da componente elástica e da componente plástica.

Nos problemas de grandes deformações, as deformações elásticas geralmente podem ser desprezadas, e algumas verificações destas equações foram realizadas por G.I. Taylor e H.Quinney [5] que notaram a existência de uma aproximação aceitável, mas quando a operação requer uma certa precisão é necessário incluir um fator de correção.

#### II.4. PROBLEMA GERAL DA PLASTICIDADE

A solução dos problemas envolvendo deformações plásticas possui um sistema das seguintes equações :

- a) as equações de equilíbrio estático das tensões, nas quais supõem-se desprezíveis os efeitos das forças de massa, dadas pela teoria da elasticidade [6].
- b) as equações fundamentais da plasticidade, dadas no item II.3.
- c) as equações de compatibilidade ou de continuidade das deformações, dadas pela teoria da elasticidade [6].
- d) a equação da condição de escoamento do material, dadas no item II.2.



A condição de volume constante é automaticamente satisfeita pelas equações fundamentais da plasticidade.

Assim tem-se um sistema de equações diferenciais linearmente independentes e determinado, sendo a solução matemática exata, perfeitamente possível.

## II.5. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

As dificuldades matemáticas para a determinação da solução exata implica no desenvolvimento de métodos de solução aproximados.

Existem vários métodos aproximados que podem ser analíticos, gráficos e analítico-experimentais. Em cada método são feitas determinadas suposições, e como consequência a resposta final dependerá das hipóteses pré-estabelecidas. Portanto o engenheiro deve analisar e interpretar o melhor método para o seu caso, e testar os resultados com a experimentação.

Entre os métodos de soluções aproximadas aplicadas aos problemas de deformação plástica dos metais, as principais são :

- a) Método da energia de deformação plástica uniforme ou do trabalho de deformação uniforme.
- b) Método da placa.
- c) Método analítico-experimental para a determinação das tensões e deformações ou Método visioplástico.
- d) Método das linhas de máxima tensão de cisalhamento.
- e) Método da análise limite.

### III. MÉTODO DE SOLUÇÃO ATRAVÉS DAS LINHAS DE MÁXIMA TENSÃO DE CISALHAMENTO

O método das linhas de máxima tensão de cisalhamento ou das linhas de fluência constitui-se numa técnica de solução para os complexos problemas de sólidos deformados plasticamente, pelo estabelecimento do campo das linhas cujas direções em cada ponto é a da tensão de cisalhamento máximo.

#### III.1. GENERALIDADES E HIPÓTESES DO MÉTODO

Tomando-se um elemento de volume no estado plano de deformação, no qual ocorre a deformação plástica, tem-se um estado de tensões dados por :  $\sigma_x$  ,  $\sigma_y$  ,  $\sigma_z$  e  $\tau_{xy}$  como mostra a figura 5-a. Pode-se determinar os planos principais onde as tensões principais ocorrem e que podem ser descritas em função da tensão hidrostática  $\sigma_m$  e da tensão de cisalhamento  $\tau = K$ , que é constante em toda a região plástica, desde que o encruamento seja negligenciado, porém não se deve esquecer que a tensão hidrostática varia de ponto para ponto no corpo. Sabe-se ainda que a máxima tensão de cisalhamento ocorre a  $45^\circ$  das direções das tensões principais e assim a tensão de cisalhamento  $\tau$  alcançará o valor crítico nestas direções. Como é mostrado pela figura 5-c, esta condição de tensão de cisalhamento máximo ocorre em duas direções ortogonais entre si, e são designadas por linhas  $\alpha$  e  $\beta$ .

Estas linhas de máxima tensão de cisalhamento são as características das equações diferenciais do equilíbrio das tensões e satisfazem as condições de escoamento de um material. As equações destas linhas são curvas hiperbólicas e só ocorrem na região do corpo deformado plasticamente.

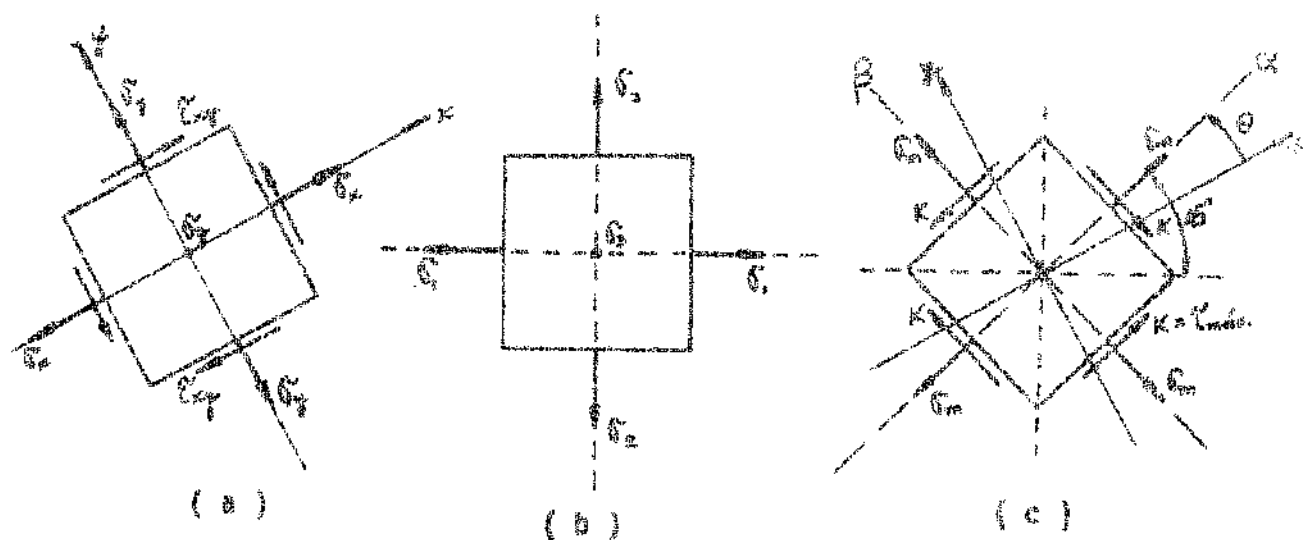


Fig. 5

O conjunto destas linhas, cujas direções em cada ponto coincidem com as direções das tensões de cisalhamento máximo, formam famílias de linhas que se interceptam ortogonalmente entre si. Portanto o campo formado pelas linhas de fluência constitui-se na região de deformação plástica do sólido.

O tratamento analítico impõe ao método certas hipóteses simplificativas, e como tais, facilitam a solução de processos envolvendo deformações plásticas, que por outros meios seriam complexas.

- a) o material é homogêneo e isotrópico.
- b) o material é rígido perfeitamente plástico.
- c) o estado de deformações é plano.

Apesar dos processos experimentais não observarem geralmente

estas hipóteses, a discrepância é suficientemente pequena como mostraram em seus trabalhos R. Hill [1], E.G. Thomsen [7] e S. Kobayashi [7]. Ressalte-se entretanto que em qualquer aplicação do método, a precisão da solução dependerá do grau de validade das hipóteses.

### III.2. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

O desenvolvimento matemático para a obtenção das equações do método foram aqui omitidas e para um melhor esclarecimento, o leitor deverá recorrer as bibliografias citadas.

a) Tensões no estado plano de deformações.

O estado de tensões em um ponto do sólido sendo deformado plasticamente em função da tensão hidrostática e da tensão de cisalhamento máximo [4] é dado por :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_m + K \sin 2 \theta \\ \sigma_y &= \sigma_m - K \sin 2 \theta \\ \sigma_z &= \sigma_m \\ \tau_{xy} &= - K \cos 2 \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (III.a)$$

onde

$$\sigma_m = - p = 1/3 ( \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z )$$

$$K = \tau_{m\acute{a}x} = c \frac{te}{\dots} \quad ( \text{ dado pelo critério de escoamento tomado} )$$

$\theta$  = âng. da direção da tensão de cisalhamento máximo em relação aos sistema de referência adotado.

Isto pode ser facilmente visualizado, utilizando-se o círculo de Mohr.

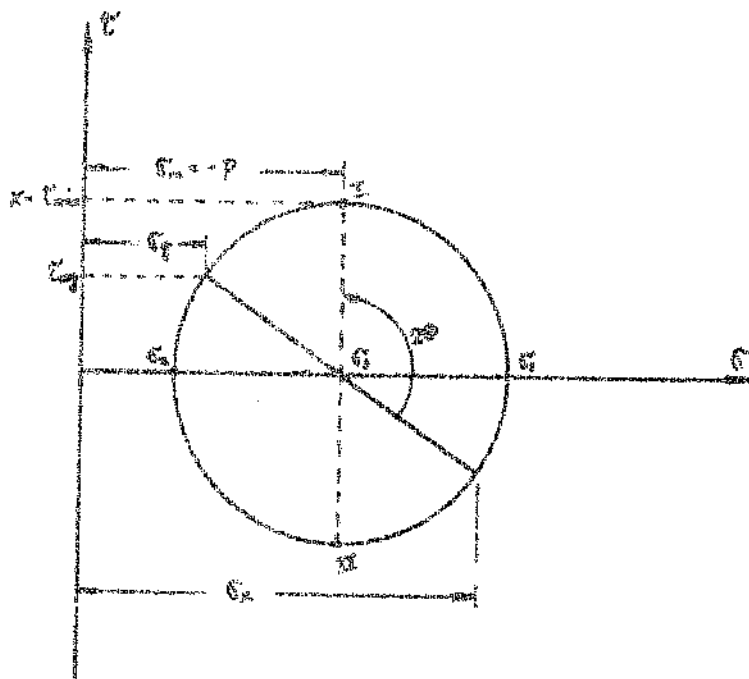


Fig. 6

b) Equações das linhas de fluência.

As características das equações diferenciais do equilíbrio estático das tensões e que constituem as equações das linhas de fluência [7] são dados por :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m + 2 k \theta &= C_1 = c \frac{te}{\rho} \text{ ao longo de uma linha } \alpha \\ \sigma_m - 2 k \theta &= C_2 = c \frac{te}{\rho} \text{ ao longo de uma linha } \beta \end{aligned} \right\} \dots (III.b)$$

As equações (III.b) são ditas de equações de Hencky.

A tensão hidrostática varia de ponto para ponto do material, e o valor da tensão máxima de cisalhamento é constante em toda a região deformada plasticamente. E a direção da tensão máxima de cisalhamento em relação a um sistema de referência e que varia de ponto para ponto

segundo a linha de fluência tomada.

Portanto é fundamental neste método a obtenção das direções das linhas de fluência com boa precisão para cada ponto, para a determinação da distribuição das tensões e deformações.

### III.3. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS LINHAS

Estas linhas de fluência são curvas hiperbólicas definidas pelas equações (III.b), e possuem propriedades geométricas características. Estas propriedades são importantes para a construção dos campos das linhas de fluência.

#### a) Primeiro teorema de Hencky

"O ângulo formado pelas tangentes a duas linhas de uma mesma família de linhas pelos pontos de intersecções com as linhas da outra família é constante ao longo de cada família de linhas."

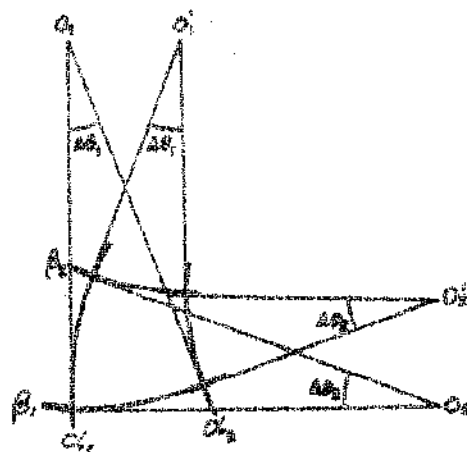


Fig. 7

b) Segundo teorema de Hencky

"Os raios de curvaturas  $R$  e  $S$  das linhas de fluência  $\alpha$  e  $\beta$  são definidas pelas equações :  $\frac{1}{R} = \frac{\partial \theta}{\partial S_\alpha}$  e  $\frac{1}{S} = \frac{\partial \theta}{\partial S_\beta}$

onde  $\frac{\partial}{\partial S_\alpha}$  e  $\frac{\partial}{\partial S_\beta}$  são variações tomadas ao longo das linhas  $\alpha$  e  $\beta$

respectivamente e relacionam-se por :  $dS + R d\theta = 0$  p/ a linha  $\alpha$

$dR - S d\theta = 0$  p/ a linha  $\beta$ ."

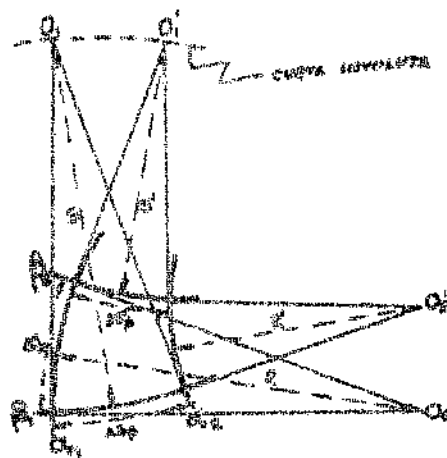


Fig. 8

c) Teorema de Prandtl

"Os centros de curvaturas instantaneos de uma família de linhas que se movem ao longo da outra família de linhas formam uma curva involuta." (figura 8).

#### III.4. OBTENÇÃO DOS CAMPOS DAS LINHAS DE FLUÊNCIA

Através das propriedades geométricas e das condições de contorno do problema, pode-se com um desenvolvimento analítico determinar o campo das linhas de fluência e conseqüentemente a posição de cada ponto sobre as linhas.

Uma vez determinado o campo das linhas de fluência de um problema, pode-se pelas coordenadas de um ponto qualquer das linhas avaliar numericamente as direções das linhas nestes pontos. E posteriormente pelas equações de Hencky determinar os valores das tensões.

Um estudo destes cálculos e de fácil aplicação foi desenvolvido por W. Johnson e H. Kudo [7] que utilizaram os princípios estabelecidos sobre os estados de tensões nos limites da região rígido-plástico e da aproximação dos segmentos curvos das linhas de fluência por segmentos de reta. Estas técnicas são as vezes chamadas de "upper-bound loads" que apresentam valores resultantes superiores aos apresentados pela solução real. A grande vantagem desta teoria é o fácil manuseio das expressões matemáticas e a rápida obtenção dos resultados com a utilização de um programa computacional.

#### III.5. CAMPO PADRÃO DAS LINHAS DE FLUÊNCIA

Embora muitos tipos de campos de linhas de fluência possam ser obtidos, de acordo com o particular problema abordado, sendo assim, os campos de linhas de fluência característico do problema de deformação abordado. Procura-se então generalizar este método determinando-se um campo padrão que se adapta a uma variedade de problemas específicos.

O campo padrão das linhas de fluência baseado nos estudos de W. Johnson são denominados de "two centered-fan" mostrado na figura 9 -



são construídas a partir de dois arcos de círculos de raios iguais, e os centros destes círculos são os pontos de origem de cada uma das famílias de linhas de fluência.

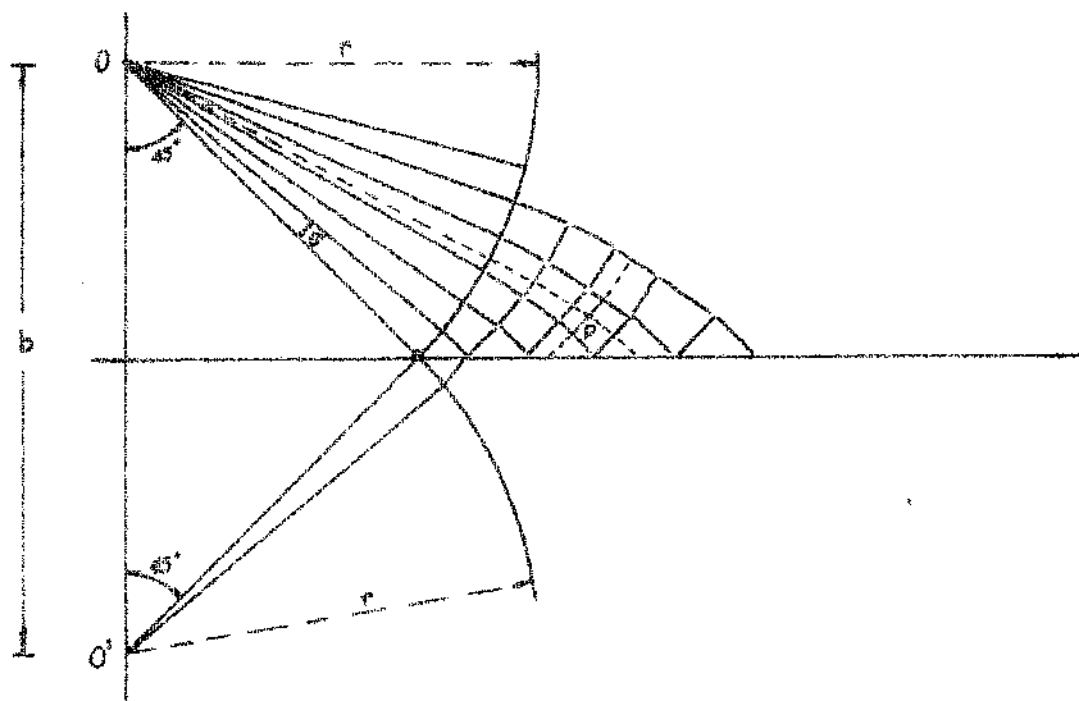


Fig. 9

Este campo padrão pode ser obtido rapidamente utilizando-se um programa computacional, onde o incremento angular pode ser adotado segundo a conveniência das nossas soluções e em nosso caso foi de  $5^\circ$ .

As linhas não definidas pelo incremento angular adotado é obtida através de uma interpolação numérica, utilizando as propriedades geométricas das linhas de fluência.

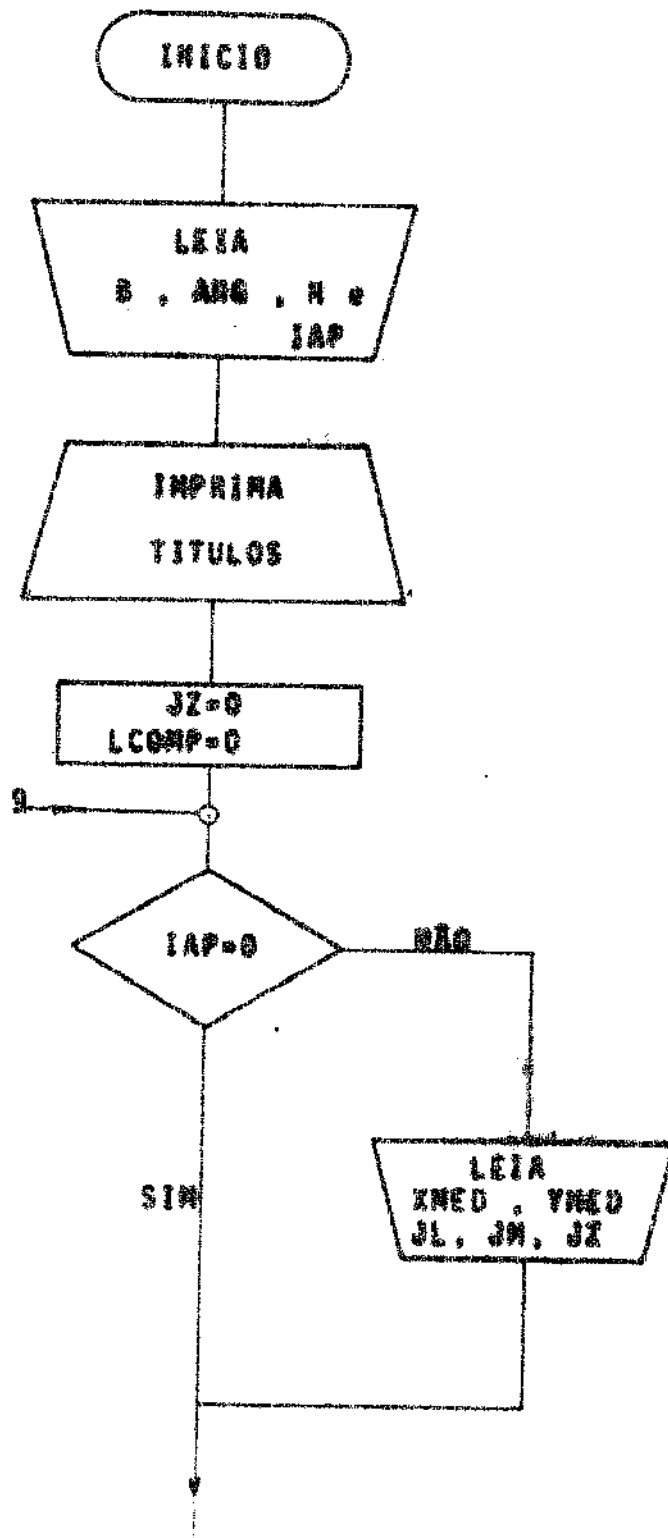
Uma outra condição que deve ser dada no programa computacional é a localização dos pontos de origem das famílias das linhas de fluência, geralmente a distância entre estes pontos são correspondentes a dimensão da ferramenta causadora da deformação.

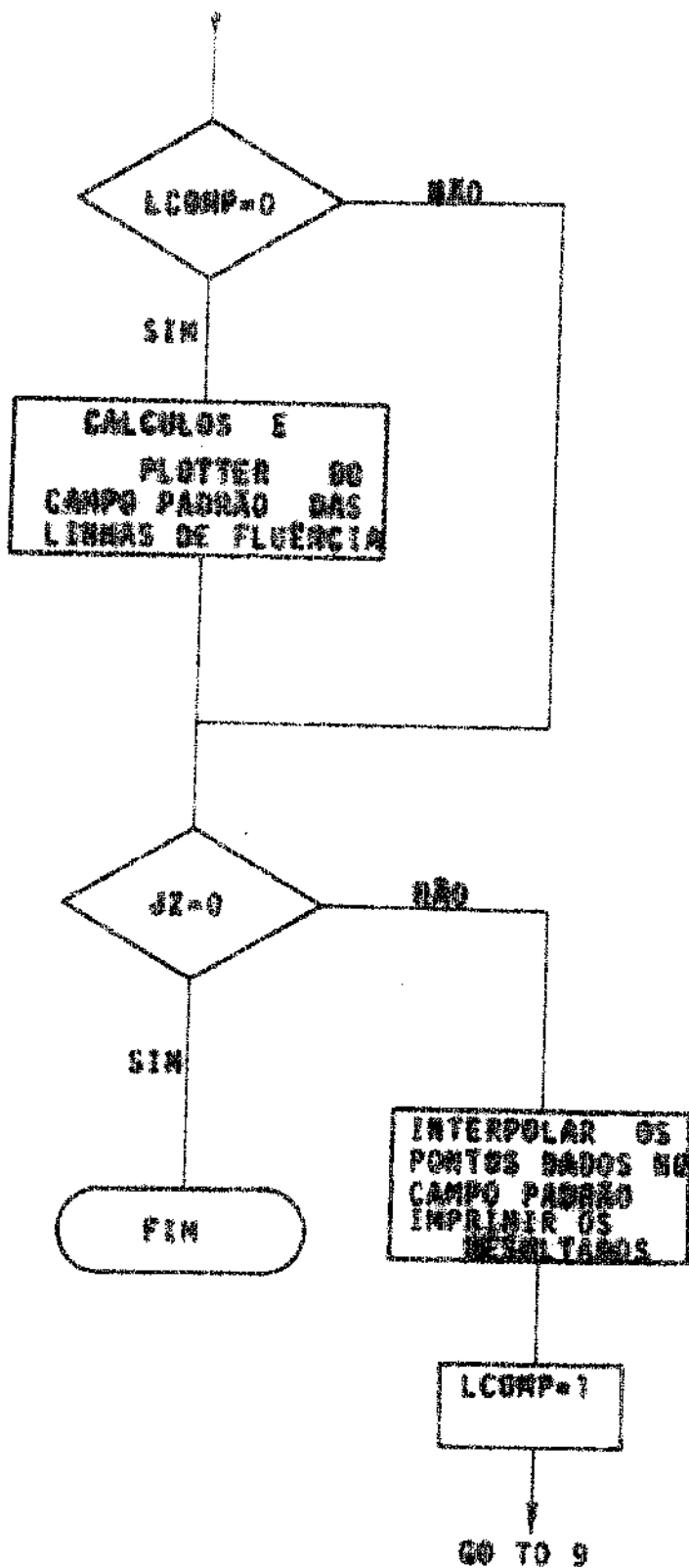
### III.6. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O programa elaborado foi baseado num estudo realizado por S. Celere [8] e constitui-se nas determinações de:

- a) Campo Padrão das Linhas de Fluência, dados em nosso caso a largura da ferramenta utilizada, o ângulo de inclinação do eixo longitudinal do campo das linhas, e o número das linhas de fluência que constituem o campo total.
- b) Interpolação de Pontos, dados a posição de um ponto no campo das linhas o programa realizará a interpolação numérica deste ponto no campo.
- c) Determinação das Direções das Linhas de Fluência, sendo o nosso objetivo as direções das linhas em um ponto qualquer do campo, feita a interpolação do ponto em questão determinaremos a direção da linha de fluência correspondente.

A seguir mostramos esquematicamente o diagrama de blocos do programa computacional utilizado :





#### IV. PROCESSO VISIOPLÁSTICO NA OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DO CAMPO DAS LINHAS DE FLUÊNCIA .

A obtenção experimental dos campos das linhas de fluência nos sólidos deformados plasticamente pode ser conseguida por diversos processos, utilizando-se propriedades químicas, físicas e visuais do comportamento, dos sólidos deformados.

Um método, de técnica simples, utilizado para testar as soluções teóricas de um problema é o processo visioplástico introduzido por Thomsen [9] em 1952.

O método consiste em inscrever um conjunto de reticulados na face paralela a deformação aplicada e observar os estágios sucessivos de deformação sofrida pelos reticulados.

No estado plano de deformação a variação de forma do reticulado inscrito, que é sujeito a deformações normais e a distorções, nos dá as deformações plásticas e portanto as direções das linhas de fluência em cada ponto analisado.

##### IV.1. INTERPRETAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DOS RETICULADOS

As equações relacionando os componentes dos deslocamentos de uma deformação finita e homogênea ou de uma deformação infinitesimal são baseadas na suposição de que um elemento de dimensões suficientemente pequenas foi levado em consideração e portanto a deformação pode ser considerada homogênea, e ainda a deformação infinitesimal pode ser um incremento de deformação, tal que a variável tempo não é apreciável. Assim é possível medir experimentalmente um incremento de deslocamento pequeno tal que a suposição de homogeneidade da deformação não é violada e por-

tanto estes deslocamentos podem ser utilizados para calcular as deformações incrementais sem considerar se a deformação é estática ou não-estática.

Há fundamentalmente duas maneiras de obter-se resultados significativos dos retículos distorcidos em um pequeno passo de deformação :

- a) determinando-se o deslocamento incremental de um ponto em questão, decompõe-o nas componentes  $u$  e  $v$  paralelas aos eixos coordenados  $x$  e  $y$  e a seguir plotando-se as curvas dos deslocamentos  $u$  e  $v$  em relação a  $x$  e  $y$  obtendo-se as inclinações  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial u}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial v}{\partial x}$  e  $\frac{\partial v}{\partial y}$  que são utilizados para obter  $\delta\epsilon_x$ ,  $\delta\epsilon_y$  e  $\delta\gamma_{xy}$  e posteriormente as direções das direções principais e das linhas de máxima tensão de cisalhamento.
- b) determinando-se diretamente as componentes da deformação de um ponto, visualizando-se as distorções relativas ao longo de eixos convenientes, determinando-se os cosenos diretores destes eixos em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , assim obtendo-se  $\delta\epsilon_x$ ,  $\delta\epsilon_y$  e  $\delta\gamma_{xy}$  e posteriormente as direções principais e de máxima tensão de cisalhamento.

O primeiro método envolve diferenciações gráficas e numéricas e portanto envolvendo aplicações de relações aproximadas. O segundo método envolve medidas diretas da deformação e que deverá ser convenientemente operado para as direções desejadas, sendo portanto de fácil manejo.

Segundo a suposição de que o material é isotrópico e homogêneo, as direções das tensões principais e dos incrementos das deformações principais coincidem, podendo-se escrever que a direção principal é

dada por :

$$\operatorname{tg} 2 \theta = \frac{d\gamma_{xy}}{de_x - de_y} = \frac{\epsilon_{\gamma_{xy}}}{\epsilon e_x - \epsilon e_y}$$

Sabendo-se que a direção das tensões máximas de cisalhamento ocorrem a  $45^\circ$  das direções principais, pode-se escrever que as direções são dadas por :

$$\alpha = \frac{\theta}{4} \pm \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2 \theta$$

Concluindo, pode-se dizer que através do processo visioplástico pode-se determinar as direções das linhas de fluência em cada ponto do sólido deformado.

#### IV.2. OBTENÇÃO DIRETA DAS DIREÇÕES DAS LINHAS DE FLUÊNCIA

O processo visioplástico é geralmente utilizado pelos pesquisadores com a finalidade de obterem as deformações incrementais dos pontos de um sólido deformado plasticamente, entretanto os nossos estudos são as direções da linha de fluência em cada ponto. Tentou-se então neste trabalho utilizar-se o processo visioplástico para tal finalidade, com a inscrição de um reticulado adequado.

Portanto há fundamentalmente dois modos de determinação das direções das linhas utilizando o processo visioplástico :

- a) pelo meio indireto, como foi visto no item anterior.
- b) pelo meio direto, através da obtenção da direção principal de deformação no reticulado inscrito.

O principal problema agora é obter um reticulado convenient-

te para a obtenção direta da direção principal. Feitas as análises, verificou-se que E. Siebel [10] desenvolveu um tipo de reticulado que contém esta informação.

Assim, examinando a deformação de um reticulado quadrícula-  
do inscrito no sólido como mostra a figura 10-a, nota-se somente nas fi-  
bras que se encontram nas proximidades do eixo do sólido, que a deforma-  
ção total é reduzida a um simples alongamento ou contração longitudinal -  
correspondente a variação desta seção no sólido, isto é, o quadrado se -  
transforma em um retângulo. Todos os elementos inscritos que não se encon-  
tram no eixo sólido são submetidos a uma deformação total composta de um  
alongamento ou contração longitudinal e mais uma distorção, isto é, o qua-  
drado se transforma em paralelogramo ou forma similar, como mostra a fi-  
gura 10-b.

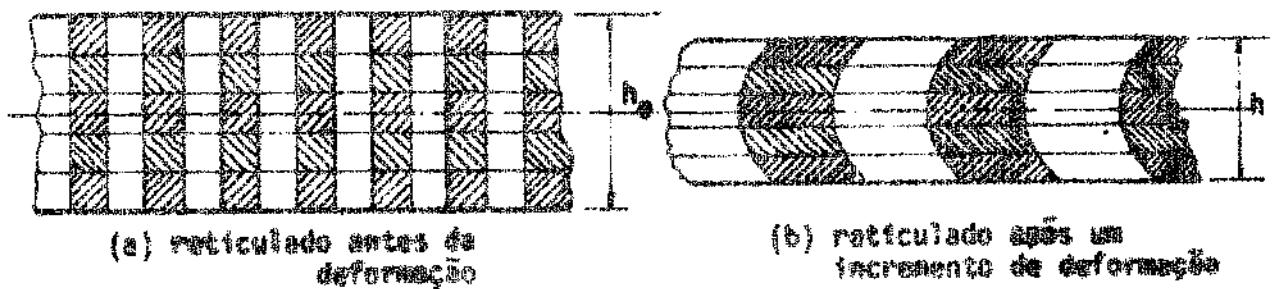


Fig. 10

Pode-se determinar estas componentes de deformação de um mo-  
do simples, examinando-se a deformação de círculos que são inscritos na  
superfície do sólido como mostra a figura 11-a. Um tal círculo se trans-  
forma numa elipse devido ao alongamento ou a uma contração [10], sendo



os eixos da elipses orientados segundo a distorção sofrida pela elipse , isto é, segundo as direções principais de deformações, como mostra a figura 11-b.

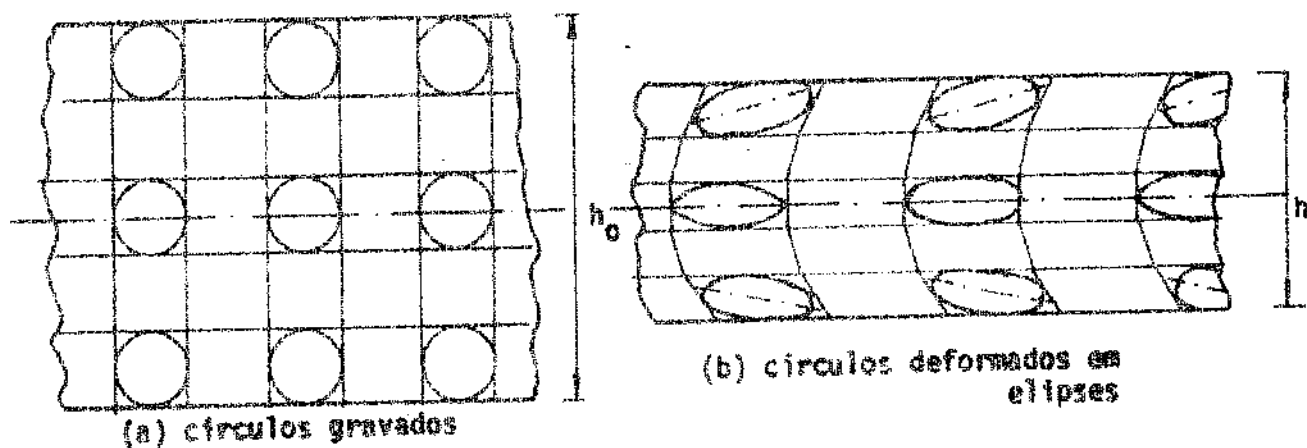


Fig.11

Assim após a deformação, em cada ponto do sólido que corresponde aos centros das elipses, pode-se avaliar através de medidas diretas as direções médias dos seus eixos e determinar a seguir as direções das linhas de fluência.

#### V. DESCRIÇÃO DA PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental consiste na obtenção das direções das linhas de fluência, pelo método da gravação de círculos descrito anteriormente, em um processo de conformação dos metais. Descrevendo-se os processos e os meios utilizados para tal finalidade.

### V.1. O MÉTODO DE DEFORMAÇÃO

Dentre os vários métodos de deformações de metais foram utilizadas os testes de compressão plana que constitui-se em um dos melhores métodos para determinar o digrama tensão x deformação para a compressão [11], é ainda o processo básico nas operações de conformações dos metais e principalmente devido a facilidade e simplicidade de operação.

O método é mostrado na figura 12 cujo arranjo foi sugerido por A. Nadai e E. Orowan [12] e mais recentemente estudado por H. Ford [4] e J.M. Alexander [13] .

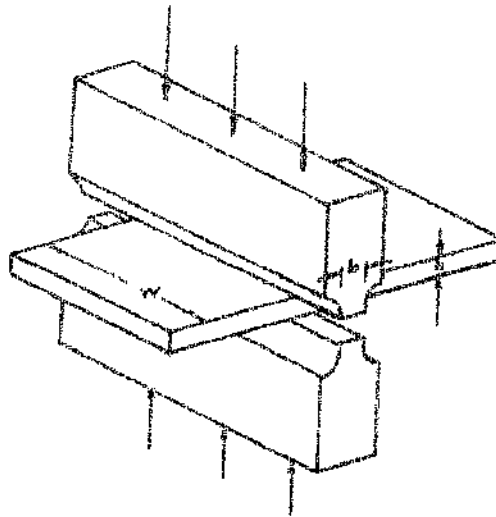


Fig.12

Para estes modelos de ensaios de deformação é necessário fixar o valor da relação  $b/h$  , pois o campo das linhas de fluência varia de acordo com esta relação. Abaixo mostram-se alguns campos em função da relação  $b/h$  e que foram verificados por R. Hill e desenvolvidas por Bishop, Wistreich e Shutt para uma aplicação tecnológica [13] .

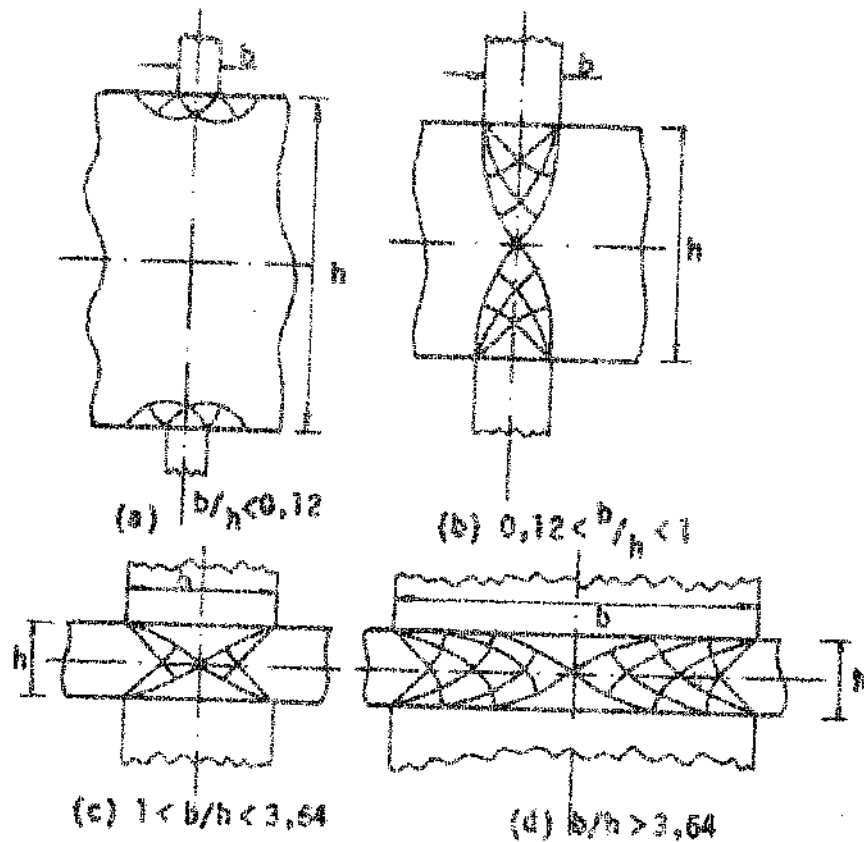


Fig.13

A. Nadai [12] em suas pesquisas também formulou um campo de linhas de fluência para este mesmo processo de deformação com relação de  $b/h = 0,5$ , isto é,  $0,120 < b/h < 1$ , como mostra a figura 14.

Tomou-se como modelo destes ensaios para a verificação dos campos das linhas de máximo cisalhamento: o ensaio de compressão com a relação  $0,120 < b/h < 1$ , portanto dever-se-ia obter campo de acordo com a configuração de Hill da figura 13-b ou de A. Nadai da figura 14. Note-se que os campos das linhas apresentados por Hill e por A. Nadai não

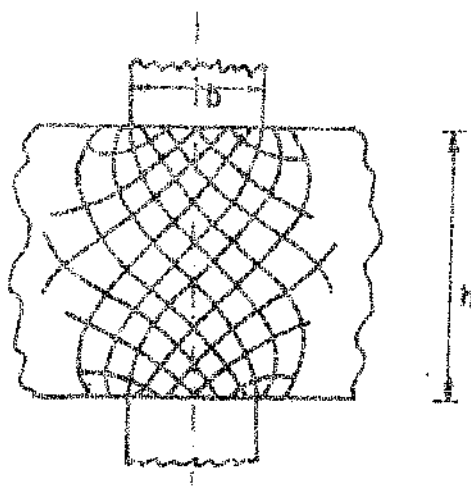


Fig.14

possuem exatamente a mesma configuração.

A escolha do ensaio com relação  $0,120 < b/h < 1$  foi devido aos seguintes fatores :

- a) possui maior área para visualização do campo total das linhas.
- b) facilidade de obtenção de corpos de prova e funções com esta dimensão.
- c) possui espaço suficiente para a gravação dos círculos.
- d) campo das linhas teóricas de fácil obtenção.

## V.2. CORPO DE PROVA E PUNCÕES

Cinco corpos de prova foram confeccionados em aços ABNT-1020, e ABNT-1060 e em alumínio comercial. Aqui a preocupação não foi confeccionar os corpos de prova com materiais ideais ou seja, com materiais que seguem aproximadamente as hipóteses da teoria, como muitos pesquisadores o fazem. Mas utilizar os metais que são utilizados nos processos reais e verificar a teoria proposta.

As dimensões dos corpos de prova foram :

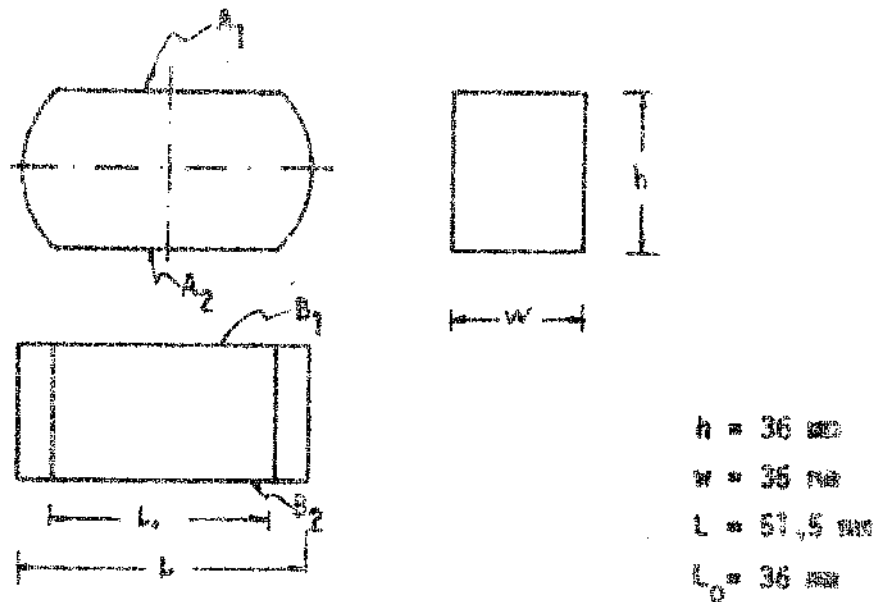


Fig.15

Alguns cuidados que se tomou durante a usinagem dos corpos de prova :

- manutenção do paralelismo das superfícies de apoio dos punções,  $A_1$  e  $A_2$  da figura 15.
- manutenção do paralelismo das superfícies de gravação,  $B_1$  e  $B_2$  da figura 15.
- bom acabamento nas superfícies.

Após a usinagem o corpo de prova é submetido a um tratamento térmico de normalização com a finalidade de homogeneizar a sua estrutura e remover as tensões internas existentes.

Finalmente as superfícies de gravação foram polidas para uma posterior inscrição dos reticulados.

As características químicas e físicas do material utilizado para a deformação estão descritas no apêndice 1.

Os punções eram constituídos por bits de aço ferramentas, cuja composição química e dureza estão descritos no apêndice 2. As dimensões do bits é mostrado na figura 16, verificou-se que com as cargas aplicadas não há deformação dos punções.

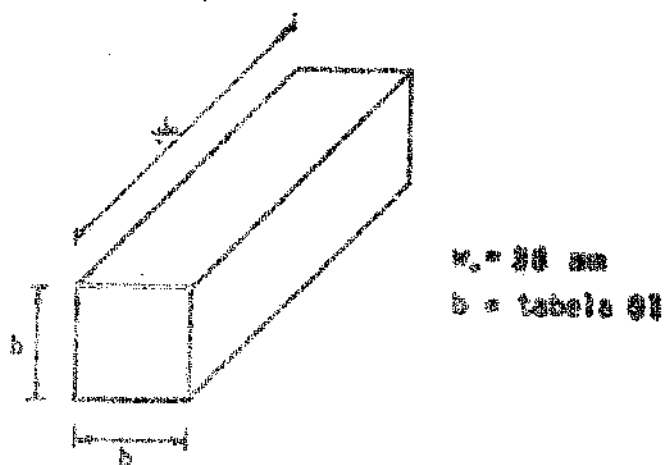


Fig. 16

### V.3. OS SISTEMAS DE GRAVAÇÃO DOS CÍRCULOS

A gravação de finos retículos nos corpos de prova, que em nosso caso foi a gravação de círculos como já visto no item IV.3 para a obtenção das direções das tensões de máximo cisalhamento não requer meios complexos de obtenção. Há basicamente dois processos de gravação, conhecidos por :

a) processo mecânico.

b) processo fotográfico.

Em estudos feitos por Baraya, Parker e Flowett [14], verificaram que os processos mecânicos são satisfatórios para a maioria dos ensaios e que os processos fotográficos possuem graus de precisão e capacidade de repetição da gravação maiores.

Os processos fotográficos de gravação em metais foram desenvolvidos pela Eastman Kodak Co. e necessitam de técnicas e conhecimentos especiais para sua utilização [15].

Os processos mecânicos utilizam técnicas menos sofisticadas e são diversos os meios com os quais pode-se gravar nas superfícies metálicas utilizando-se dispositivos ou ferramentas de gravação.

Portanto neste trabalho optou-se pelos processos mecânicos de gravação e em particular pelo método de gravação através de fresas, que é o melhor método mecânico segundo os estudos de Baraya, Parker e Flowett [14].

Esquemáticamente consiste no arranjo mostrado na figura 17 abaixo, onde no eixo vertical de uma fresadora é fixado um cortador, a superfície de gravação pode então ser trabalhada e com uma profundidade constante e produzir reticulados uniformes com relativa precisão.

Este método também foi sugerido por Alexander e Brewer na gravação de reticulados extremamente finos [14].

Os corpos de prova foram gravados com a utilização de uma fresadora universal do tipo CINCINNATI CHOMIENNE "TOOLMASTER" MILLING MACHINES 6 JIF conforme vemos na figura 18, possuindo as seguintes características fundamentais.

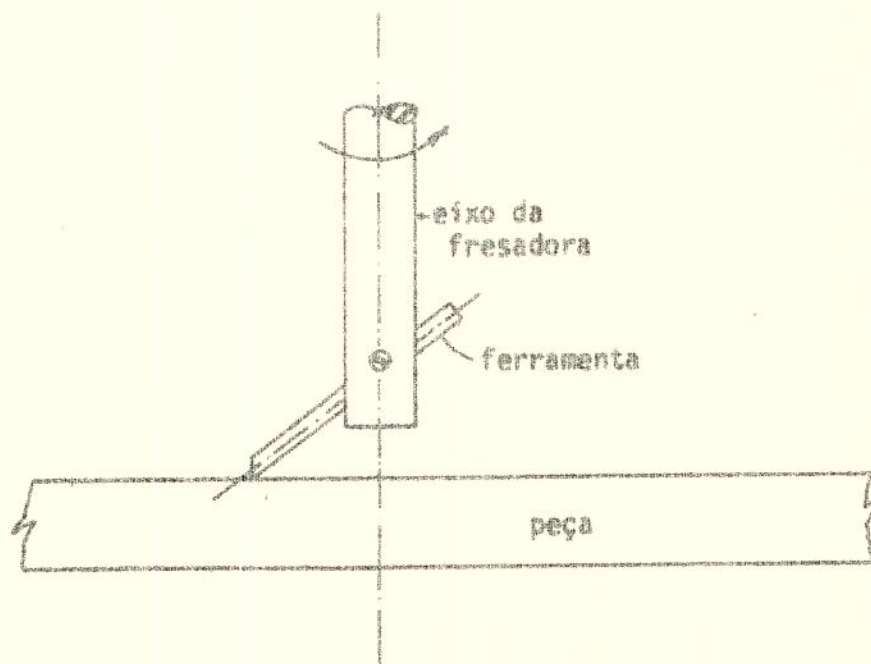


Fig.17 - Esquema do arranjo para a gravação.

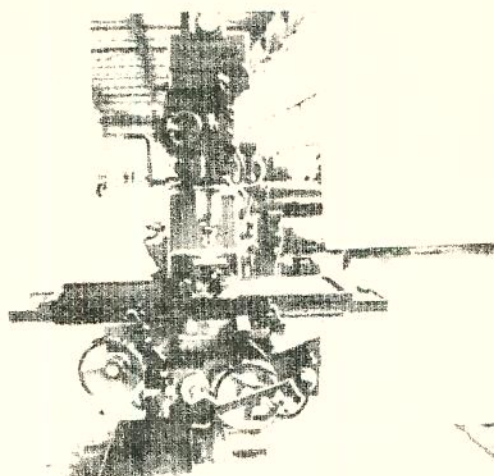


Fig.18 - Vista da fresadora universal.



a) Mesa de Coordenadas :

Posicionada através de um sistema ótico de precisão, com movimentos nas direções transversais, longitudinais e verticais.

As direções transversais e longitudinais são posicionadas através de coordenadas mostradas no visor ótico e possui precisão de microns de metro ( 0,001 mm ).

A direção vertical correspondente a regulagem da profundidade da gravação é acionada por uma polia, graduada em 120 divisões iguais que corresponde a 0,025 mm por divisão e portanto cada volta completa da polia corresponde a um avanço de 3 mm .

Foi utilizada a menor velocidade da máquina : 80 ~ 500 rpm para o eixo árvore.

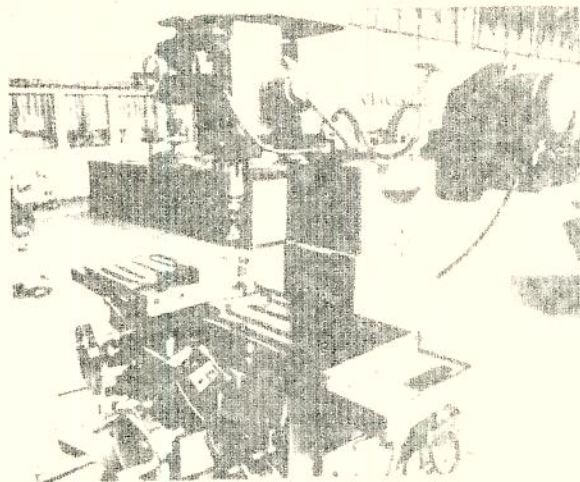


Fig.19 - Vista do sistema de gravação.

b) Mandril Universal Expansivo

Foi utilizado um mandril universal expansivo da Wohlhaupter, que possui um deslocamento do seu eixo regulável. Possuindo 100 divisões e correspondente a 0,01 mm de excentricidade por divisão, que está mostrado na figura 20. Com excentricidade do mandril definimos o diâmetro dos círculos gravados.

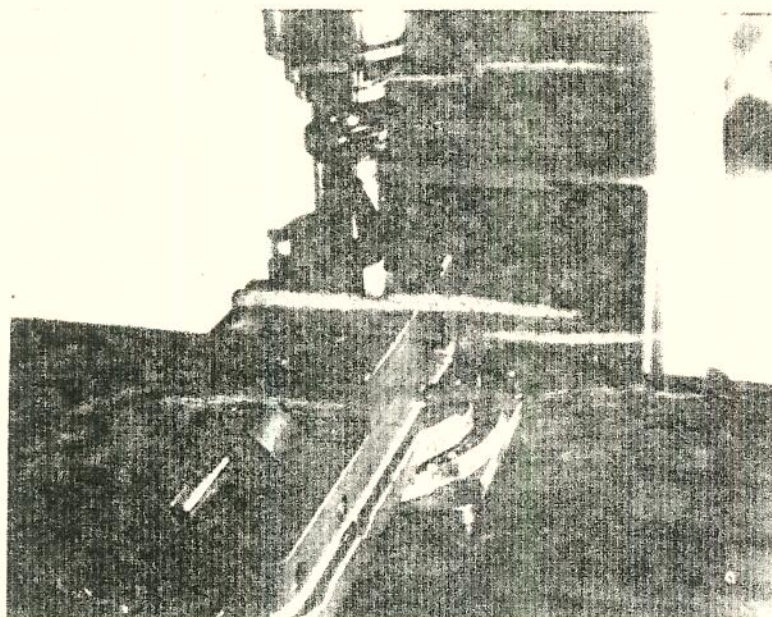


Fig.20 - Vista do mandril expansivo e da fixação do corpo a ser gravado.

c) Ferramenta

Para a gravação dos círculos nos corpos de prova, foi confeccionado uma ferramenta de barra conforme mostra a figura 21 seguinte:

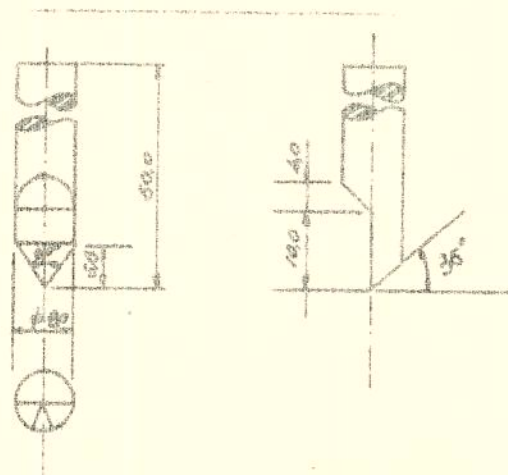


Fig.21

Esta ferramenta tem como característica uma ponta fina e centrada de tal forma que gere um risco na peça, para conservar a rigidez a ferramenta possui apenas 5 cm de comprimento.

#### V.4. OS ENSAIOS DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi realizado na máquina universal - para ensaio de materiais MOHR & FEDERHAFF - UED 40, montado conforme a figura 22 .

Os cuidados tomados para a execução do ensaio foram :

- a) colocação do corpo de prova no centro das placas.
- b) verificar o paralelismo entre as placas da máquina.
- c) colocação dos punções paralelos entre si, e no centro do corpo de prova.



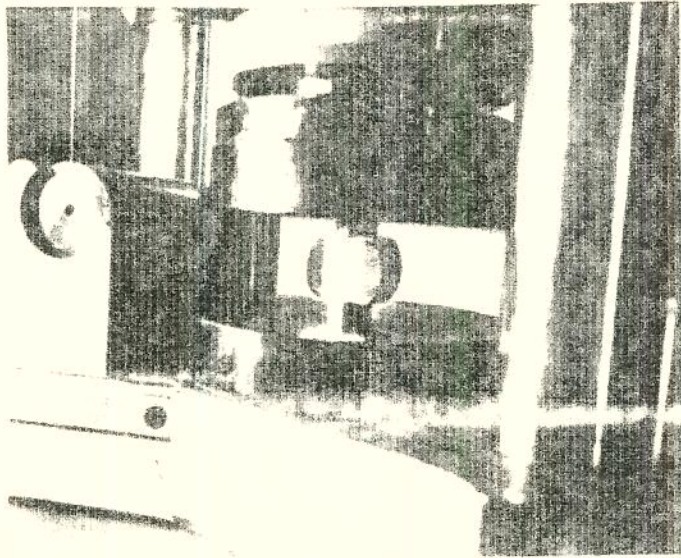


Fig.22 - Vista da deformação do corpo de prova.

- d) manter a velocidade de carregamento da máquina de ensaio constante, em nosso caso foi de aproximadamente 5 kg/min.
- e) a parte fundamental do ensaio e que deve-se ter uma norma é a determinação do final do ensaio. O final do ensaio deve ser determinado por um pequeno escoamento do material, tanto que as literaturas determinam o final do ensaio com o início de escoamento do material. Entretanto há uma dificuldade experimental para a determinação exata do início do escoamento do material devido a influência de diversos fatores, como é notado pelos diversos pesquisadores. Assim no processo visioelástico - os pesquisadores definem este ponto, quando ocorre um fato macroscópico nos reticulados inscritos que evidencia o escoamento do material. Um dos fatos que mais evidencia o escoamento plástico de um material como

É visto na teoria da plasticidade é a distorção ou deformação angular devido ao cisalhamento puro. Portanto define-se o início do escoamento quando o elemento inscrito no corpo sofre uma pequena distorção.

Neste trabalho o final foi definido quando os eixos das elipses iniciavam um deslocamento angular, como mostrado na figura 23.

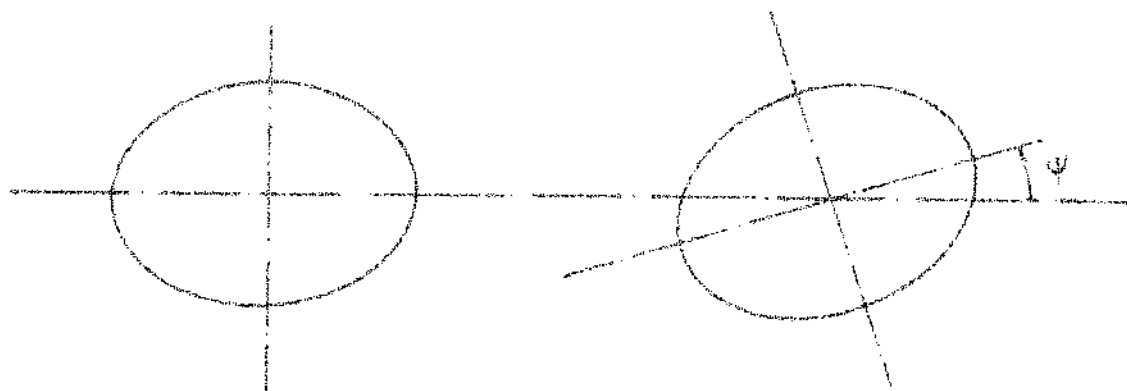


Fig. 23

A máxima deformação atingida foi limitada sempre pelo início do escoamento do corpo de prova.

Para a determinação mais precisa deste ponto, o ensaio foi executado em pequenos incrementos de deformação e a cada passo foi verificada o aspecto dos círculos deformados através de um projetor de perfis NIKON R-14, com aumento de 20 vezes como vemos na figura 24.

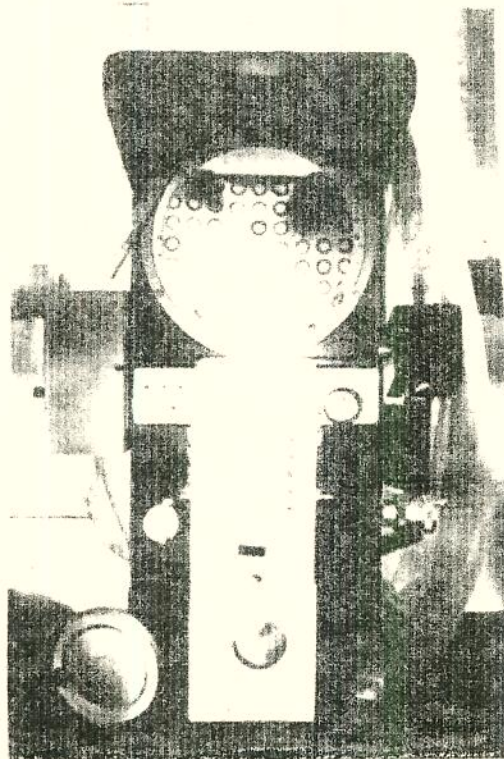


Fig.24 - Projektor de Perfis utilizado para a visualização da deformação dos círculos.

#### V.5. OS SISTEMAS DE MEDIDAS

Para a medida dos ângulos dos eixos das elipses em relação a um sistema de referências fixas e das deformações sofridas pelos círculos inscritos, foi utilizado o microscópio para medidas de precisão CARL ZEISS WM 100/50, com leitura digital acoplado a um registrador digital KIENZLE ( C11E-12 ), como mostra a figura 25.

O aparelho foi utilizado com um aumento de 10 vezes, com iluminação vertical e com uma ocular especial provida de retículos inscritos que serviam de referência para as medidas. A ocular possui um deslocamento angular que pode ser lida diretamente no aparelho, graduados em  $0,1^\circ$ . Possui ainda uma mesa de coordenadas que posiciona a peça com uma



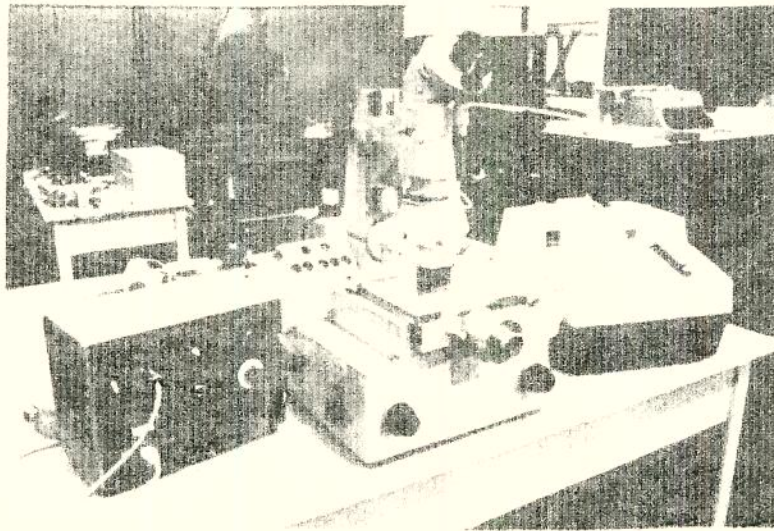


Fig.25 - Aparelhos utilizados para a medida das direções dos eixos das elipses.

precisão de  $2\mu\text{m}$  (figura 25). Pode-se ainda utilizar uma mesa com movimentos rotativos (figura 26).

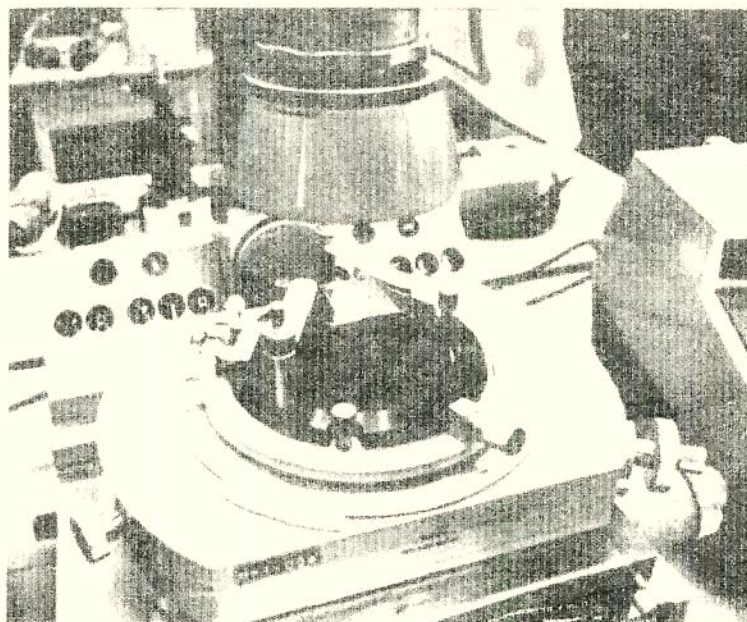


Fig.26 - Fixação do corpo de prova no microscópio com mesa rotativa.

Em cada ensaio foram medidas em média 120 direções do eixo menor das elipses e para cada elipse foram efetuadas três medidas. As leituras foram anotadas em uma folha adequada que contém a identificação da posição de cada elipse no corpo ensaiado. Então foi determinada a média aritmética das leituras efetuadas para cada elipse, obtendo-se assim os valores médios das direções dos eixos principais das elipses.



## VI. RESULTADOS OBTIDOS

Apresentar-se-ão neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios experimentais e os obtidos pelos cálculos numéricos nos cinco corpos de prova preparados segundo os processos descritos nos capítulos anteriores, e cujas características são apresentados na tabela abaixo :

| CORPO DE PROVA Nº                | 2             | 3             | 4             | 5             | 6                  |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| MATERIAL                         | Aço ABNT 1020 | Aço ABNT 1020 | Aço ABNT 1060 | Aço ABNT 1060 | Aluminio comercial |
| TRATAMENTO TERMICO               | Normaliz.     | Normaliz.     | Normaliz.     | Normaliz.     | -----              |
| DIAMETRO MÉD. CIRCULOS (mm)      | 1,780         | 1,578         | 1,470         | 1,230         | 1,250              |
| ESPESSURA MÉD. DOS RISCOS (mm)   | 0,065         | 0,074         | 0,067         | 0,097         | 0,093              |
| LARGURA MÉD. DOS PUNÇÕES -b-(cm) | 1,570         | 1,250         | 1,250         | 0,950         | 0,950              |

TABELA 01

## VI.7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Aspectos de um corpo de prova :

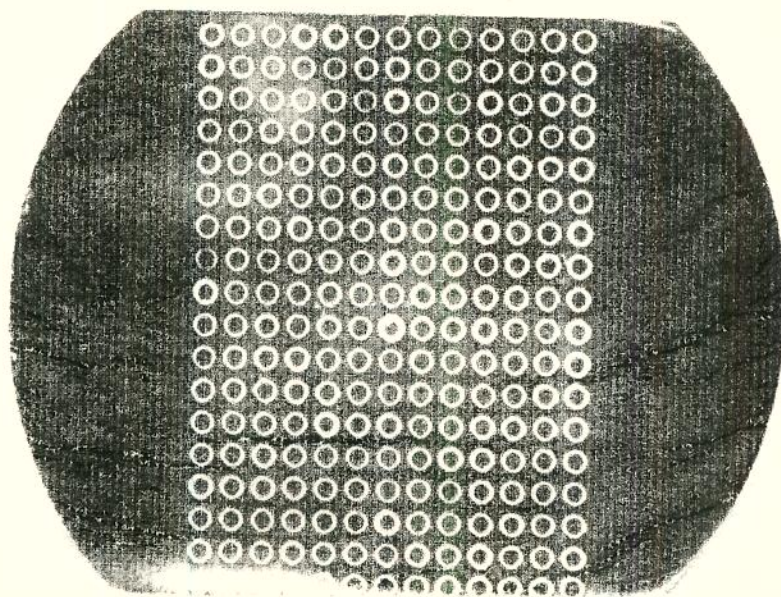


Fig.27 - antes da deformação  
corpo de prova Nº 5

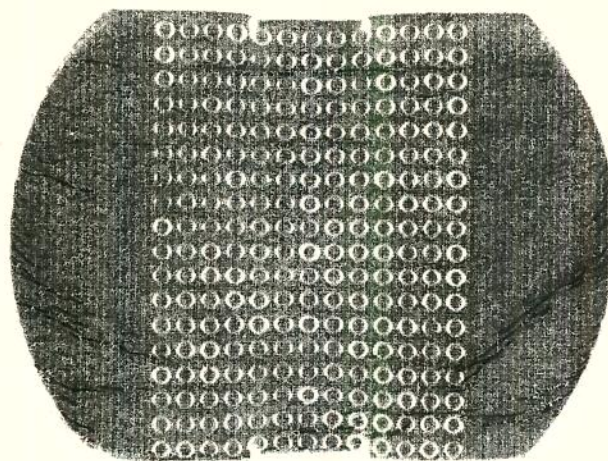
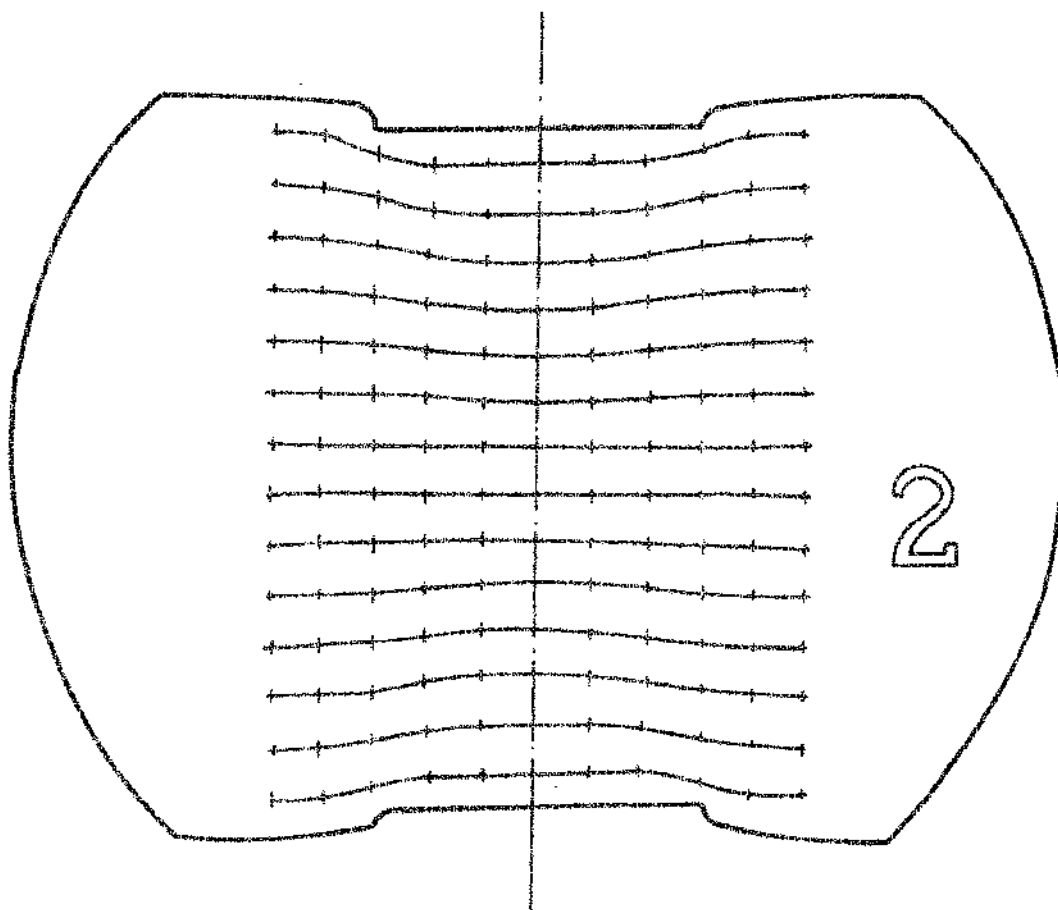
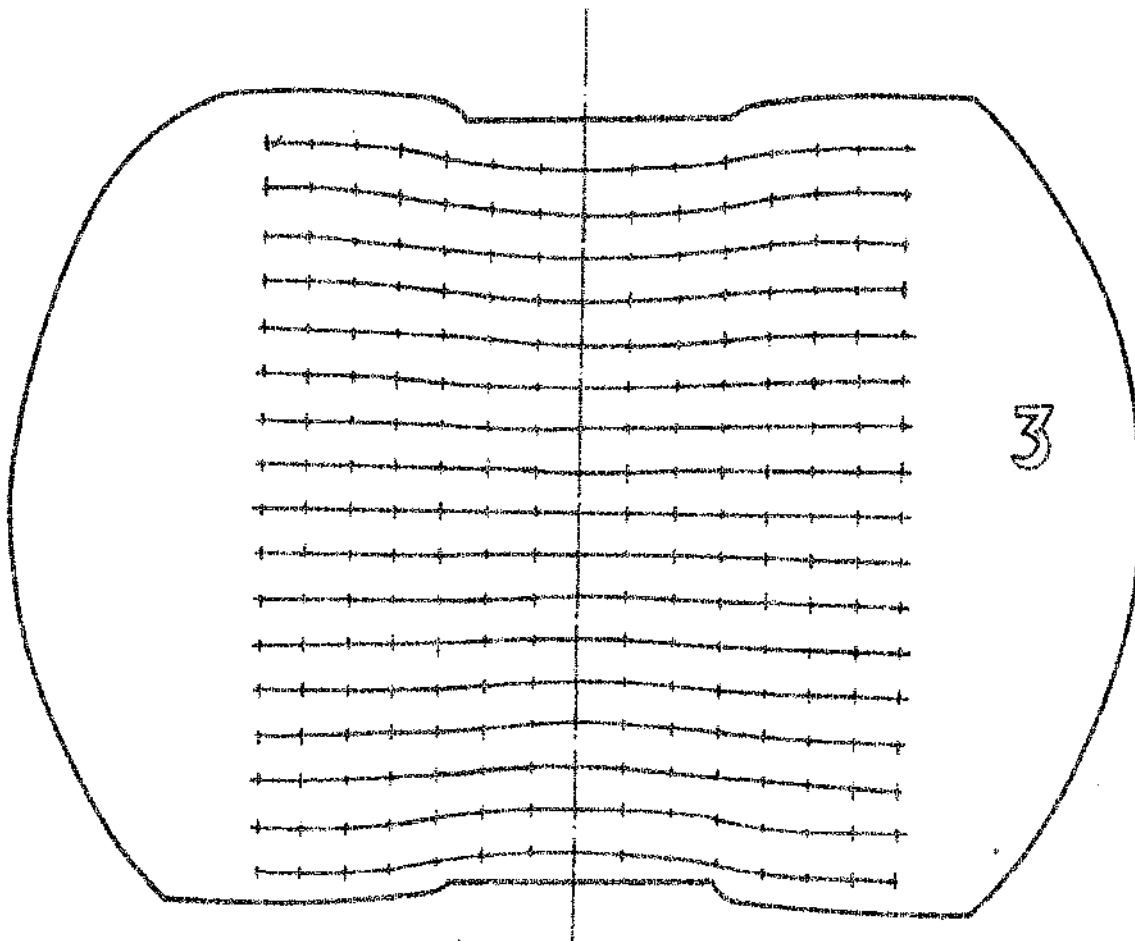


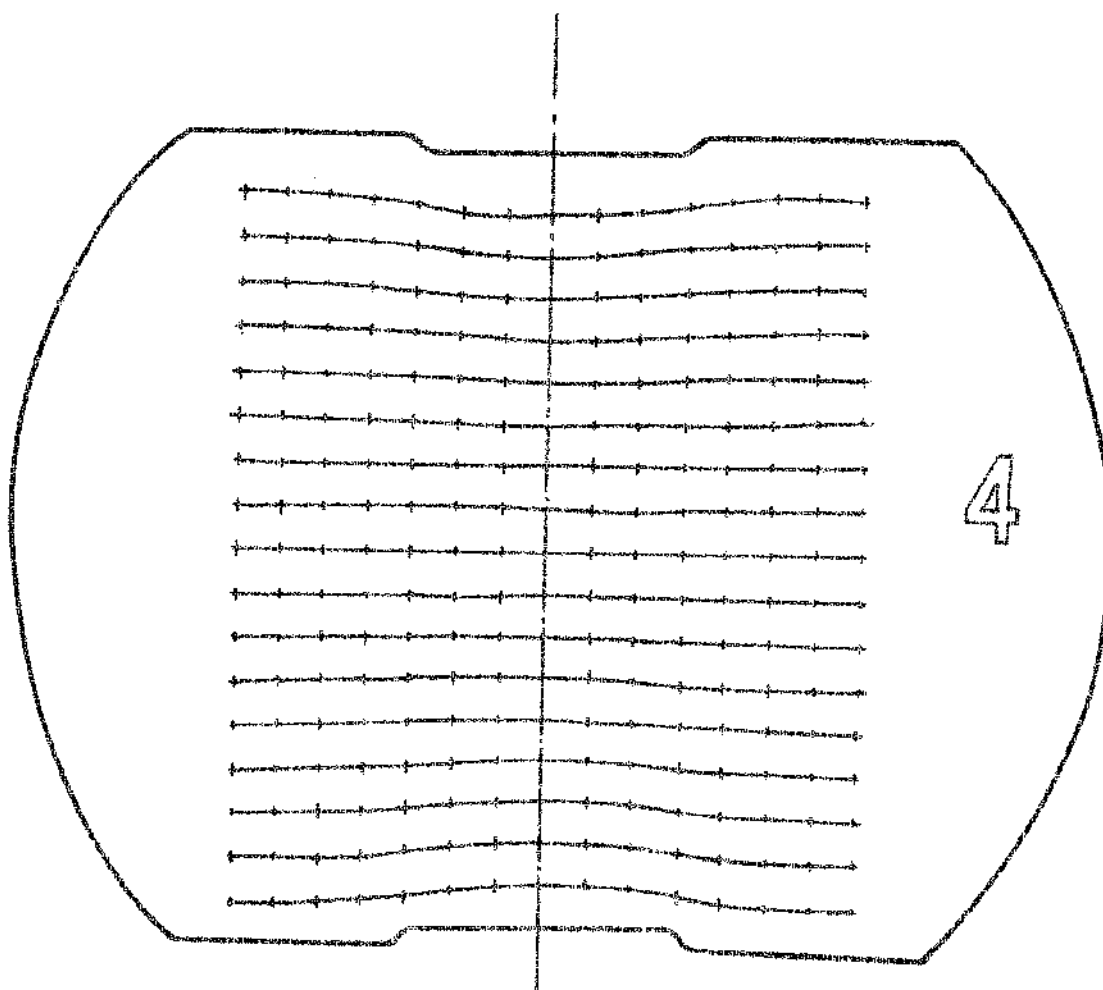
Fig.28 - após a deformação total  
corpo de prova Nº 5



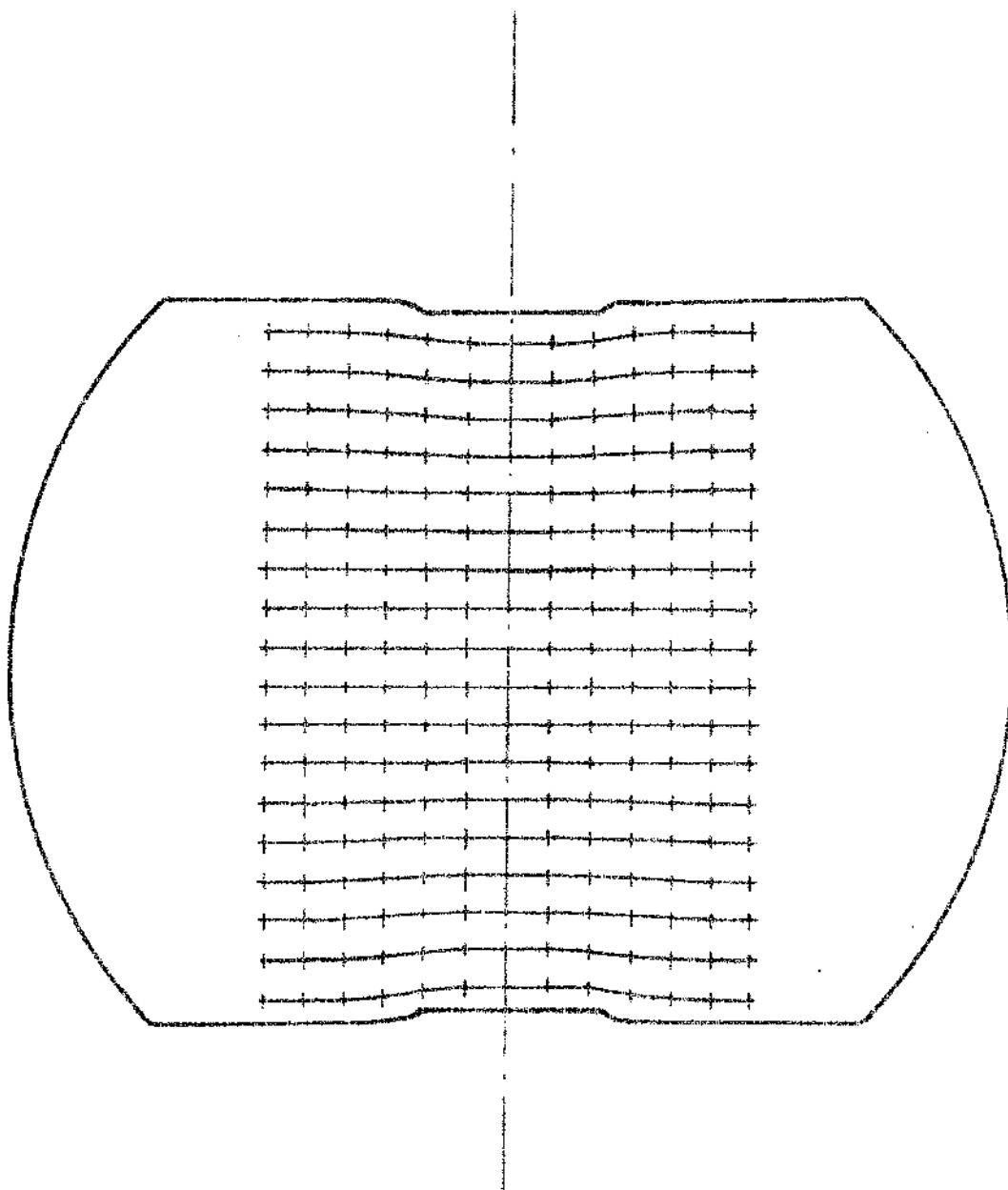
| CORPO DE PROVA Nº 2 - aço ABNT 1020 |                     |         |
|-------------------------------------|---------------------|---------|
| DESENHO                             | POSIÇÃO DOS CENTROS | ESCALA  |
| Nº 1                                | DAS ELIPSES         | 1 : 2,5 |
| RENATO YUKI                         |                     | 1973    |



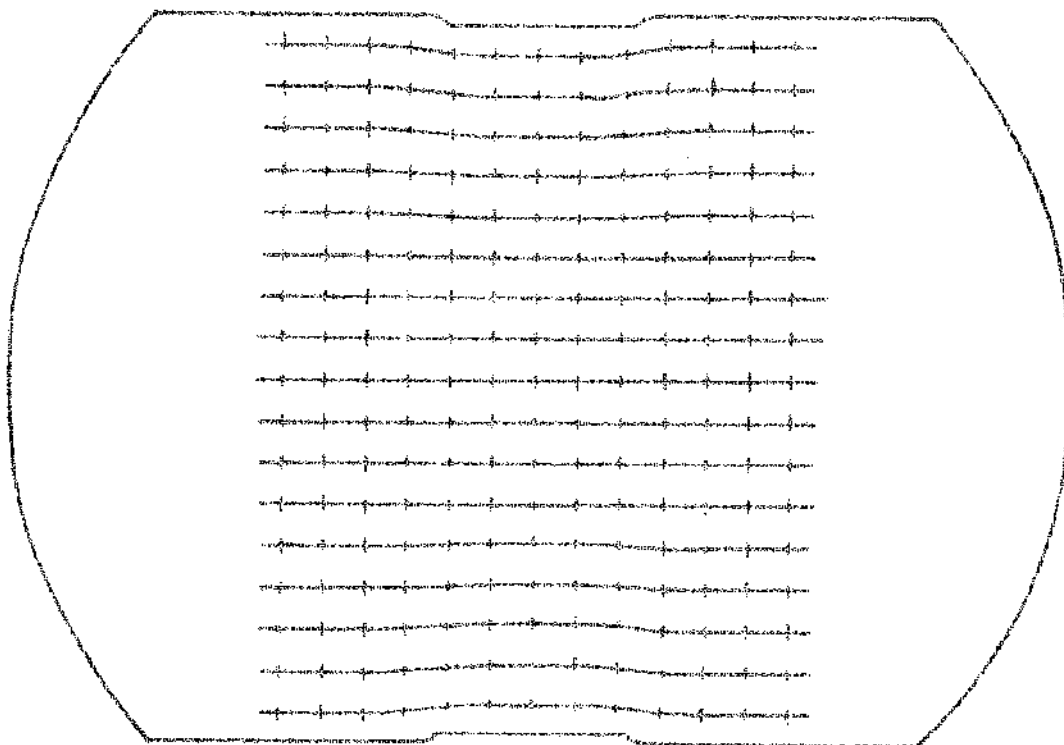
|                                     |                                    |                 |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| CORPO DE PROVA Nº 3 - Aço ABNT 1020 |                                    |                 |
| DESENHO<br>Nº 2                     | POSICÃO DOS CENTROS<br>DAS ELIPSES | ESCALA<br>1:2,5 |
| RENATO YUKI                         |                                    | 1973            |



|                                     |                                    |                 |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| CORPO DE PROVA Nº 4 - Aço ABNT 1060 |                                    |                 |
| DESENHO<br>Nº 3                     | POSICÃO DOS CENTROS<br>DAS ELIPSES | ESCALA<br>1:2,5 |
| RENATO YUKI                         |                                    | 1973            |

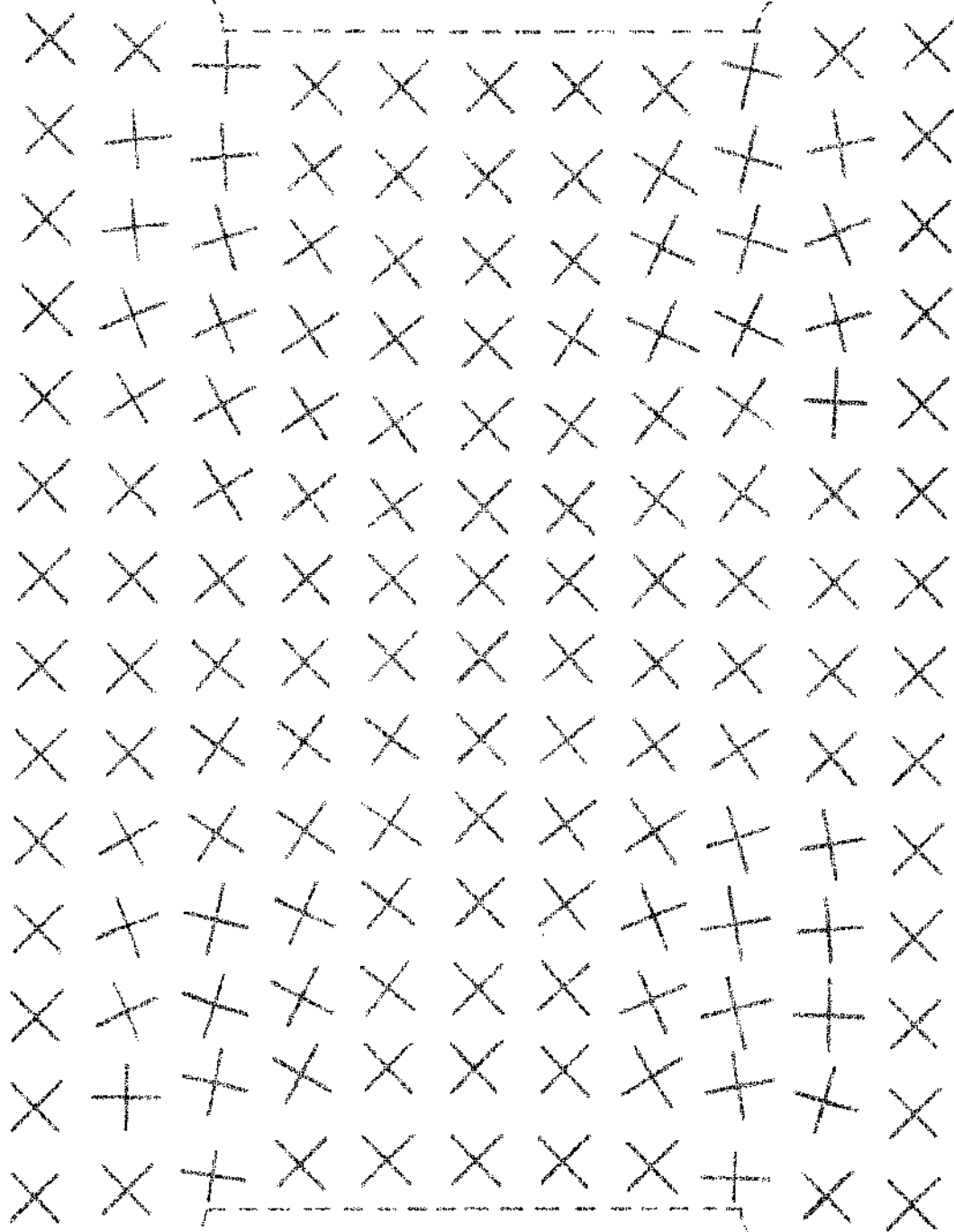


|                                     |                                    |                 |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| CORPO DE PROVA Nº 5 - aço ABNT 1060 |                                    |                 |
| DESENHO<br>Nº 4                     | POSIÇÃO DOS CENTROS<br>DAS ELIPSES | ESCALA<br>1:2,5 |
| RENATO YUKI                         |                                    | 1973            |

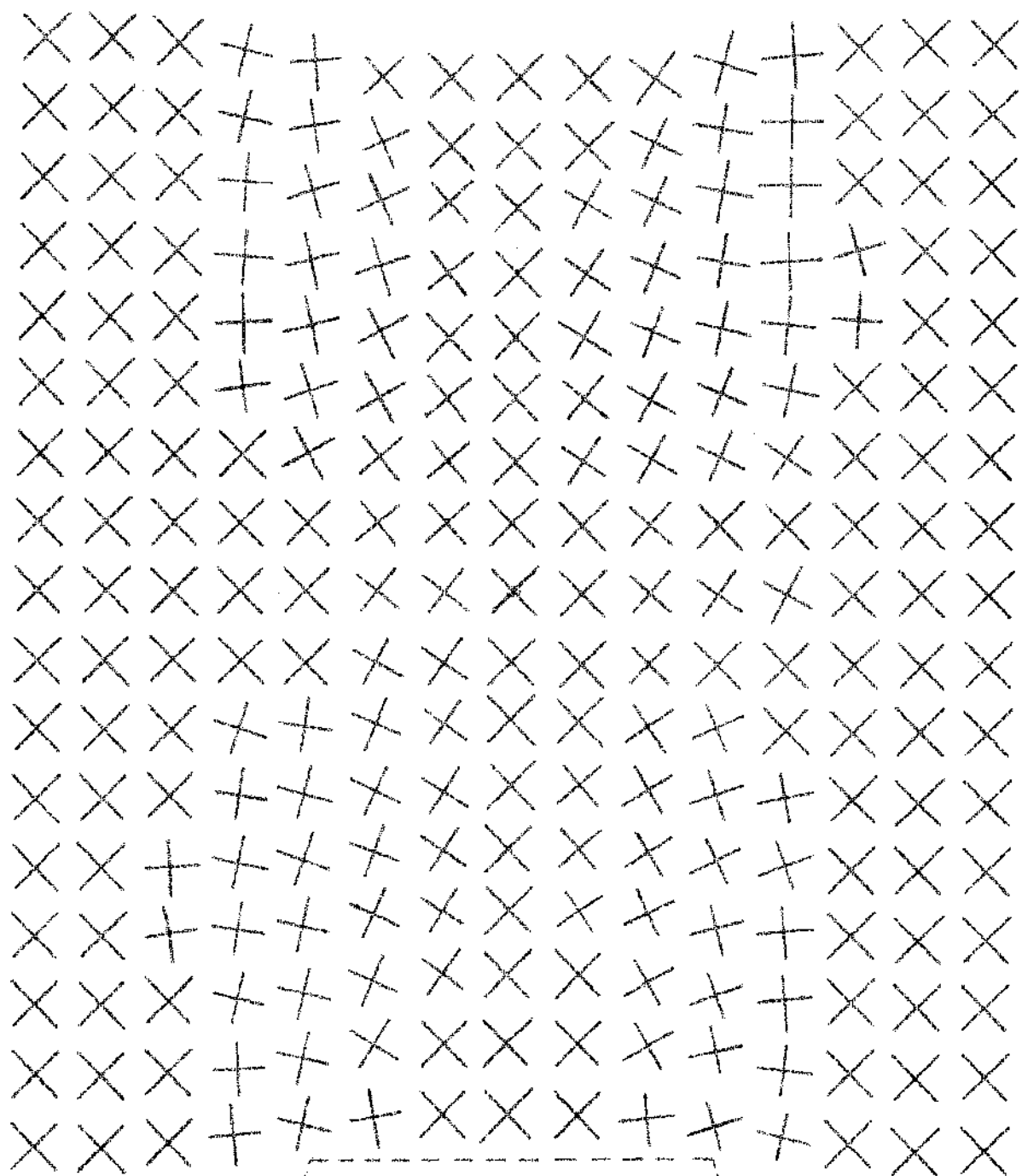


|                                |                                    |                 |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| CORPO DE PROVA NO 6 - alumínio |                                    |                 |
| DESENHO<br>Nº 5                | POSICÃO DOS CENTROS<br>DAS ELIPSES | ESCALA<br>1:2,5 |
| RENATO YUKI                    |                                    | 1973            |

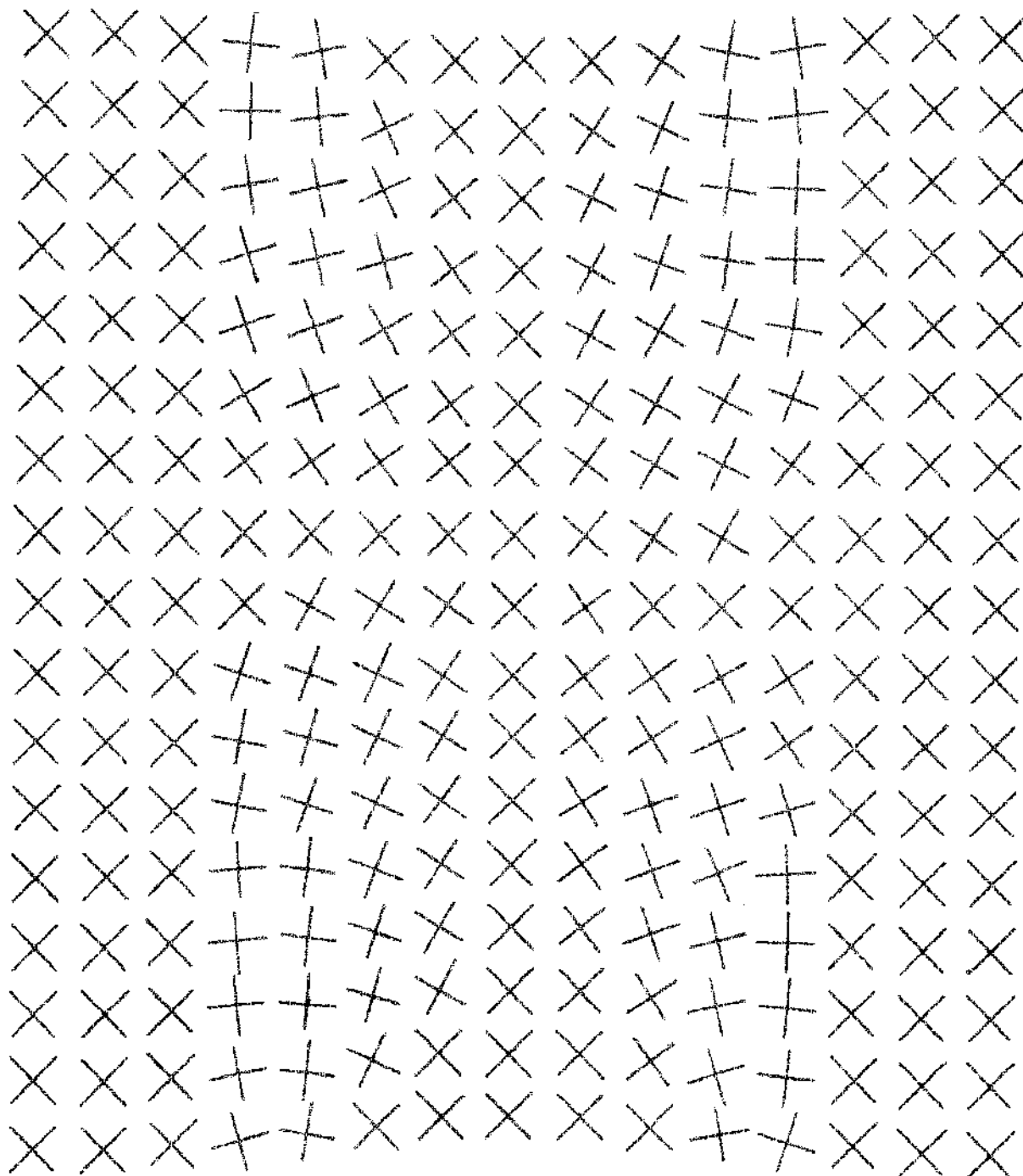




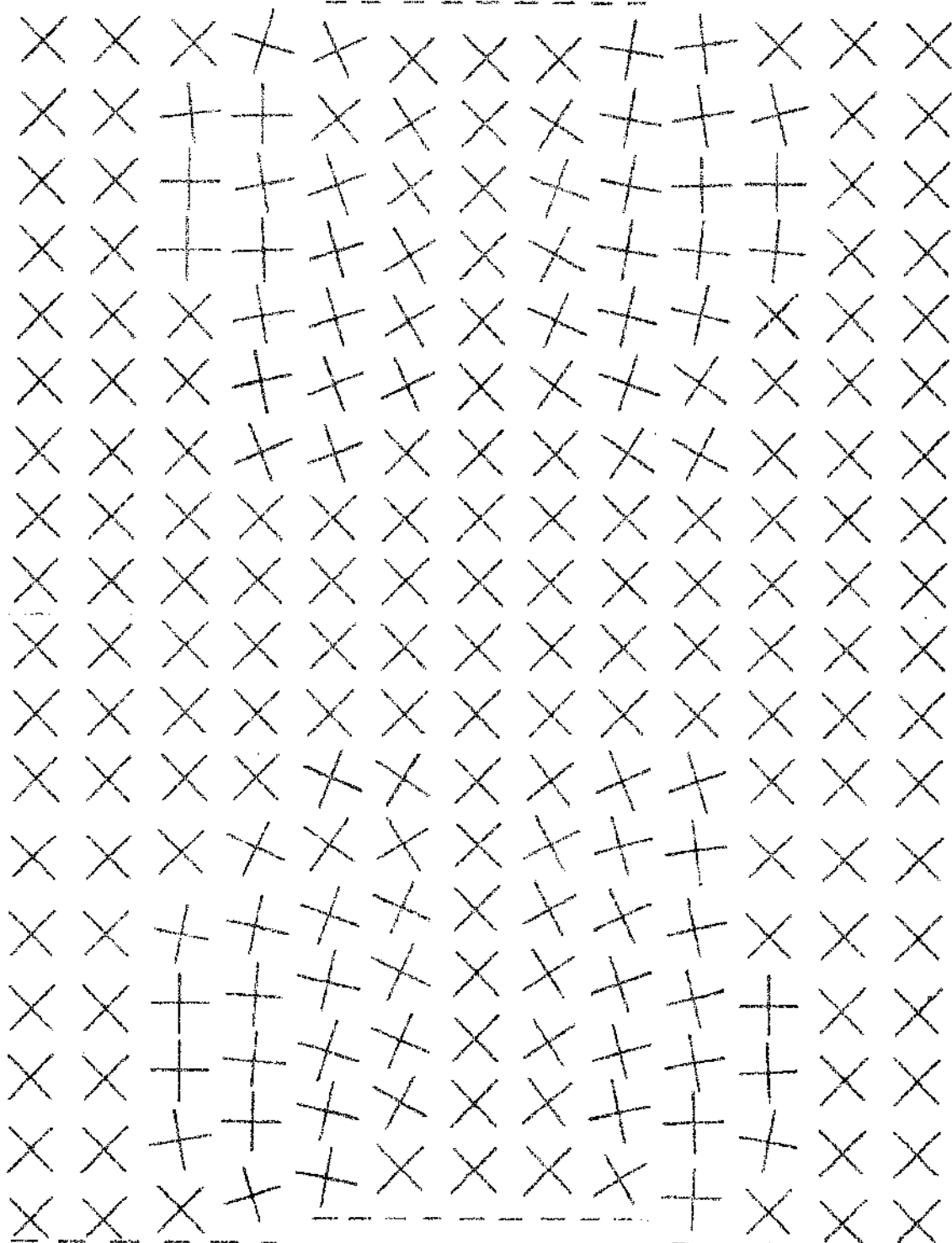
|                     |                    |        |
|---------------------|--------------------|--------|
| LIVRO DE PRIMA Nº 2 |                    |        |
| DESENHO             | DESENHO DAS LINHAS | ESCALA |
| Nº 6                | DE FLUENCIA        | 1:5    |
| RENATO YUKI         |                    | 1973   |



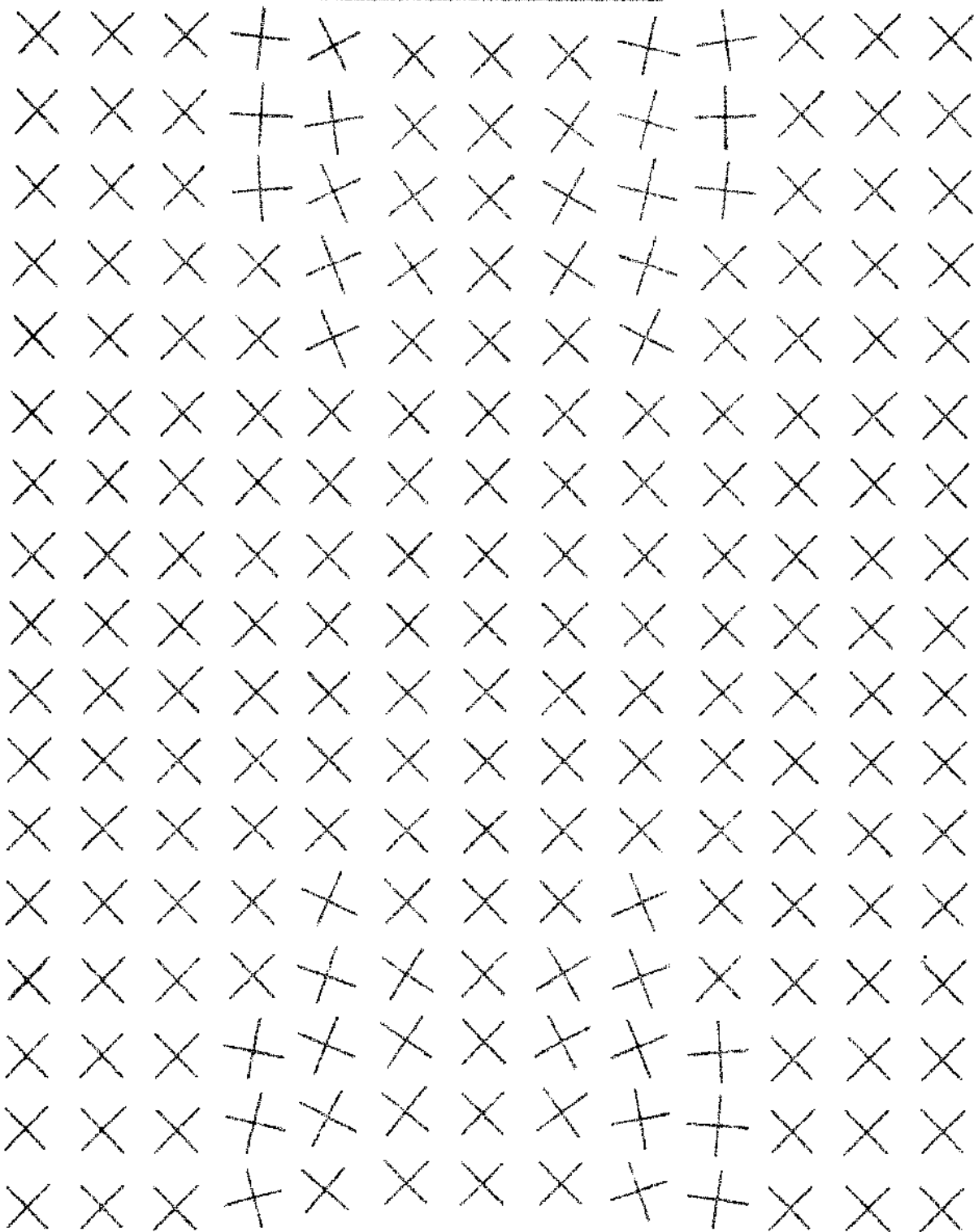
| CORPO DE PROVA Nº 3 |                                    |               |
|---------------------|------------------------------------|---------------|
| DESENHO<br>Nº 7     | DIREÇÕES DAS LINHAS<br>DE FLUÊNCIA | ESCALA<br>1:5 |
| renato yuki         |                                    | 1973          |



| CORPO DE PROVA Nº 4 |                                    |               |
|---------------------|------------------------------------|---------------|
| DESENHO<br>Nº 8     | DIREÇÕES DAS LINHAS<br>de FLUÊNCIA | ESCALA<br>1:5 |
| RENATO YUKI         |                                    | 1973          |



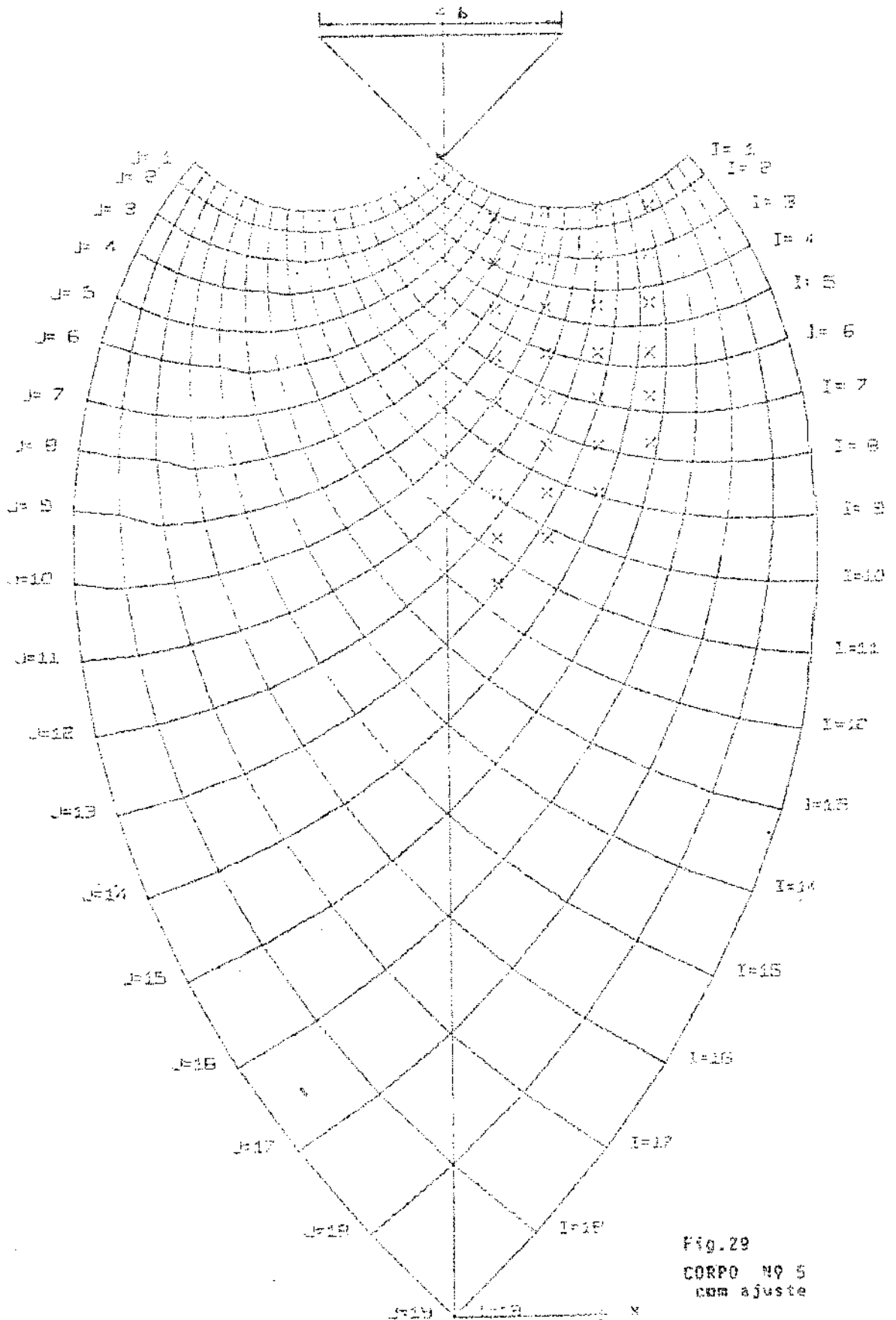
| CORPO DE PROVA Nº 5 |                                    |               |
|---------------------|------------------------------------|---------------|
| DESENHO<br>Nº 9     | DIREÇÕES DAS LINHAS<br>DE FLUÊNCIA | ESCALA<br>1:6 |
| RENATO YUKI         |                                    | 1973          |



| CORPO DE PROVA Nº 6 |                                 |            |
|---------------------|---------------------------------|------------|
| DESENHO Nº 10       | DIREÇÕES DAS LINHAS DE FLUÊNCIA | ESCALA 1:6 |
| RENATO YUKI         |                                 | 1973       |

VI.2. RESULTADOS DOS CÁLCULOS NUMÉRICOS

# LINHAS DE FLUENCIA



ESTUDO DAS DIREÇÕES DAS LINHAS DE FLUÊNCIA  
OPERACAO DE FORJAMENTO COM MATRIZ ABERTA  
LARGURA DA FERRAMENTA = 7.500 (CM)

| PONTO | XMED  | YMED   | ANG-1 |
|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 1.200 | 33.600 | 26.0  |
| 2     | 2.500 | 33.650 | 10.3  |
| 3     | 3.700 | 33.900 | -5.1  |
| 4     | 5.000 | 34.150 | -12.5 |
| 5     | 1.200 | 32.350 | 32.8  |
| 6     | 2.500 | 32.450 | 16.9  |
| 7     | 3.700 | 32.650 | 5.6   |
| 8     | 5.000 | 32.900 | -10.1 |
| 9     | 1.200 | 31.150 | 30.4  |
| 10    | 2.500 | 31.350 | 14.8  |
| 11    | 3.700 | 31.500 | 13.8  |
| 12    | 5.000 | 31.600 | -4.6  |
| 13    | 1.200 | 30.050 | 29.6  |
| 14    | 2.500 | 30.100 | 17.9  |
| 15    | 3.700 | 30.200 | 10.6  |
| 16    | 5.000 | 30.300 | 9.1   |
| 17    | 1.200 | 28.800 | 28.8  |
| 18    | 2.500 | 28.900 | 17.2  |
| 19    | 3.700 | 29.000 | 14.7  |
| 20    | 5.000 | 29.150 | 8.6   |
| 21    | 1.200 | 27.600 | 28.9  |
| 22    | 2.500 | 27.700 | 17.1  |
| 23    | 3.700 | 27.800 | 14.6  |



|        |    |       |        |      |
|--------|----|-------|--------|------|
|        | 24 | 1.200 | 26.550 | 35.0 |
| // XEQ | 25 | 2.500 | 26.550 | 22.6 |

ESTUDO DAS DIRECÇÕES DAS LINHAS DE FLUENCIA

OPERACAO DE FORJAMENTO COM MATRIZ ABERTA

LARGURA DA FERRAMENTA = 6.200 (CM)

| PONTO | XMED  | YMED   | ANG-1 |
|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 1.050 | 28.000 | 29.3  |
| 2     | 2.100 | 28.000 | 13.2  |
| 3     | 3.120 | 28.250 | -5.1  |
| 4     | 4.200 | 28.400 | -11.6 |
| 5     | 5.200 | 28.500 | -28.3 |
| 6     | 1.050 | 27.000 | 36.2  |
| 7     | 2.100 | 27.020 | 19.9  |
| 8     | 3.120 | 27.250 | 2.7   |
| 9     | 4.200 | 27.390 | -9.6  |
| 10    | 5.200 | 27.480 | -20.3 |
| 11    | 1.050 | 26.100 | 33.8  |
| 12    | 2.100 | 26.150 | 17.5  |
| 13    | 3.120 | 26.300 | 19.2  |
| 14    | 4.200 | 26.400 | -4.9  |
| 15    | 5.200 | 26.500 | -15.5 |
| 16    | 1.050 | 25.030 | 31.3  |
| 17    | 2.100 | 25.150 | 20.0  |
| 18    | 3.120 | 25.220 | 13.8  |
| 19    | 4.200 | 25.300 | 17.6  |
| 20    | 5.200 | 25.420 | -10.8 |
| 21    | 1.050 | 24.100 | 30.9  |
| 22    | 2.100 | 24.200 | 19.2  |
| 23    | 3.120 | 24.220 | 16.8  |

|    |       |        |      |
|----|-------|--------|------|
| 24 | 4.200 | 24.300 | 13.5 |
| 25 | 5.200 | 24.390 | -4.2 |
| 26 | 1.050 | 23.150 | 31.1 |
| 27 | 2.100 | 23.150 | 16.6 |
| 28 | 3.120 | 23.250 | 16.7 |
| 29 | 4.200 | 23.300 | 14.6 |
| 30 | 5.200 | 23.390 | 14.1 |
| 31 | 1.050 | 22.200 | 36.6 |
| 32 | 2.100 | 22.280 | 24.5 |
| 33 | 3.120 | 22.300 | 22.0 |
| 34 | 4.200 | 22.300 | 7.5  |
| 35 | 5.200 | 22.310 | 3.0  |
| 36 | 1.050 | 21.250 | 27.3 |
| 37 | 2.100 | 21.250 | 25.0 |
| 38 | 3.120 | 21.250 | 22.5 |
| 39 | 4.200 | 21.250 | 8.0  |
| 40 | 5.200 | 21.250 | 3.8  |
| 41 | 1.050 | 20.200 | 28.3 |
| 42 | 2.100 | 20.200 | 30.9 |
| 43 | 3.120 | 20.200 | 17.5 |
| 44 | 4.200 | 20.200 | 14.0 |
| 45 | 5.200 | 20.200 | 10.1 |

// XEQ

ESTUDO DAS DIRECCES DAS LINHAS DE FLUENCIA

OPERACAO DE FORJAMENTO COM MATRIZ ABERTA

LARGURA DA FERRAMENTA = 6.200 (CM)

| PONTO | XMED  | YMED   | ANG-1 |
|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 1.050 | 27.500 | 30.4  |
| 2     | 2.150 | 27.500 | 13.7  |
| 3     | 3.150 | 27.620 | 1.6   |
| 4     | 4.200 | 27.720 | -8.9  |
| 5     | 1.050 | 26.460 | 26.0  |
| 6     | 2.150 | 26.500 | 14.1  |
| 7     | 3.150 | 26.700 | 10.2  |
| 8     | 4.200 | 26.720 | -5.1  |
| 9     | 1.050 | 25.460 | 23.8  |
| 10    | 2.150 | 25.520 | 23.3  |
| 11    | 3.150 | 25.600 | 4.3   |
| 12    | 4.200 | 25.610 | 4.2   |
| 13    | 1.050 | 24.400 | 33.1  |
| 14    | 2.150 | 24.500 | 21.5  |
| 15    | 3.150 | 24.560 | 7.8   |
| 16    | 4.200 | 24.600 | 5.3   |
| 17    | 1.050 | 23.380 | 37.3  |
| 18    | 2.150 | 23.450 | 25.5  |
| 19    | 3.150 | 23.500 | 18.8  |
| 20    | 4.200 | 23.510 | 3.0   |
| 21    | 1.050 | 22.300 | 37.1  |
| 22    | 2.150 | 22.310 | 24.7  |
| 23    | 3.150 | 22.390 | 22.6  |

|    |       |        |      |
|----|-------|--------|------|
| 24 | 4.200 | 22.410 | 8.0  |
| 25 | 1.050 | 21.400 | 27.9 |
| 26 | 2.150 | 21.400 | 25.9 |
| 27 | 3.150 | 21.400 | 12.4 |
| 28 | 4.200 | 21.400 | 8.8  |
| 29 | 1.050 | 20.300 | 33.6 |
| 30 | 2.150 | 20.300 | 31.5 |
| 31 | 3.150 | 20.300 | 17.9 |
| 32 | 4.200 | 20.300 | 14.5 |
| 33 | 1.050 | 19.210 | 34.8 |
| 34 | 2.150 | 19.210 | 44.1 |
| 35 | 3.150 | 19.210 | 55.5 |
| 36 | 4.200 | 19.210 | 58.5 |

// XEQ

ESTUDO DAS DIRECÇÕES DAS LINHAS DE FLUENCIA

OPERAÇÃO DE FORJAMENTO COM MATRIZ ABERTA

LARGURA DA FERRAMENTA = 5.500 (CM)

| PONTO | XMED  | YMED   | ANG-1 |
|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 1.120 | 24.670 | 27.5  |
| 2     | 2.250 | 24.800 | 8.6   |
| 3     | 3.400 | 24.900 | -8.4  |
| 4     | 4.550 | 24.900 | -25.9 |
| 5     | 1.120 | 23.670 | 28.7  |
| 6     | 2.250 | 23.730 | 12.4  |
| 7     | 3.400 | 23.800 | 2.1   |
| 8     | 4.550 | 23.850 | -14.2 |
| 9     | 1.120 | 22.680 | 25.0  |
| 10    | 2.250 | 22.700 | 8.0   |
| 11    | 3.400 | 22.720 | 4.1   |
| 12    | 4.550 | 22.780 | -10.1 |
| 13    | 1.120 | 21.650 | 22.8  |
| 14    | 2.250 | 21.700 | 21.9  |
| 15    | 3.400 | 21.710 | 2.5   |
| 16    | 4.550 | 21.710 | -4.4  |
| 17    | 1.120 | 20.650 | 21.8  |
| 18    | 2.250 | 20.700 | 20.5  |
| 19    | 3.400 | 20.730 | 7.0   |
| 20    | 4.550 | 20.750 | 16.9  |
| 21    | 1.120 | 19.680 | 26.6  |
| 22    | 2.250 | 19.700 | 20.0  |
| 23    | 3.400 | 19.710 | 6.6   |

|    |       |        |      |
|----|-------|--------|------|
| 24 | 4.550 | 19.720 | 2.4  |
| 25 | 1.120 | 18.620 | 26.6 |
| 26 | 2.250 | 18.650 | 24.7 |
| 27 | 3.400 | 18.650 | 11.6 |
| 28 | 1.120 | 17.650 | 27.4 |
| 29 | 2.250 | 17.650 | 25.4 |
| 30 | 1.120 | 16.650 | 33.6 |

// XEQ

ESTUDO DAS DIRECCOES DAS LINHAS DE FLUENCIA  
OPERACAO DE FORJAMENTO COM MATRIZ ABERTA  
LARGURA DA FERRAMENTA = 5.500 (CM)

| PONTO | XMED  | YMED   | ANG-1 |
|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 1.250 | 24.620 | 22.7  |
| 2     | 2.500 | 24.750 | 5.9   |
| 3     | 3.750 | 24.900 | -18.5 |
| 4     | 1.250 | 23.500 | 27.3  |
| 5     | 2.500 | 23.600 | 6.6   |
| 6     | 3.750 | 23.700 | -5.0  |
| 7     | 1.750 | 22.420 | 23.4  |
| 8     | 2.500 | 22.500 | 6.9   |
| 9     | 3.750 | 22.530 | 8.9   |
| 10    | 1.250 | 21.300 | 31.3  |
| 11    | 2.500 | 21.350 | 14.7  |
| 12    | 3.750 | 21.350 | 8.0   |
| 13    | 1.250 | 20.120 | 29.4  |
| 14    | 2.500 | 20.180 | 17.8  |
| 15    | 3.750 | 20.180 | 9.7   |
| 16    | 1.250 | 18.980 | 28.6  |
| 17    | 2.500 | 19.000 | 16.7  |
| 18    | 1.250 | 17.870 | 28.8  |

// \*END OF JOB



## VII. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos deve revelar a validade ou não das hipóteses simplificativas feitas para a solução teórica, verificar a aproximação entre a solução teórica e a experimental e ainda pode-se determinar qualitativamente as influências de outros parâmetros no processo de deformação em estudo.

Esta análise é feita pela comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os obtidos analiticamente. Para tal determinamos os desvios apresentados pelas direções das linhas de fluência para cada ponto :  $\delta = \theta_{\text{teor}} - \theta_{\text{exp.}}$

Entretanto, nota-se com um deslocamento e do campo padrão das linhas de fluência ao longo do eixo vertical de simetria do corpo de prova como mostra a fig. 30, aparece uma posição onde os desvios se minimizam.

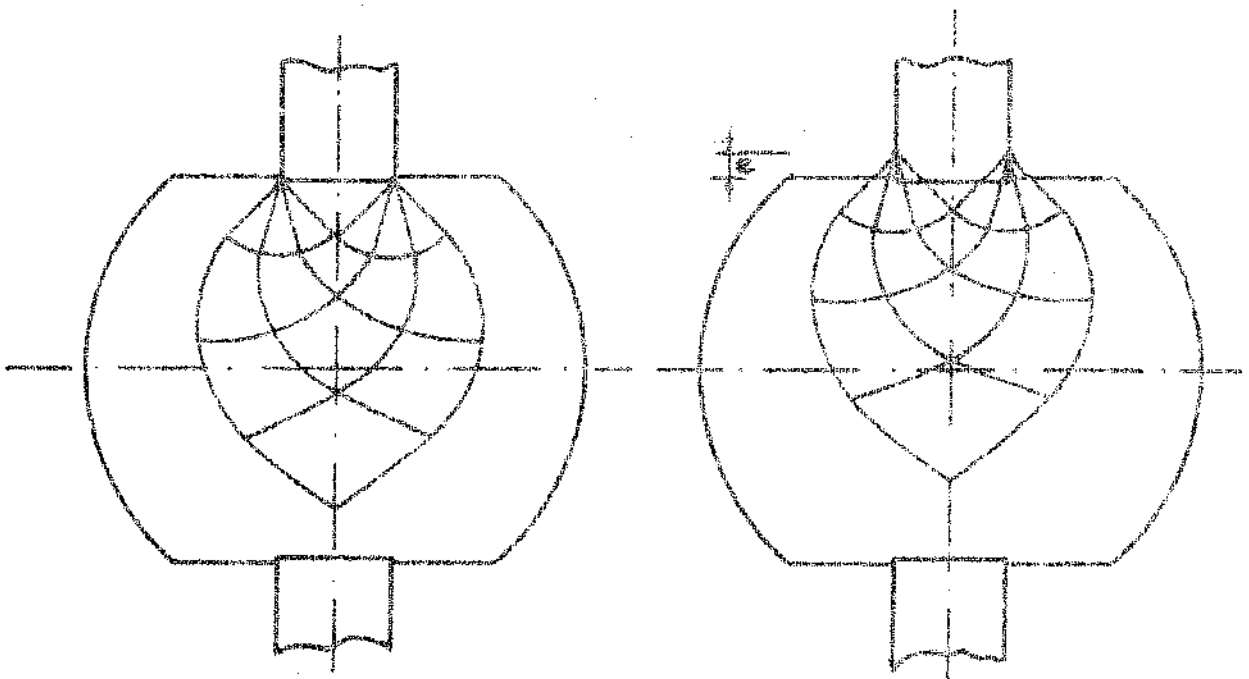


Fig 30

### VII.1. DESVIOS APRESENTADOS

Com o ajuste do campo padrão em relação ao eixo vertical do corpo de prova, que já tinha sido verificado por A. Nadai [12], obtemos os desvios mínimos que foram colocadas nas tabelas 03 a 07 respectivamente dos corpos de prova nº 2, 3, 4, 5, 6.

### VII.2. DESVIO COMPARATIVO

Com a análise simples dos desvios não se pode concluir da validade ou não da solução teórica do método em estudo, pois neles estão incorporados os erros inerentes aos métodos utilizados, entre os quais se tem:

- a) erros pela falta de homogeneidade e isotropia do material
- b) erros cometidos na confecção dos corpos de prova
- c) erros de centragem dos corpos e dos punções para os ensaios de compressão
- d) erros cometidos durante as medições
- e) erros devido a linearização das linhas de fluência
- f) erros devidos as aproximações dos cálculos

É necessário então estabelecer uma grandeza que represente os erros do método utilizado, de forma que a análise dos desvios determinados possam ser realizados em comparação com esta grandeza.

Em primeira análise, verifica-se nos ensaios efetuados a falta de semelhança nos valores obtidos para os pontos situados em posições simétricas em relação ao eixo vertical do corpo de prova, apesar de os ensaios serem simétricos. Em vista disto pode-se concluir que o desvio devido a falta de simetria nos valores, num mesmo corpo de prova deve in-

cluír a maioria dos erros já citados.

Tomamos portanto os desvios máximos de simetria como grandeza que representa os erros dos processos utilizados .

Na tabela 02 abaixo, estão registrados os valores dos desvios máximos de simetria para cada corpo de prova ensaiado.

| CORPO<br>Nº | DESVIO MÁX.<br>DE SIMETRIA |
|-------------|----------------------------|
| 2           | 11,5°                      |
| 3           | 11,2°                      |
| 4           | 11,4°                      |
| 5           | 9,5°                       |
| 6           | 8,9°                       |

TABELA 02

Portanto tomam-se os valores da tabela como a grandeza de comparação, que representa os erros nas comparações das linhas de fluência obtidas analiticamente e experimentalmente.

DESVIOS APRESENTADOS

CORPO DE PROVA Nº 2 com ajuste

MATERIAL : Aço AMT 2020

MEQUISA 6M GRAUS

Observações :

$$J = \Theta_{calc.} - \Theta_{obs.}$$

$$J_{med.} = 19,5^{\circ} (máx.)$$

|    | 1 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 | 7     | 8     | 9     | 10    | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----|---|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|----|----|----|----|----|
| 1  |   |       | -7,1  | -24,7 | -19,0 |   | -19,0 | -24,7 | -15,1 |       |    |    |    |    |    |
| 2  |   | -11,1 | -4,4  | -12,1 | -12,2 |   | -12,2 | -14,1 | -8,4  | -4,1  |    |    |    |    |    |
| 3  |   | -7,6  | -3,2  | -8,1  | -9,5  |   | -10,6 | -10,2 | -2,1  | -6,6  |    |    |    |    |    |
| 4  |   | -11,1 | -12,4 | -7,1  | -10,4 |   | -7,4  | -4,1  | -14,4 | -2,4  |    |    |    |    |    |
| 5  |   | -17,4 | -14,3 | -16,8 | -9,2  |   | -10,1 | -14,3 | -15,1 | -13,4 |    |    |    |    |    |
| 6  |   |       | -22,4 | -22,9 | -10,1 |   | -14,1 | -23,2 | -24,4 |       |    |    |    |    |    |
| 7  |   |       |       | -20,4 | -9,0  |   | -10,0 | -20,4 |       |       |    |    |    |    |    |
| 8  |   |       |       | -21,4 | -10,0 |   | -8,0  | -20,4 |       |       |    |    |    |    |    |
| 9  |   |       | -18,4 | -19,9 | -7,1  |   | -12,1 | -21,9 | -19,4 |       |    |    |    |    |    |
| 10 |   | -16,4 | -18,3 | -17,8 | -6,2  |   | -9,2  | -17,8 | -12,3 | -14,4 |    |    |    |    |    |
| 11 |   | -6,9  | -11,4 | -3,1  | -9,4  |   | -9,4  | -4,1  | -3,4  | -1,9  |    |    |    |    |    |
| 12 |   | -3,6  | -3,2  | -11,2 | -7,6  |   | -11,5 | -9,1  | -1,2  | -3,6  |    |    |    |    |    |
| 13 |   | -10,1 | -3,4  | -11,1 | -12,2 |   | -12,2 | -14,1 | -4,4  | -1,4  |    |    |    |    |    |
| 14 |   |       | -19,1 | -24,7 | -19,0 |   | -19,0 | -24,7 | -4,1  |       |    |    |    |    |    |
| 15 |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    |    |    |
| 16 |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    |    |    |
| 17 |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    |    |    |
| 18 |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    |    |    |

DESVIOS APRESENTADOS

CORPO DE PROVA Nº 3 s/ajuste

MATERIAL : Aço ARMY 1020

MEDIDAS em graus

Observações :

$$\delta = \theta_{calc} - \theta_{exp.}$$

$$\delta_{lim} = 11,8^{\circ} (máx)$$

|    | 1   | 2   | 3   | 4     | 5     | 6     | 7     | 8   | 9     | 10    | 11    | 12    | 13   | 14  | 15  |
|----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| 1  | --- | --- | --- | -9,0  | -10,3 | -31,5 | -17,9 | --- | -17,9 | -24,3 | -10,2 | -7,1  | ---  | --- | --- |
| 2  | --- | --- | --- | -6,3  | -14,4 | -6,7  | -10,8 | --- | -10,8 | -7,7  | -13,3 | -9,9  | ---  | --- | --- |
| 3  | --- | --- | --- | -3,0  | +9,0  | -8,0  | -8,4  | --- | +2,5  | -8,1  | +6,4  | -4,8  | ---  | --- | --- |
| 4  | --- | --- | --- | +15,8 | -0,9  | +0,1  | -9,1  | --- | -4,4  | -3,3  | +2,0  | +14,4 | +5,7 | --- | --- |
| 5  | --- | --- | --- | +7,9  | +1,3  | -9,0  | -8,4  | --- | -1,0  | -2,5  | +3,4  | +5,3  | -5,6 | --- | --- |
| 6  | --- | --- | --- | +4,5  | -2,6  | -13,1 | -10,3 | --- | -8,8  | -10,6 | -6,6  | +1,4  | ---  | --- | --- |
| 7  | --- | --- | --- | -26,2 | -4,4  | -7,1  | -4,6  | --- | -7,1  | -4,7  | -2,4  | -26,4 | ---  | --- | --- |
| 8  | --- | --- | --- | -37,6 | -13,4 | -13,1 | -16,1 | --- | -18,5 | -17,3 | -13,4 | -37,6 | ---  | --- | --- |
| 9  | --- | --- | --- | -31,7 | -28,1 | -22,2 | -24,5 | --- | -17,4 | -19,4 | -27,2 | -31,7 | ---  | --- | --- |
| 10 | --- | --- | --- | -37,6 | -23,4 | -13,9 | -17,1 | --- | -18,3 | -17,4 | -23,4 | -37,6 | ---  | --- | --- |
| 11 | --- | --- | --- | -23,0 | -6,3  | -8,8  | -3,0  | --- | -9,4  | -3,7  | -2,7  | -34,2 | ---  | --- | --- |
| 12 | --- | --- | --- | +5,2  | +2,0  | -7,7  | -8,2  | --- | -10,6 | -12,6 | -3,0  | +1,5  | ---  | --- | --- |
| 13 | --- | --- | --- | +0,6  | -0,3  | -3,6  | -3,3  | --- | -7,3  | -8,4  | -1,2  | -3,4  | ---  | --- | --- |
| 14 | --- | --- | --- | -2,3  | +4,8  | +1,1  | +4,3  | --- | -4,6  | -7,1  | -2,8  | +6,5  | ---  | --- | --- |
| 15 | --- | --- | --- | -5,7  | +4,1  | -6,1  | +3,1  | --- | -8,2  | -11,2 | -4,2  | -7,3  | ---  | --- | --- |
| 16 | --- | --- | --- | -6,3  | -16,9 | -12,8 | -10,8 | --- | -10,8 | -11,7 | -16,7 | -4,3  | ---  | --- | --- |
| 17 | --- | --- | --- | -5,6  | -14,5 | -30,0 | -17,9 | --- | -17,9 | -26,1 | -11,9 | -8,1  | ---  | --- | --- |
| 18 | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---   | ---  | --- | --- |

TABELA Nº 04

| DESVIOS APRESENTADOS         |   |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    | Observações :                                           |  |
|------------------------------|---|---|---|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|----|----|---------------------------------------------------------|--|
| CORPO DE PROVA Nº 4 e/ajuste |   |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    | $\delta = \Theta_{\text{calc.}} - \Theta_{\text{obs.}}$ |  |
| MATERIAL : Aço AHT 1060      |   |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    | $\delta_{\text{máx}} = 11,4' (\text{máx})$              |  |
| MEDIDAS em graus             |   |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |                                                         |  |
|                              | 1 | 2 | 3 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8 | 9     | 10    | 11    | 12    | 13 | 14 | 15                                                      |  |
| 1                            | — | — | — | -3,9  | -16,1 | -27,7 | -16,9 | — | -16,8 | -23,4 | -13,3 | -2,0  | —  | —  | —                                                       |  |
| 2                            | — | — | — | -3,4  | -8,2  | -13,2 | -11,8 | — | -10,9 | -10,4 | -7,8  | -2,2  | —  | —  | —                                                       |  |
| 3                            | — | — | — | -8,7  | -6,7  | -4,0  | -7,9  | — | -4,6  | +4,1  | -3,2  | -8,0  | —  | —  | —                                                       |  |
| 4                            | — | — | — | -13,2 | -3,0  | +1,5  | -1,8  | — | +2,6  | +0,8  | -2,5  | -6,5  | —  | —  | —                                                       |  |
| 5                            | — | — | — | -10,3 | -3,0  | -6,0  | +1,1  | — | +4,4  | -1,3  | -1,7  | -9,0  | —  | —  | —                                                       |  |
| 6                            | — | — | — | -19,9 | -4,0  | -7,9  | -2,4  | — | +2,1  | -3,7  | -6,4  | -13,4 | —  | —  | —                                                       |  |
| 7                            | — | — | — | -31,0 | -17,3 | -9,4  | -13,2 | — | -10,0 | -3,9  | -16,0 | -32,0 | —  | —  | —                                                       |  |
| 8                            | — | — | — | —     | -27,7 | -9,9  | -11,3 | — | -10,6 | -9,2  | -18,2 | —     | —  | —  | —                                                       |  |
| 9                            | — | — | — | —     | —     | —     | -12,3 | — | -12,3 | —     | —     | —     | —  | —  | —                                                       |  |
| 10                           | — | — | — | —     | -11,4 | -7,3  | -6,5  | — | -10,0 | -3,3  | -14,8 | —     | —  | —  | —                                                       |  |
| 11                           | — | — | — | -11,6 | -7,1  | -4,1  | -8,1  | — | -9,2  | -8,8  | -13,4 | -27,5 | —  | —  | —                                                       |  |
| 12                           | — | — | — | -6,2  | +6,7  | -0,9  | +2,2  | — | +0,8  | -1,8  | +2,4  | -11,1 | —  | —  | —                                                       |  |
| 13                           | — | — | — | -0,7  | +6,3  | +4,8  | +1,7  | — | +0,3  | +3,9  | +4,2  | -0,1  | —  | —  | —                                                       |  |
| 14                           | — | — | — | -1,3  | -2,6  | +2,3  | +0,3  | — | -2,4  | +1,2  | -4,4  | -3,6  | —  | —  | —                                                       |  |
| 15                           | — | — | — | +1,0  | -4,3  | -2,9  | -3,6  | — | -8,1  | -6,3  | -7,6  | -0,2  | —  | —  | —                                                       |  |
| 16                           | — | — | — | +1,9  | -8,0  | -10,8 | -20,6 | — | -20,4 | -13,1 | -10,2 | -1,4  | —  | —  | —                                                       |  |
| 17                           | — | — | — | +7,9  | -13,9 | -33,7 | -16,6 | — | -16,8 | -33,7 | -12,8 | +9,1  | —  | —  | —                                                       |  |
| 18                           | — | — | — | —     | —     | —     | —     | — | —     | —     | —     | —     | —  | —  | —                                                       |  |

TABELA Nº 05

| DESVIOS APRESENTADOS         |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    | Observações :                                         |  |
|------------------------------|---|---|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|----|----|----|-------------------------------------------------------|--|
| CORPO DE PROVA Nº 9 c/ajuste |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    | $\delta = \Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{med.}}$ |  |
| MATERIAL : Aço ABNT 1040     |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    | $\delta_{\text{adm.}} = 9,5'(\text{máx.})$            |  |
| MEDIDAS em graus             |   |   |       |       |       |       |   |       |       |       |       |    |    |    |                                                       |  |
|                              | 1 | 2 | 3     | 4     | 5     | 6     | 7 | 8     | 9     | 10    | 11    | 12 | 13 | 14 | 15                                                    |  |
| 1                            | — | — | —     | +2,9  | -13,9 | -18,0 | — | -18,0 | -12,3 | +1,9  | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 2                            | — | — | -16,0 | +0,3  | -14,0 | -4,7  | — | -5,7  | -6,3  | +3,1  | -9,5  | —  | —  |    |                                                       |  |
| 3                            | — | — | -10,4 | -6,8  | -7,7  | -5,8  | — | -1,7  | -3,7  | -5,6  | -10,4 | —  | —  |    |                                                       |  |
| 4                            | — | — | -4,1  | -1,8  | -2,6  | -8,3  | — | -4,0  | -3,8  | -4,1  | -6,5  | —  | —  |    |                                                       |  |
| 5                            | — | — | —     | -3,5  | +2,7  | -9,0  | — | -3,6  | +2,1  | -6,9  | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 6                            | — | — | —     | -14,3 | -3,2  | -9,2  | — | -10,2 | -2,2  | -18,1 | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 7                            | — | — | —     | -13,9 | -3,9  | -18,5 | — | -18,9 | -9,8  | -17,0 | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 8                            | — | — | —     | —     | -20,1 | -18,0 | — | -18,0 | -20,1 | —     | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 9                            | — | — | —     | —     | —     | -11,1 | — | -11,1 | —     | —     | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 10                           | — | — | —     | —     | —     | -11,1 | — | -11,1 | —     | —     | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 11                           | — | — | —     | —     | -20,1 | -18,0 | — | -18,0 | -20,1 | —     | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 12                           | — | — | —     | —     | -5,1  | -13,3 | — | -14,4 | -6,6  | -9,8  | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 13                           | — | — | —     | -16,9 | -7,2  | -9,5  | — | -10,9 | -4,7  | -12,4 | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 14                           | — | — | -15,7 | -5,0  | -1,0  | -3,4  | — | -6,4  | -1,2  | -7,3  | —     | —  | —  |    |                                                       |  |
| 15                           | — | — | -4,1  | -3,6  | +6,7  | -3,6  | — | -8,9  | +2,6  | -8,4  | -4,1  | —  | —  |    |                                                       |  |
| 16                           | — | — | -10,2 | -8,3  | -8,2  | -2,9  | — | -6,4  | -8,3  | -10,7 | -12,2 | —  | —  |    |                                                       |  |
| 17                           | — | — | -4,3  | -3,9  | -2,2  | -4,3  | — | -7,0  | -5,8  | -5,6  | -3,6  | —  | —  |    |                                                       |  |
| 18                           | — | — | —     | +2,2  | -11,3 | -19,0 | — | -19,0 | -18,4 | +0,6  | —     | —  | —  |    |                                                       |  |

TABELA Nº 06

| DESVIOS APRESENTADOS           |     |     |     |       |       |       |     |       |       |       | Observações :                                          |     |     |    |    |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------|-----|-----|----|----|
| CORPO DE PROVA Nº 6 com ajuste |     |     |     |       |       |       |     |       |       |       | $\delta = \theta_{\text{calc.}} - \theta_{\text{obs}}$ |     |     |    |    |
| MATERIAL : Alumínio            |     |     |     |       |       |       |     |       |       |       | $\delta_{\text{máx}} = 8,9' (\text{máx})$              |     |     |    |    |
| MEDIDA em graus                |     |     |     |       |       |       |     |       |       |       |                                                        |     |     |    |    |
|                                | 1   | 2   | 3   | 4     | 5     | 6     | 7   | 8     | 9     | 10    | 11                                                     | 12  | 13  | 14 | 15 |
| 1                              | --- | --- | --- | -3,1  | -12,2 | -23,8 | --- | -23,8 | -10,5 | +1,1  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 2                              | --- | --- | --- | -2,0  | -8,8  | -7,4  | --- | -8,5  | -8,6  | +6,9  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 3                              | --- | --- | --- | -8,7  | -8,1  | -7,4  | --- | -6,8  | -6,6  | -9,8  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 4                              | --- | --- | --- | -32,6 | -6,8  | -5,4  | --- | -3,4  | -4,2  | -38,6 | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 5                              | --- | --- | --- | ---   | -9,3  | -10,2 | --- | -9,0  | -9,4  | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 6                              | --- | --- | --- | ---   | ---   | -16,8 | --- | -16,8 | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 7                              | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 8                              | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 9                              | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 10                             | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 11                             | --- | --- | --- | ---   | ---   | ---   | --- | ---   | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 12                             | --- | --- | --- | ---   | ---   | -16,8 | --- | -16,8 | ---   | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 13                             | --- | --- | --- | ---   | -10,0 | -9,3  | --- | -10,0 | -10,2 | ---   | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 14                             | --- | --- | --- | -38,6 | -4,7  | -2,2  | --- | -3,2  | -7,0  | -38,6 | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 15                             | --- | --- | --- | -12,1 | -9,9  | -6,8  | --- | -5,1  | -9,4  | -8,8  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 16                             | --- | --- | --- | -5,7  | -10,6 | -9,3  | --- | -8,2  | -9,3  | -7,5  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 17                             | --- | --- | --- | -2,1  | -18,5 | -23,8 | --- | -23,8 | -13,2 | -1,6  | ---                                                    | --- | --- |    |    |
| 18                             |     |     |     |       |       |       |     |       |       |       |                                                        |     |     |    |    |

TABELA Nº 07



### VIII. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e das discussões anteriores conclui-se que:

- 1- A influência do atrito entre o punção e o corpo de prova não foi analisada, entretanto sua influência pode justificar a solução de deslocamento das origens do campo das linhas de fluência como foi visto no item VII.
- 2- Com os resultados dos desvios apresentados pela solução teórica e a solução experimental, analisadas em relação ao desvio de simetria que representa os erros podemos concluir que todos os corpos de prova podem ser divididos em três regiões características, como mostra a fig. 37. A saber:
  - a) Região I onde os desvios apresentados são maiores que os desvios representativos como erros
  - b) Região II onde os desvios apresentados são menores que os desvios representativos como erros
  - c) Região III onde os desvios apresentados são maiores que os desvios representativos como erros

Portanto pode-se concluir que na região II, região central do campo das linhas de fluência, existe uma boa aproximação entre a solução teórica proposta e a solução experimental utilizada.

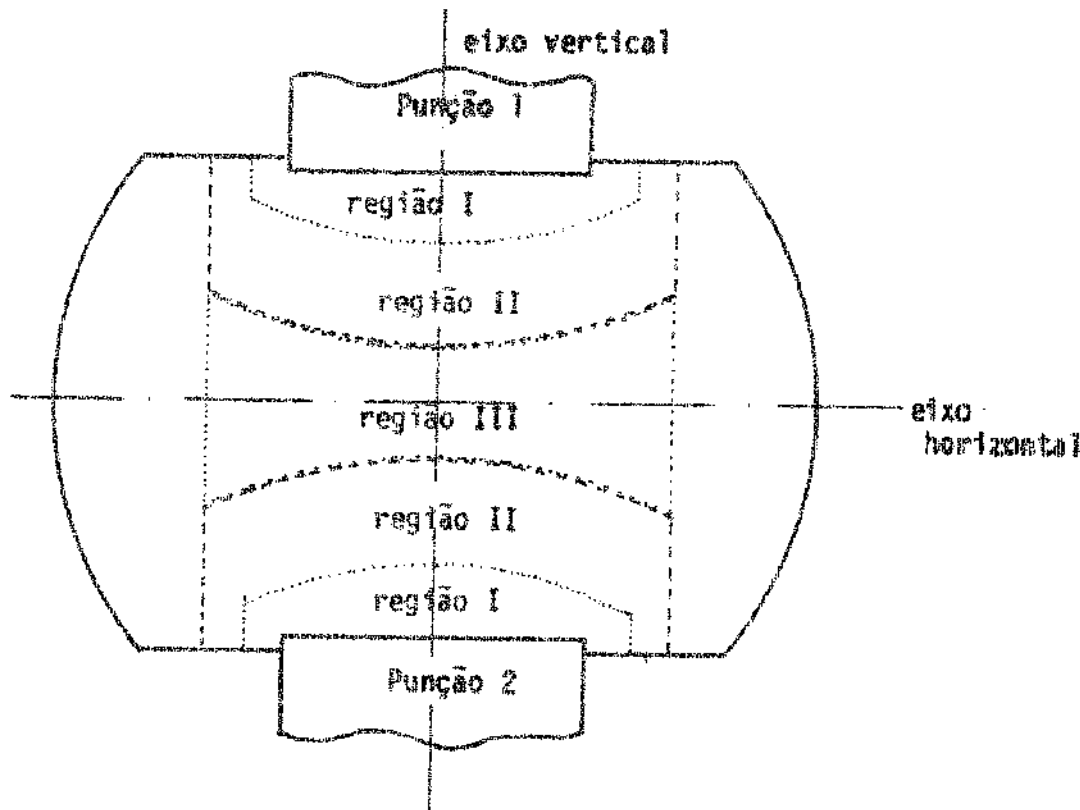


Fig.31

- 3- Nas regiões logo abaixo dos punções ,que corresponde as regiões I , verificam-se desvios apresentados maiores em consequência da influência do contato entre o punção e o corpo de prova, resultando ainda nesta região deformações relativamente grandes e falta de verificação da condição de deformação plana .
- 4- Na região central do corpo de prova, que corresponde a região III , verificam-se desvios apresentados maiores em consequência da possível intersecção dos campos das linhas de fluência originados dos punções colocados opostamente. Note-se que no corpo de prova N96 esta região é negligenciado, pois a deformação sofrida pelo corpo foi relativamente pequena.

- 5- Apesar de ter sido observado um pequeno encruamento nos corpos de prova, o parametro encruamento parece não influir na modificação do campo das linhas de fluência na região II.

# IX. SIMBOLOS UTILIZADOS

$\sigma$  - Componente Normal Genérica da Tensão ( F.L.<sup>-2</sup> )

$\epsilon$  - " " " da Deformação

$\sigma_e = Y$  - Tensão de Escoamento ao Estado Uniaxial ( F.L.<sup>-2</sup> )

E - Módulo de Elasticidade ( F.L.<sup>-2</sup> )

H - Índice de Encruamento

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - Tensões Principais ( F.L.<sup>-2</sup> )

$I_1, I_2, I_3$  - Invariantes do Tensor de Tensões

$\sigma_m = -p$  - Tensão Hidrostática ou Esférica ( F.L.<sup>-2</sup> )

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$  - Tensões Desviadoras Principais

$I'_1, I'_2, I'_3$  - Invariantes do Tensor de Tensões Desviadoras

f( ) - função matemática

$\gamma$  - ângulo

$\bar{\tau}_{\max} = K_1 = K_2$  - Tensão de cisalhamento máximo ( F.L.<sup>-2</sup> )

$\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$  - Componentes normais da Tensão em relação a um sistema de coordenadas cartesianas ( F.L.<sup>-2</sup> )

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  - Componentes tangenciais da tensão em relação a um sistema de coordenadas cartesianas - ( F.L.<sup>-2</sup> )

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  - Componentes normais da tensão desviadora em relação a um sistema de coordenadas cartesianas - ( F.L.<sup>-2</sup> )

$de_x, de_y, de_z$  - Incremento da deformação total normal no sistema de coordenadas cartesianas

$dy_{xy}, dy_{yz}, dy_{zx}$  - Incremento da deformação angular total no sistema de coordenadas cartesianas

$d\lambda$  - Módulo de Plasticidade

$de^p_x, de^p_y, de^p_z$  - Incremento da deformação normal plástica no sistema de coordenadas cartesianas

$dy^p_{xy}, dy^p_{yz}, dy^p_{zx}$  - Incremento da deformação angular plástica no sistema de coordenadas cartesianas

$\alpha$  e  $\beta$  - Designação das Linhas de Fluências correspondentes a cada família

$\theta$  - ângulo da direção das Linhas de Fluência em relação a um sistema de referência

$C_1$  e  $C_2$  - Constante ao longo de de uma linha de fluência  $\alpha$  e  $\beta$  respectivamente

$R, R', S, S'$  - Raios de curvaturas das linhas de fluência {L}

$\Delta S_\alpha, \Delta S_\beta$  - Comprimento do segmento de curva das linhas de fluência {L}

$b$  - distância entre os pontos de origem das famílias das linhas de fluência ou largura do punção {L}

$r$  - raio dos arcos bases das linhas de fluência {l}

$u, v$  - deslocamentos nas direções  $x$  e  $y$  do sistema de coordenadas cartesianas

$h_0$  - espessura inicial do corpo a ser deformado {l}

$h$  - espessura final do corpo deformado (L)

$W_0$  - largura do punção (L)

$W$  - largura do corpo de prova (L)

$\gamma$  - ângulo do eixo principal da elipse em relação a um sistema de referência

$e$  - deslocamento do campo das linhas de fluência ao longo do eixo vertical do corpo (L)

$\delta$  - desvios das direções das linhas de fluência

$\delta_{\text{sim}}^{\text{máx}}$  - desvio máximo de simetria

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hill, R. - "The Mathematical Theory of Plasticity" - Oxford at the Clarendon Press - 1950.
- [2] Thomsen, E.G. - "Comparison of Slip-Lines Solutions with Experiment" - Trans. ASME, J.Appl.Mech., 23, 1956 , pg (225-230).
- [3] Kobayashi, S. e Thomsen, E.G. - "Aproximate Solutions to a Problem of Press Forging" - Trans. ASME, Series B, 81 nº 3 - 1959 - pg (217-227).
- [4] Ford, H. - "Advanced Mechanics of Materials" - Longmans, Green and Co. Ltd. - 1963.
- [5] Taylor, G.I. e Quinney - Phil. Trans. Roy. Soc. A, 230, 1931 , pg pg 323.
- [6] Timoshenko, S.P. e Goodier, J.N. - "Theory of Elasticity" - McGraw Hill Book Co. - 1970.
- [7] Thomsen, E.G. ; Yang, C.T. e Kobayashi, S. - "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing" - MacMillan Co. - 1965.
- [8] Celere, S.W. - "Programa Computacional das Linhas de Fluência" - Dissertação de Mestrado apresentado à EESCUSP - 1973.
- [9] Thomsen, E.G. - "Visioplasticity" - C.I.R.P. Annalen, 12 , pt 3 , pg (127-133) - 1962.

- [10] Siebel, E. - "Le Façonnage des Metaux par Deformation Plastique"  
- Librairie Polytechnique Ch. Beranger - 1936.
- [11] Johnson, W. e Mellor, P.B. - "Plasticity for Mechanical Engineers"  
- D. Van Nostrand Co. Ltd. - 1966.
- [12] Nadai, A. - "Plasticity-A Mechanics of the Plastic State of  
Matter" - McGraw Hill Book Co. - 1931.
- [13] Alexander, J.M. e Brewer, R.C. - "Manufacturing Properties of  
Materials" - D. Van Nostrand Co. Ltd. - 1968.
- [14] Baraya, G.L. ; Parker, J. e Flowett, J.W. - "Mechanical and  
Photographic Processes for Producing a Grid of  
Lines" - Int. J. Mech. Sci. 5 - 1963.
- [15] Kodak Catalog - P - 79 - "An Introduction to Photofabrication  
Using Kodak Photosensitive Resists" - 1970.
- [16] Rehder, O.A. - "Conformação Plástica" - Vol. I, II e III, Publi-  
cação da EESCUSP- 1970.
- [17] Silva Lene, R.A. - "Curso de Estatística-Elementos" - Ao Livro  
Técnico S.A. - 1969.
- [18] Dieter Jr, G.E. - "Mechanical Metallurgy" - McGraw Hill Book Co.  
- 1961.
- [19] De La Penha, G. - "Método de Solução de Problemas no Estado Plano  
de Deformações Plásticas" - COPPE - UFRJ - NQ5.69 -  
1969.



- [20] Johnson, W. ; Sowerby, R. e Haddow , J.B. - "Plane-Strain  
Slip-Line Fields : Theory and Bibliography" -  
Edward Arnold Publishers Ltd. - 1970.

## XI. APPENDICES

## APÊNDICE 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ESTRUTURA METALOGRAFICA DOS MATERIAIS

A verificação da composição química e da estrutura metalográfica dos materiais dos corpos de prova foram realizadas por :

FEMAQ-Fundição Engenharia Máquinas Ltda (Piracicaba - SP) e

Centro de Tecnologia da UNICAMP.

a) Corpo de prova Nº 2 e 3

Composição química : C = 0,22%

Mn = 0,40%

P = 0,04%

S = 0,05%

Estrutura metalográfica: Rede contínua de ferrita envolvem do grãos de perlita, como mostra a figura 32.

Dureza média antes da deformação: 204 Vickers.

Granulometria: segundo a Norma ASTM entre o Nº 5 e Nº 6.



(a) antes da deformação



(b) após a deformação

Fig.32 - Estrutura metalográfica.

Aumento : 200 vezes.

b) Corpo de prova Nº 4 e 5

Composição química: C = 0,57%

Mn = 0,80%

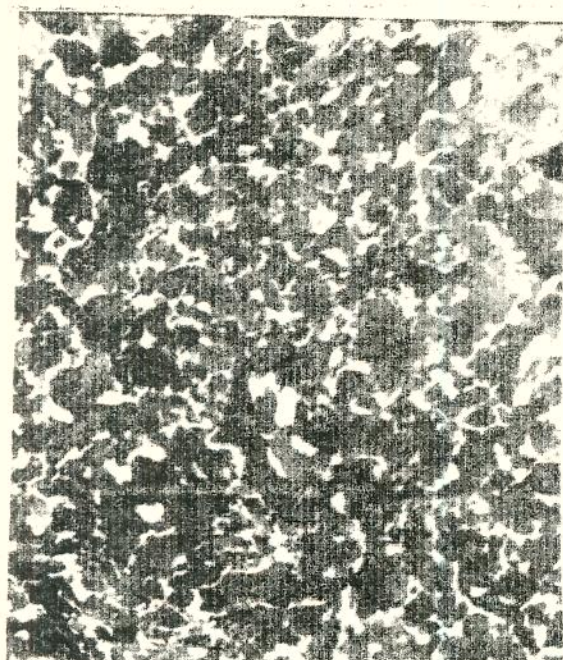
P = 0,04%

S = 0,05%

Estrutura metalografica: Rede contínua de ferrita envolvendo grãos de perlita, como mostra a fig.(33).

Dureza média antes da deformação: 207 Vickers

Granulometria : Segundo a Norma ASTM entre os Nº 5 e Nº 6.



(a) antes da deformação



(b) após a deformação

Fig.33 - Estrutura metalográfica.

Aumento : 200 vezes.

c) Corpo de prova Nº 6

Liga 57M de Siz. Brasileira de Alumínio - ASTM 5052

Composição química aproximada : Si + Fe = 0,50%

Mg = 2,20%

Cr = 0,20%

|    |   |                              |
|----|---|------------------------------|
| Mn | } | traços com menos<br>de 0,10% |
| Cu |   |                              |
| Zn |   |                              |

Dureza média antes da deformação : 72,5 Brinell

APÊNDICE 2 - CARACTERÍSTICA DOS PUNÇÕES

Os punções utilizados foram de aço rápido, de especificação VHK-10 da VILLARES. Apresentando uma dureza média de 64 a 66 Rc.