

FD-1230

São Paulo , 1991



Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia.

NA EXTRUSÃO A FRIO DE UM AÇO CARBONO

INFLUENCIA DA CAMADA DE FOSFATO

MARCUS ZUCCHINI

São Paulo , 1991

Orientador : Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica.

NA EXTRUSÃO A FRIO DE UM AÇO CARBONO

INFLUÊNCIA DA CAMADA DE FOSFATO

ENGENHARIA MECÂNICA, ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, 1991

M A R C U S Z U C C H I N I

A minha esposa LOLITA
Aos meus filhos KARINA
e BRUNO

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. ETORE BRESCIANI FILHO, pela valiosa orientação e incentivo prestados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, pelo apoio à realização deste trabalho. As professoras MARIA ELENA DOS SANTOS TAQUEDA, do departamento de engenharia química da U.S.P. e LIDIA MARIA MARGAVA, do departamento de engenharia química da UNICAMP, pela valiosa colaboração dispensada para realização deste trabalho.

A empresa IRMOS PARASKO S/A pela elaboração das ferramentas e corpos de prova.

Ao engenheiro EGIDIO PARASKO pelo apoio constante à realização deste trabalho.

Aos funcionários e Diretores das empresas NAKATA S/A ; SERVUS TECNOLOGIA E INFORMATICA S/A e CEPSTRUM ENGENHARIA EXPERIMENTAL LTDA pela cessão dos laboratórios metalográfico e físico para execução dos ensaios.

A Sra. EUGÊNIA GARDIN e TANIA CRISTINA MARQUES, pelos trabalhos de digitação e datilografia.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a realização deste trabalho.

The determination of friction coefficient existing between two bodies in contact under relative motion, can be obtained in indirect way by verification of the resistance to this motion. This work determines, by indirect way, the friction factor in the process of cold extrusion for a low carbon steel. For this, some cylindrical specimens, which had their initial diameter changed through the process of cold extrusion in open die, were

A B S T R A C T
 * * * * *

A determinação do coeficiente de atrito existente entre duas superfícies em movimento relativo, pode ser conseguida de forma indireta, pela verificação da resistência imposta a esse movimento. O presente trabalho determina tal parâmetro no processo de extrusão a frio de um aço baixo carbono. Para isso, foram preparados alguns corpos de prova cilíndricos, os quais tiveram seus diâmetros iniciais alterados através do processo de extrusão a frio em matriz aberta. Estudou-se a variação dos esforços de extrusão em função da espessura da camada de fosfato para diferentes reduções e diferentes ângulos de ferramenta (matriz cônica). Através do modelo de Avitzur, o qual se utiliza do método do limite superior, pode-se verificar a variação do coeficiente de atrito em função da espessura da camada de fosfato.

R E S U M O
 * * * * *

prepared.

The variation of the extrusion force as a function of the phosphate layer by different reductions and different angles of the die (conical die), were studied.

Through the Avitzur model, which uses the upper bound solution, it was possible to determine the variation of the friction coefficient in function of the phosphate layer.

4.2. - Modelo de Avitzur 22

4.1 - Métodos técnicos de determinação de tensões e deformações..... 21

CÔNICA

CAPITULO 4 - DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS DE EXTRUSÃO EM MATRIZ

3.5 - Equipamentos..... 19

3.4.4 - Controle do tamanho dos cristais de fosfato de zinco..... 18

3.4.3 - Controle químico do processo de fosfatização..... 17

3.4.2 - Temperatura de tratamento..... 17

3.4.1 - Tempo de tratamento..... 17

3.4 - Fatores de influência no processo..... 17

3.3 - Características do banho..... 16

3.2 - Mecanismo de formação da camada..... 15

3.1 - Natureza do processo..... 14

CAPITULO 3 - PROCESSO DE FOSFATIZAÇÃO DE METAIS

2.2.2 - Lubrificação 12

2.2.1 - Modelo de atrito 11

2.2 - Modelo de atrito e Lubrificação 11

2.1 - Desenvolvimento da teoria de atrito..... 08

CAPITULO 2 - CONDIÇÕES NOS LIMITES METAL-FERRAMENTA

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO..... 06

6.2 - Análise da variação da força de extrusão em função da camada de fosfato92

6.1 - Análise da variação da camada de fosfato em função do tempo de tratamento92

CAPITULO 6 - AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.4 - Determinação da força ao longo da extrusão.....47

5.4.1 - Equipamento.....47

5.4.2 - Ferramenta.....49

5.4.3 - Ensaios de extrusão em matriz aberta.....52

5.3 - Determinação da espessura da camada de fosfato.....42

5.2 - Determinação da tensão de escoamento.....39

5.2.1 - Preparação do corpo de prova.....39

5.2.2 - Ensaio de traço.....40

5.1.1 - Considerações gerais.....37

5.1.2 - Material utilizado.....38

5.1 - Material.....37

CAPITULO 5 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 - Campo de velocidade22

4.2.2 - Limite superior aplicado à extrusão ..25

4.2.3 - Ângulo de cone ótimo30

4.2.4 - Escoamento do material através de matriz cônica31

4.2.5 - Escoamento considerado o encruamento34

Apêndice A 114
 Apêndice B 115
 Apêndice C 116

APÊNDICES

LISTA DE TABELAS..... 111

LISTA DE FIGURAS 108

SIMBOLOGIA 106

BIBLIOGRAFIA 103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES 98

à espessura da camada e à redução 96

6.3 - Dependência do fator de atrito com relação

ferramenta de semi-ângulo de 18° 95

6.2.3 - Resultados obtidos nos ensaios com

ferramenta de semi-ângulo de 14° 95

6.2.2 - Resultados obtidos nos ensaios com

ferramenta de semi-ângulo de 10° 93

6.2.1 - Resultados obtidos nos ensaios com

O processo de extrusão consiste em submeter um material a um esforço de compressão, forçando-o a escoar plasticamente ao passar através de uma matriz. Esse processo visa produzir peças com geometria bem definida [01].

O processo é caracterizado como a frio, pois a temperatura de conformação é menor que a de recristalização e estacionária, pois o tempo não interfere na deformação.

Os primeiros trabalhos, em nível industrial, com extrusão a frio de aços, datam da década de 20. Entretanto, é com Singer em 1934 que testes bem sucedidos são alcançados, utilizando o fosfato como tratamento superficial do metal para compor o filme lubrificante [02].

Durante a Segunda Guerra Mundial, esse processo foi muito utilizado, sem que os resultados obtidos fossem publicados. Após esse período, algumas empresas dos Estados Unidos da América em conjunto com órgãos do Departamento de Defesa continuaram investigações e pesquisas nesse campo.

Uma evolução marcante dos processos de conformação a frio de metais pode ser verificada nos últimos 40 anos, tornando esses processos competitivos com os demais processos de manufatura. Essa competitividade está condicionada à análise de alguns fatores, tais como: quantidade de peças produzidas, precisão dimensional do produto final, complexidade geométrica do produto e outros, que definirão a escolha do processo. Outra possibilidade é a escolha de um processo misto, como por exemplo, produtos produzidos com partes usinadas e partes extrudadas.

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I

No processo de extrusão a frio de metais, o atrito tem grande influencia nos esforços envolvidos. Assim, o estudo da camada de fosfato, a qual é utilizada como lubrificante nesse processo, tem fundamental importância no que se refere a diminuição da potência consumida, aumento da precisão dimensional e da uniformidade das propriedades mecânicas do produto. Procurou-se, nesse trabalho, estudar a relação entre a espessura da camada de fosfato e a força de extrusão, para diferentes reduções e ângulos da ferramenta, e determinar o fator de atrito em função da espessura da camada e da redução.

A variação do coeficiente de atrito em função da espessura da camada de fosfato, pode ser medida, indiretamente, através do modelo de Avitzur. Esse modelo, baseado no método do limite superior, se adapta satisfatoriamente às condições desenvolvidas durante o processo de extrusão a frio de metais, apesar deste considerar o processo como isotérmico [03] .

nos processos de conformação plástica, ocasionando a deformação basicamente devido ao inevitável desenvolvimento de altas pressões sabe-se que existem diferenças entre essas áreas, que são estudos no campo da conformação plástica dos metais. Entretanto, conhecimento adquirido nessa área, pode ser absorvido para os mecânicos compostos de eixo-mancal. Assim grande parte do O estudo da tribologia teve grande evolução em sistemas baseadas na conservação de energia.

A tribologia é uma área de estudo que trata da interação entre superfícies sólidas em movimento relativo, cujas considerações são atrito, lubrificação e desgaste.

enfocando a análise de um "tribossistema", considerando:

Yust [04], apresenta um trabalho sobre mecanismo de atrito asperezas e condições de deformação das mesmas. primeiras teorias baseavam-se no conceito de interpenetração de algumas teorias baseadas nas hipóteses até então consideradas. As proporcionalidade, entre a força de atrito e a carga, surgem Na busca de explicar e quantificar esse termo de dos corpos.

força de atrito é proporcional a carga e independente do tamanho pesquisadores posteriormente verificaram e comprovaram que a um determinado corpo sólido e a força para movimentá-lo. Outros Vinci, quando da verificação da relação existente entre o peso de O estudo do atrito remonta ao século XVI com Leonardo da

2.1 - DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DE ATRITO

 CONDIÇÕES NOS LIMITES METAL-FERRAMENTA

plástica da peça de trabalho; a qual não ocorre num sistema eixo-
 mancal.

O conhecimento mais profundo do tribossistema existente nos
 processos de conformação plástica dos metais, leva a vantagens
 como a redução do atrito e do desgaste, e maior controle sobre a
 deformação, que podem ser obtidas através de um aumento de
 eficiência do lubrificante. Essa condição é desejada como
 apresenta o quadro da tabela 2.1 .

TABELA 2.1 - Efeitos da redução do atrito pelo aumento da eficiência da lubrificação [05].

	AUMENTA/DIMINUI	
1		X
2		X
3		X
4		X
5	X	
6		X
7		X
8		X
9		X
10	X	
11		X
12		X
13		X
14	X	
15		X
16		X
17	X	

O fator de atrito "m" é considerado constante para um dado também da velocidade.

Essa relação assume a tensão de cisalhamento constante sem dependência da pressão entre a ferramenta e o material, como

$$T = m \frac{\sigma_0}{3} \quad (2.1)$$

Em conformação plástica de metais, quando o material é considerado perfeitamente plástico, pode-se estabelecer a relação interface entre ferramenta e material.

processos de conformação plástica de metais ela esta presente na " T " é medida em unidade de força por unidade de área. Nos é chamada de resistência de atrito. Essa resistência de atrito A resistência imposta a movimentação de dois corpos em contato,

2.2.1 - Modelo de atrito

-ferramenta ($m = 1$).
de ausência de atrito ($m = 0$) e o contato direto metal-encontrados para "m", que estarão compreendidos entre a condição direta a análise do regime de lubrificação através dos resultados que representa as perdas por atrito. Além disso, se torna mais escolhida [03] , baseia-se na facilidade de cálculo da expressão atrito constante" ($T = m \sigma_0 / 3$). A justificativa dessa dos esforços de extrusão, emprega o modelo de atrito de "fator de O modelo utilizado no presente trabalho, para a determinação plástica de metais, são complexos. Os mecanismos de atrito, presentes nos processos de conformação

2.2 - MODELO DE ATRITO E LUBRIFICAÇÃO

No processo de extrusão de metais, altas cargas são desenvolvidas e diferentes regimes de atrito podem estar presentes ao longo do processamento. Desta forma, a consideração

regime misto.

regime de filme limite e

regime de filme pleno (espesso e fino)

determinado ponto, que poderão ser:

regime de lubrificação presente num determinado instante e num natureza dos metais e do lubrificante e a temperatura definem o relativa entre essas superfícies, a pressão de contato, a forma geométrica das superfícies em contato, a velocidade encontrado num determinado processo de conformação. Assim, a Vários são os fatores que definem o regime de lubrificação processo.

Além disso, a lubrificação pode ser fator limitante do êxito do final no que se refere a característica de acabamento superficial. reconhecidamente responsável, entre outros fatores, pelo resultado A lubrificação utilizada nos processos de conformação plástica é

2.2.2 - Lubrificação

$$\tau = \frac{\sigma}{3}$$

(2.2)

de escoamento de von Mises): material, ferramenta (matriz) e condição de temperatura e superfície. O fator de atrito pode variar de $0 < \mu < 1$, sendo que a tensão de cisalhamento máxima será alcançada para (critério

de coeficiente de atrito constante é muito pobre. Entretanto, apesar de existirem modelos que tratam de forma mais refinada o atrito, através por exemplo, da partição da influência dos regimes de lubrificação, esses possuem uma difícil modelagem matemática [05]. Assim, a hipótese de coeficiente ou fator de atrito constante é muito empregada nos modelos matemáticos dos processos de extrusão de metais.

O processo de formação dessa camada uniforme tem origem quando produtos insolúveis, formados pela neutralização de uma fina camada de solução, precipitam ao entrar em contato com o metal. Esses produtos insolúveis se formam, uma vez que na solução neutralizada a solubilidade dos fosfatos metálicos é reduzida e esses precipitam da solução em forma de cristais. Esses cristais são atraídos a

cristalino aderente à superfície do metal base. O processo de fosfatação de metais se baseia numa reação química estabelecida entre o metal base e uma solução de ácido fosfórico, que resulta na formação de uma camada fina de fosfato

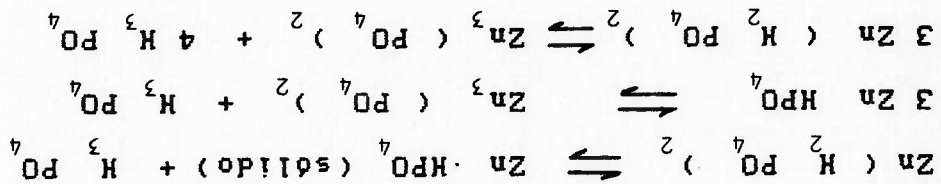
3.1 - NATUREZA DO PROCESSO

Folhas conclui que o papel da camada de fosfato não pode ser esclarecido por uma só razão, mas por um conjunto de propriedades de água lubrificante que essa camada possui.

superfície. Junto com o lubrificante líquido forma uma pasta aderente à deformação sob altas pressões, são reduzidos a um pó fino, o qual autores que acreditam que os cristais de fosfato, na operação de simples separação dos corpos em contato. Posteriormente, surgem acreditava-se que a camada de fosfato tinha como função, a processos de conformação plástica de metais. Inicialmente camada de fosfato, usada como parte do filme lubrificante, em Folhas [06] apresenta algumas teorias sobre o papel da

 PROCESSO DE FOSFATAÇÃO DE METAIS

Os agentes oxidantes são os nitratos de sódio e o clorato de sódio, que têm como função principal acelerar a reação. O cálcio é utilizado para modificar a estrutura cristalina e



do tanque. A reação terá como processo residual, o fosfato férrico que precipita, e portanto deverá ser periodicamente removido do fundo de fosfolita, que é depositada junto a superfície metálica [07]. Solubilidade do fosfato de zinco terciário. Essa camada é chamada fosfato de zinco inicia quando é ultrapassado o produto de ocorrência a liberação de hidrogênio. A formação da camada de dissolvido pela ação do ácido fosfórico, sendo que dessa reação, introduzindo uma superfície ferrosa no banho, o ferro é e agentes oxidantes.

O banho de fosfato de zinco consiste de ácido fosfórico livre, solução aquosa de fosfato de zinco primário - $\text{Zn} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

3.2 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DA CAMADA

que todo o metal seja dissolvido [07]. aderente na superfície metálica e o ataque do ácido continuará até corrosivos solúveis, haverá a precipitação de uma camada não do ácido fosfórico ao ferro ou zinco leva a formação de produtos metal, protegendo o mesmo do ataque ácido. Entretanto, se o ataque superfície dos metais pela ação do potencial eletrostático do

util da solução.

dos cristais, e com seu efeito oxidante, podem aumentar a vida a função de aumentar a velocidade da reação, reduzir o tamanho nitratos, nitratos, cloretos ou peróxidos. Esses aceleradores têm Esses banhos usualmente contém aceleradores que podem ser 2,4, e o fosfato de zinco "spray" opera com PH maior que 3,0. Banhos de fosfato de zinco operam com o PH na faixa de 1,8 a camada pode apresentar peso entre 15 a 400 [mg/dm²] [08].

fosfato poderá apresentar variação no tamanho dos cristais. Essa composição química da solução de fosfato de zinco, a camada de Dependendo do processo de limpeza da superfície do metal e da envolvendo portanto, estágios de decapagem e desengraxamento.

superfície para que exista uma perfeita aderência da camada, No processo de fosfatização, é necessária uma preparação da líquidos.

utilizado o fosfato de zinco, juntamente com lubrificantes Nos processos de deformação a frio de metais, é comumente

- Fosfato de manganes
- Fosfato de zinco
- Fosfato de ferro

Existem três principais tipos de proteção fosfórica:

3.3 - CARACTERÍSTICAS DO BANHO

auxiliar a formação da camada microcristalina.

A frequência de inspeção do teste é determinada em função do tipo de carga e da linha em questão.

Para se conseguir eficiência no processo de fosfatização e melhor qualidade da camada depositada, deve-se manter a solução dentro de limites. Esses limites variam em função da concentração utilizada num determinado processo.

3.4.3 - Controle químico do processo de fosfatização

A temperatura de trabalho do banho de fosfato deve estar entre 32°C e 99°C, nos processos de fosfatização chamados à quente. Se a temperatura de trabalho estiver abaixo do mínimo ou acima do máximo recomendado, a espessura da camada de fosfato será alterada quando o processo de fosfatização é denominado a frio, a temperatura de trabalho do banho é a temperatura ambiente.

3.4.2 - Temperatura de trabalho

A quantidade de fosfato depositado sobre o metal, é função do tempo que esse fica imerso na solução. Se um material é submetido a um curto período de tempo de imersão, poderá resultar numa deposição irregular ou numa camada muito fina. Se o material é submetido a um grande período de tempo de imersão, poderá resultar numa camada com cristais muito grandes.

3.4.1 - Tempo de tratamento

3.4 - FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO

de fosfato é utilizada como lubrificante, é interessante que essa
Como nos processos de conformação plástica de metais, a camada
diminuir o tamanho dos cristais.

alcalina, um condicionador de tignio. Esse pode refinar ou
antecede o banho de fosfato, ou em qualquer outra forma de limpeza
Outro modo de controle é utilizar na água de limpeza que
mais grosseiros será formada.

limpeza alcalina é empregada, uma estrutura composta de cristais
podem funcionar como refinadores de cristais. Por outro lado, se a
residuais de solventes, quando retidos na superfície,
controlado, é a condição da superfície a ser recoberta. O
Um fator de influência no recobrimento é que pode ser
os interstícios dos cristais maiores.

profundados, a solução continuará depositando cristais preenchendo
estrutura cristalina da camada, uma vez que para tempos
O tempo de permanência do metal no banho pode determinar a
se controlar esse parâmetro [08].

difícil de ser estabelecido. Entretanto, existem algumas formas de
O controle sobre o tamanho dos cristais depositados é bastante
aplicação desse tratamento superficial.

recobrimento de fosfato, deve ser determinado em função da
O tamanho dos cristais ou a estrutura cristalina do

3.4.4 - Controle do tamanho dos cristais de fosfato de zinco

- Medida da concentração de ferro

- Medida da concentração de aceleradores

- Medida da acidez do banho

zinco especificam o controle sobre:

Em geral, os métodos de teste para as soluções de fosfato de

camada possui cristais grosseiros, pois desta forma o filme de óleo, que também é usado como lubrificante, poderá penetrar nos interstícios melhorando as condições de aderência.

3.5 - EQUIPAMENTOS

O método de aplicação do revestimento de fosfato é normalmente determinado pelo tamanho e forma do produto que se quer revestir. Basicamente os equipamentos se dividem em dois tipos:

- Equipamento de tratamento por imersão
- Equipamento de tratamento por aspersão

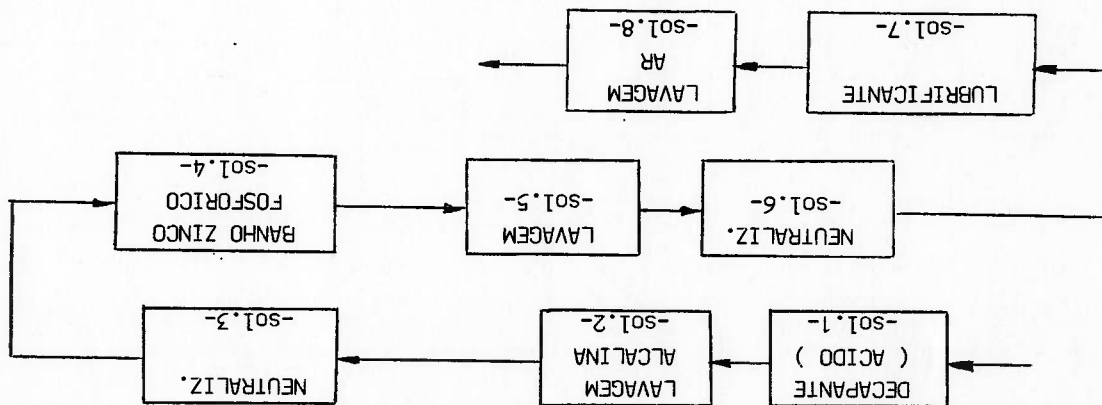
Em ambos os casos, em instalações industriais, o processo é contínuo.

Tanto o método de imersão quanto o método de aspersão podem ser utilizados nos tratamentos de superfícies visando uma posterior operação de conformação plástica. Entretanto, normalmente se utiliza o método de imersão nesse caso, pois esse confere uma camada mais aderente.

O equipamento de fosfatização por imersão deve possuir sensores de temperatura, sensores de nível de solução, sistema de drenagem, sistema de exaustão de vapor e dispositivo de coleta de amostra para controle.

A figura 3.1 ilustra uma linha automática de fosfatização e lubrificação de esboço (forma original da peça no processo) de material aço SAE 1010, que será deformado plasticamente.

FIGURA 3.1 - Fluxograma típico para linha de fosfatização -
adaptação da ref. [08]



Esse método baseia-se no teorema do limite superior, o qual
metal.

descontinuidades de velocidade durante o escoamento plástico do
permite avaliar o trabalho redundante decorrente das
de processos de extrusão a frio de metais, pois esse método
apontam o método do limite superior, como sendo valioso no estudo
A análise das hipóteses simplificadoras [10] e [11],

- Método da energia uniforme
- Método da divisão em elementos
- Método do limite superior
- Método das linhas de deslizamento

referências [09 - 11], São eles.

e comentados, no âmbito de suas hipóteses simplificadoras, pelas
Alguns métodos, mais comumente utilizados, são apresentados
processo.

para relacionar as tensões e as deformações envolvidas no
matemáticos, se utilizam de métodos analíticos e experimentais
um material sob condições de processamento, esses modelos, físico-
para projetar equipamentos, bem como, predir o comportamento de
lubrificação e geometria definida pelo processo. Utilizados
necessários nos processos de conformação, condições de
Vários autores propuseram modelos que relacionam os esforços

4.1- MÉTODOS TEÓRICOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS DE EXTRUSÃO EM MATRIZ CÔNICA

estabelece que "quando o corpo escoa, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidade cinematicamente admissível no corpo" [12].

4.2 - MODELO DE AVITZUR (Método do limite superior)

4.2.1 - Campo de velocidade

O campo de velocidade cinematicamente admissível, é apresentado na figura 4.2 o qual é definido a partir de uma geometria da ferramenta mostrada na figura 4.1 , considerada como um corpo rígido.

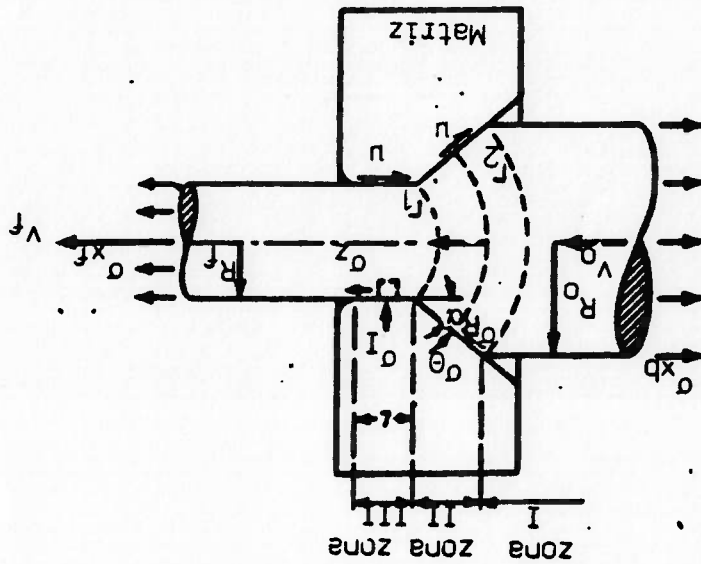
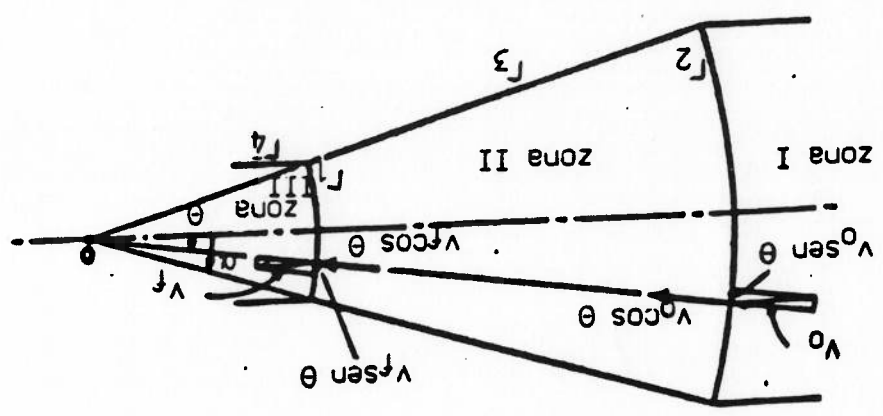


FIGURA 4.1 - Geometria da ferramenta [03]

Três regiões distintas são consideradas, nas quais o campo de velocidade é uniforme. Na zona I a velocidade possui somente a

As superfícies r_1 e r_2 são superfícies esféricas de centro em "O" que delimitam a zona de deformação (zona II). Os componentes de velocidade normais às superfícies r_1 e r_2 são uniformes. Entretanto, existe descontinuidade de velocidade ao longo dessas superfícies, na direção tangencial às mesmas.

FIGURA 4.2 - Campo de velocidade [13].



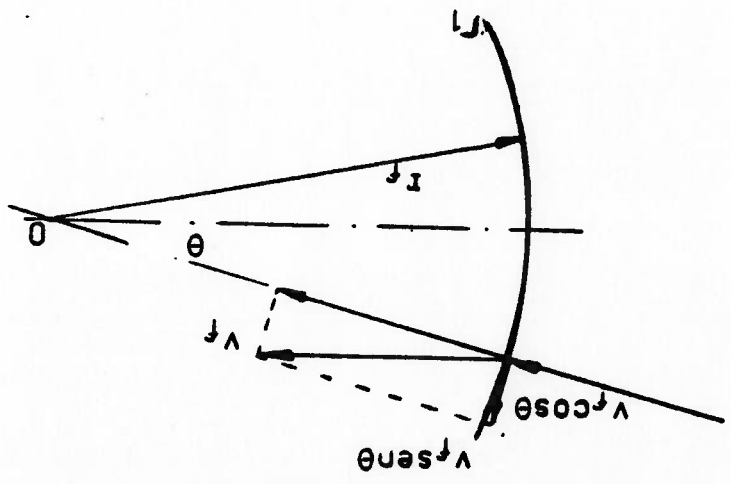
$$V_0 = V_f \begin{pmatrix} R_f \\ R_0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

componente axial igual a V_0 . Na zona II a velocidade tem direção apontada para o ápice do cone (ponto "O"). Na região III a velocidade volta a possuir somente a componente axial igual a V_f . Considerando-se a deformação a volume constante (modelo admitindo material incompressível):

- (4.2) Superfície 1 : $\Delta v = v_f \text{ Sen } \theta$
- (4.3) Superfície 2 : $\Delta v = v_0 \text{ Sen } \theta$
- (4.4) Superfície 3 : $\Delta v = v_f r^2 \frac{r^2}{\text{Cos } \alpha}$
- (4.5) Superfície 4 : $\Delta v = v_f$

Os componentes da velocidade tangenciais às superfícies 1, 2, 3 e 4 serão :

FIGURA 4.3 - Componentes da velocidade



$$dv = 2\pi r dr \sin\theta = 2\pi r^2 dr \sin\theta$$

Considerando os componentes do volume infinitesimal

$$W_1 = 2 \sigma_0 v r^2 \int \frac{1}{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} dv$$

$$W_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 v r^2 \int \sqrt{\frac{3}{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta}} dv$$

$$W_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 v r^2 \left[\frac{2}{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} + 2 \left(-\frac{1}{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \right) \cos \theta \right] + 2 \left(\frac{2}{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \right) \sin \theta$$

* potencia interna de deformação

(4.7)

$$J^* = -\pi v r^2 \sigma_0 \sin \theta$$

* potencia externa

escrever:

Para o campo de velocidade apresentado no figura 4.2 pode-se

(4.6)

$$J^* = W_1 + W_s$$

processo de extrusão :

que relaciona as diferentes formas de potencias envolvidas no

O teorema do limite superior [12] apresenta como a expressão

4.2.2- Limite superior aplicado a extrusão

$$W_1 = 2\pi \int_0^a r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta$$

$$W_1 = 4\pi \int_0^a \int_0^{\theta} r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta$$

$$W_1 = 4\pi \int_0^a \left[\frac{r^3}{3} \sin \theta \right]_{r=0}^{r=a} \, d\theta$$

integrando

$$W_1 = 2\pi \int_0^a \left[\frac{r^3}{3} \sin \theta \right]_{r=0}^{r=a} \, d\theta$$

$$W_1 = 2\pi \int_0^a \left[\frac{r^3}{3} \left(\frac{11}{12} \cos \alpha + \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]_{r=0}^{r=a} \, d\alpha$$

$$\frac{r_0}{R_0} = \frac{r_f}{R_f} \quad ; \quad r_f = \frac{R_f}{R_0} r_0$$

$$W_1 = 2\pi \int_0^a \left[\frac{r_0^3}{3} \left(\frac{11}{12} \cos \alpha + \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]_{r_0=0}^{r_0=R_0 \frac{r_f}{R_0}} \, d\alpha$$

$$W_1 = 2\pi \int_0^a \left[\frac{r_0^3}{3} \left(\frac{11}{12} \cos \alpha + \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]_{r_0=0}^{r_0=R_0} \, d\alpha$$

$$W_1 = 2\pi \int_0^a \left[\frac{r_0^3}{3} \left(\frac{11}{12} \cos \alpha + \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]_{r_0=0}^{r_0=R_0} \, d\alpha$$

onde

$$f(\alpha) = \frac{\sin^2 \alpha}{1 - \cos \alpha} \left[1 - \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{\sqrt{11 \cdot 12}}{1} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right]$$

* Potência dissipada por descontinuidade de velocidade e por

atrito nas superfícies 1 e 2 .

$$W_{s1-2} = 1 \int_{\theta=0}^{\alpha} 2\pi r_f \text{sen} \theta v_f \text{sen} \theta + 1 \int_{\theta=0}^{\alpha} 2\pi r_0 \text{sen} \theta v_0 \text{sen} \theta d\theta$$

(4.11)

onde τ é a tensão de cisalhamento ao longo das referidas superfícies, sendo o modelo do material considerado incompressível;

$$W_{s1-2} = 4\pi r_f^2 v_f \frac{\sqrt{3}}{2} \int_{\theta=0}^{\alpha} \text{sen}^2 \theta d\theta$$

$$W_{s1-2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \pi v_f r_f^2 \sigma_0 (\alpha - (\text{sen} \alpha) \text{coss} \alpha) = \frac{\sqrt{3}}{2} \pi v_f r_f^2 \sigma_0 \left(\frac{\text{sen}^2 \alpha}{\alpha} - \text{coss} \alpha \right) \quad (4.12)$$

na superfície 3

$$W_{s3} = \int_{R_0}^{R_f} \tau dv ds = \int_{R_0}^{R_f} \frac{2\pi R}{\text{sen} \alpha} v_f \left(\frac{R}{R_f} \right)^2 \text{coss} \alpha m \frac{\sigma_0}{2} dR$$

$$2\pi R dR = ds ; \tau = m \frac{\sigma_0}{2} ; \Delta v = v_f \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \text{coss} \alpha$$

$$W_{s3} = 2\pi v_f r_f^2 \text{coss} \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} \int_{R_0}^{R_f} \frac{\sigma_0}{2} m \pi v_f R_f^2 \text{coss} \alpha \ln \frac{R_f}{R_0} dR = 2\pi v_f r_f^2 \text{coss} \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 m \pi v_f R_f^2 \text{coss} \alpha \ln \frac{R_f}{R_0}$$

(4.13)

superfície 4

$$W_{s4} = \int_{r_0}^{r_f} \tau dv ds = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 m \pi v_f r_f L$$

(4.14)

função dos termos :

1- A potência requerida para a extrusão é expressa como

conclusões.

Analisando a expressão (4.15) pode-se extrair várias

anteriores podem ser simplificadas [15] .

Para o caso de matriz de pequeno ângulo, as expressões

A redução máxima ocorre para $\sigma_{xb} = - \sigma_0$.

(4.16)

$$\frac{R_f}{R_0} = \exp \left[\frac{(\sigma_{xf} - \sigma_{xb}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_0}{a} \right) \left(\frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{a} \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\sigma_0}{a} \right) \left(\frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{a} \right) \cot \alpha}{\left(\frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{a} \right) \left(\frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{a} \right) - \cot \alpha + m \frac{R_f}{L}} \right]$$

Isolando a relação $\left(\frac{R_f}{R_0} \right)$ de redução temos:

(4.15)

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_0} - 2f(\alpha) \ln \left(\frac{R_f}{R_0} \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\sigma_0}{a} \right] \left[\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_0} - \cot \alpha + m(\cot \alpha) \ln \left(\frac{R_f}{R_0} \right) + m \frac{R_f}{L} \right]$$

temos:

sendo

$$J = W_1 + W_2 + W_3$$

a solução pelo limite superior

$$W_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_0 \pi V R_f^2 \left[\frac{\sigma_0}{a} \left(\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_0} - \cot \alpha + m(\cot \alpha) \ln \left(\frac{R_f}{R_0} \right) + m \frac{R_f}{L} \right) \right]$$

$$W_s = W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} + W_{s4}$$

Assim a potência total dissipada em todas as superfícies será:

Assim, a contribuição desses termos na potência total W_t pode ser representada graficamente conforme a figura 4.4.

$$W_{SA} = \frac{\sqrt{3}}{2} m \cotg \alpha \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) + m \frac{L}{R_f}$$

c) Potência dissipada por atrito

A potência dissipada por descontinuidade de velocidade é nula quando o ângulo da matriz é zero; e aumenta diretamente com o ângulo da matriz.

$$W_{SD} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\alpha}{\text{sen}^2 \alpha} - \cotg \alpha \right)$$

b) Potência dissipada por descontinuidade de velocidade

A potência interna de deformação, aumenta com a redução e o ângulo interno da matriz. Entretanto, para ângulos entre 0° e 45° esse aumento é desprezível.

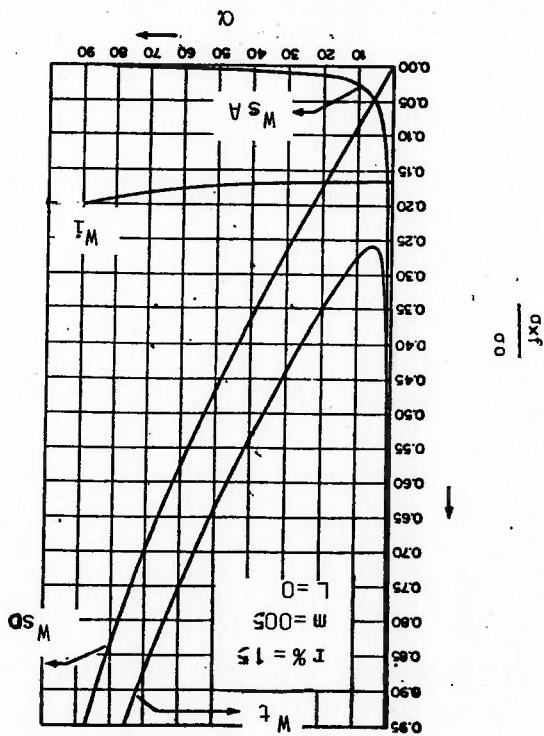
$$W_I = 2 f(\alpha) \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right)$$

a) Potência interna de deformação

A existência de um ângulo ótimo da ferramenta de extrusão (matriz) é facilmente compreendida, pois deve existir um ângulo onde a força de extrusão é mínima para a maior redução possível. Quando o ângulo da ferramenta se torna pequeno demais, o comprimento da área de contato entre a ferramenta e o material se torna demasiado grande causando um acréscimo na dissipação da energia por atrito. Por outro lado, quando esse ângulo é grande demais, a distorção no fluxo do material se faz preponderante. Nesse caso, existirá a formação da "zona-morta", que é a porção do material que ao penetrar na matriz, adere a mesma. Assim, existe um ângulo ótimo que estabelece o equilíbrio entre

4.2.3 - Ângulo de cone ótimo

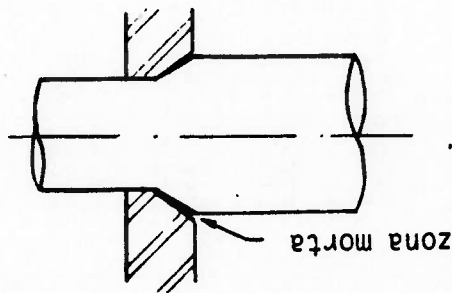
FIGURA 4.4 - Potência total versus semi-ângulo da ferramenta [03]



Através do método de visioelasticidade, conforme apresentado por Thomsen [17], pode-se estudar o comportamento do material

4.2.4 - Escocamento do material através de matriz cônica

FIGURA 4.5 - Zona Morta



$$d = \sqrt{\frac{3}{2} m \ln \left(\frac{R_0^f}{R_0} \right)}$$

(4.17)

$$\frac{6a}{\delta} [f(\alpha)] = \frac{\text{sen} \alpha}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{11}{12} \text{sen}^2 \alpha} - (\text{coss} \alpha) f(\alpha) \right]$$

$$\frac{6a}{\delta} [f(\alpha) \ln \left(\frac{R_0^f}{R_0} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(1 + \frac{\text{sen} \alpha}{\alpha \text{coss} \alpha} \right) - \frac{1}{2} m \ln \left(\frac{R_0^f}{R_0} \right)] = 0$$

$$\frac{6a}{\delta} \left(\frac{a}{b} \times \frac{a}{b} \right) = 0$$

esses fatores [03], [14], [16].

Esse ângulo pode ser encontrado diferenciando a equação (4.15).

zonas II e III.

etapas intermediárias e analisando a deformação da malha nas cônica. Esse estudo é feito interrompendo o processo em várias mostram a forma de escoamento do material através da matriz As figuras apresentadas por Avitzur na referência [16] ,

se apresenta a malha.

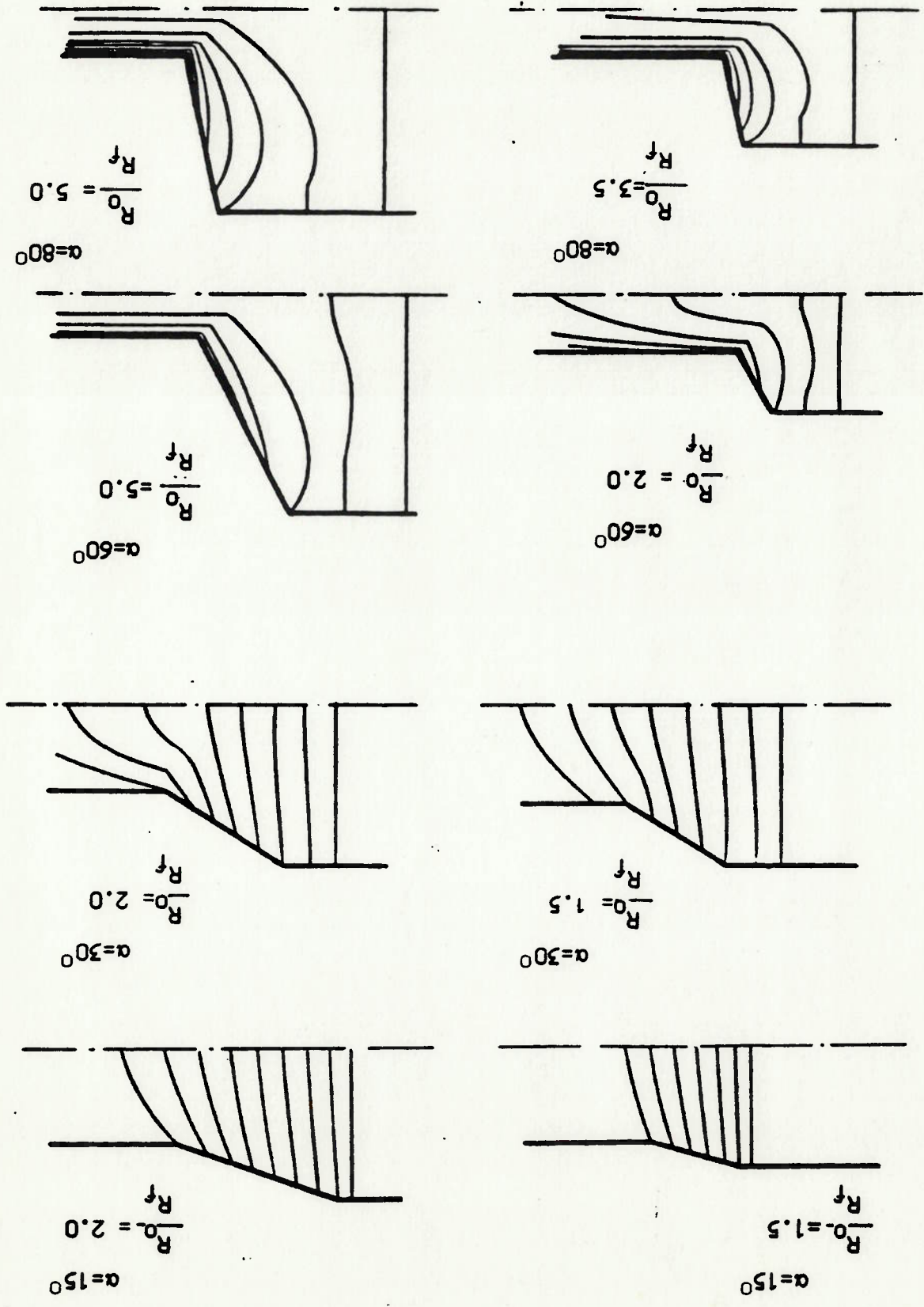
2- Quanto maior o ângulo de cone e a redução, mais distorcida agudo vai se tornando esse ângulo. o centro da matriz. Quanto mais se aproxima da superfície, mais ao eixo de simetria da matriz permanece a 90° até aproximadamente simetria da matriz e outra linha da malha originalmente paralela 1- O ângulo entre uma linha originalmente normal ao eixo de

São elas:

estudos.

Algumas conclusões podem ser estabelecidas através dos citados por Avitzur na figura 4 da referência [16] . uma matriz cônica, pode ser apreciado através de estudo realizado relativa de uma partícula se movendo passando pelo interior de velocidade é estudado por Avitzur mostrado na ref. [03]. A posição escoando através de uma matriz cônica. Analiticamente, um campo de

FIGURA 4.6 - Escoamento do material através de matriz [16]



$$\sigma_{ef} = S \left(1 + 2\beta \sqrt{1 - \frac{11}{12} \text{Sen}^2 \theta} \right) \frac{\text{Cos } \theta}{\text{Ln } \frac{r_0}{r}} \quad (4.20)$$

substituindo (4.19) em (4.18) , temos a tensão efetiva para algum ponto dentro da zona de deformação.

$$\phi = 2 \left(1 - \frac{11}{12} \text{Sen}^2 \theta \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\text{Cos } \theta}{\text{Ln } \frac{r_0}{r}} \quad (4.19)$$

S = tensão de escoamento inicial

ϕ = deformação efetiva

β = coeficiente de encrramento

σ = tensão de escoamento do material sendo:

$$\sigma = S (1 + \beta \phi) \quad (4.18)$$

pode ser aproximado como :

O efeito do encrramento na tensão de escoamento do material [24],

extrusão.

A equação (4.15) fornece o valor da tensão no processo de

4.2.6 - Escoamento considerando o encrramento

Outros fenômenos, tais como "central bursting" , "death zone" e "shaving", que ocorrem durante o escoamento do material através de matrizes cônicas, são comentados nas ref. [18 - 23].

onde $f(\alpha)$, $F(\alpha)$ e $\frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\alpha}$ - Cotg α são tabelados para $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ conforme apêndice (A).

$$\left\{ \frac{\sqrt{3}}{4} m \frac{RF}{L} \frac{\text{Cos} \alpha}{\left(1 - \frac{11}{12} \text{Sen}^2 \alpha\right)^{\frac{1}{2}}} \lambda_n \frac{RF}{RO} \right.$$

$$\left. + \frac{3}{2} m \frac{\text{Sen} \alpha}{\left(1 - \frac{11}{12} \text{Sen}^2 \alpha\right)^{\frac{1}{2}}} \lambda_n \frac{RF}{RO} \right\}^2$$

$$\times \left(\lambda_n \frac{RF}{RO} \right)^2 + \frac{\sqrt{3}}{4} F(\alpha) \lambda_n \frac{RF}{RO} +$$

$$+ \beta \left[\frac{6}{11} \left(1 - \frac{11}{2} \frac{\lambda_n (\text{Cos} \alpha)}{\text{Sen} \alpha}\right) \right]$$

$$+ m \left(\text{Cotg} \alpha \right) \lambda_n \frac{RF}{RO} + m \frac{RF}{L} \left[\right]$$

$$A = S \left\{ 2 f(\alpha) \lambda_n \frac{RF}{RO} + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\alpha} - \text{Cotg} \alpha \right] \right\}$$

onde

$$\sigma_{xb} = \sigma_{xf} - A \quad (4.21)$$

A deformação efetiva, como apresentada na equação (4.19), permite analisar a taxa de encruamento do material. Assim, considerando a deformação efetiva no cálculo das potências envolvidas no processo [24], os termos referentes a potência interna e potência dissipada por atrito e descontinuidade de velocidades, serão alterados resultando:

(4.25)

$$= m \frac{- \left(\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_{ef}} + 2 f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} \right) \frac{R_f}{R_0} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\alpha} + \text{Cotg } \alpha \right)}{\text{Cotg } \alpha \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{R_f}{L}}$$

de (4.22) temos:

$$\sigma_{ef} = S \left\{ 1 + \beta \left[f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\alpha} - \text{Cotg } \alpha \right] \right\} \quad (4.24)$$

Se admitirmos perdas nas superfícies 1 e 2,

$$\sigma_{ef} = S \left(1 + \beta f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} \right) \quad (4.23)$$

Para material rígido-plástico perfeito, $\sigma_{ef} = \sigma_0$. Quando o material apresenta fenômeno de encruamento, então

$$A = 2 f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{\alpha} - \text{Cotg } \alpha + m \left[\left(\text{Cotg } \alpha \right) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{R_f}{L} \right]$$

onde

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_{ef}} = \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_{ef}} - A \quad (4.22)$$

deformação média efetiva, teremos:

Quando a tensão de escoamento é calculada considerando a

As informações mais expressivas de materiais usados em extrusão a frio de parafusos e prisioneiros datam da década de 60. Alguns autores como Donaldski e Schuler [26], Kiessler e Frober [27], continuaram os estudos e classificaram os materiais em grupos. A norma DIN 1654 "Steels for Cold Heading and Cold Extrusion" é periodicamente revista pelo "Iso Technical Committee" [17/ Working Group 4. Novos desenvolvimentos usando aços ligados ao boro são apresentados por Gezella [28]. Quando um aço com baixo teor de carbono recebe adição de boro, esse reúne a vantagem de possuir boa condutividade de conformabilidade com a possibilidade de ser tratado termicamente.

As considerações metalúrgicas, dos tratamentos térmicos

5.1.1 - Considerações Gerais

5.1 - MATERIAL

O desenvolvimento experimental desta pesquisa teve origem numa indústria fabricante de porcas e parafusos, por se tratar de assunto de seu interesse. Sendo assim, as dimensões e o material utilizado na confecção dos corpos de prova foram escolhidos tendo em vista a aplicação dentro do grupo de parafusos e prisioneiros classe 5.6 [25].

Nesse capítulo está descrito todo o procedimento experimental utilizado.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

SAE 1038	C	Mn	P máx	S máx
0.35	0.60	0.040	0.050	
0.42	0.90			
0.39	0.68	0.030	0.010	
Encontrado (%)				

TABELA 5.1 - Composição química do material

[30].

Na tabela 5.1 é apresentada a composição química do material

bitola adequada para a fabricação do produto.

Obter a estrutura esferoidizada, e em seguida são trefiladas na
passam por um tratamento de coalescimento, com a finalidade de
fornecido na forma de "fio-máquina". As bobinas de fio máquina
exposto na introdução desse capítulo, foi o aço SAE 1038
O material utilizado nesta pesquisa, obedecendo o critério

5.1.2 - Material utilizado

tratamento térmico antes da extrusão [30].

estrutura esferoidizada, a qual é conseguida através de
A condição estrutural que favorece a extrusão a frio é a

discutidas por Okell [29].

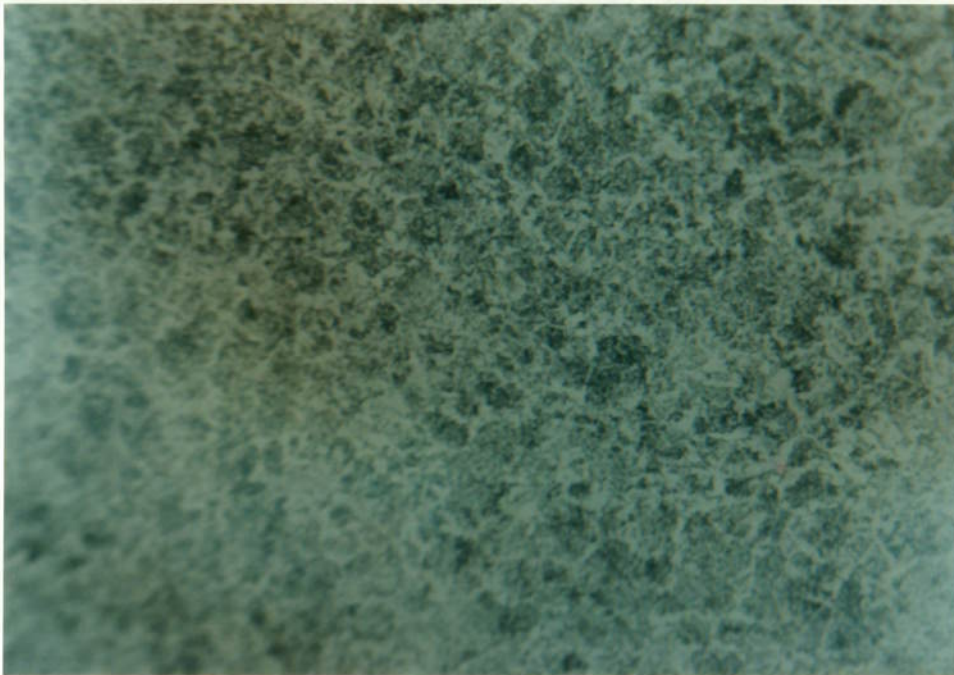
empregados no processo de extrusão a frio de metais, são

O corpo de prova para ensaio de tração foi confeccionado

5.2.1 - Preparação do corpo de prova

5.2 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO

FIGURA 5.1 - Micro-estrutura do material (ampl. 200 X)
Grãos de ferrita e de perlita
Ataque : Nítrico

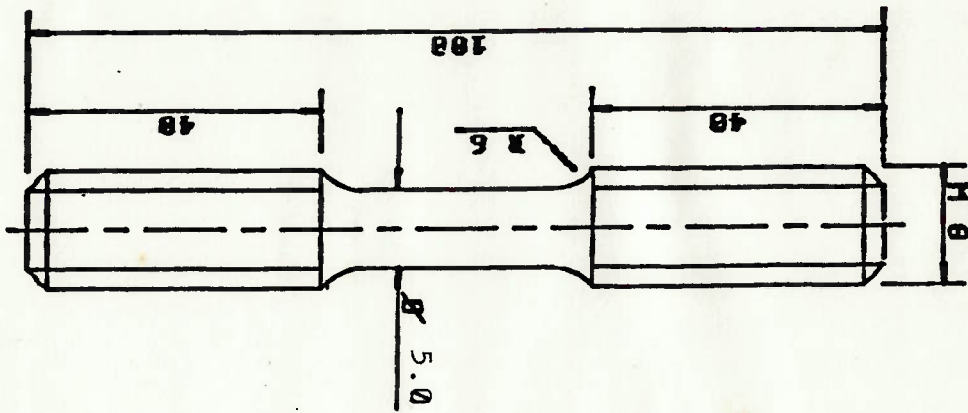


0 ensaio de tração foi feito numa máquina KRATOS modelo K - 2000 , com capacidade de 20000 N e velocidade do cabeçote 15 mm/min. Foram realizados 3 ensaios. As características mecânicas , bem como, a respectiva curva força-deslocamento ($F \times \Delta l$) obtidas nesse ensaio, estão

5.2.2 - Ensaio de tração

FIGURA 5.2 - Corpo de prova para ensaio de tração

dimensões em (mm)



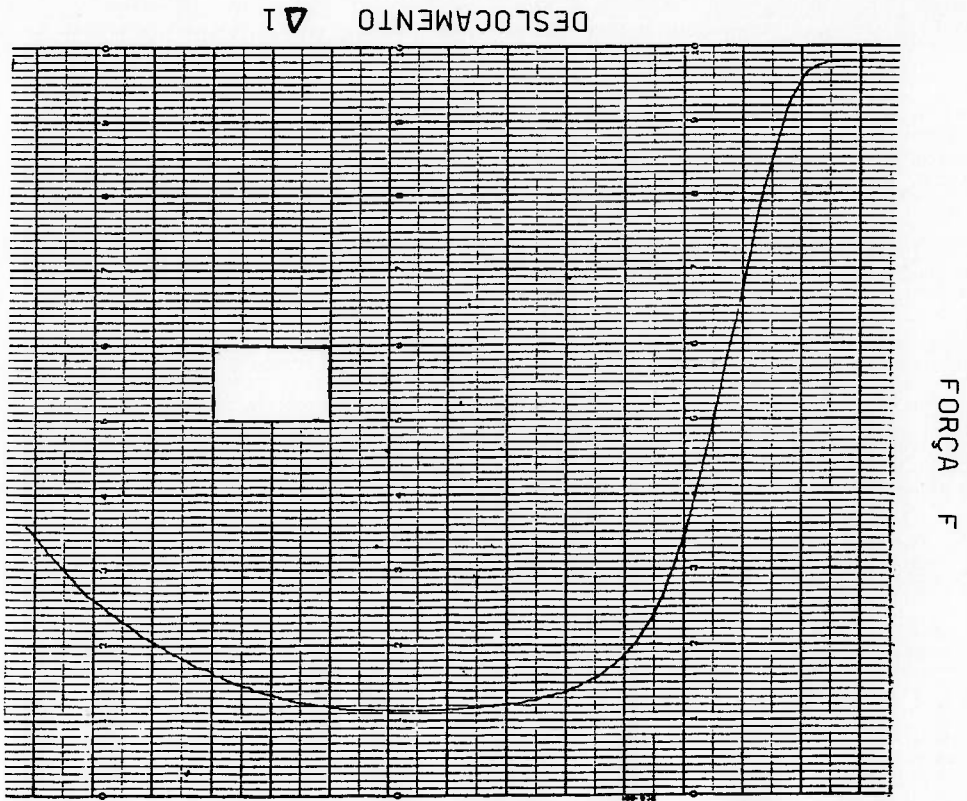
conforme figura 5.2 [31] sofrendo tratamento térmico idêntico ao dos corpos de prova do ensaio de extrusão.

apresentados na figura 5.3 e tabela 5.2 .

TABELA 5.2 - Características mecânicas

G.P. (n) = Corpo de Prova	S_0 (mm) ²	l_0 (mm)	σ_0 (MPa)
G.P. (1)	19.6	35	616.0
G.P. (2)	19.6	35	611.5
G.P. (3)	19.6	35	614.7

G.P. (n) = Corpo de Prova
 S_0 = Area transversal do corpo de prova (inicial)
 σ_0 = Tensão limite de escoamento
 l_0 = Comprimento inicial do corpo de prova



* F máx = 16260 N

* velocidade do papel = 60 cm/min

FIGURA 5.3 - Curva Força x Deslocamento - (corpo de prova 3)

5.3 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE FOSFATO

Apesar de existirem aparelhos que medem, diretamente, a espessura da camada de fosfato, a forma empregada nos processos industriais, bem como na literatura que descreve tais processos, se baseia na medição da massa da camada por unidade de área. Além disso, a forma cilíndrica do corpo de prova com secção de pequeno raio não é favorável para uma medida direta através de aparelhos convencionais.

Assim foram utilizados 15 chapas de mesmo material dos corpos de prova, as quais foram imersas no banho de fosfato simultaneamente aos corpos de prova.

A tabela 5.3 apresenta as dimensões das chapas .

TABELA 5.3 - Corpos de prova -CHAPAS

NUMERO DAS CHAPAS	DIMENSÕES DAS CHAPAS (mm)		AREA (dm ²)
	LADO 1	LADO 2	
1	43.1	42.3	0.3646
2	42.4	41.8	0.3545
3	42.5	43.2	0.3672
4	42.4	42.5	0.3604
5	42.8	42.1	0.3604
6	44.3	42.4	0.3757
7	41.8	42.5	0.3553
8	42.5	42.4	0.3604
9	42.0	43.0	0.3612
10	42.5	42.2	0.3587
11	43.1	42.3	0.3646
12	42.4	41.8	0.3545
13	42.5	43.2	0.3672
14	42.8	42.1	0.3604
15	41.8	42.5	0.3553

C.P. CHAPA 1-26 USADOS P/ RED 16.94% ANG=14°

TEMPO (s)	C.P. (CHAPA)	MASSA (g)	MASSA (SEM CAMADA)	DIFERENÇA (g)	MASSA/AREA (g/dm ²)	MEDIA (g/dm ²)
60	01	41.041	41.033	0.00840	0.02304	0.03373
300	02	41.049	41.033	0.01620	0.04443	0.05569
300	03	41.303	41.288	0.01490	0.04058	0.05569
300	04	41.314	41.288	0.02600	0.07081	0.06023
660	05	40.027	40.001	0.02610	0.07346	0.06023
660	06	40.017	40.001	0.01670	0.04700	0.06023
900	07	40.552	40.532	0.02040	0.05687	0.05391
900	08	40.837	40.818	0.01840	0.05094	0.05391
1200	09	40.838	40.820	0.01770	0.04911	0.05819
1200	10	40.059	40.035	0.02390	0.06727	0.05819
1500	11	42.363	42.335	0.02750	0.07320	0.07920
1500	12	41.129	41.099	0.03070	0.08519	0.07920
1800	13	40.682	40.652	0.03020	0.08380	0.08956
1800	14	41.347	41.312	0.03500	0.09532	0.08956
2100	15	39.763	39.719	0.04430	0.12498	0.11748
2100	16	41.097	41.057	0.04010	0.10998	0.11748
2400	17	40.576	40.532	0.04450	0.12406	0.12778
2400	18	40.866	40.818	0.04750	0.13151	0.12778
2700	19	40.870	40.820	0.04950	0.13735	0.13214
2700	20	40.080	40.035	0.04510	0.12693	0.13214
3000	21	42.383	42.335	0.04810	0.12804	0.12271
3000	22	41.141	41.099	0.04230	0.11738	0.12271
3300	23	40.700	40.652	0.04810	0.13346	0.12229
3300	24	41.353	41.312	0.04080	0.11111	0.12229
3600	25	39.756	39.719	0.03700	0.10438	0.11088
3600	26	41.100	41.057	0.04280	0.11738	0.11088

TABELA 5.4a - Massa da camada de fosfato

Nas tabelas 5.4a a 5.4d estão apresentados os valores do tempo de tratamento e suas respectivas massas pós-tratamento. A coluna "diferença" estabelece a diferença entre a massa pós-tratamento e pré-tratamento, definindo a massa da camada de fosfato depositada. As colunas "MASSA/AREA" e "MEDIA" apresentam a relação entre a massa da camada de fosfato por unidade de área e a média dos dois valores obtidos para o mesmo tempo de tratamento, respectivamente. As figuras 5.4a a 5.4d mostram, de forma gráfica, a camada de fosfato depositada em função do tempo de tratamento.

C.P. CHAPA 43-50 USADOS P/ RED 12.56Z , 16.94Z E 24.75Z ANG=10°

TEMPO (s)	C.P. (CHAPA)	KASSA (g)	SEM CAMADA	DIFERENCA (g)	KASSA/AREA (g/dm ²)	MEDIA (g/dm ²)
60	43	40.731	40.726	0.00490	0.01357	0.01361
60	44	40.429	40.424	0.00490	0.01366	0.01361
300	45	41.011	41.000	0.01110	0.03080	0.03581
300	46	39.800	39.785	0.01450	0.04081	0.03581
660	47	42.249	42.211	0.03840	0.10222	0.08996
660	48	40.598	40.570	0.02800	0.07769	0.08996
900	49	41.042	40.995	0.04740	0.12908	0.13100
900	50	40.556	40.508	0.04790	0.13291	0.13100

TABELA 5.9d - Massa da camada de fosfato

C.P. CHAPA 35-42 USADOS P/ RED 12.56Z , 16.94Z E 24.75Z ANG=18°

TEMPO (s)	C.P. (CHAPA)	KASSA (g)	SEM CAMADA	DIFERENCA (g)	KASSA/AREA (g/dm ²)	MEDIA (g/dm ²)
60	35	41.033	41.028	0.00470	0.01304	0.01538
60	36	40.760	40.754	0.00640	0.01772	0.01538
300	37	42.276	42.268	0.00830	0.02209	0.02235
300	38	41.060	41.059	0.00830	0.02260	0.02235
660	39	40.502	40.470	0.03190	0.08893	0.09073
660	40	39.502	39.470	0.03280	0.09253	0.09073
900	41	40.613	40.584	0.02880	0.07991	0.08055
900	42	40.995	40.966	0.02960	0.08118	0.08055

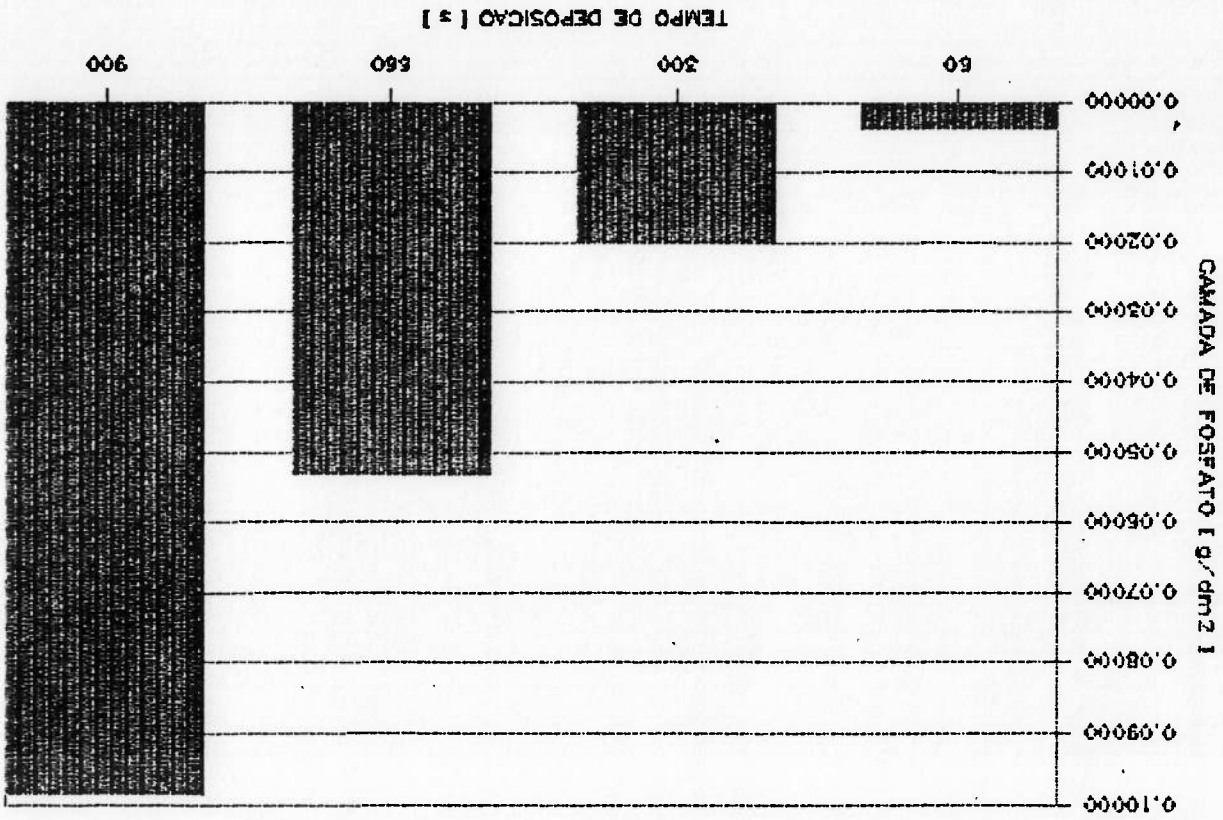
TABELA 5.9c - Massa da camada de fosfato

C.P. CHAPA 27-34 USADOS P/ RED 12.56Z E 24.75Z ANG=14°

TEMPO (s)	C.P. (CHAPA)	KASSA (g)	SEM CAMADA	DIFERENCA (g)	KASSA/AREA (g/dm ²)	MEDIA (g/dm ²)
60	27	41.030	41.029	0.00080	0.00219	0.00359
60	28	40.796	40.794	0.00180	0.00498	0.01964
300	29	39.699	39.690	0.00930	0.02624	0.01964
300	30	41.065	41.060	0.00470	0.01304	0.01964
660	31	40.804	40.786	0.01820	0.05050	0.05299
660	32	40.519	40.499	0.01990	0.05548	0.05299
900	33	40.651	40.614	0.03720	0.10322	0.09846
900	34	42.333	42.298	0.03520	0.09370	0.09846

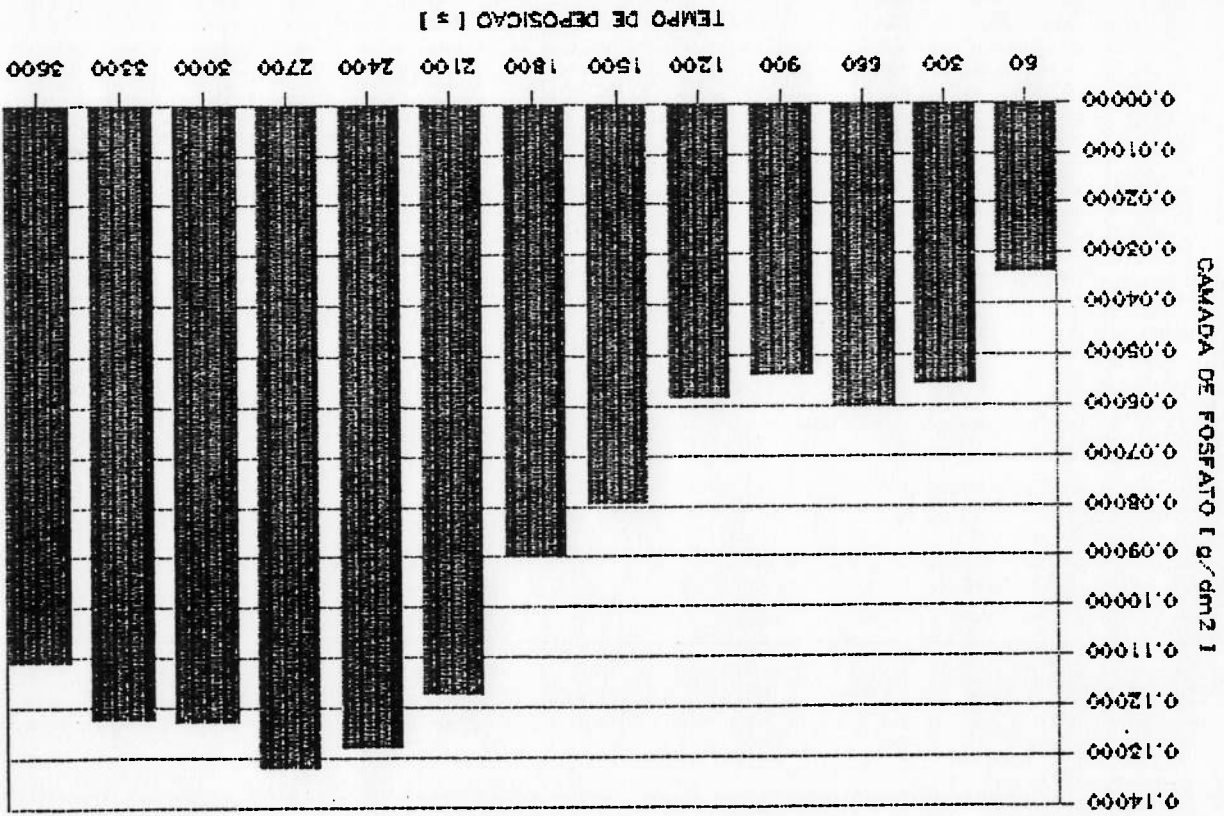
TABELA 5.9b - Massa da camada de fosfato

FIGURA 5.4b - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova-chapa 27-34)



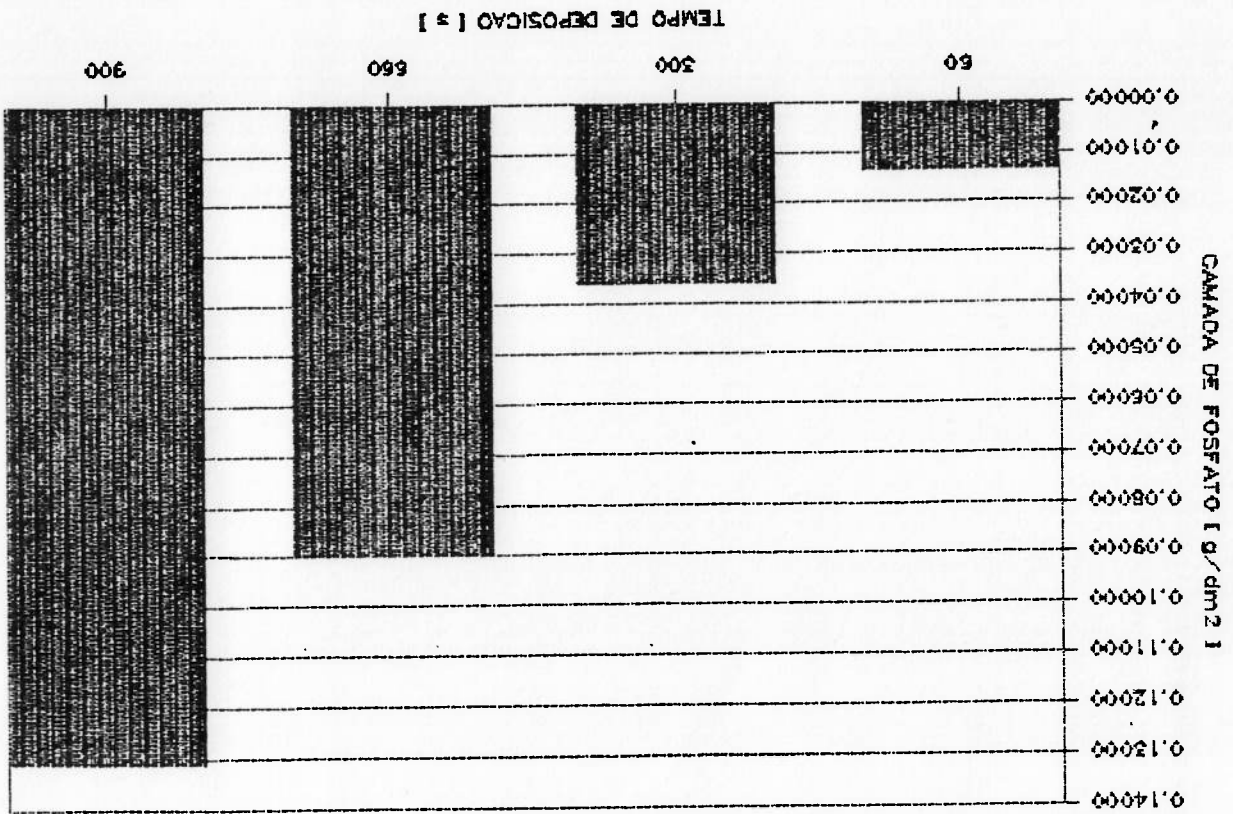
CAMADA DE FOSFATO

FIGURA 5.4a - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova-chapa 1-26)



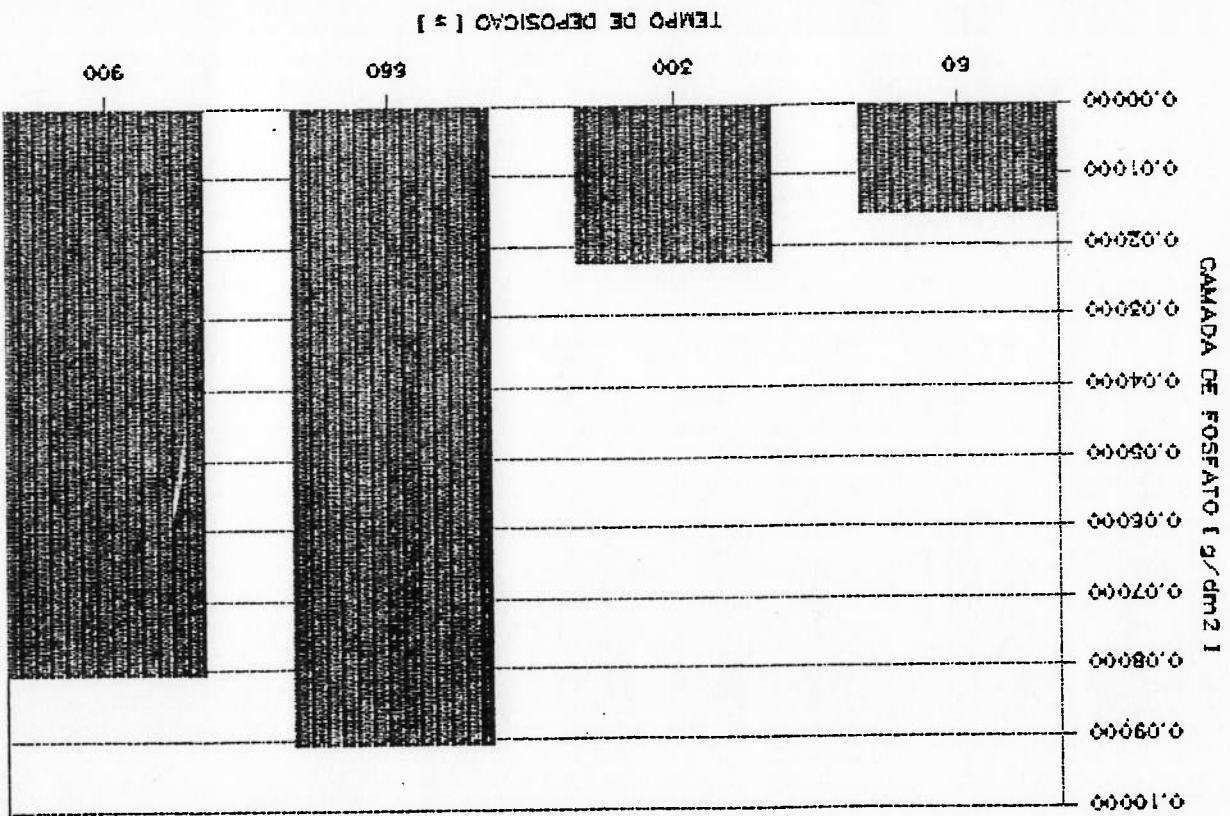
CAMADA DE FOSFATO

FIGURA 5.4d - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova-chapa 43-50)



CAMADA DE FOSFATO

FIGURA 5.4c - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova-chapa 35-42)



CAMADA DE FOSFATO

5.4 - DETERMINAÇÃO DA FORÇA AO LONGO DA EXTRUSÃO

5.4.1 - Equipamento

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios mecânicos modelo MES-08 de fabricação da "Servus Tecnologia e Informática" (vide anexo B), a qual teve algumas de suas funções alteradas visando melhor adequação aos testes.

As funções utilizadas foram:

- Leitura de curso: para a leitura de curso (deslocamento) o equipamento é provido de "encoder" de 2000 pulsos. Esses valores são apresentados num mostrador de 6 dígitos (em unidade de engenharia - mm)

- Leitura de força: para leitura de força foi utilizado uma célula de carga acoplada a um medidor condicionador de marca MICROMEASUREMENT modelo P3500, o qual apresenta o valor da grandeza medida em unidade de deformação [10 E-6 mm/mm]. Os fabricantes de extensômetros (strain gauges) representam essa unidade como: [$\mu\epsilon$]

Atrás da curva característica desse par, célula de carga e medidor, estabeleceu-se um fator de conversão conforme figura 5.5 .

- Leitura de velocidade: por se tratar de um equipamento com eletrônica microprocessada, através de programa, o valor da velocidade é indicado num mostrador de 4 dígitos (em unidade de engenharia mm/min.)

CURVA CELULA DE CARGA

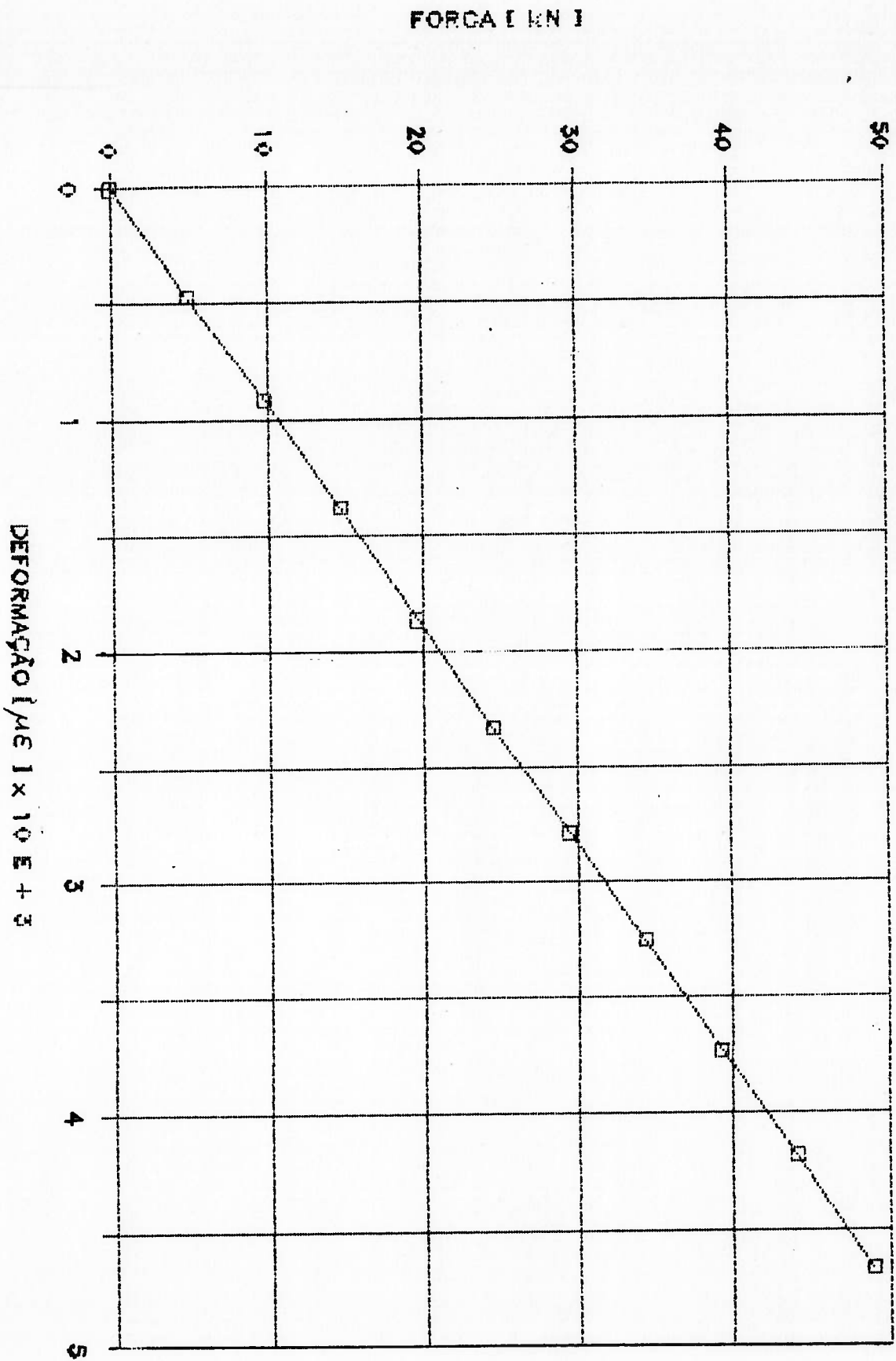


FIGURA 5.5 - Curva de linearidade

O perfil da ferramenta (matriz) define o fluxo do material, bem como o esforço de extrusão [32].

Entretanto existe uma limitação no estudo e escolha do perfil da ferramenta, uma vez que esse está condicionado à forma do produto final.

O material e o tratamento térmico da ferramenta têm fundamental importância na vida da mesma. A escolha do material da ferramenta utilizada deve ser feita como orientação as referências [33 , 34] :

Referente à figura 5.6 :

* Material da ferramenta : Aço VC 131 (Villares)

equivalente : AISI D 6

* Tratamento térmico : temperado e revenido

(dureza 59 - 63 HRC)

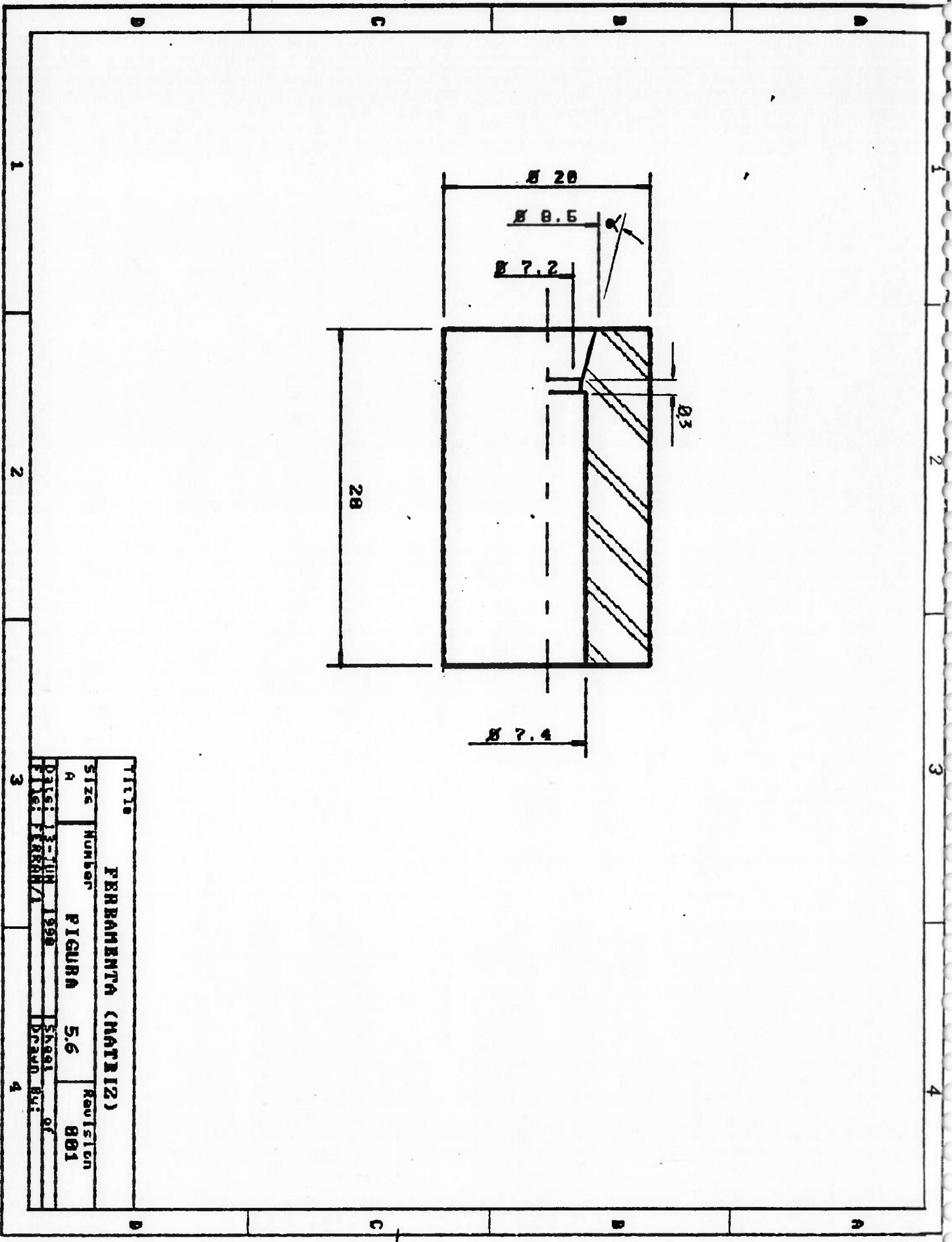
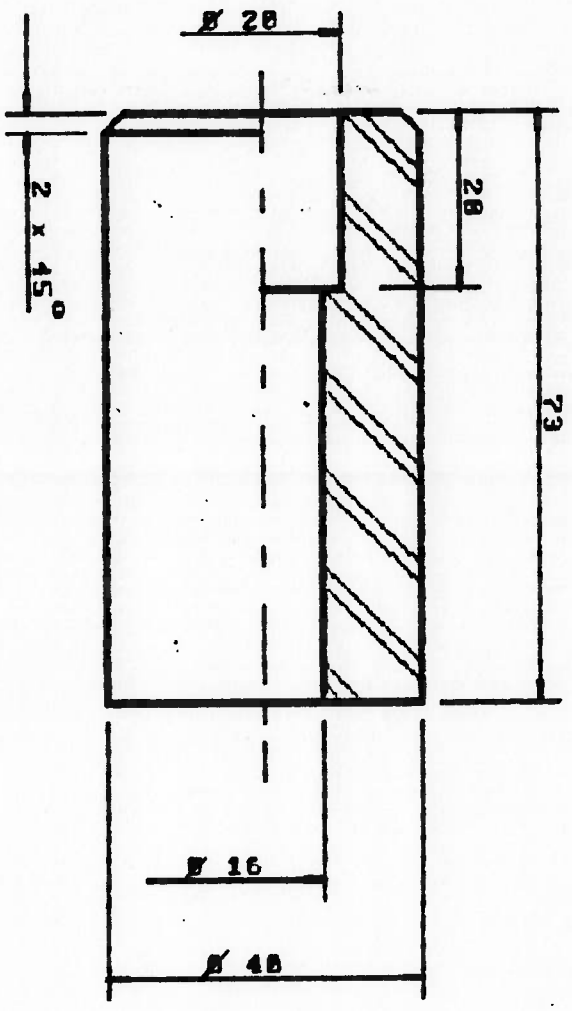


FIGURA 5.6 - Ferramenta de extrusão (matriz)



TITULO			
SUPPORTO FERRAMENTA			
SIZE	NUMBER	FIGURA	Revision
A		5.7	001
Proj: 15-70M		558	
File: suporte		5/8	
DRAWN BY:			

FIGURA 5.7 - Supporto da ferramenta (carcaca)

5.4.3 - Ensaio de extrusão em matriz aberta

Como programa de ensaio estabeleceu-se:

1- 03 (tres) ferramentas (matrizes) com semi-ângulo de cone de 10°, 14° e 18° .

2- Para cada matriz foram ensaiados 36 corpos de prova

sendo:

2.1 - 03 corpos de prova para cada camada (tempo de

tratamento)

2.2 - 04 camadas para cada semi-ângulo da ferramenta, sendo que

para a matriz de semi-ângulo de 14° e redução 16,94%

foram ensaiados corpos de prova com 07

camadas diferentes (45 corpos de prova).

3 - Os itens 2.1 e 2.2 repetem-se para 03 diferentes reduções:

RED. = 12,56% , RED. = 16,94% , RED. = 24,75% .

4- Com a finalidade de se verificar a variação da força de

extrusão com a velocidade de avanço do punção, foram

ensaíados 09 (nove) corpos de prova : C.P. 511 ; C.P. 512

C.P. 513 ; C.P. 514 ; C.P. 515 ; C.P. 516 ; C.P. 517 ; C.P. 518

e C.P. 519. Esse ensaio foi previsto uma vez que a

velocidade utilizada nos ensaios seria menor daquela

utilizada nos equipamentos industriais (prensas).

5 - Observação : Além da camada de fosfato, os corpos de prova

foram oleados.

Óleo utilizado : CAB - O - FORM LD

(fabricante : Prolubex)

Total de corpos de prova de extrusão : 117

α \ RED.	12.56 %	16.94 %	24.75 %
10°	C.P. 101-112	C.P. 201-212	C.P. 301-312
14°	C.P. 401-412	C.P. 501-521	C.P. 601-612
18°	C.P. 701-712	C.P. 801-812	C.P. 901-912

TABELA 5.5 - Programa de ensaios

As tabelas 5.6 a 5.35 mostram a variação da força ao longo da extrusão. O valor para cada ensaio apresentado como "MÉDIA", é o valor médio das forças obtidas entre as penetrações de 4mm e 10mm.

TABELA 5.6 - Variação da força (C.P. 101 - 103)

CORPO DE PROVA N.º 101		CORPO DE PROVA N.º 102		CORPO DE PROVA N.º 103	
REDUCAO 12.56 %		REDUCAO 12.56 %		REDUCAO 12.56 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1087 11434.73	2.00	1084 11423.11	2.00	1110 11697.10
4.00	1240 13067.03	4.00	1235 13014.34	4.00	1209 12740.35
5.00	1260 13277.79	5.00	1265 13330.48	5.00	1265 13330.48
8.00	1238 13045.95	8.00	1244 13109.18	8.00	1254 13214.56
10.00	1252 13193.48	10.00	1257 13246.17	10.00	1265 13330.48
MEDIA F101= 13146.06		MEDIA F102= 13175.04		MEDIA F103= 13153.97	

TABELA 5.7 - Variação da força (C.P. 104 - 106)

CORPO DE PROVA N.º 104		CORPO DE PROVA N.º 105		CORPO DE PROVA N.º 106	
REDUCAO 12.56 %		REDUCAO 12.56 %		REDUCAO 12.56 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1090 11486.34	2.00	1162 12245.07	2.00	1153 12150.23
4.00	1203 12677.13	4.00	1247 13140.80	4.00	1238 13045.95
5.00	1247 13140.80	5.00	1269 13372.63	5.00	1243 13098.64
8.00	1234 13003.80	8.00	1252 13193.48	8.00	1234 13003.80
10.00	1244 13109.18	10.00	1253 13204.02	10.00	1238 13045.95
MEDIA F104= 12982.73		MEDIA F105= 13227.73		MEDIA F106= 13048.59	

TABELA 5.8 - Variação da força (C.P. 107 - 109)

CORPO DE PROVA Nº 107			CORPO DE PROVA Nº 108			CORPO DE PROVA Nº 109		
REDUCAO 12.56 %			REDUCAO 12.56 %			REDUCAO 12.56 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
TEMPO DE DEPOSITAO 11 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 11 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 11 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°		
0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0
2.00	1069	11265.04	2.00	1073	11307.20	2.00	1083	11412.57
4.00	1102	11612.80	4.00	1104	11633.87	4.00	1090	11486.34
6.00	1117	11770.86	6.00	1116	11760.33	6.00	1118	11781.40
8.00	1108	11676.02	8.00	1119	11791.94	8.00	1104	11633.87
10.00	1107	11686.56	10.00	1124	11844.63	10.00	1133	11939.47
MEDIA	F107=	11686.56	MEDIA	F108=	11757.69	MEDIA	F109=	11710.27

TABELA 5.9 - Variação da força (110 - 112)

CORPO DE PROVA Nº 110			CORPO DE PROVA Nº 111			CORPO DE PROVA Nº 112		
REDUCAO 12.56 %			REDUCAO 12.56 %			REDUCAO 12.56 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°		
0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0
2.00	1078	11359.80	2.00	1095	11539.03	2.00	1137	11981.62
4.00	1098	11570.64	4.00	1118	11781.40	4.00	1128	11886.78
6.00	1116	11760.33	6.00	1127	11876.24	6.00	1145	12065.93
8.00	1109	11686.56	8.00	1133	11939.47	8.00	1133	11939.47
10.00	1119	11791.94	10.00	1125	11855.17	10.00	1130	11907.86
MEDIA	F110=	11702.37	MEDIA	F111=	11863.07	MEDIA	F112=	11950.01

TABELA 5.10 - Variação da força (C.P. 201 - 203)

CORPO DE PROVA Nº 201			CORPO DE PROVA Nº 202			CORPO DE PROVA Nº 203		
REDUCAO 16.94 %			REDUCAO 16.94 %			REDUCAO 16.94 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
TEMPO DE DEPOSITAO 01 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 01 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 01 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°			ANGULO DA FERRAMENTA 10°		
0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0
2.00	1605	16913.37	2.00	1478	15575.96	2.00	1447	15248.38
4.00	1700	17914.48	4.00	1585	16702.62	4.00	1619	17060.91
6.00	1738	18525.60	6.00	1649	17377.04	6.00	1679	17693.18
8.00	1763	18578.37	8.00	1687	17777.48	8.00	1726	18188.46
10.00	1757	18515.14	10.00	1694	17831.25	10.00	1760	18546.75
MEDIA	F201=	18383.42	MEDIA	F202=	17427.10	MEDIA	F203=	17872.33

TABELA 5.11 - Variação da força (C.P. 204 - 206)

CORPO DE PROVA Nº 204			CORPO DE PROVA Nº 205			CORPO DE PROVA Nº 206		
REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	1503	15838.51	2.00	1472	15311.83	2.00	1437	15143.80
4.00	1635	17229.51	4.00	1623	17103.86	4.00	1601	16871.22
6.00	1694	17831.25	6.00	1634	17429.73	6.00	1634	17429.73
8.00	1704	17956.63	8.00	1677	17672.11	8.00	1693	17840.71
10.00	1710	18019.86	10.00	1674	17851.25	10.00	1713	18031.47
MEDIA F204= 17764.31			MEDIA F205= 17534.84			MEDIA F206= 17548.28		

TABELA 5.12 - Variação da força (C.P. 207 - 209)

CORPO DE PROVA Nº 207			CORPO DE PROVA Nº 208			CORPO DE PROVA Nº 209		
REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	1510	16766.96	2.00	1450	15288.80	2.00	1405	14805.79
4.00	1622	17092.52	4.00	1632	17197.90	4.00	1460	15385.37
6.00	1621	17001.98	6.00	1630	17176.82	6.00	1570	16344.33
8.00	1618	17050.37	8.00	1658	17471.88	8.00	1604	16902.84
10.00	1625	17124.13	10.00	1650	17387.38	10.00	1617	17039.83
MEDIA F207= 17087.25			MEDIA F208= 17388.55			MEDIA F209= 16468.15		

TABELA 5.13 - Variação da força (210 - 212)

CORPO DE PROVA Nº 210			CORPO DE PROVA Nº 211			CORPO DE PROVA Nº 212		
REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %			REDUCAO 16,94 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)			PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	1419	14838.48	2.00	1470	15470.75	2.00	1470	15490.75
4.00	1574	16586.70	4.00	1635	17229.51	4.00	1571	16555.88
6.00	1538	16287.33	6.00	1601	16871.22	6.00	1549	16323.25
8.00	1550	16333.79	8.00	1616	17029.29	8.00	1575	16597.24
10.00	1570	16544.55	10.00	1620	17071.44	10.00	1590	16755.31
MEDIA F210= 16418.89			MEDIA F211= 17050.37			MEDIA F212= 16557.72		

TABELA 5.14- Variação da força (C.P. 301 - 303)

CORPO DE PROVA Nº 301		CORPO DE PROVA Nº 302		CORPO DE PROVA Nº 303	
REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1910 20127.44	2.00	1884 19853.45	2.00	1899 20011.73
4.00	2335 24606.86	4.00	2300 24237.24	4.00	2226 23457.43
6.00	2462 25944.38	6.00	2476 26091.91	6.00	2397 25259.42
8.00	2545 26819.03	8.00	2611 27514.53	8.00	2536 26724.19
10.00	2635 27767.44	10.00	2716 28621.02	10.00	2644 27862.29
MEDIA F301= 26284.23		MEDIA F302= 26616.17		MEDIA F303= 25825.83	

TABELA 5.15- Variação da força (C.P. 304 - 306)

CORPO DE PROVA Nº 304		CORPO DE PROVA Nº 305		CORPO DE PROVA Nº 306	
REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1972 20780.80	2.00	1888 19875.61	2.00	2018 21265.54
4.00	2268 23900.02	4.00	2297 24205.62	4.00	2436 25670.40
6.00	2410 25396.41	6.00	2489 26228.91	6.00	2582 27208.93
8.00	2501 26355.36	8.00	2524 26597.73	8.00	2636 27777.98
10.00	2574 27124.63	10.00	2531 26882.26	10.00	2676 28199.50
MEDIA F304= 25694.11		MEDIA F305= 25978.63		MEDIA F306= 27214.20	

TABELA 5.16- Variação da força (C.P. 307 - 309)

CORPO DE PROVA Nº 307		CORPO DE PROVA Nº 308		CORPO DE PROVA Nº 309	
REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1932 20359.28	2.00	1924 20274.77	2.00	1928 20317.13
4.00	2247 23678.73	4.00	2218 23373.13	4.00	2243 23636.57
6.00	2339 24548.22	6.00	2279 24015.94	6.00	2350 24764.13
8.00	2392 25206.73	8.00	2380 25080.27	8.00	2416 25459.64
10.00	2401 25301.57	10.00	2429 25396.63	10.00	2465 25976.00
MEDIA F307= 24708.81		MEDIA F308= 24516.49		MEDIA F309= 24959.09	

TABELA 5.17 - Variação da força (310 - 312)

CORPO DE PROVA Nº 310		CORPO DE PROVA Nº 311		CORPO DE PROVA Nº 312	
REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %		REDUCAO 24,75 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1769 20749.18	2.00	1920 20232.82	2.00	1810 19073.65
4.00	2212 23309.90	4.00	2245 23657.65	4.00	2175 22920.00
6.00	2277 23974.86	6.00	2269 23910.56	6.00	2239 23394.42
8.00	2315 24395.31	8.00	2344 24700.91	8.00	2304 24279.39
10.00	2326 24511.22	10.00	2374 25017.04	10.00	2395 25238.34
MEDIA F310= 24052.82		MEDIA F311= 24321.54		MEDIA F312= 24008.04	

TABELA 5.18 - Variação da força (C.P. 401 - 403)

CORPO DE PROVA Nº 401		CORPO DE PROVA Nº 402		CORPO DE PROVA Nº 403	
REDUCAO 12,56 %		REDUCAO 12,56 %		REDUCAO 12,56 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1430 15595.13	2.00	1493 15733.13	2.00	1343 15260.02
4.00	1621 17081.98	4.00	1550 16333.79	4.00	1581 16660.46
6.00	1610 16956.96	6.00	1382 16671.00	6.00	1605 16713.37
8.00	1639 17271.66	8.00	1606 16923.91	8.00	1612 16987.14
10.00	1673 17840.71	10.00	1629 17166.23	10.00	1600 16860.68
MEDIA F401= 17290.11		MEDIA F402= 16773.75		MEDIA F403= 16855.42	

TABELA 5.19 - Variação da força (C.P. 404 - 406)

CORPO DE PROVA Nº 404		CORPO DE PROVA Nº 405		CORPO DE PROVA Nº 406	
REDUCAO 12,56 %		REDUCAO 12,56 %		REDUCAO 12,56 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)		(mm) (µε) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1302 13827.97	2.00	1570 16544.55	2.00	1470 15701.51
4.00	1469 15480.22	4.00	1610 16966.06	4.00	1531 16133.57
6.00	1485 15648.82	6.00	1568 16523.47	6.00	1512 15933.35
8.00	1497 15775.28	8.00	1544 16270.56	8.00	1523 16049.26
10.00	1512 15933.35	10.00	1545 16281.10	10.00	1532 16144.11
MEDIA F404= 15709.42		MEDIA F405= 16510.30		MEDIA F406= 16065.07	

TABELA 5.20 - Variação da força (C.P. 407 - 409)

CORPO DE PROVA Nº 407		CORPO DE PROVA Nº 408		CORPO DE PROVA Nº 409	
REDUCAO 12.5% X		REDUCAO 12.5% X		REDUCAO 12.5% X	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1433 15311.61	2.00	1508 15871.20	2.00	1460 15385.37
4.00	1455 15332.68	4.00	1485 15648.82	4.00	1530 16123.63
6.00	1467 15439.14	6.00	1480 15576.13	6.00	1499 15796.35
8.00	1478 15575.06	8.00	1493 15733.13	8.00	1524 16059.80
10.00	1479 15776.35	10.00	1520 16017.65	10.00	1533 16365.40
MEDIA	F407= 15540.81	MEDIA	F408= 15748.93	MEDIA	F409= 16086.15

TABELA 5.21 - Variação da força (410 - 412)

CORPO DE PROVA Nº 410		CORPO DE PROVA Nº 411		CORPO DE PROVA Nº 412	
REDUCAO 12.5% X		REDUCAO 12.5% X		REDUCAO 12.5% X	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1510 15912.27	2.00	1460 15385.37	2.00	1440 15174.62
4.00	1516 15975.50	4.00	1509 15901.73	4.00	1474 15532.91
6.00	1517 15986.04	6.00	1512 15933.35	6.00	1468 15469.68
8.00	1528 16101.95	8.00	1524 16059.80	8.00	1480 15596.13
10.00	1523 16049.25	10.00	1527 16091.42	10.00	1539 16217.87
MEDIA	F410= 16028.19	MEDIA	F411= 15996.57	MEDIA	F412= 15704.15

TABELA 5.22 - Variação da força (C.P. 501 - 503)

CORPO DE PROVA Nº 501		CORPO DE PROVA Nº 502		CORPO DE PROVA Nº 503	
REDUCAO 16.94 X		REDUCAO 16.94 X		REDUCAO 16.94 X	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)		(mm) (N) (µε)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	2170 23078.06	2.00	2144 22573.32	2.00	2166 22825.15
4.00	2263 23847.33	4.00	2030 21392.00	4.00	2158 22740.85
6.00	2280 24026.40	6.00	2012 21202.31	6.00	2120 22340.41
8.00	2302 24258.31	8.00	2030 21392.00	8.00	2123 22372.02
10.00	2290 24131.85	10.00	2030 21392.00	10.00	2078 22108.57
MEDIA	F501= 24066.00	MEDIA	F502= 21344.57	MEDIA	F503= 22390.46

TABELA 5.23 - Variação da força (C.P. 504 - 506)

CORPO DE PROVA N.º 504		CORPO DE PROVA N.º 505		CORPO DE PROVA N.º 506	
REDUCAO 15,74 %		REDUCAO 15,74 %		REDUCAO 15,74 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1735 20390.89	2.00	1742 20464.66	2.00	1932 20359.28
4.00	1502 20043.14	4.00	1854 19537.32	4.00	1975 20812.41
6.00	1870 19705.73	6.00	1865 17653.24	6.00	1828 17263.33
8.00	1858 19579.47	8.00	1922 20253.90	8.00	1846 19389.79
10.00	1863 17632.16	10.00	1750 20548.76	10.00	1844 19431.94
MEDIA	F504= 19740.17	MEDIA	F505= 19998.35	MEDIA	F506= 19724.37

TABELA 5.24 - Variação da força (C.P. 507 - 509)

CORPO DE PROVA N.º 507		CORPO DE PROVA N.º 508		CORPO DE PROVA N.º 509	
REDUCAO 15,74 %		REDUCAO 15,74 %		REDUCAO 15,74 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1753 20530.57	2.00	1887 19906.15	2.00	1866 19663.77
4.00	1883 19842.92	4.00	1790 18862.89	4.00	1866 19031.50
6.00	1850 17600.55	6.00	1753 18472.79	6.00	1775 18704.82
8.00	1894 19958.84	8.00	1782 18778.59	8.00	1790 18862.89
10.00	1874 17958.84	10.00	1776 18726.12	10.00	1771 18873.43
MEDIA	F507= 19840.29	MEDIA	F508= 18760.15	MEDIA	F509= 18868.16

TABELA 5.25 - Variação da força (510 - 512)

CORPO DE PROVA N.º 510		CORPO DE PROVA N.º 511		CORPO DE PROVA N.º 512	
REDUCAO 16,74 %		REDUCAO 16,74 %		REDUCAO 16,74 %	
PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA		PENETR. DEFORM. FORÇA	
(mm) (N)		(mm) (N)		(mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1680 17703.72	2.00	1655 17440.27	2.00	1695 17861.79
4.00	1732 18251.65	4.00	1743 18367.61	4.00	1770 18652.13
6.00	1750 18441.37	6.00	1764 18588.71	6.00	1800 18768.27
8.00	1735 18283.31	8.00	1754 18483.53	8.00	1784 18799.66
10.00	1745 18388.68	10.00	1755 18474.06	10.00	1797 18736.66
MEDIA	F510= 18341.26	MEDIA	F511= 18483.53	MEDIA	F512= 18839.18

TABELA 5.26 - Variação da força (C.P. 513 - 515)

CORPO DE PROVA N.º 513		CORPO DE PROVA N.º 514		CORPO DE PROVA N.º 515	
REDUCAO 16,94 %					
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)					
ANGULO DA FERRAMENTA 14°					
TEMPO DE DEPOSITAO 25 min.					
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1647 17355.97	2.00	1705 17767.17	2.00	1523 17103.06
4.00	1761 17925.02	4.00	1775 18704.82	4.00	1696 17872.33
5.00	1719 18114.79	5.00	1779 18652.13	5.00	1688 17780.02
8.00	1707 17980.24	8.00	1760 18546.75	8.00	1672 17619.42
10.00	1718 18104.15	10.00	1783 18789.13	10.00	1690 17809.10
MEDIA FS13= 18033.03		MEDIA FS14= 18673.21		MEDIA FS15= 17772.22	

TABELA 5.27 - Variação da força (C.P. 516 - 518)

CORPO DE PROVA N.º 516		CORPO DE PROVA N.º 517		CORPO DE PROVA N.º 518	
REDUCAO 16,94 %					
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)					
ANGULO DA FERRAMENTA 14°					
TEMPO DE DEPOSITAO 35 min.					
0.00	0	0	0	0.00	0
2.00	1669 17587.00	2.00	1675 17651.03	2.00	1604 16702.84
4.00	1726 18125.24	4.00	1730 18230.62	4.00	1656 17809.10
5.00	1742 18357.07	5.00	1762 18567.83	5.00	1670 17598.34
8.00	1738 18314.92	8.00	1751 18451.91	8.00	1653 17419.20
10.00	1755 18474.06	10.00	1763 18578.37	10.00	1677 17672.11
MEDIA FS16= 18322.82		MEDIA FS17= 18457.18		MEDIA FS18= 17624.68	

TABELA 5.28 - Variação da força (C.P. 519 - 521)

CORPO DE PROVA N.º 519		CORPO DE PROVA N.º 520		CORPO DE PROVA N.º 521	
REDUCAO 16,94 %					
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)					
ANGULO DA FERRAMENTA 14°					
TEMPO DE DEPOSITAO 45 min.					
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	1647 17355.97	2.00	1685 17756.41	2.00	1820 19179.03
4.00	1684 17745.87	4.00	1723 18156.85	4.00	1904 20064.22
5.00	1699 17903.94	5.00	1750 18441.37	5.00	1720 20232.82
8.00	1680 17703.72	8.00	1752 18462.45	8.00	1930 20338.20
10.00	1690 17809.10	10.00	1763 18578.37	10.00	1885 19864.00
MEDIA FS19= 17790.66		MEDIA FS20= 18409.76		MEDIA FS21= 20124.81	

TABELA 5.31 - Variação da força (C.P. 607 - 609)

CORPO DE PROVA Nº 607			CORPO DE PROVA Nº 608			CORPO DE PROVA Nº 609		
REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
(mm) (N)			(mm) (N)			(mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	2445	23763.24	2.00	2520	26535.58	2.00	2530	26660.96
4.00	2458	25620.23	4.00	2522	26576.66	4.00	2515	26502.89
6.00	2432	25620.24	6.00	2476	26091.71	6.00	2505	26397.51
8.00	2427	25575.35	8.00	2460	25923.31	8.00	2511	26460.74
10.00	2475	26081.37	10.00	2347	26840.11	10.00	2475	26081.37
MEDIA F607= 25796.85			MEDIA F608= 26358.00			MEDIA F609= 26360.63		

TABELA 5.30 - Variação da força (C.P. 604 - 606)

CORPO DE PROVA Nº 604			CORPO DE PROVA Nº 605			CORPO DE PROVA Nº 606		
REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
(mm) (N)			(mm) (N)			(mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	2539	26753.80	2.00	2531	26671.50	2.00	2211	23299.36
4.00	2629	27704.22	4.00	2650	28347.03	4.00	2549	26861.18
6.00	2646	27883.36	6.00	2737	28853.37	6.00	2524	26397.73
8.00	2688	28325.95	8.00	2703	28484.02	8.00	2530	26660.96
10.00	2730	28768.55	10.00	2723	28694.78	10.00	2572	27103.55
MEDIA F604= 28170.52			MEDIA F605= 28597.31			MEDIA F606= 26805.86		

TABELA 5.29 - Variação da força (601 - 603)

CORPO DE PROVA Nº 601			CORPO DE PROVA Nº 602			CORPO DE PROVA Nº 603		
REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %			REDUCAO 24.75 %		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
(mm) (N)			(mm) (N)			(mm) (N)		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	2392	25206.73	2.00	2384	25122.42	2.00	2503	26376.44
4.00	2622	27630.45	4.00	2682	28262.73	4.00	2592	27314.31
6.00	2570	27082.48	6.00	2680	28241.65	6.00	2569	27071.94
8.00	2578	27166.78	8.00	2705	28505.10	8.00	2615	27536.69
10.00	2668	28115.20	10.00	2680	28325.95	10.00	2730	28768.55
MEDIA F601= 27498.73			MEDIA F602= 28333.86			MEDIA F603= 27677.87		

TABELA 5.34 - Variação da força (C.P. 710 - 712)

CORPO DE PROVA Nº 710			CORPO DE PROVA Nº 711			CORPO DE PROVA Nº 712		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
REDUCAO 12,56 %			REDUCAO 12,56 %			REDUCAO 12,56 %		
TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 18°			ANGULO DA FERRAMENTA 18°			ANGULO DA FERRAMENTA 18°		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	1740	18336.00	2.00	1875	19738.62	2.00	1650	17387.58
4.00	1745	20456.27	4.00	2110	22235.03	4.00	2060	21708.13
6.00	2110	22235.03	6.00	2294	24174.01	6.00	2300	24237.24
8.00	2210	23288.82	8.00	2374	25017.04	8.00	2427	25275.55
10.00	2290	24131.86	10.00	2463	25934.72	10.00	2390	25185.65
MEDIA F710= 22538.00			MEDIA F711= 24345.25			MEDIA F712= 24176.64		

TABELA 5.33 - Variação da força (C.P. 707 - 709)

CORPO DE PROVA Nº 707			CORPO DE PROVA Nº 708			CORPO DE PROVA Nº 709		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
REDUCAO 12,56 %			REDUCAO 12,56 %			REDUCAO 12,56 %		
TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 18°			ANGULO DA FERRAMENTA 18°			ANGULO DA FERRAMENTA 18°		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	2110	22235.03	2.00	1970	20757.72	2.00	1880	19811.31
4.00	2440	25712.55	4.00	2400	25291.03	4.00	2340	24658.75
6.00	2695	28397.72	6.00	2710	28557.79	6.00	2650	27925.51
8.00	2853	30064.71	8.00	2930	30876.13	8.00	2825	29769.65
10.00	2955	31139.58	10.00	3070	32351.44	10.00	2939	30970.97
MEDIA F707= 28829.14			MEDIA F708= 29269.10			MEDIA F709= 28331.22		

TABELA 5.32 - Variação da força (C.P. 610 - 612)

CORPO DE PROVA Nº 610			CORPO DE PROVA Nº 611			CORPO DE PROVA Nº 612		
PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA			PENETR. DEFORM. FORÇA		
REDUCAO 24,75 %			REDUCAO 24,75 %			REDUCAO 24,75 %		
TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.			TEMPO DE DEPOSITAO 15 min.		
ANGULO DA FERRAMENTA 14°			ANGULO DA FERRAMENTA 14°			ANGULO DA FERRAMENTA 14°		
0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00
2.00	2250	23710.34	2.00	2509	26439.66	2.00	2428	25386.09
4.00	2497	26313.21	4.00	2524	26597.73	4.00	2473	26060.30
6.00	2505	26397.51	6.00	2562	26978.17	6.00	2470	26028.69
8.00	2525	26608.27	8.00	2570	27082.48	8.00	2510	26450.20
10.00	2569	27071.94	10.00	2553	26903.33	10.00	2578	27166.78
MEDIA F610= 26597.73			MEDIA F611= 26895.43			MEDIA F612= 26426.49		

Com os resultados obtidos nos testes de extrusão (tabela 5.6 a 5.35) pode-se, através das expressões teóricas, preparar as tabelas 5.36 a 5.38 e figuras 5.9 a 5.53 que apresentam:

- Distribuição da força em função da penetração do punção
- Variação da força em função da velocidade
- Valor médio da força de extrusão para cada camada
- Tensão de conformação (calculada com a força medida)
- Tensão efetiva (expressão 4.24)
- Fator de atrito (expressão 4.25)

CORPO DE PROVA Nº 810		CORPO DE PROVA Nº 811		CORPO DE PROVA Nº 812	
REDUCAO 16.94 X		REDUCAO 16.74 X		REDUCAO 16.74 X	
PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)		PENETR. DEFORM. FORÇA (mm) (N)	
0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.00	2110 22235.03	2.00	1770 20770.48	2.00	2070 22024.27
4.00	2450 25817.93	4.00	2240 23604.96	4.00	2470 26239.44
6.00	2720 28663.17	6.00	2410 25396.41	6.00	2745 28726.62
8.00	2878 30328.16	8.00	2465 25976.00	8.00	2890 30454.62
10.00	2909 31497.87	10.00	2480 26134.06	10.00	2960 31192.27
MEDIA	F810= 29076.78	MEDIA	F811= 25277.86	MEDIA	F812= 29203.24

TABELA 5.35 - Variação da força (C.P. 810 - 812)

TABELA 5.36 - Valores calculados para $\alpha = 10^\circ$

REDUÇAO		
12.56%	16.94%	24.75%
F101= 13146.96 F(01) = 13158.36 F102= 13175.04 O xb = 282.57 O ef = 655.44 F103= 13153.97 m = 0.302	F201= 18883.42 F(01) = 17894.28 F202= 17427.10 O xb = 364.75 O ef = 681.73 F203= 17872.33 m = 0.305	F301= 26284.23 F(01) = 26242.06 F302= 26616.17 O xb = 485.01 O ef = 749.06 F303= 25825.83 m = 0.222
F104= 12982.73 F(05) = 13086.35 F204= 17764.31 F(05) = 17608.88 F205= 17514.04 O xb = 359.24 O ef = 681.73 F206= 17548.28 m = 0.293	F107= 11886.56 F(11) = 11718.17 F207= 17087.25 F(11) = 16954.65 F208= 17308.55 O xb = 345.89 O ef = 681.73 F209= 16468.15 m = 0.265	F108= 11757.69 O xb = 251.64 O ef = 655.44 F109= 11710.27 m = 0.214
F110= 11702.37 F(15) = 11838.48 F210= 16418.09 F(15) = 16675.39 F211= 17050.37 O xb = 340.19 O ef = 681.73 F212= 16557.72 m = 0.253	F112= 11750.01 O ef = 655.44 F113= 11863.07 O xb = 254.22 F114= 11702.37 F(15) = 11838.48 F214= 16418.09 F(15) = 16675.39 F215= 17050.37 O xb = 340.19 O ef = 681.73 F216= 16557.72 m = 0.253	F117= 11886.56 F(11) = 11718.17 F217= 17087.25 F(11) = 16954.65 F218= 17308.55 O xb = 345.89 O ef = 681.73 F219= 16468.15 m = 0.265
F119= 11702.37 F(15) = 11838.48 F219= 16418.09 F(15) = 16675.39 F220= 17050.37 O xb = 340.19 O ef = 681.73 F221= 16557.72 m = 0.253	F120= 11702.37 F(15) = 11838.48 F220= 16418.09 F(15) = 16675.39 F221= 17050.37 O xb = 340.19 O ef = 681.73 F222= 16557.72 m = 0.253	F121= 11702.37 F(15) = 11838.48 F221= 16418.09 F(15) = 16675.39 F222= 17050.37 O xb = 340.19 O ef = 681.73 F223= 16557.72 m = 0.253

UNIDADES : * FORÇA (F 101 - F 312)..... [N]

* TENSÃO (Qxp ; Def)..... [Mpa]

TABELA 5.37 - Valores calculados para $\alpha = 14^\circ$

REDUÇAO		12.56%	16.94%	24.75%
F401=	17290.11	F(01)= 16973.09	F(01)= 22600.34	F(01)= 27836.82
F402=	16773.75	$\sigma_{xb} = 364.49$	$\sigma_{xb} = 461.07$	$\sigma_{xb} = 514.48$
F403=	16855.42	$\sigma_{ef} = 649.59$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.582	n= 0.594	n= 0.315
F404=	15709.42	F(05)= 16094.93	F(05)= 19820.97	F(05)= 27857.89
F405=	16510.30	$\sigma_{xb} = 345.63$	$\sigma_{xb} = 404.37$	$\sigma_{xb} = 514.87$
F406=	16065.07	$\sigma_{ef} = 649.59$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.511	n= 0.433	n= 0.315
F407=	15540.81	F(11)= 15791.96	F(11)= 19156.20	F(11)= 26171.83
F408=	15748.93	$\sigma_{xb} = 339.12$	$\sigma_{xb} = 390.80$	$\sigma_{xb} = 483.71$
F409=	16086.15	$\sigma_{ef} = 649.59$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.486	n= 0.394	n= 0.258
F410=	16028.19	F(15)= 15909.64	F(15)= 18554.66	F(15)= 26639.89
F411=	15996.57	$\sigma_{xb} = 341.65$	$\sigma_{xb} = 378.53$	$\sigma_{xb} = 492.36$
F412=	15704.15	$\sigma_{ef} = 649.59$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.496	n= 0.359	n= 0.274
F501=	24666.00	F(01)= 22600.34	F(01)= 22600.34	F(01)= 27836.82
F502=	21344.57	$\sigma_{xb} = 461.07$	$\sigma_{xb} = 461.07$	$\sigma_{xb} = 514.48$
F503=	22390.46	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.594	n= 0.594	n= 0.315
F504=	19740.17	F(05)= 19820.97	F(05)= 19820.97	F(05)= 27857.89
F505=	19998.35	$\sigma_{xb} = 404.37$	$\sigma_{xb} = 404.37$	$\sigma_{xb} = 514.87$
F506=	19724.37	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.433	n= 0.433	n= 0.315
F507=	19840.29	F(11)= 19156.20	F(11)= 19156.20	F(11)= 26171.83
F508=	18760.15	$\sigma_{xb} = 390.80$	$\sigma_{xb} = 390.80$	$\sigma_{xb} = 483.71$
F509=	18868.16	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.394	n= 0.394	n= 0.258
F510=	18941.26	F(15)= 18554.66	F(15)= 18554.66	F(15)= 26639.89
F511=	18483.53	$\sigma_{xb} = 378.53$	$\sigma_{xb} = 378.53$	$\sigma_{xb} = 492.36$
F512=	18839.18	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.359	n= 0.359	n= 0.274
F513=	18033.03	F(25)= 18159.48	F(25)= 18159.48	F(25)= 26171.83
F514=	18673.21	$\sigma_{xb} = 370.47$	$\sigma_{xb} = 370.47$	$\sigma_{xb} = 492.36$
F515=	17772.22	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.337	n= 0.337	n= 0.258
F516=	18322.82	F(35)= 18134.90	F(35)= 18134.90	F(35)= 26171.83
F517=	18457.58	$\sigma_{xb} = 369.97$	$\sigma_{xb} = 369.97$	$\sigma_{xb} = 492.36$
F518=	17624.68	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.335	n= 0.335	n= 0.258
F519=	17790.66	F(45)= 18775.08	F(45)= 18775.08	F(45)= 26639.89
F520=	18409.76	$\sigma_{xb} = 383.03$	$\sigma_{xb} = 383.03$	$\sigma_{xb} = 492.36$
F521=	20124.81	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 670.55$	$\sigma_{ef} = 722.81$
		n= 0.372	n= 0.372	n= 0.274

UNIDADES : * FORÇA (F 401 - F 612) [N]

* TENSÃO (Qxp ; Def) [Mpa]

TABELA 5.38 - Valores calculados para $\alpha = 18^\circ$

REDUÇAO																																																																																																																																																																																																																										
12.56%	16.94%	24.75%																																																																																																																																																																																																																								
<table border="1"> <tr> <td>F701=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F702=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F703=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F704=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F705=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F706=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F707=</td> <td>28829.14</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F708=</td> <td>29269.10</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F709=</td> <td>28331.22</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F710=</td> <td>22538.00</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F711=</td> <td>24345.25</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F712=</td> <td>24176.64</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F801=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F802=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F803=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F804=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F805=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F806=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F807=</td> <td>*</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F808=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F809=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F810=</td> <td>29076.78</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F811=</td> <td>25277.86</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F812=</td> <td>27203.24</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F901=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F902=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F903=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F904=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F905=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F906=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F907=</td> <td>*</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F908=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F909=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F910=</td> <td>*</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F911=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F912=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> </table>	F701=	*	F(01)=	F702=	*	σ_{xd} =	F703=	*	σ_{ef} =	F704=	*	F(05)=	F705=	*	σ_{xd} =	F706=	*	σ_{ef} =	F707=	28829.14	F(11)=	F708=	29269.10	σ_{xd} =	F709=	28331.22	σ_{ef} =	F710=	22538.00	F(15)=	F711=	24345.25	σ_{xd} =	F712=	24176.64	σ_{ef} =	F801=	*	F(01)=	F802=	*	σ_{xd} =	F803=	*	σ_{ef} =	F804=	*	F(05)=	F805=	*	σ_{xd} =	F806=	*	σ_{ef} =	F807=	*	F(11)=	F808=	*	σ_{xd} =	F809=	*	σ_{ef} =	F810=	29076.78	F(15)=	F811=	25277.86	σ_{xd} =	F812=	27203.24	σ_{ef} =	F901=	*	F(01)=	F902=	*	σ_{xd} =	F903=	*	σ_{ef} =	F904=	*	F(05)=	F905=	*	σ_{xd} =	F906=	*	σ_{ef} =	F907=	*	F(11)=	F908=	*	σ_{xd} =	F909=	*	σ_{ef} =	F910=	*	F(15)=	F911=	*	σ_{xd} =	F912=	*	σ_{ef} =	<table border="1"> <tr> <td>F801=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F802=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F803=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F804=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F805=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F806=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F807=</td> <td>*</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F808=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F809=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F810=</td> <td>29076.78</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F811=</td> <td>25277.86</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F812=</td> <td>27203.24</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F901=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F902=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F903=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F904=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F905=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F906=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F907=</td> <td>*</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F908=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F909=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F910=</td> <td>*</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F911=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F912=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> </table>	F801=	*	F(01)=	F802=	*	σ_{xd} =	F803=	*	σ_{ef} =	F804=	*	F(05)=	F805=	*	σ_{xd} =	F806=	*	σ_{ef} =	F807=	*	F(11)=	F808=	*	σ_{xd} =	F809=	*	σ_{ef} =	F810=	29076.78	F(15)=	F811=	25277.86	σ_{xd} =	F812=	27203.24	σ_{ef} =	F901=	*	F(01)=	F902=	*	σ_{xd} =	F903=	*	σ_{ef} =	F904=	*	F(05)=	F905=	*	σ_{xd} =	F906=	*	σ_{ef} =	F907=	*	F(11)=	F908=	*	σ_{xd} =	F909=	*	σ_{ef} =	F910=	*	F(15)=	F911=	*	σ_{xd} =	F912=	*	σ_{ef} =	<table border="1"> <tr> <td>F901=</td> <td>*</td> <td>F(01)=</td> </tr> <tr> <td>F902=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F903=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F904=</td> <td>*</td> <td>F(05)=</td> </tr> <tr> <td>F905=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F906=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F907=</td> <td>*</td> <td>F(11)=</td> </tr> <tr> <td>F908=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F909=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> <tr> <td>F910=</td> <td>*</td> <td>F(15)=</td> </tr> <tr> <td>F911=</td> <td>*</td> <td>σ_{xd} =</td> </tr> <tr> <td>F912=</td> <td>*</td> <td>σ_{ef} =</td> </tr> </table>	F901=	*	F(01)=	F902=	*	σ_{xd} =	F903=	*	σ_{ef} =	F904=	*	F(05)=	F905=	*	σ_{xd} =	F906=	*	σ_{ef} =	F907=	*	F(11)=	F908=	*	σ_{xd} =	F909=	*	σ_{ef} =	F910=	*	F(15)=	F911=	*	σ_{xd} =	F912=	*	σ_{ef} =
F701=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F702=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F703=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F704=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F705=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F706=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F707=	28829.14	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F708=	29269.10	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F709=	28331.22	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F710=	22538.00	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F711=	24345.25	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F712=	24176.64	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F801=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F802=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F803=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F804=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F805=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F806=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F807=	*	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F808=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F809=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F810=	29076.78	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F811=	25277.86	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F812=	27203.24	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F901=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F902=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F903=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F904=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F905=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F906=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F907=	*	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F908=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F909=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F910=	*	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F911=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F912=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F801=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F802=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F803=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F804=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F805=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F806=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F807=	*	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F808=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F809=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F810=	29076.78	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F811=	25277.86	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F812=	27203.24	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F901=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F902=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F903=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F904=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F905=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F906=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F907=	*	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F908=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F909=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F910=	*	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F911=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F912=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F901=	*	F(01)=																																																																																																																																																																																																																								
F902=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F903=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F904=	*	F(05)=																																																																																																																																																																																																																								
F905=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F906=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F907=	*	F(11)=																																																																																																																																																																																																																								
F908=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F909=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								
F910=	*	F(15)=																																																																																																																																																																																																																								
F911=	*	σ_{xd} =																																																																																																																																																																																																																								
F912=	*	σ_{ef} =																																																																																																																																																																																																																								

(*) Esses valores não foram considerados, pois os corpos de prova se deformaram por recalque.

UNIDADES : * FORÇA (F 701 - F 912) [N]
 * TENSÃO (σ_{xp} ; σ_{ef}) [Mpa]

FIGURA 5.8 - Corpo de prova deformado por recalque

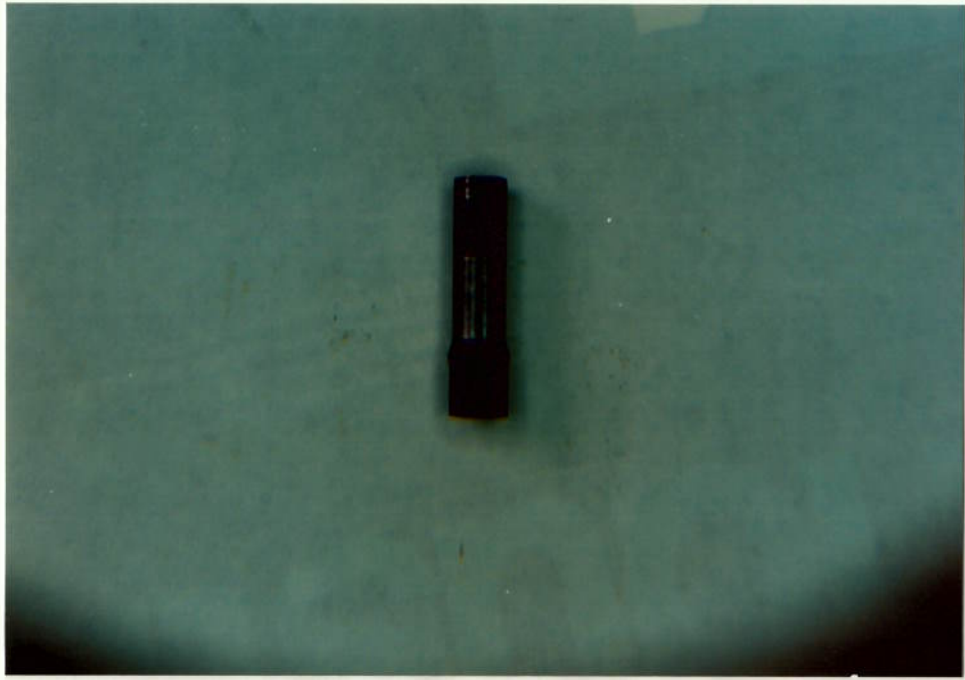


FIGURA 5.10 - Distribuição da força em função da penetração do punção

($\alpha = 10^\circ$ / RED.=12.56% / CAMADA=0.03581 g/dm² (0.5min.))

□ C.P. 104 + C.P.105
 ◇ C.P. 106

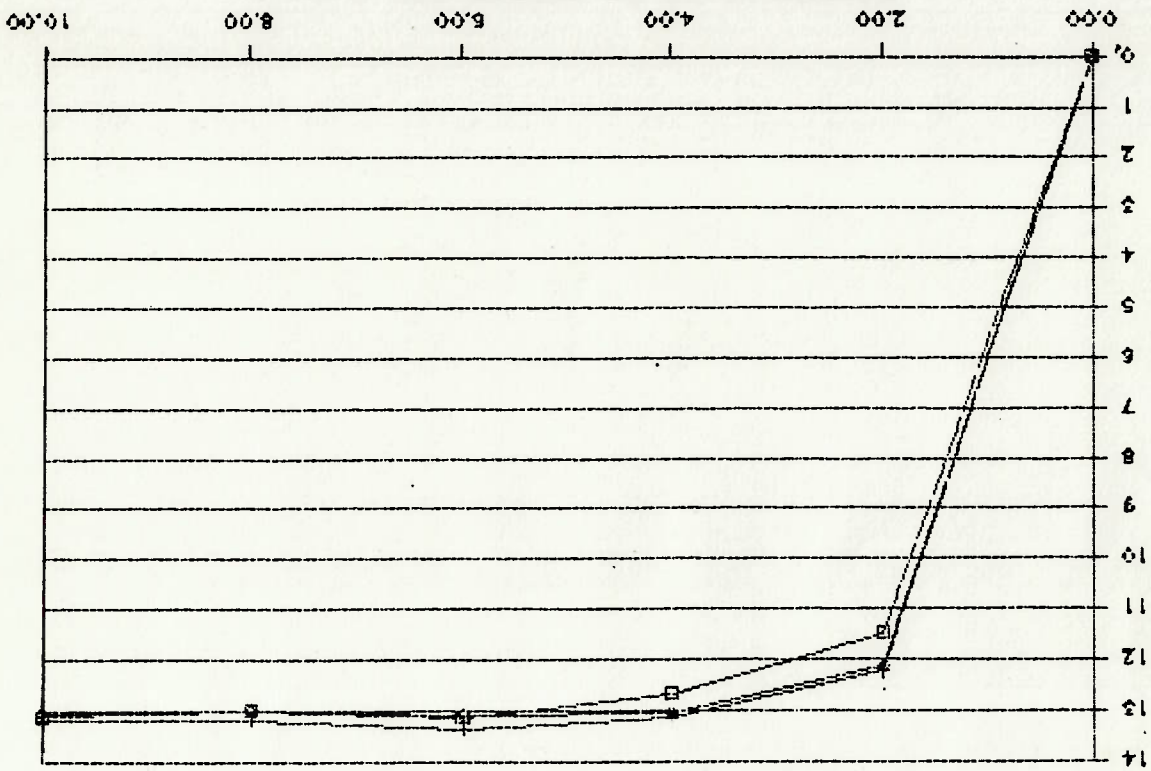
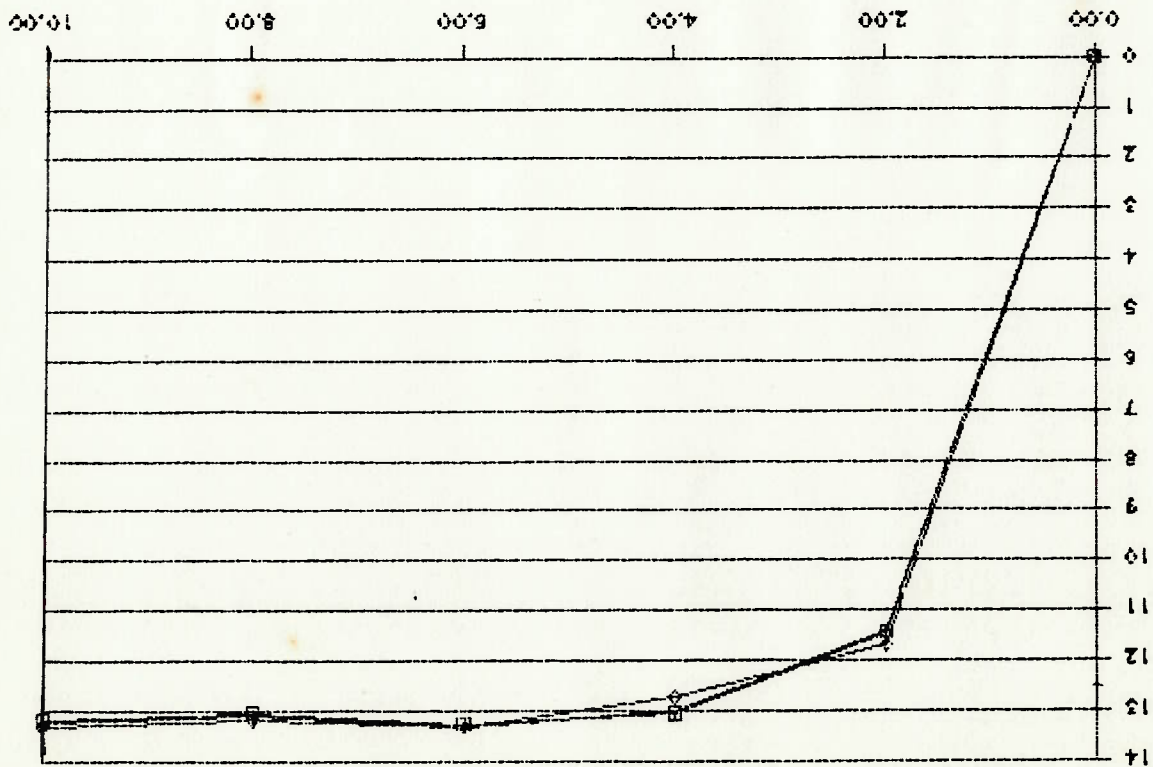


FIGURA 5.9 - Distribuição da força em função da penetração do punção

($\alpha = 10^\circ$ / RED.=12.56% / CAMADA=0.01361 g/dm² (0.1min.))

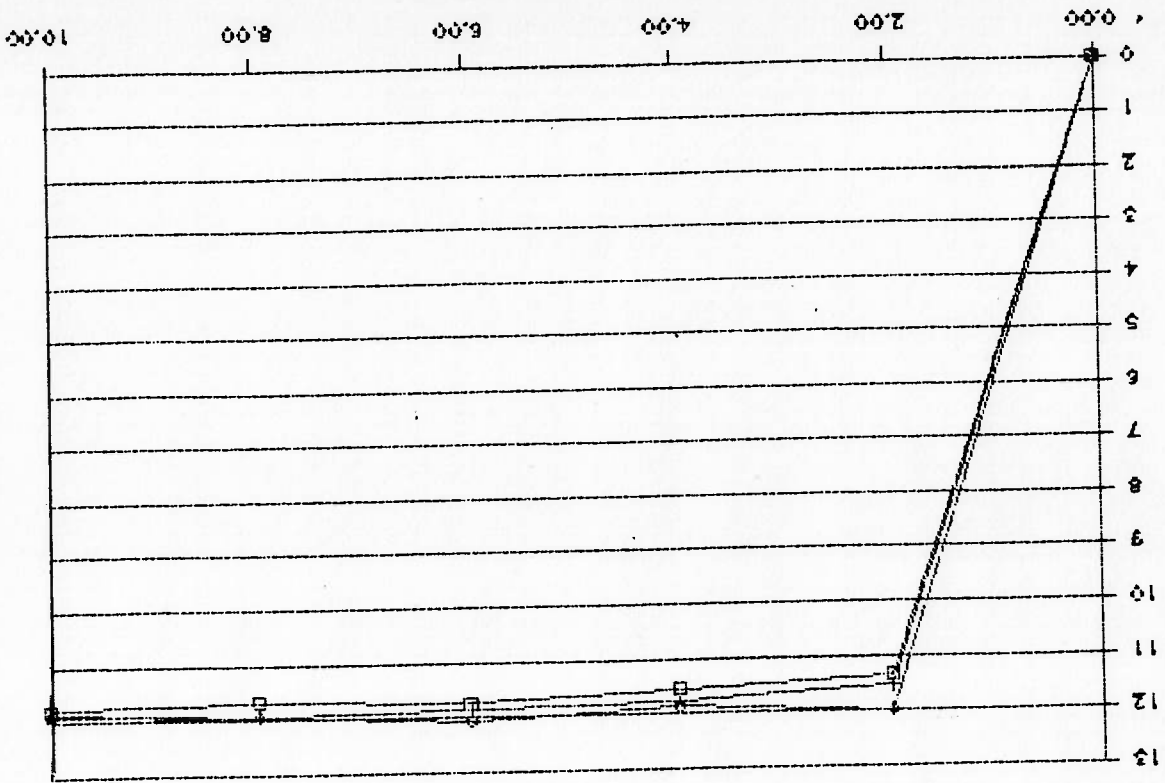
□ C.P. 101 + C.P.102
 ◇ C.P. 103



FORÇA [KN]

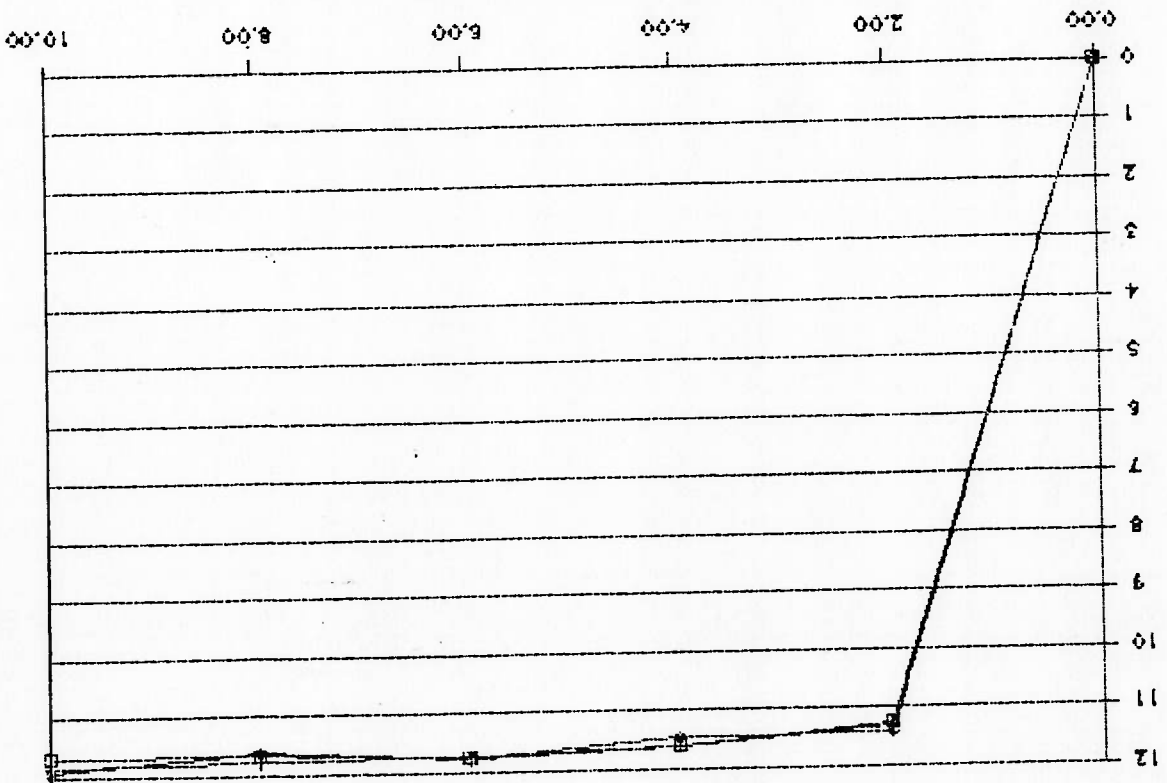
FORÇA [KN]

FIGURA 5.12 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED. = 12.56% / CAMADA = 0.13100 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 110 + C.P. 111
 ◇ C.P. 112
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



FORÇA [N]

FIGURA 5.11 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED. = 12.56% / CAMADA = 0.08996 g/dm² (14min.))
 □ C.P. 107 + C.P. 108
 ◇ C.P. 109
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



FORÇA [N]

FIGURA 5.13 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 10° / RED.=16.94% / CAMADA= 0.01361 g/dm² (01min.))
 □ C.P. 201 + C.P. 202
 ◇ C.P. 203

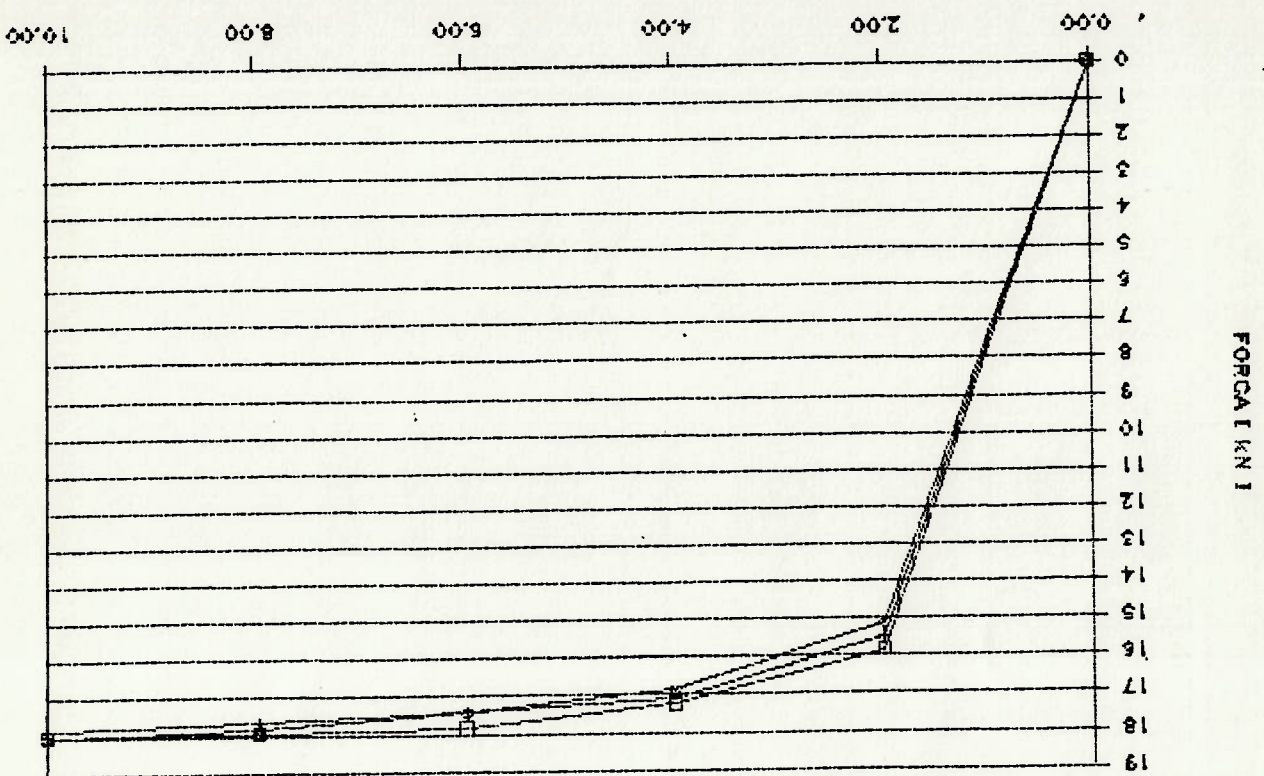


FIGURA 5.14 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 10° / RED.=16.94% / CAMADA= 0.03581 g/dm² (05min.))
 □ C.P. 204 + C.P. 205
 ◇ C.P. 206

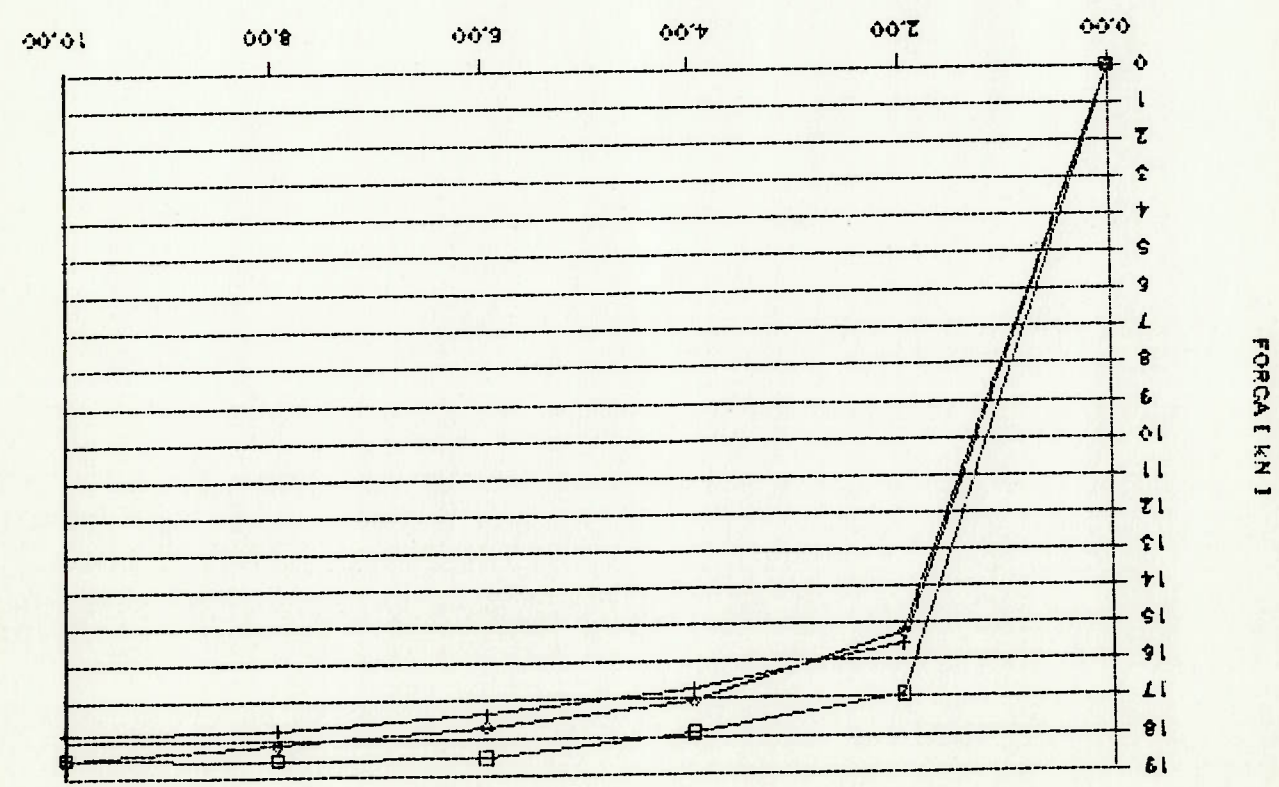
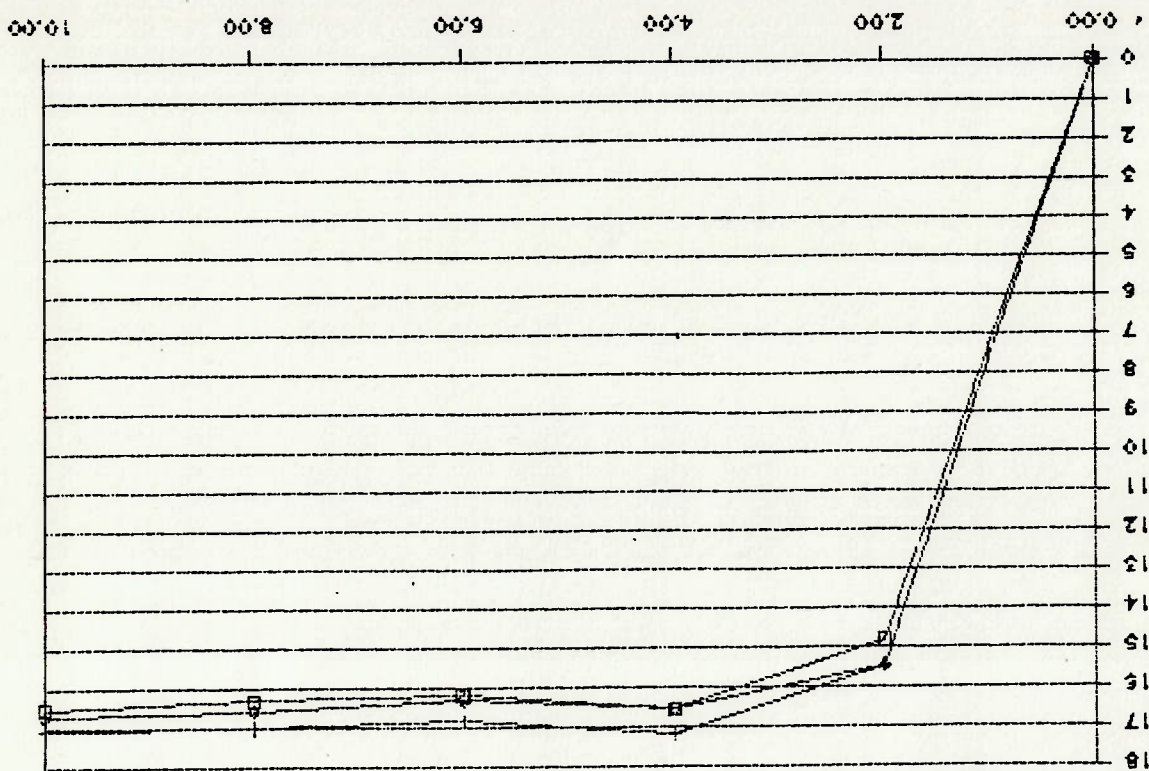
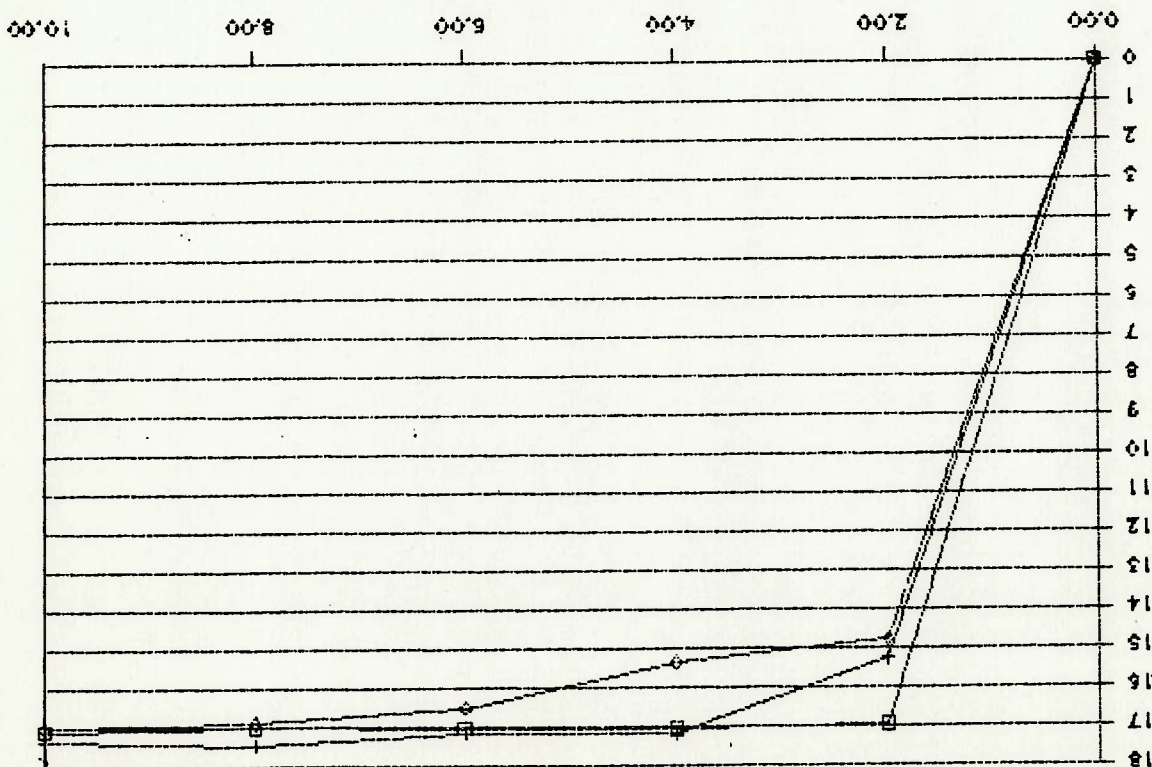


FIGURA 5.16 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED. = 16.94% / CAMADA = 0.13100 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 210 + C.P. 211
 ◇ C.P. 212
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



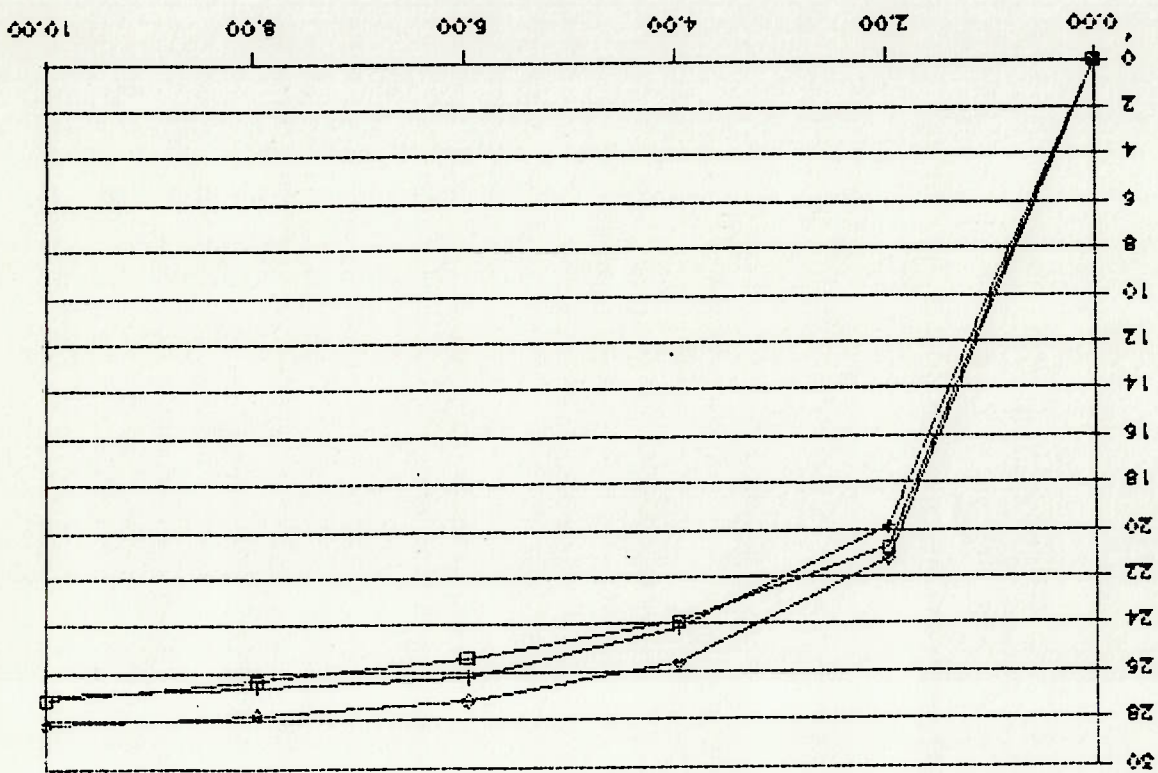
FORÇA [KN]

FIGURA 5.15 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED. = 16.94% / CAMADA = 0.08996 g/dm² (11min.))
 □ C.P. 207 + C.P. 208
 ◇ C.P. 209
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



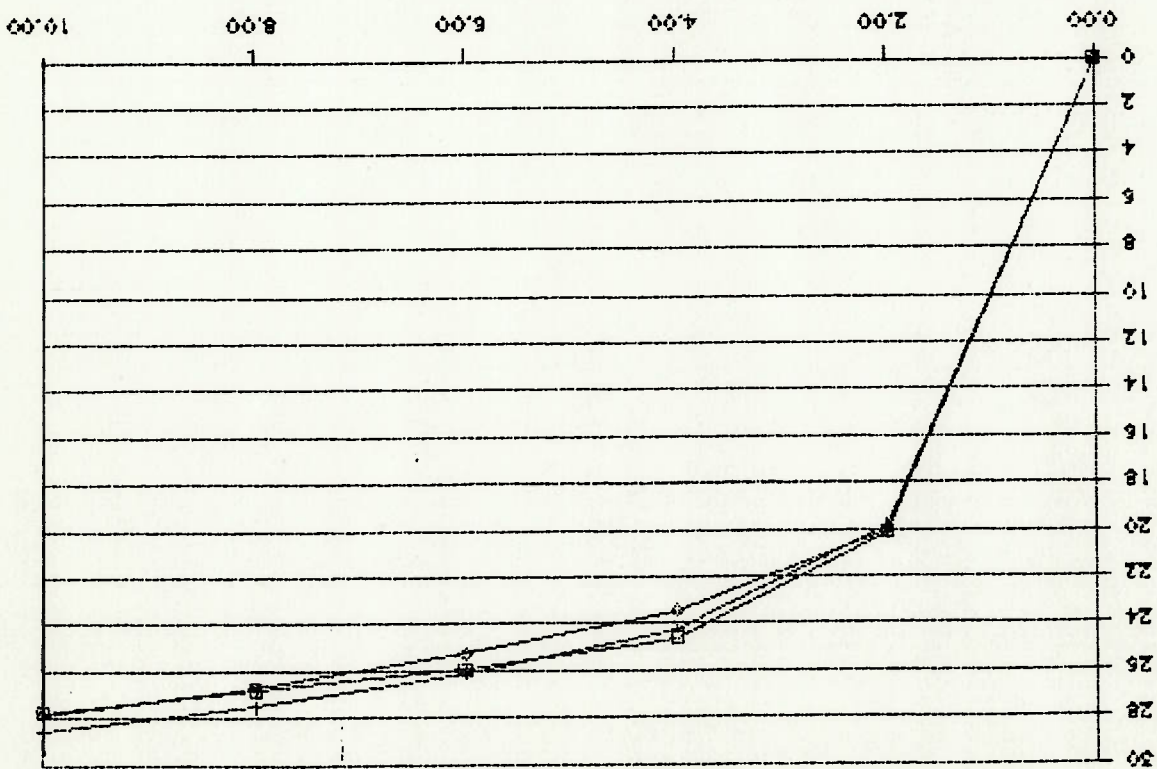
FORÇA [KN]

FIGURA 5.18 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED.=24.75% / CAMADA= 0.03581 g/dm^2 (05 min.))
 □ C.P. 304 + C.P. 305
 ◇ C.P. 306



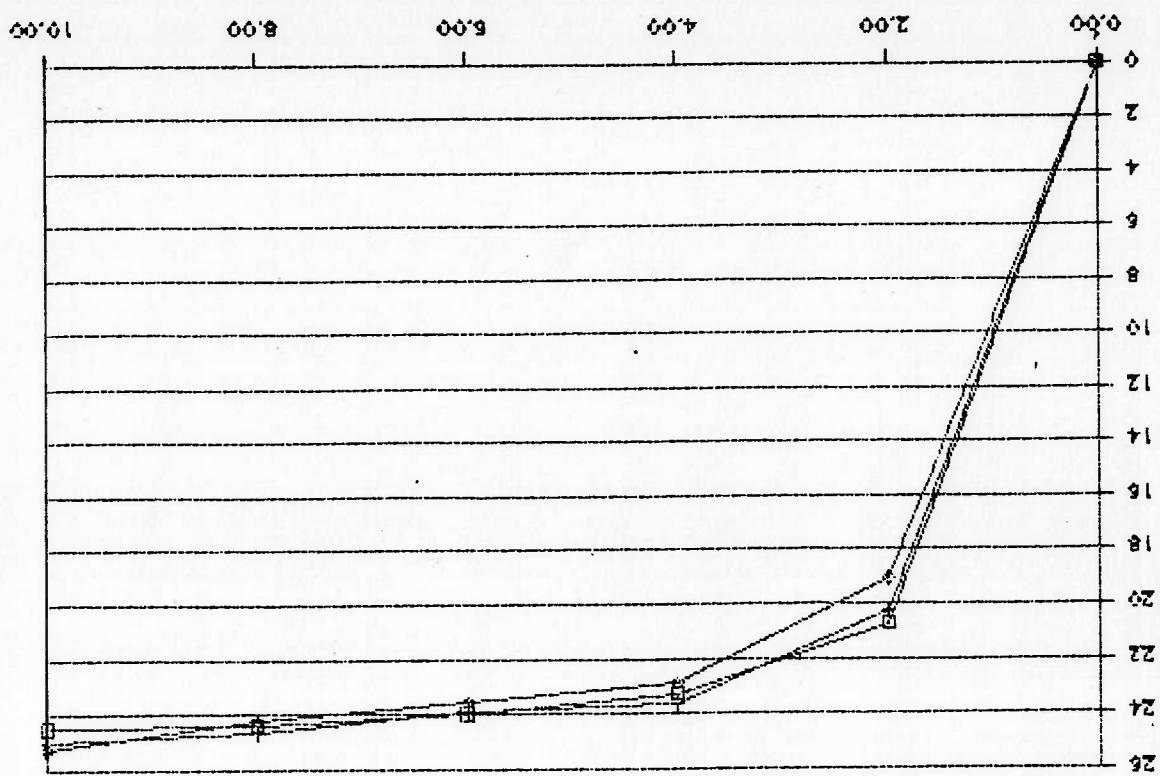
FORÇA [KN]

FIGURA 5.17 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED.=24.75% / CAMADA= 0.01361 g/dm^2 (01 min.))
 □ C.P. 301 + C.P. 302
 ◇ C.P. 303



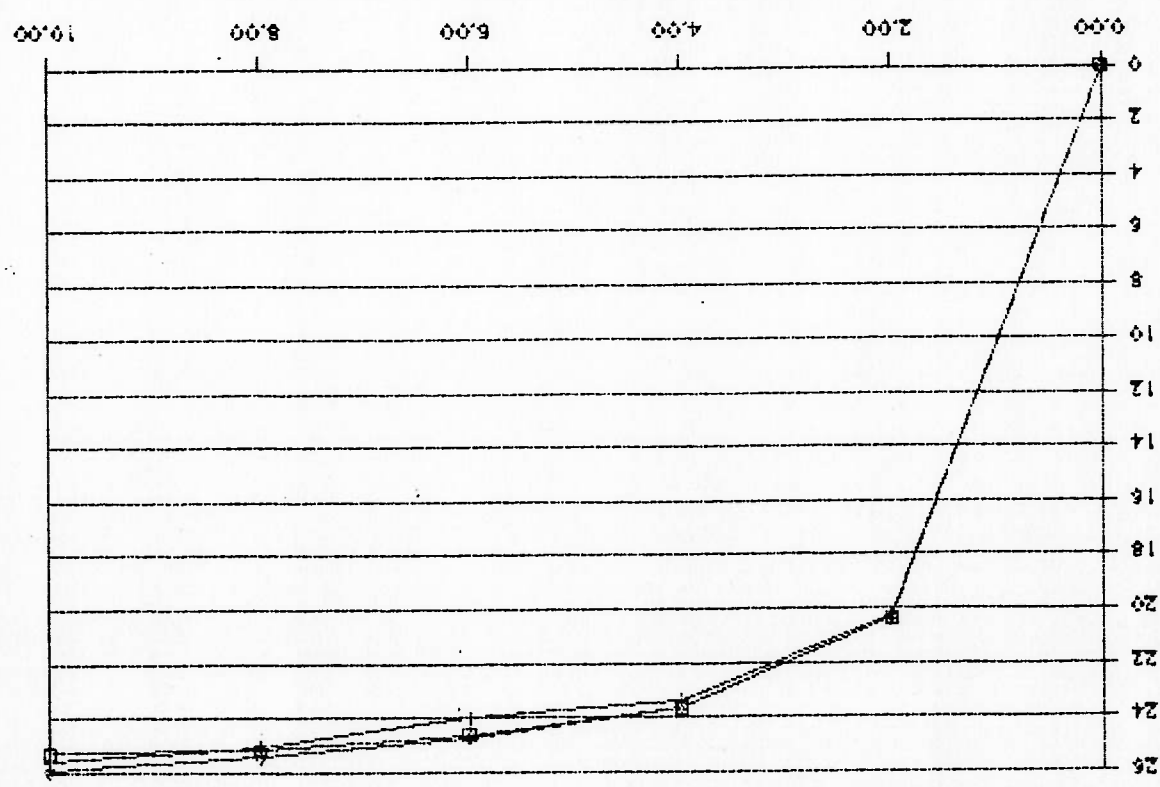
FORÇA [KN]

FIGURA 5.20 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED.=24.75% / CAMADA=0.13100 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 310 + C.P. 311
 ◇ C.P. 312



FORÇA [KN]

FIGURA 5.19 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 10^\circ$ / RED.=24.75% / CAMADA=0.08996 g/dm² (11min.))
 □ C.P. 307 + C.P. 308
 ◇ C.P. 309



FORÇA [KN]

FIGURA 5.22- Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 14^\circ$ / RED.=12.56% / CAMADA= 0.01964 g/dm^2 (05 min.))
 □ C.P. 404 + C.P. 405
 ◇ C.P. 406

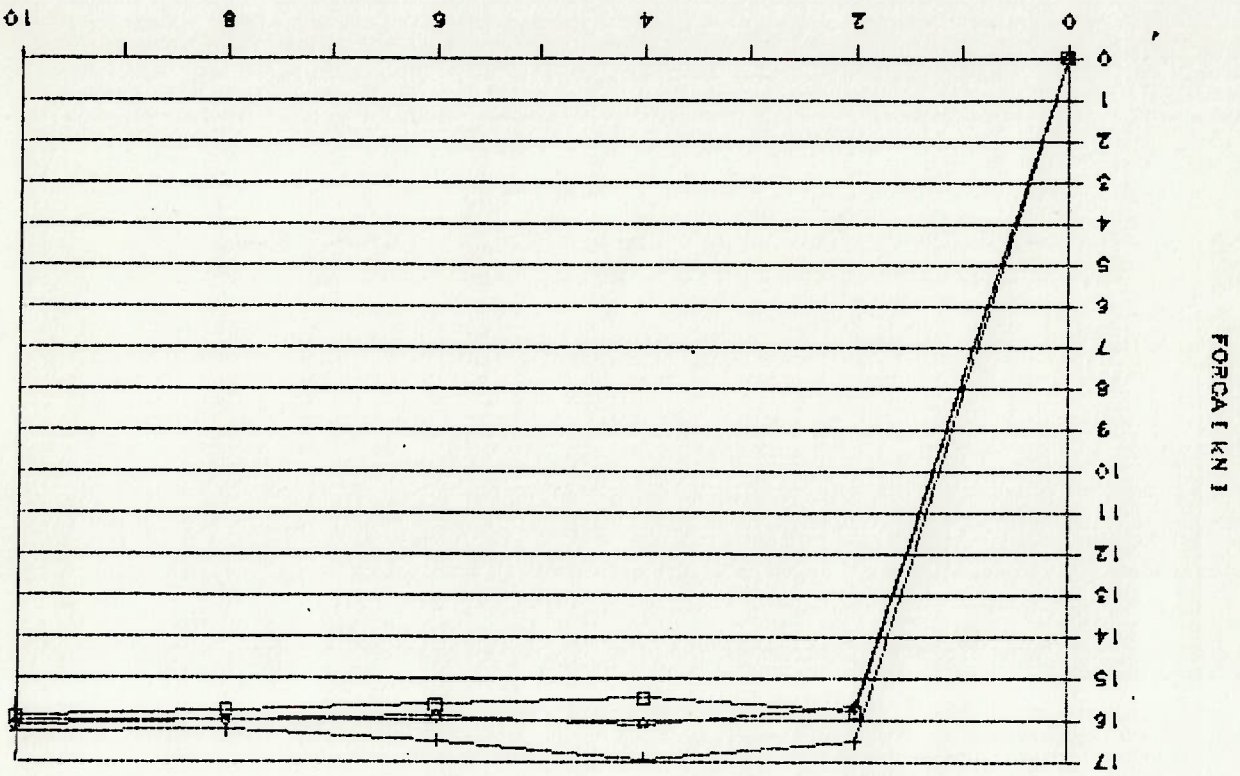


FIGURA 5.21- Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 14^\circ$ / RED.=12.56% / CAMADA= 0.00359 g/dm^2 (01 min.))
 □ C.P. 401 + C.P. 402
 ◇ C.P. 403

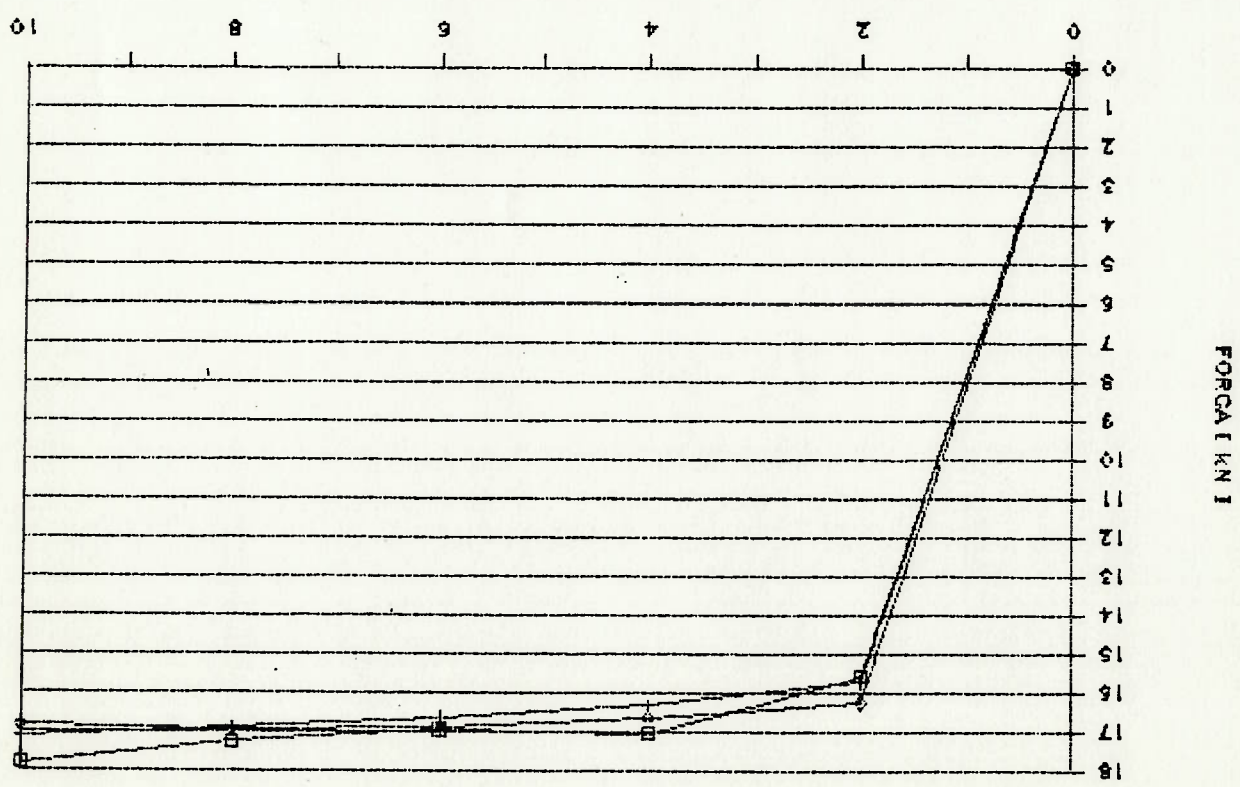
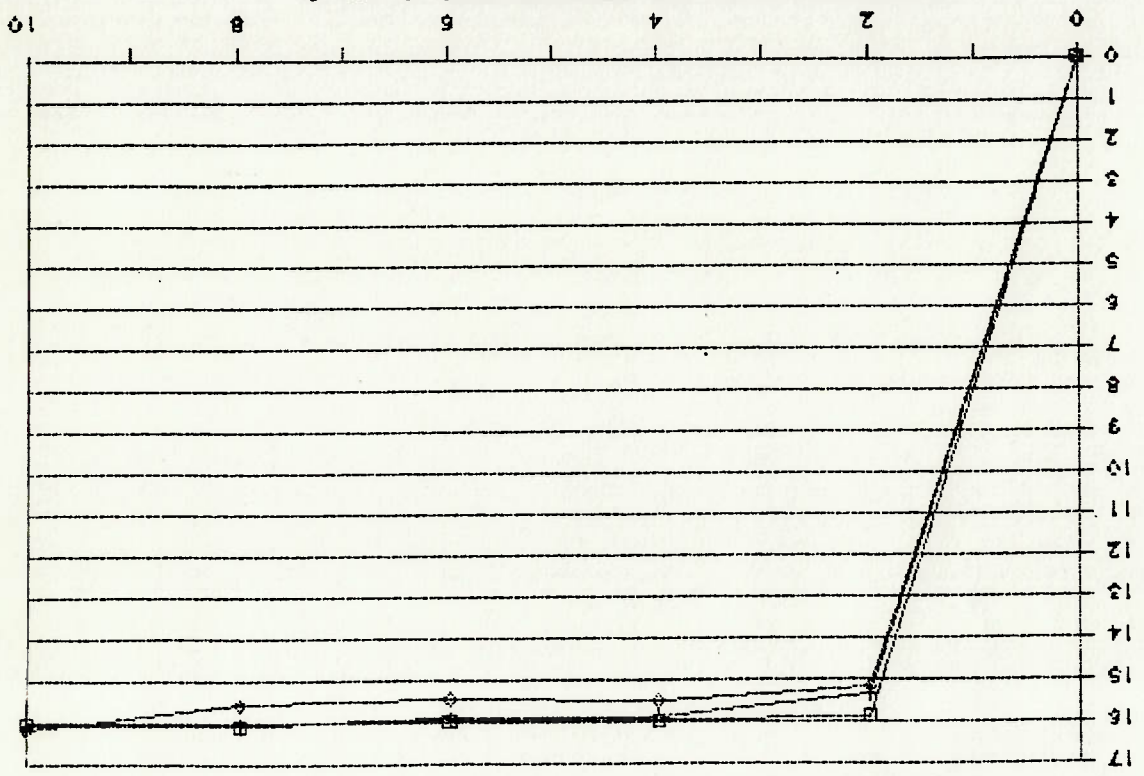
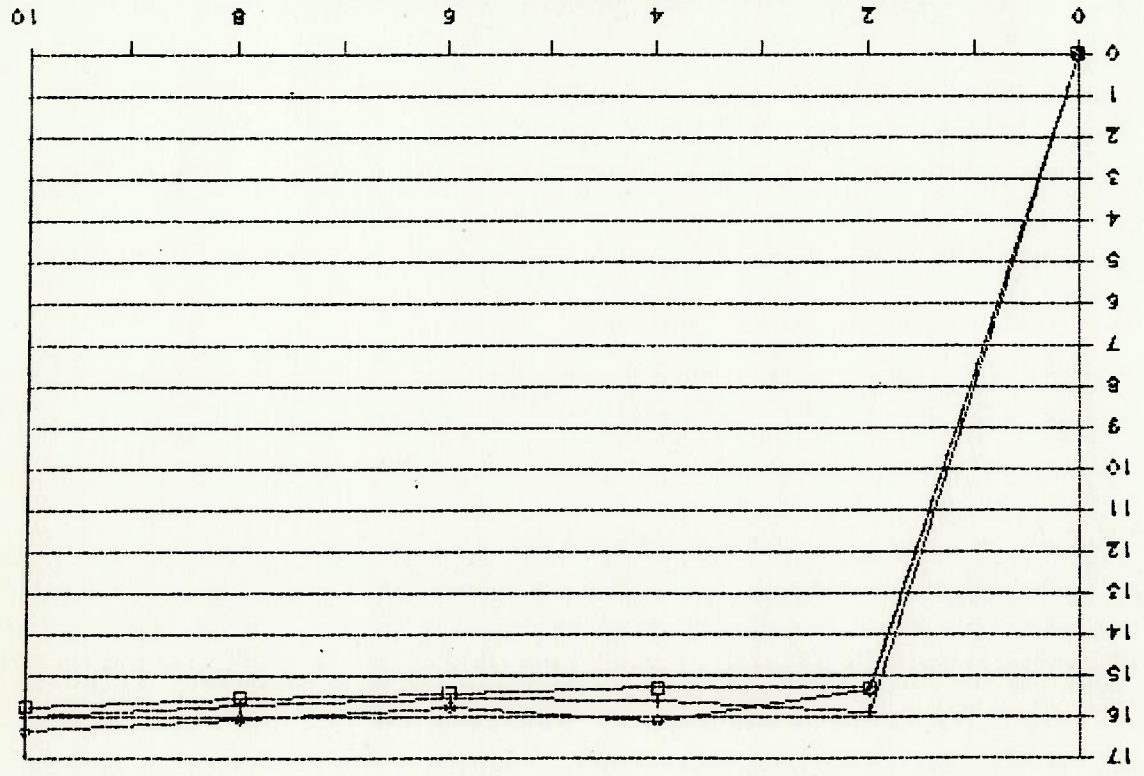


FIGURA 5.24 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 14° / RED.=12.56% / CAMADA= 0.09846 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 410 + C.P. 411
 ◇ C.P. 412
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



FORÇA [N]

FIGURA 5.23 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 14° / RED.=12.56% / CAMADA= 0.05299 g/dm² (1min.))
 □ C.P. 407 + C.P. 408
 ◇ C.P. 409
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]



FORÇA [N]

FIGURA 5.26 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140 / \text{RED.} = 16.94\% / \text{CAMADA} = 0.05569 \text{ g/dm}^2 (0.5 \text{ min.})$)
 □ C.P. 504 + C.P. 505
 ◇ C.P. 506
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

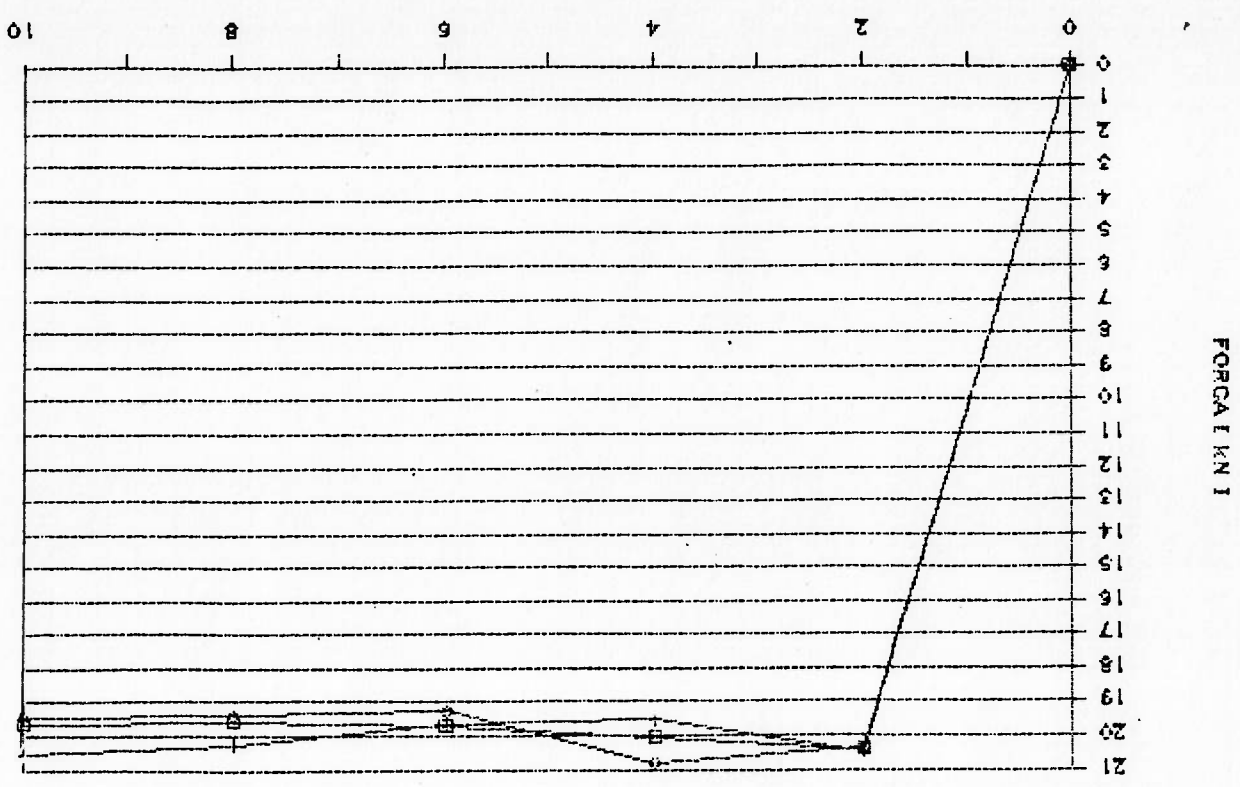


FIGURA 5.25 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140 / \text{RED.} = 16.94\% / \text{CAMADA} = 0.03373 \text{ g/dm}^2 (0.1 \text{ min.})$)
 □ C.P. 501 + C.P. 502
 ◇ C.P. 503
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

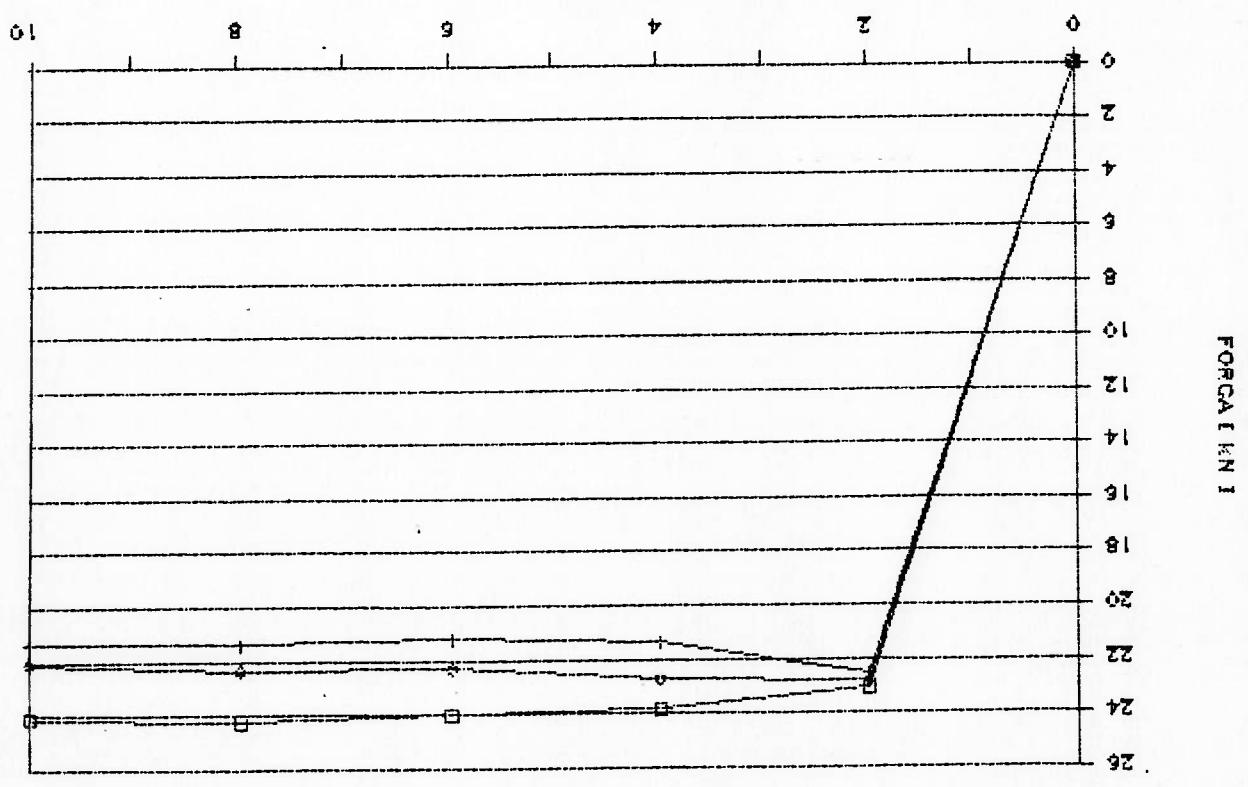


FIGURA 5.28 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140 / \text{RED} = 16.94\% / \text{CAMADA} = 0.05391 \text{ g/dm}^2 (15 \text{ min.})$)
 □ C.P. 510 + C.P. 511
 ◇ C.P. 512

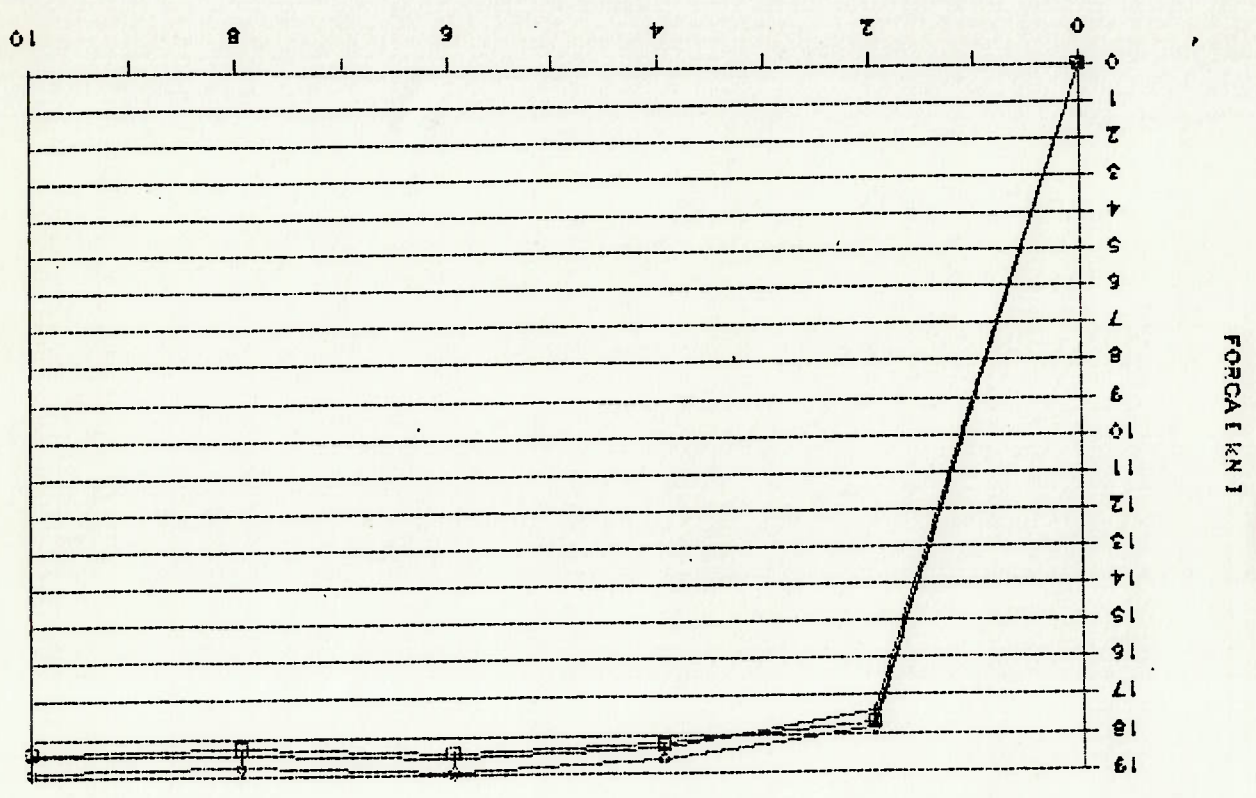


FIGURA 5.27 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140 / \text{RED} = 16.94\% / \text{CAMADA} = 0.06023 \text{ g/dm}^2 (15 \text{ min.})$)
 □ C.P. 507 + C.P. 508
 ◇ C.P. 509

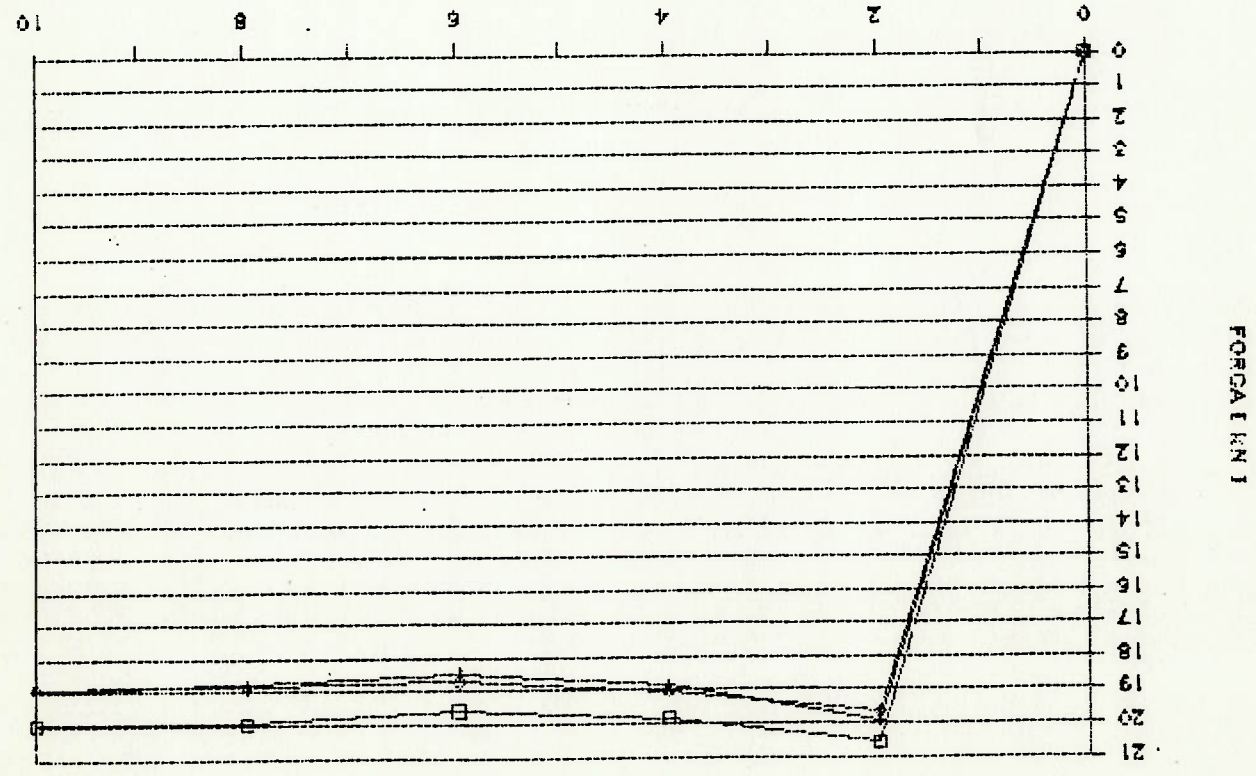


FIGURA 5.30 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140^\circ$ / RED.=16.94% / CAMADA=0.11748 g/dm² (35min.))
 □ C.P. 516 + C.P. 517 ◇ C.P. 518
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

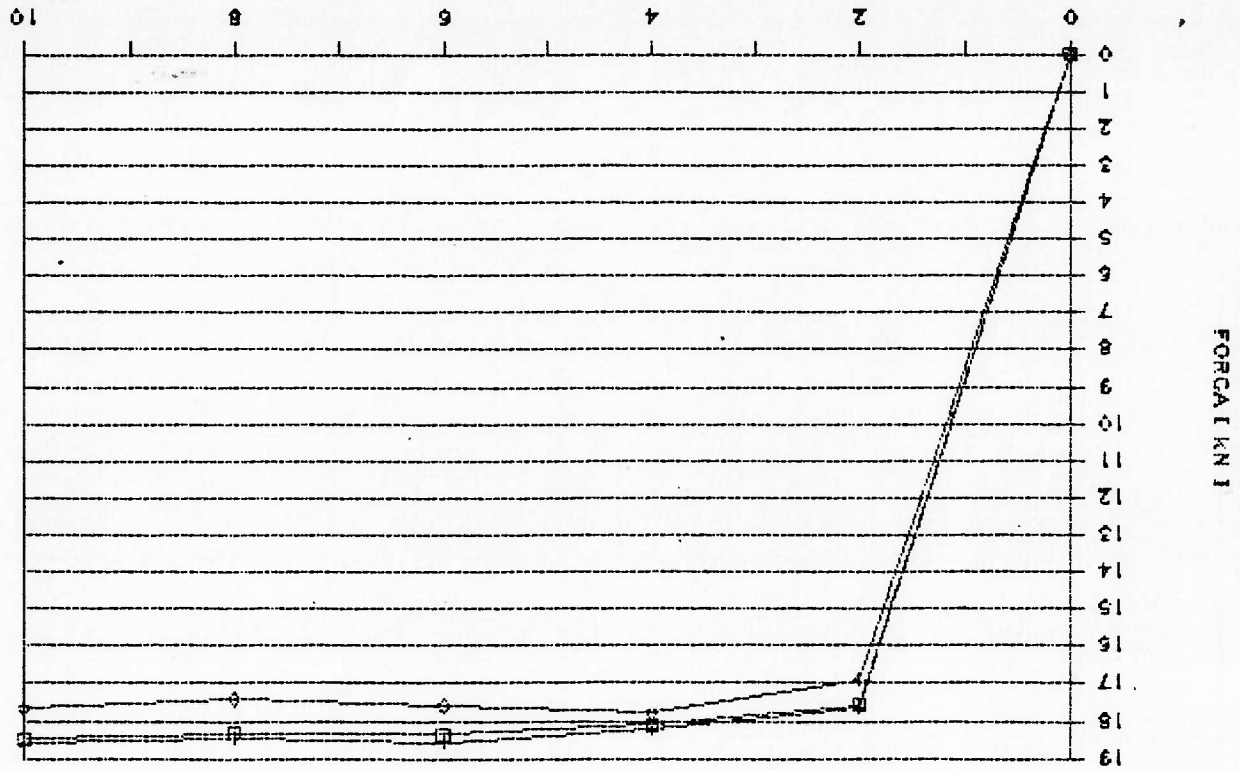


FIGURA 5.29 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 140^\circ$ / RED.=16.94% / CAMADA=0.07920 g/dm² (25min.))
 □ C.P. 513 + C.P. 514 ◇ C.P. 515
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

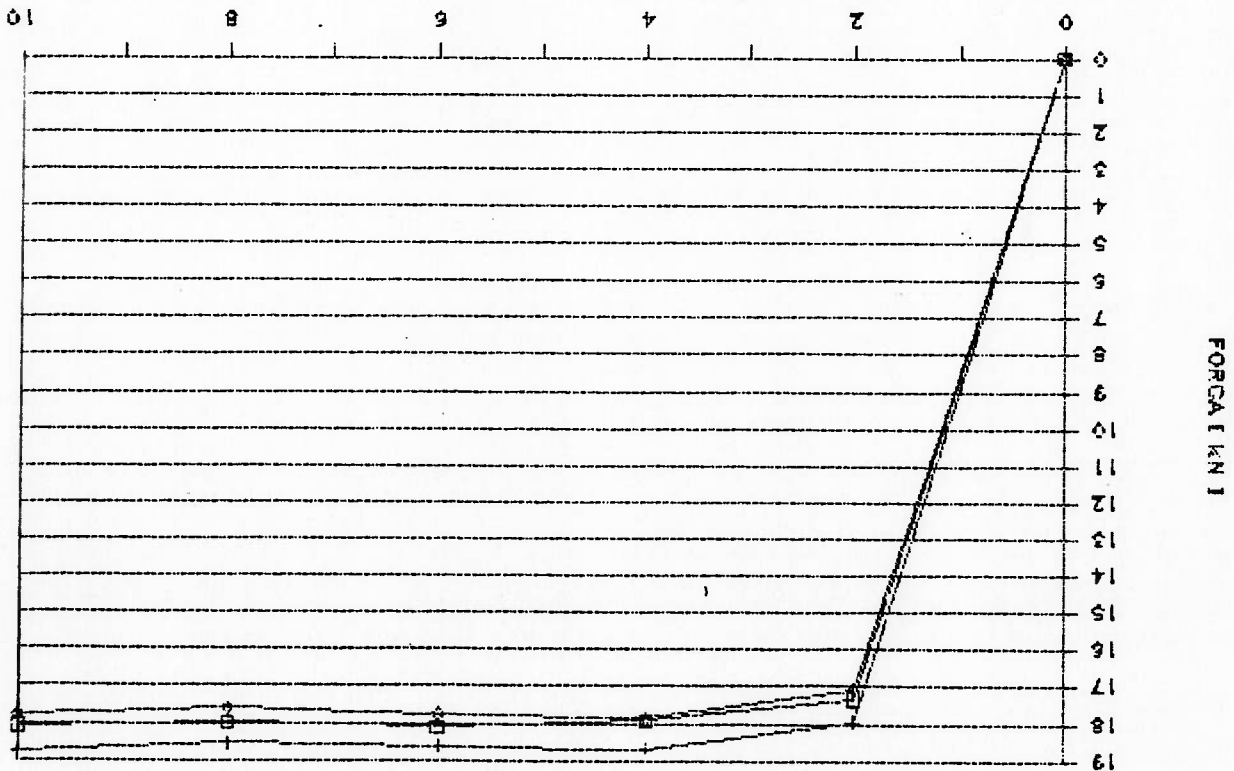
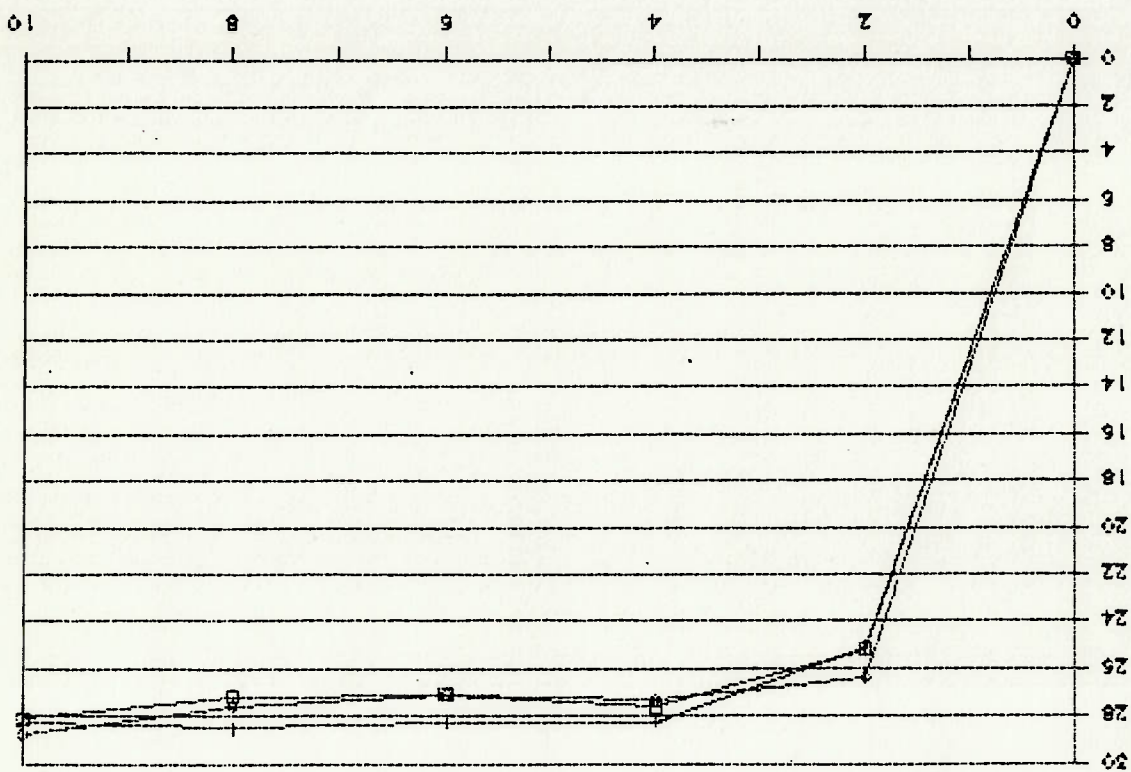
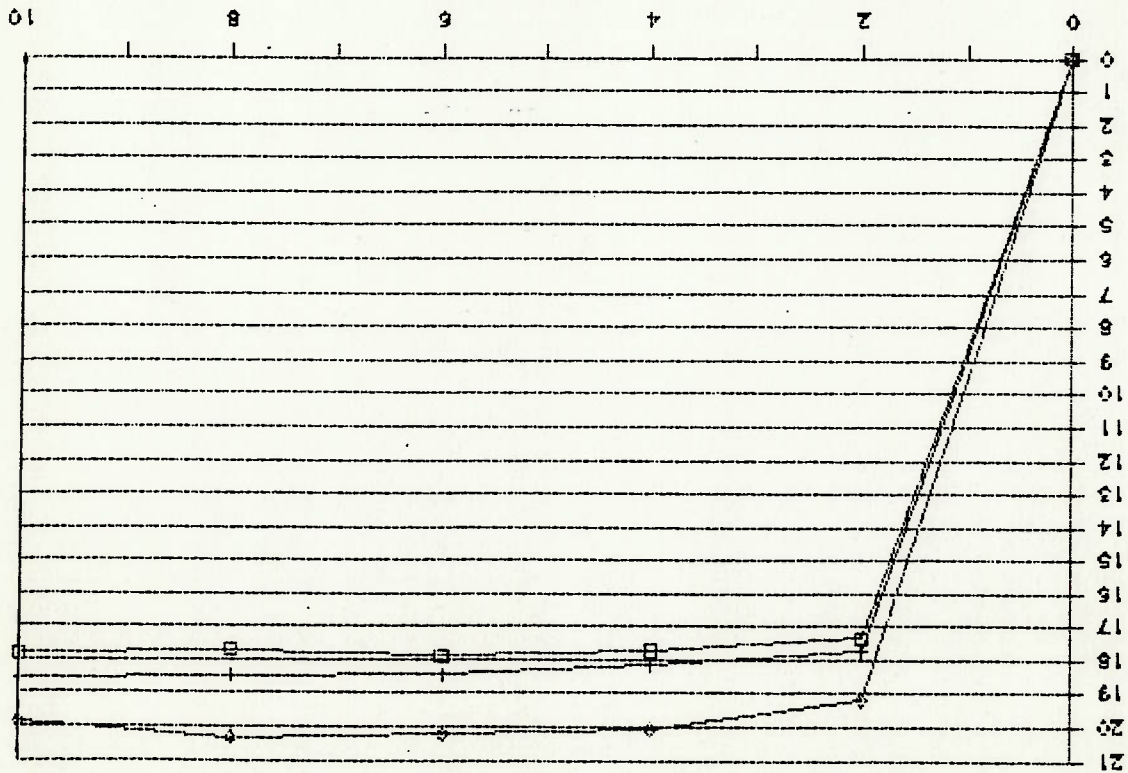


FIGURA 5.32 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 D.C.P. 601 + C.P. 602
 D.C.P. 603
 $\alpha = 140^\circ / \text{RED.} = 24.75\% / \text{CAMADA} = 0.00359 \text{ g/dm}^2 \text{ (} \dot{\phi} \text{min.} \text{)}$



FORÇA (KN)

FIGURA 5.31 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 D.C.P. 519 + C.P. 520
 D.C.P. 521
 $\alpha = 140^\circ / \text{RED.} = 16.94\% / \text{CAMADA} = 0.13214 \text{ g/dm}^2 \text{ (} \dot{\phi} \text{min.} \text{)}$



FORÇA (KN)

FIGURA 5.34 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 140° / RED.=24.75% / CAMADA= 0.05299 g/dm² (1min.))
 □ C.P. 607 + C.P.608
 ◇ C.P. 609

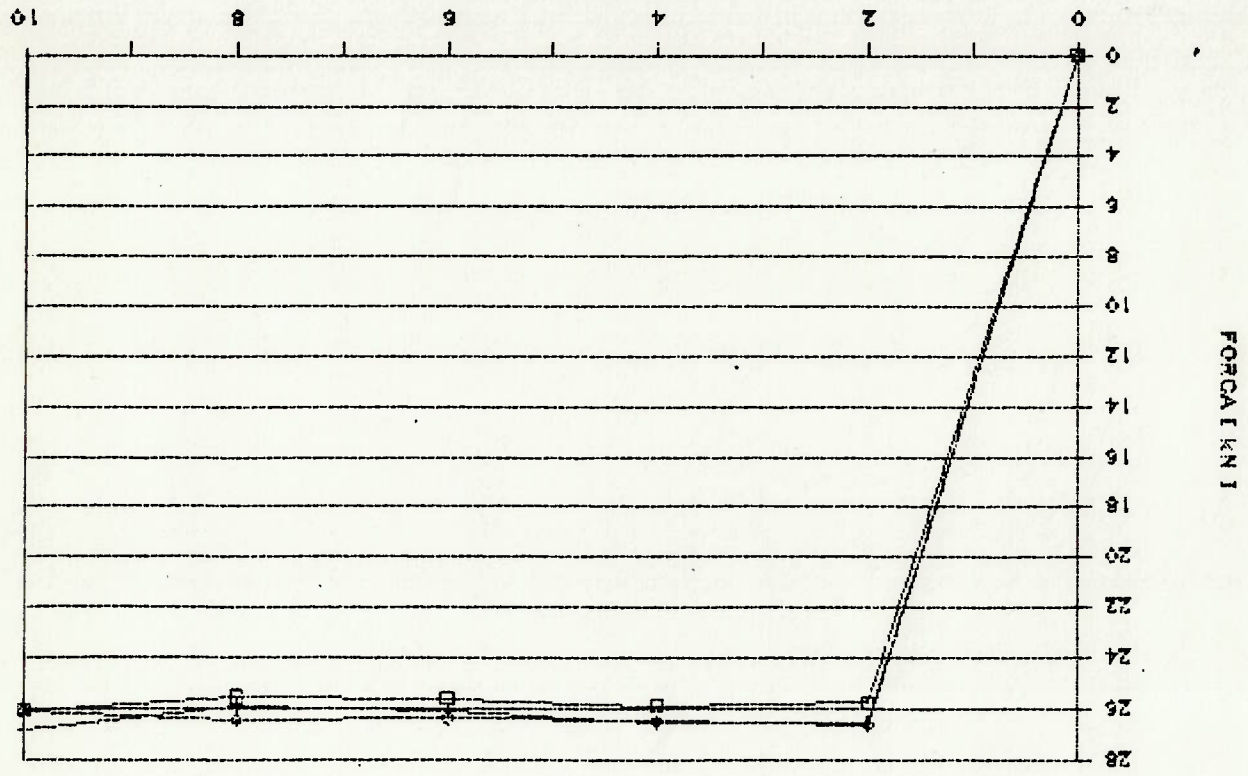


FIGURA 5.33 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 (α = 140° / RED.=24.75% / CAMADA= 0.01964 g/dm² (05min.))
 □ C.P. 604 + C.P.605
 ◇ C.P. 606

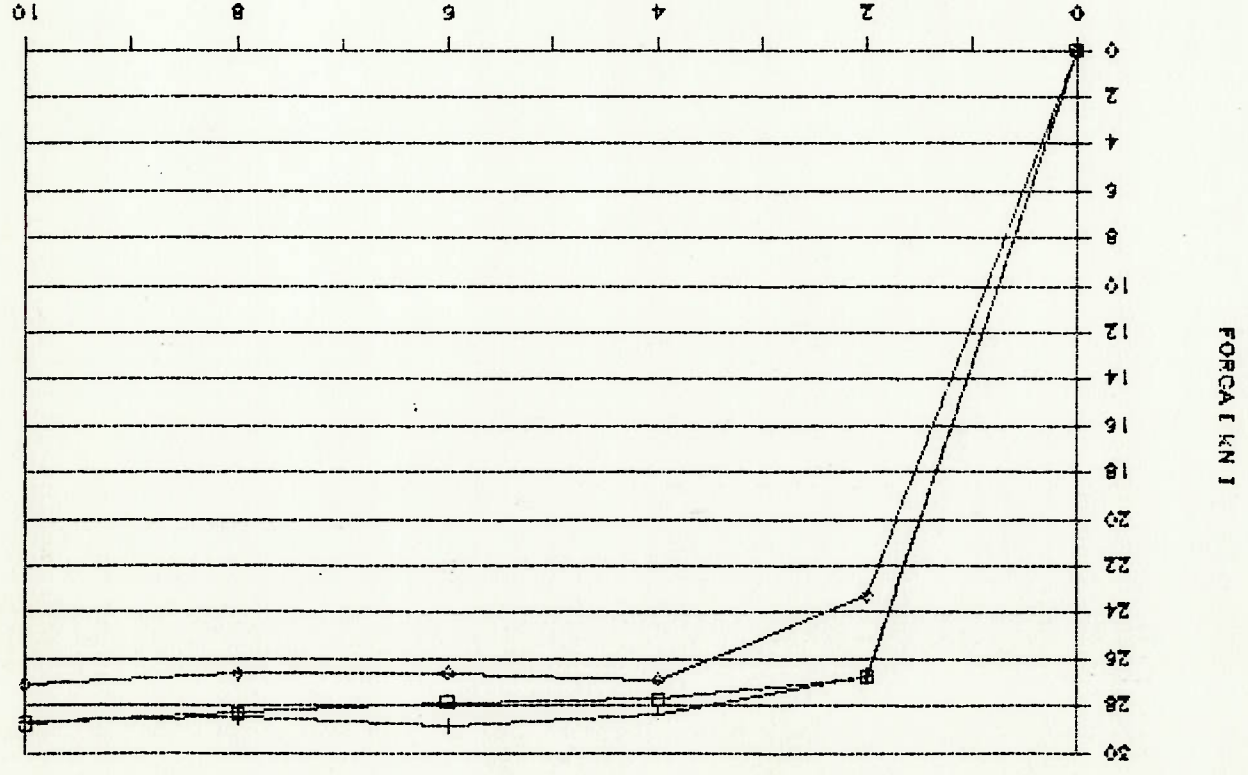


FIGURA 5.36- Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 18^\circ$ / RED.=12.56% / CAMADA=0.09073 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 707 + C.P.708
 ◇ C.P. 709
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

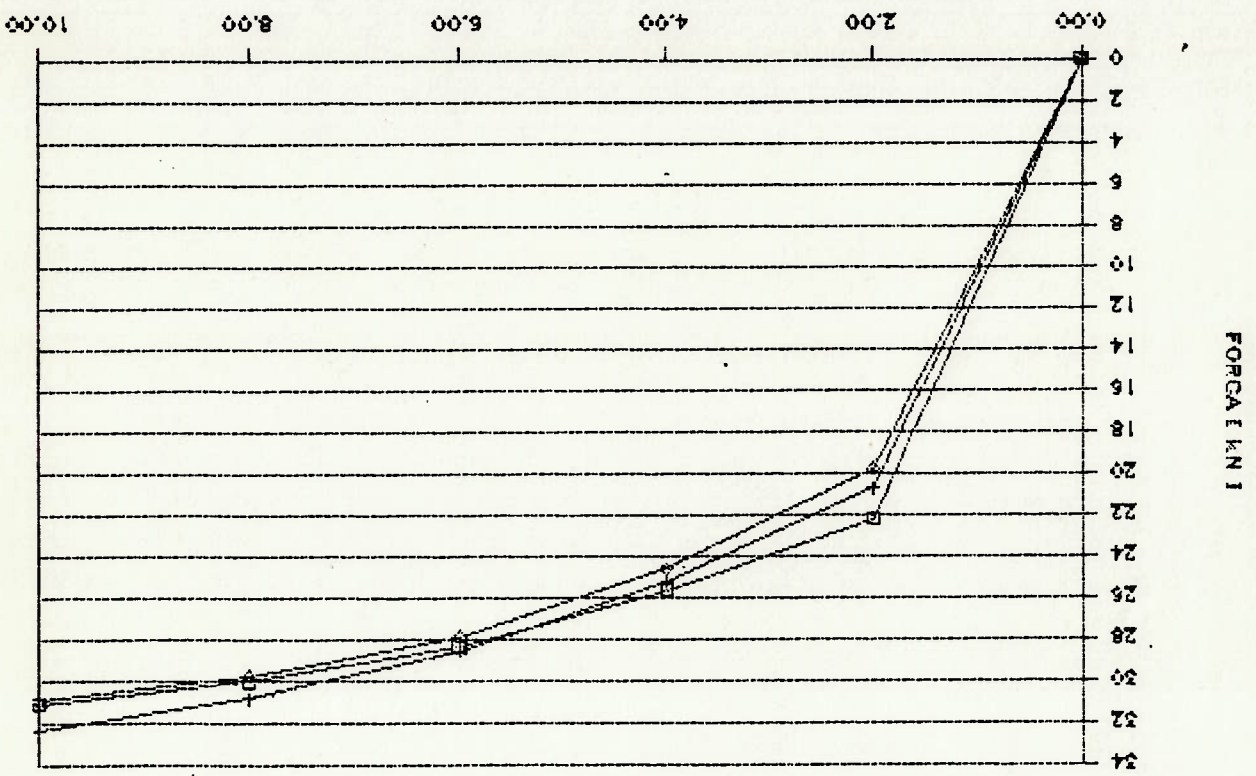


FIGURA 5.35- Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 14^\circ$ / RED.=24.75% / CAMADA=0.09846 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 610 + C.P.611
 ◇ C.P. 612
 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [mm]

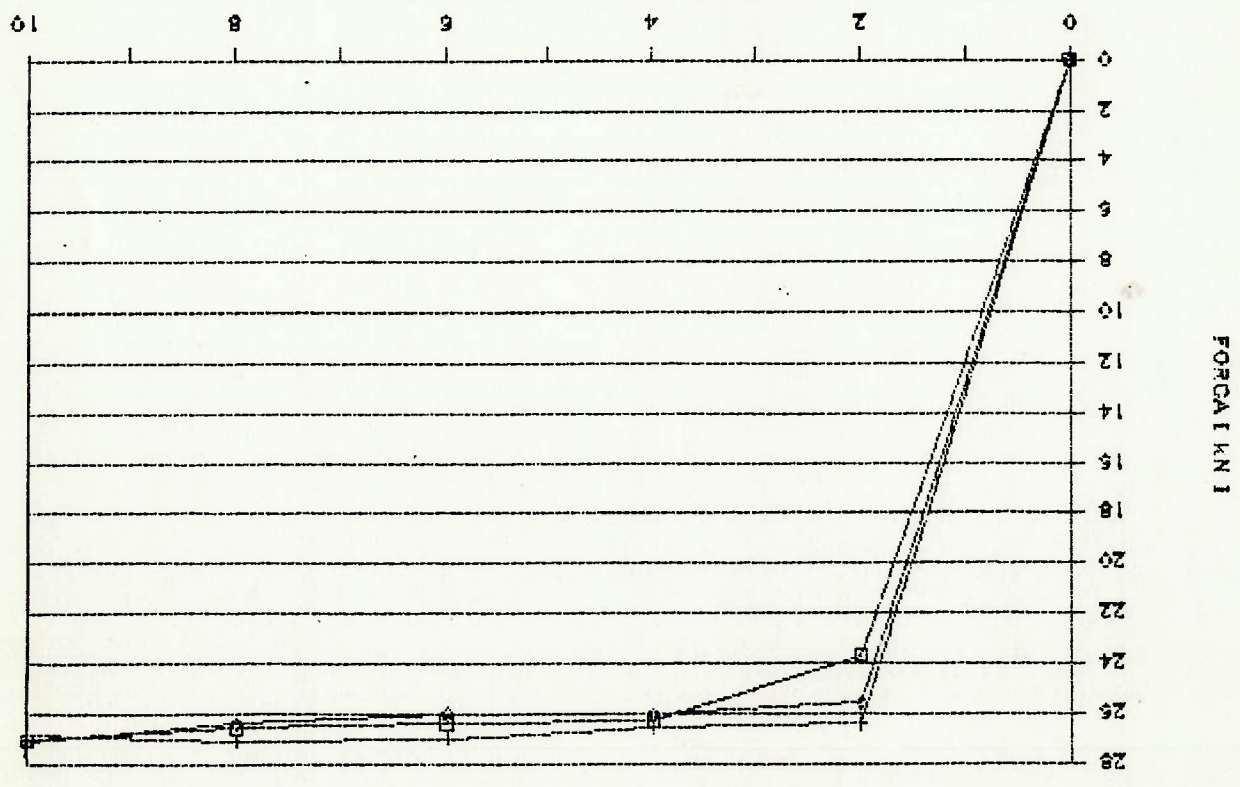


FIGURA S.38 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 180^\circ$ / RED. = 16.94% / CAMADA = 0.08055 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 810 + C.P. 811 ◇ C.P. 812

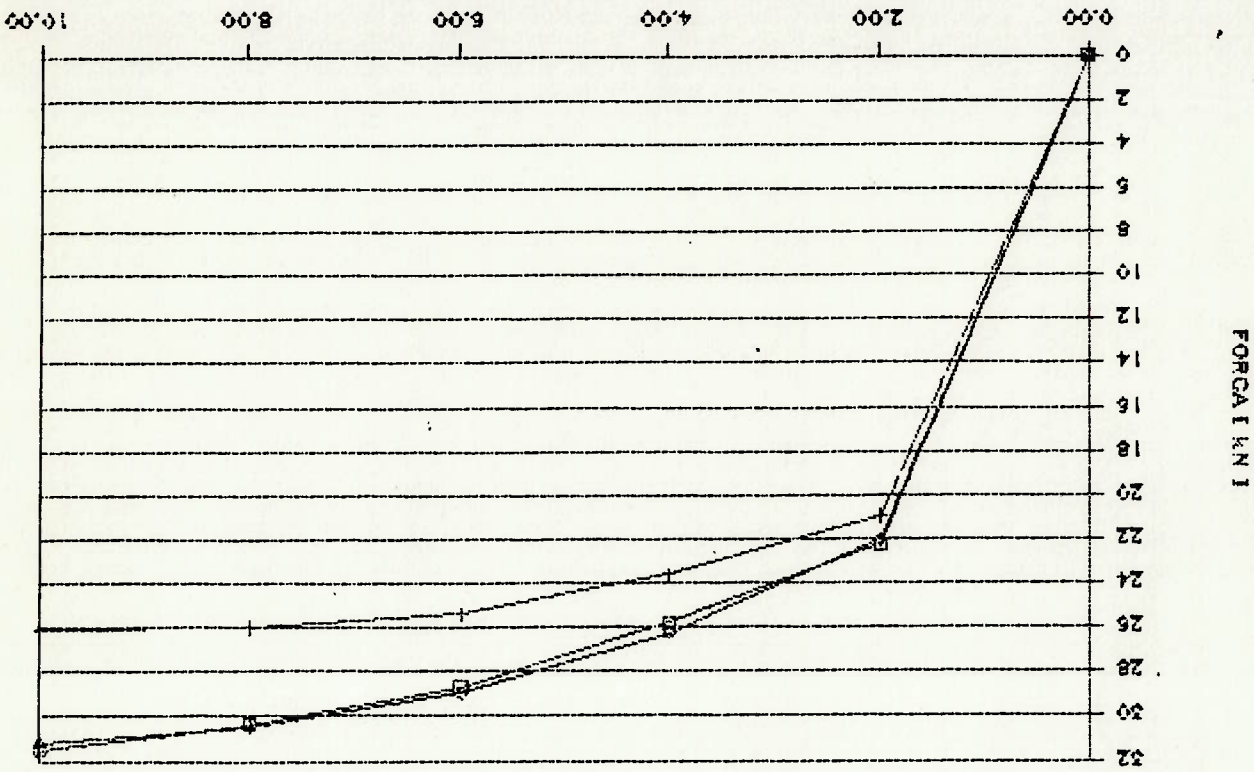


FIGURA S.37 - Distribuição da força em função da penetração do punção
 ($\alpha = 180^\circ$ / RED. = 12.56% / CAMADA = 0.08055 g/dm² (15min.))
 □ C.P. 710 + C.P. 711 ◇ C.P. 712

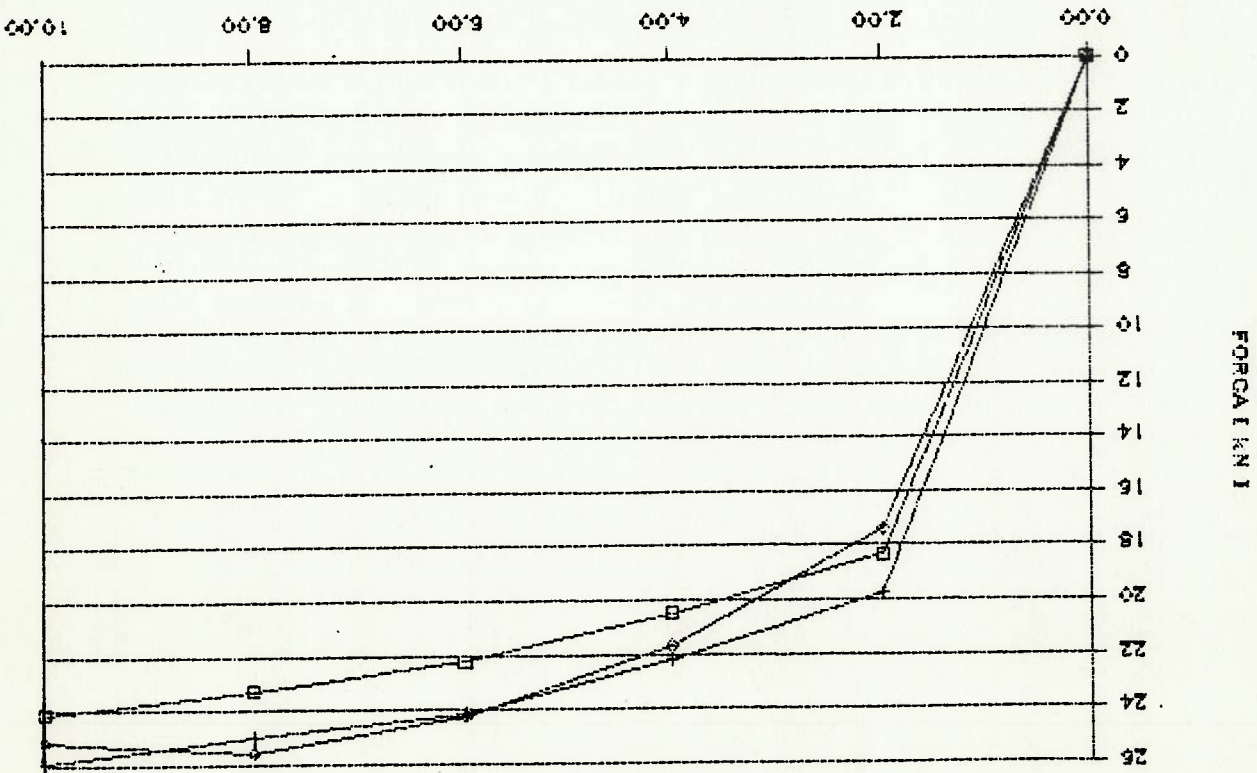


FIGURA 5.40 - Valores médios das forças para cada camada

($\alpha = 10^\circ / \text{RED.} = 16.94\%$)
 (C.P. 201 - 212)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

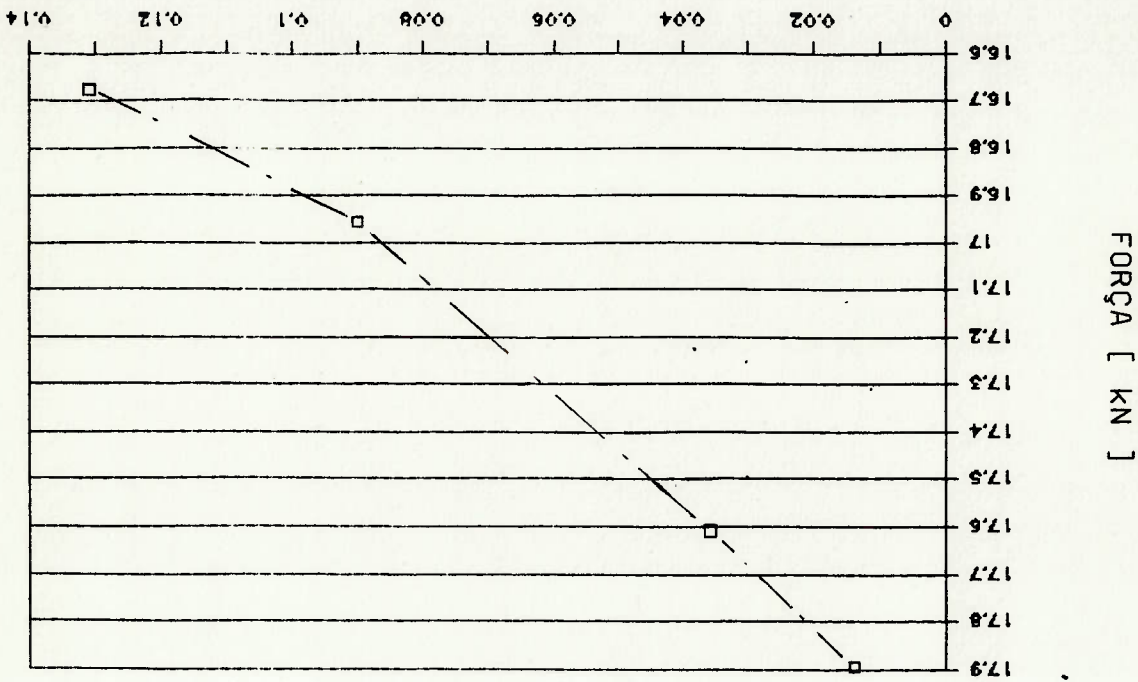


FIGURA 5.39 - Valores médios das forças para cada camada

($\alpha = 10^\circ / \text{RED.} = 12.56\%$)
 (C.P. 101 - 112)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

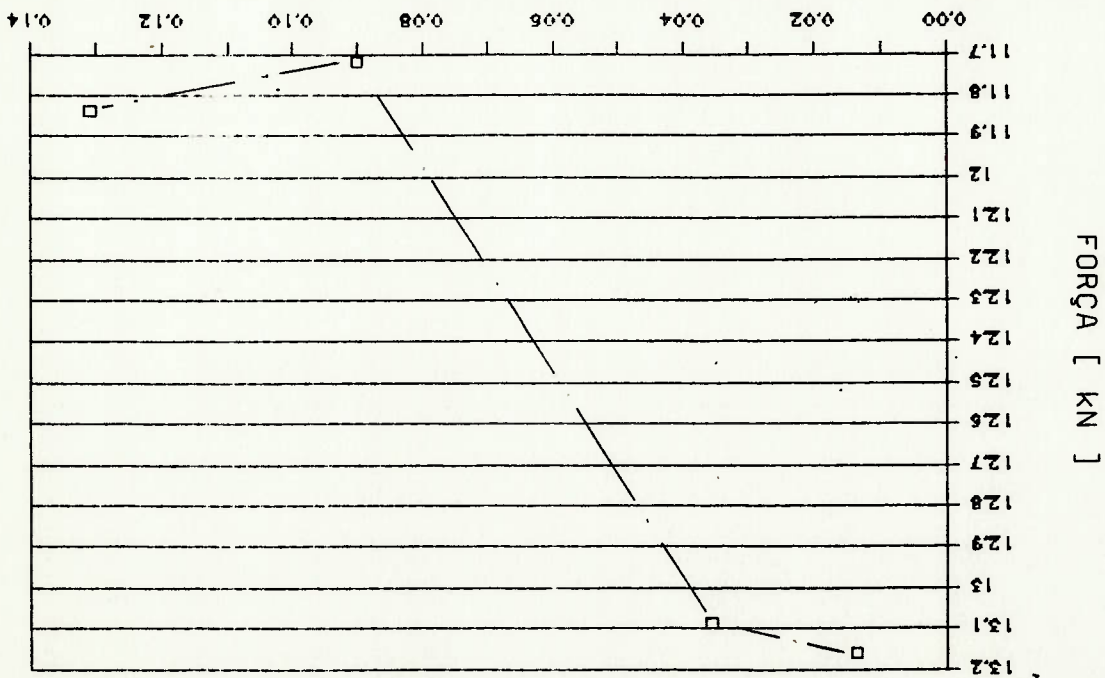


FIGURA 5.42 - Valores médios das forças para cada camada
 ($\alpha = 140^\circ / \text{RED.} = 12.56\%$)
 (C.P. 401 - 412)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

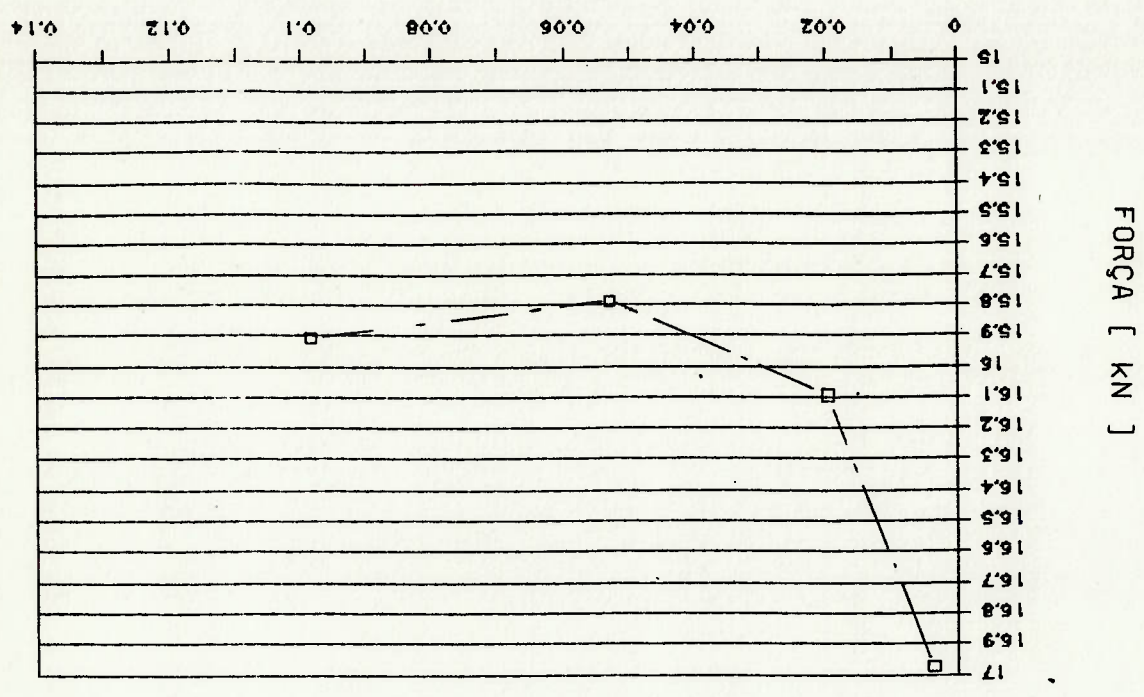


FIGURA 5.41 - Valores médios das forças para cada camada
 ($\alpha = 100^\circ / \text{RED.} = 24.75\%$)
 (C.P. 301 - 312)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

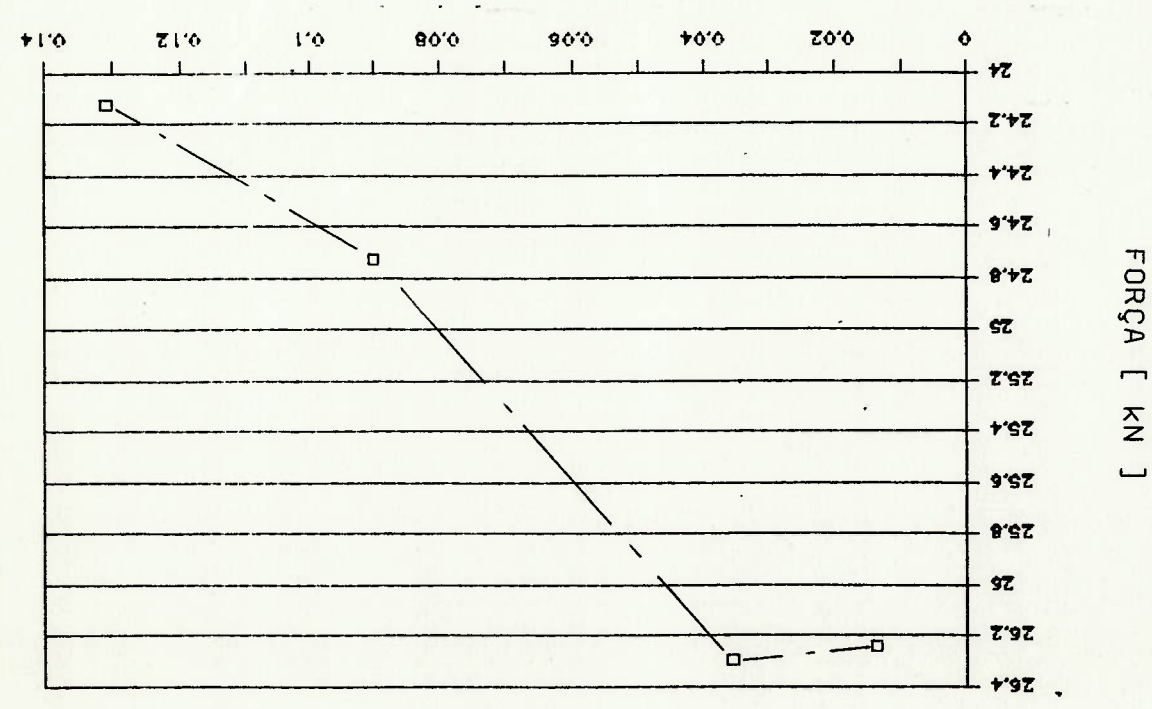


FIGURA 5.44 - Valores médios das forças para cada camada

($\alpha = 140^\circ$ / RED. = 24.75%)
 (C.P. 601 - 612)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

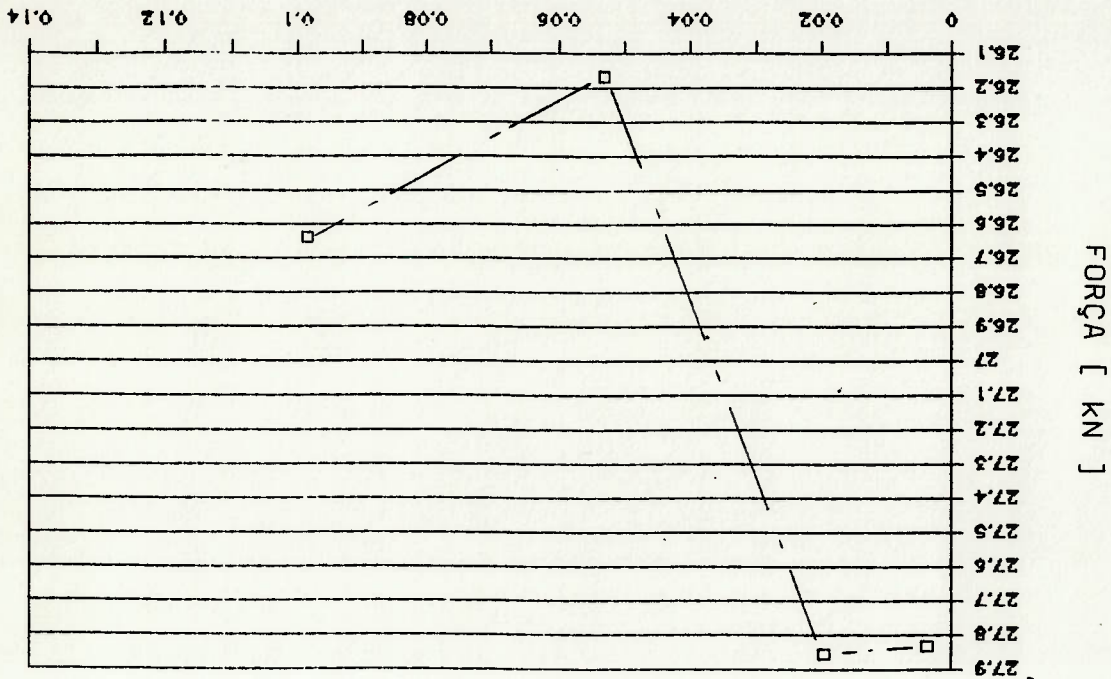


FIGURA 5.43 - Valores médios das forças para cada camada

($\alpha = 140^\circ$ / RED. = 16.94%)
 (C.P. 501 - 521)
 CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

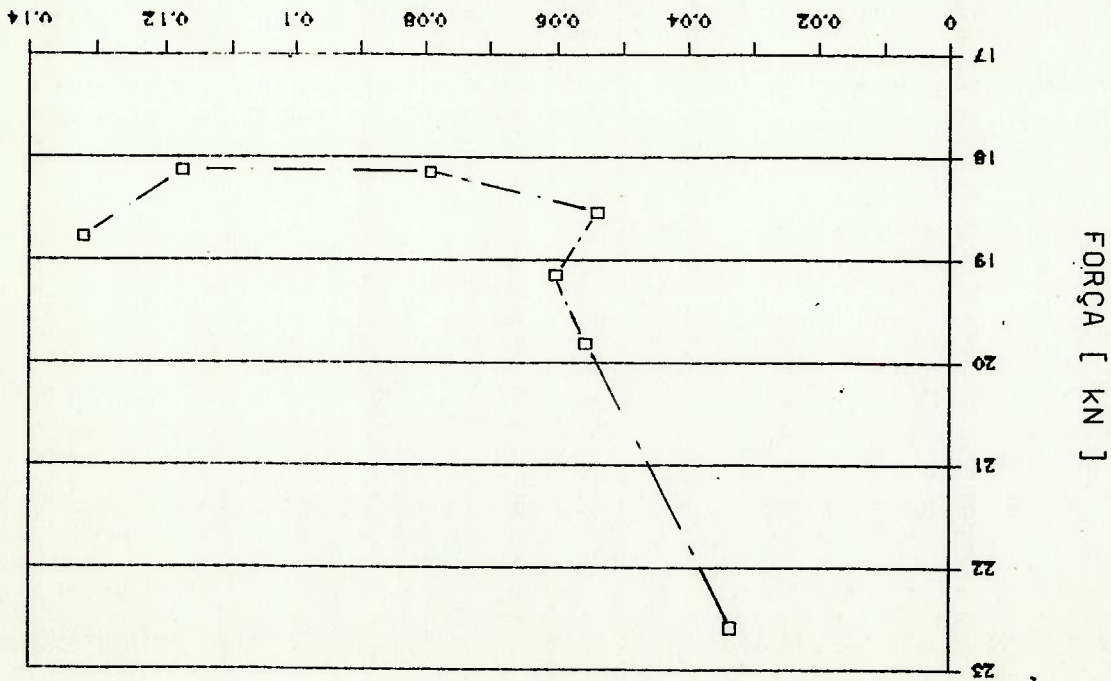


FIGURA 5.46 - Variação da força com a velocidade do punção (corpos de prova 514-515-516)

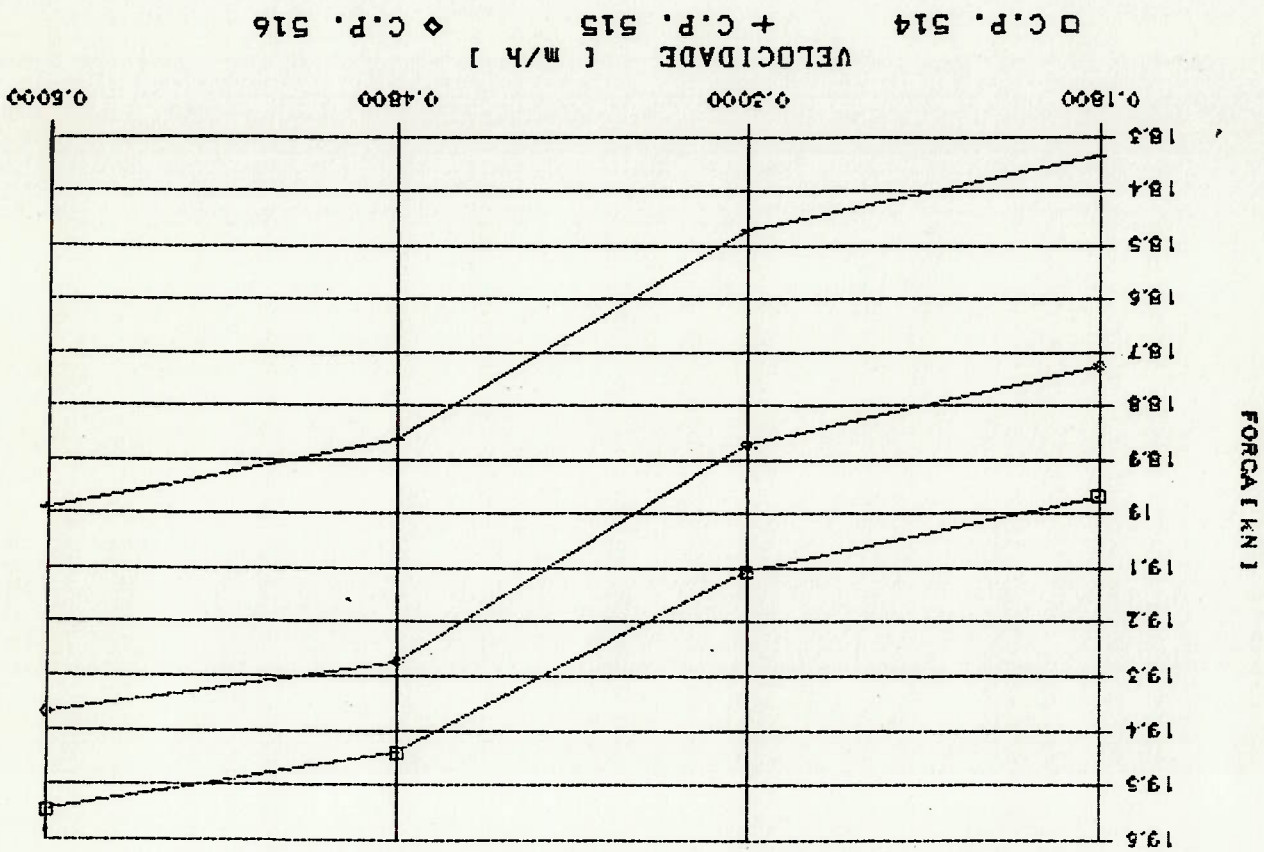


FIGURA 5.45 - Variação da força com a velocidade do punção (corpos de prova 511-512-513)

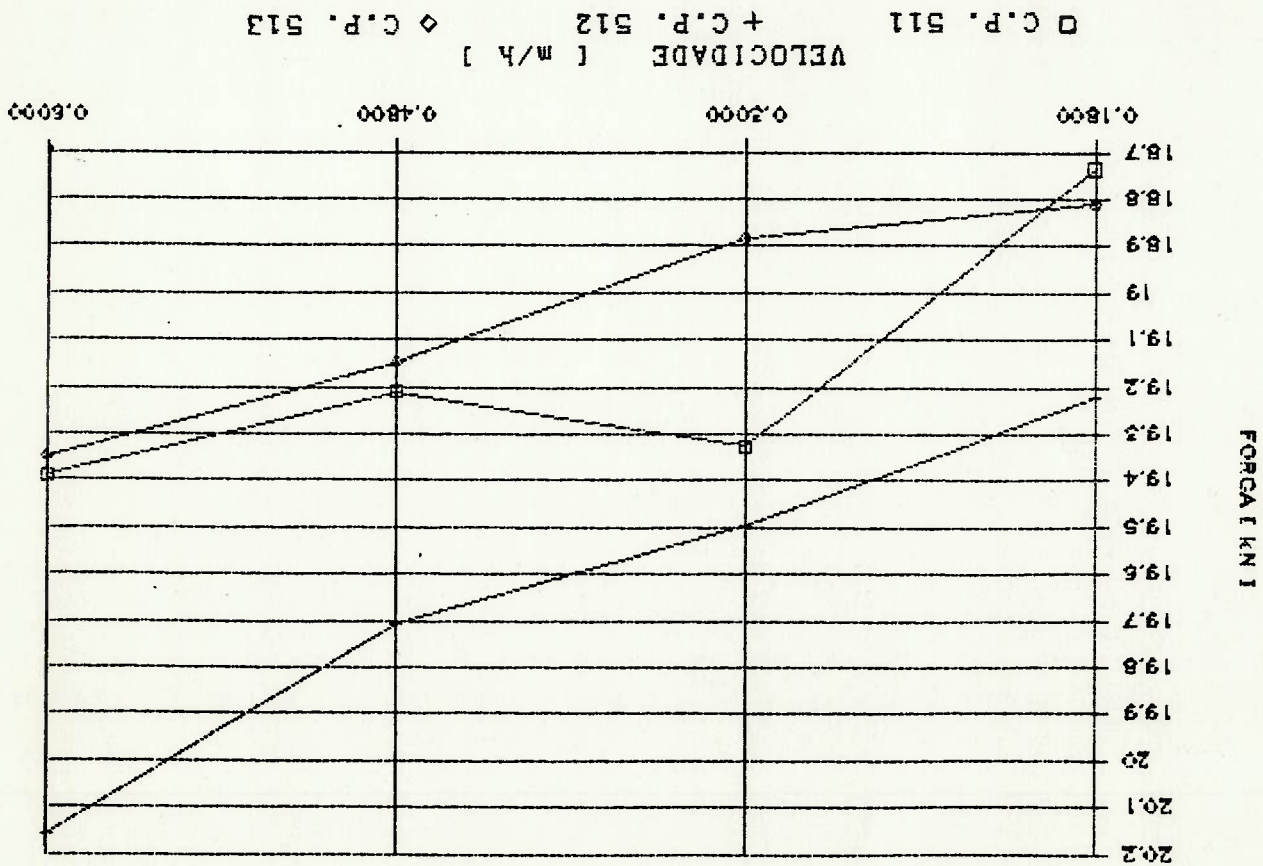


FIGURA 5.47 - Variação da força com a velocidade do punção (corpos de prova 517-518-519)

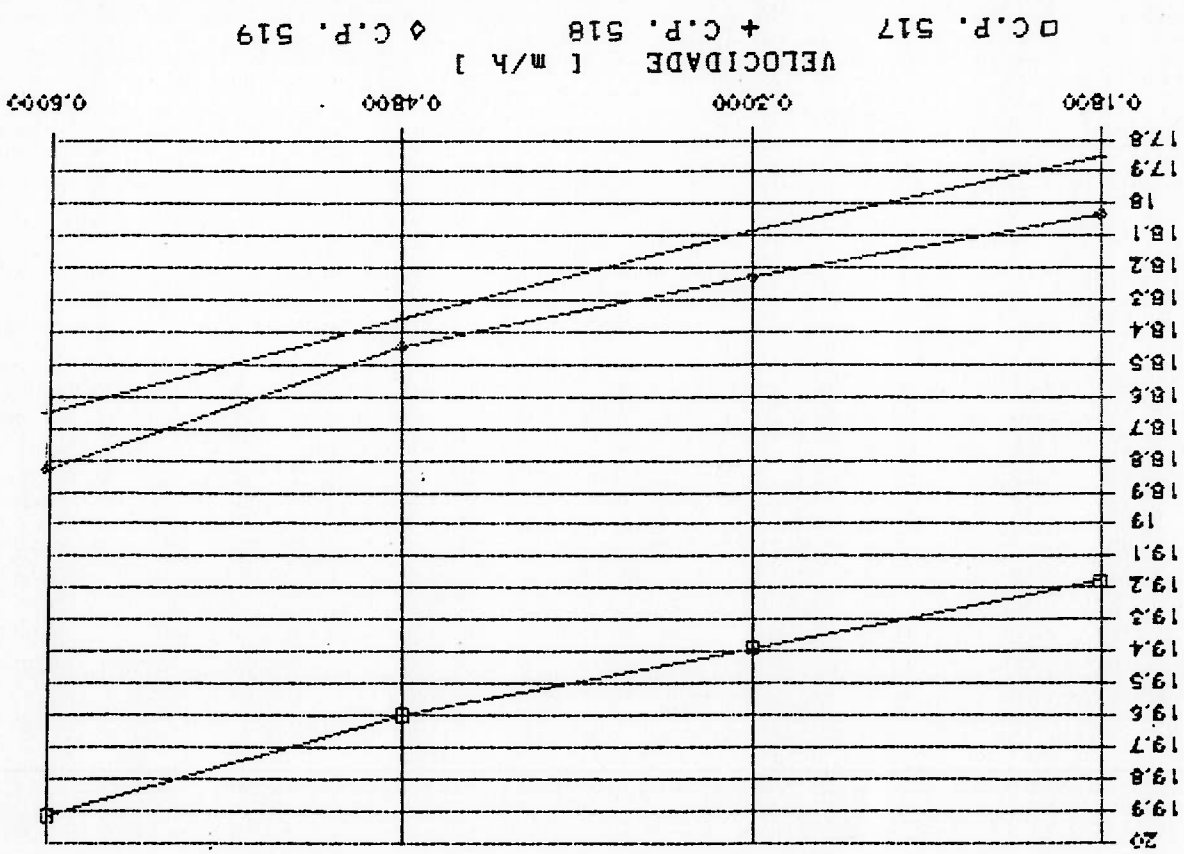


FIGURA 5.49 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 10^\circ / R = 16.94\%$)

CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

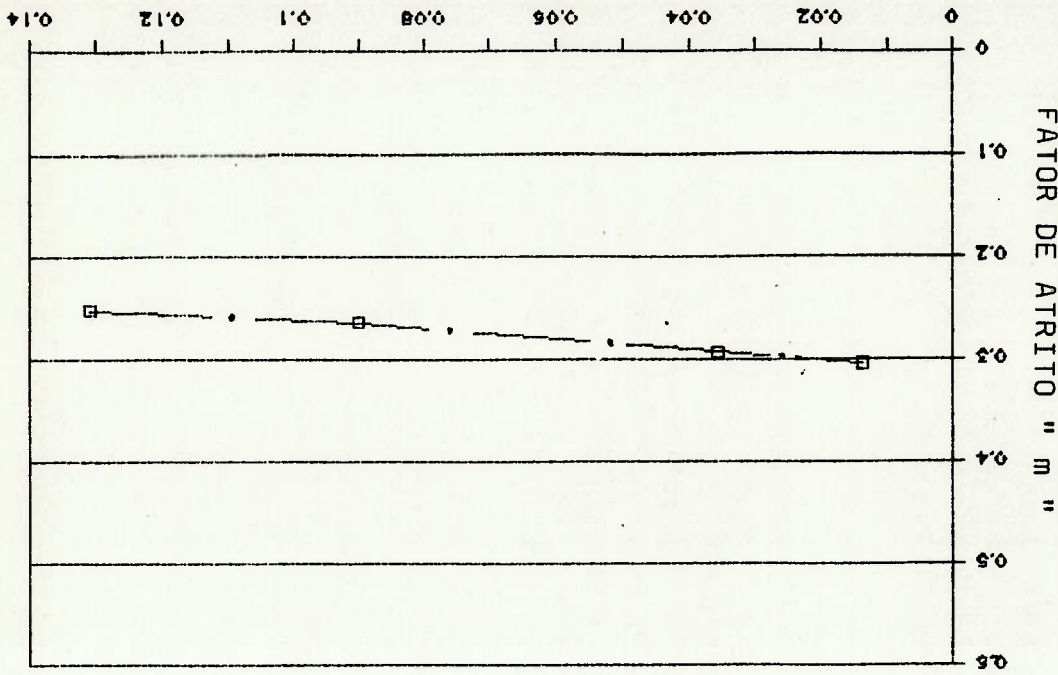


FIGURA 5.48 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 10^\circ / R = 12.56\%$)

CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

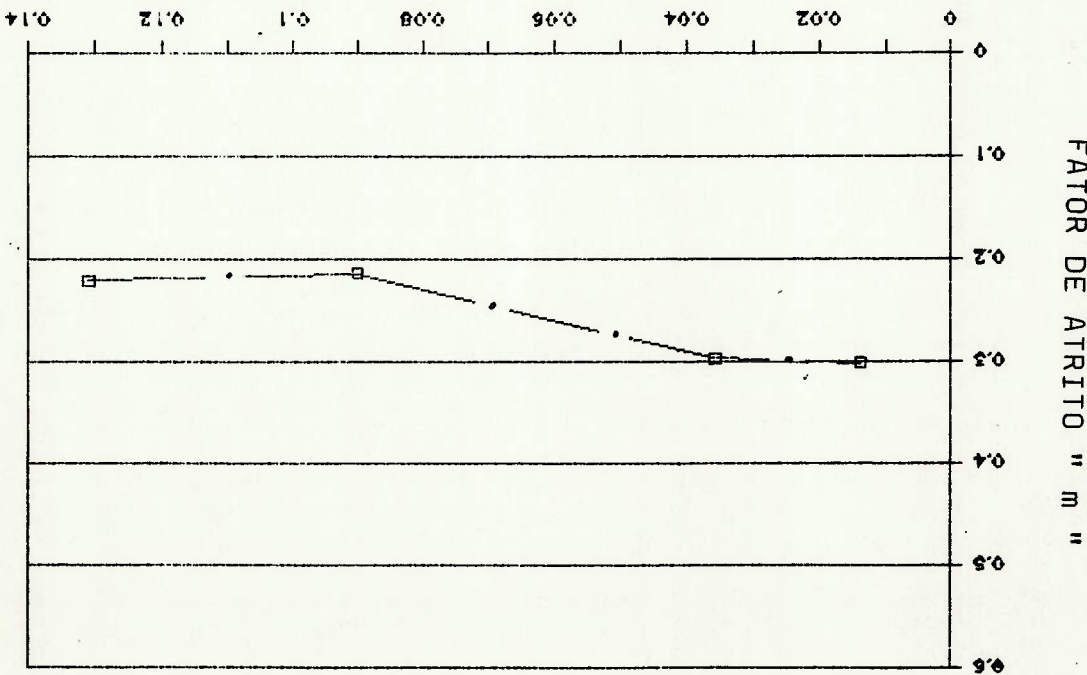


FIGURA 5.51 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 140 / 12.56\%$)

CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

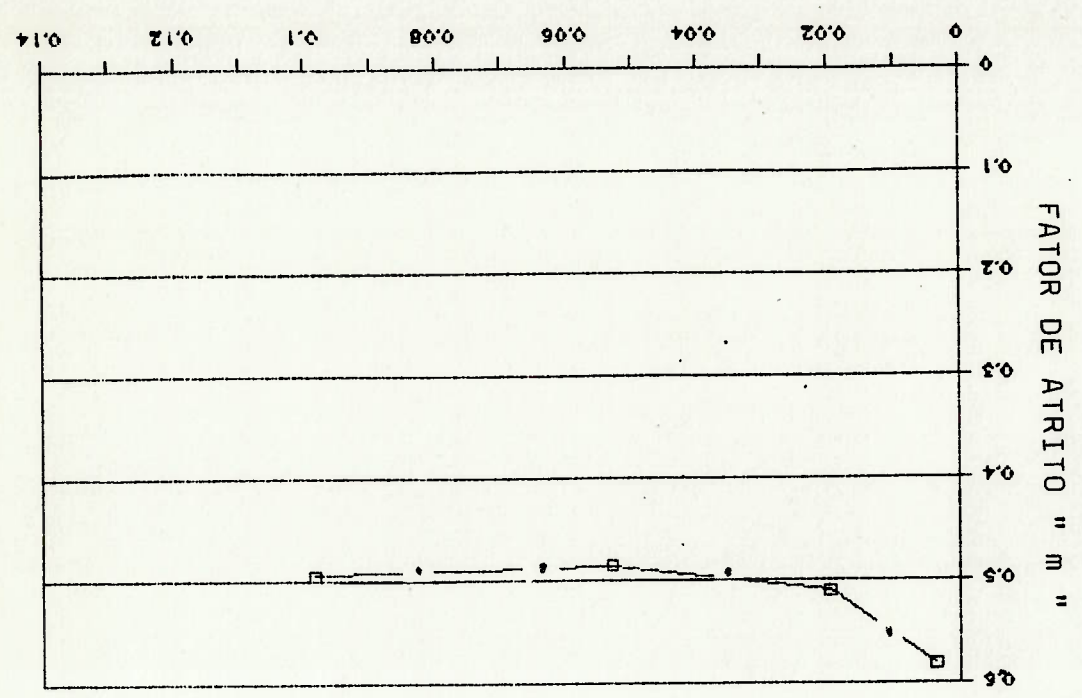


FIGURA 5.50 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 100 / R = 24.75\%$)

CAMADA DE FOSFATO [g/dm²]

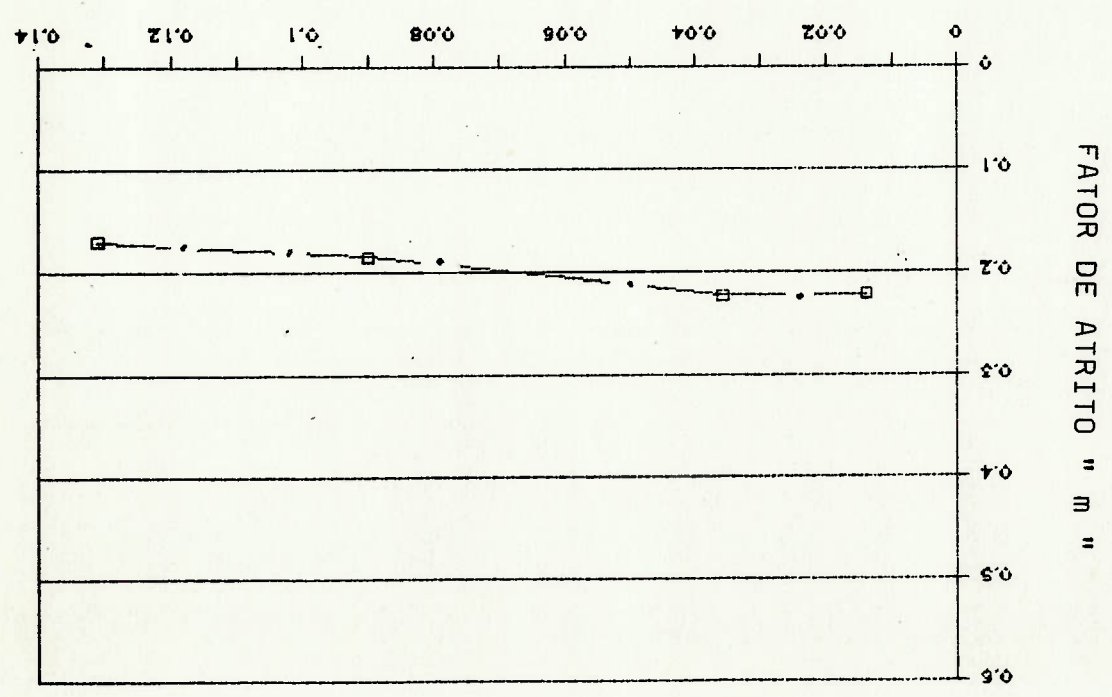


FIGURA 5.53 - Variação do fator de atrito com a camada

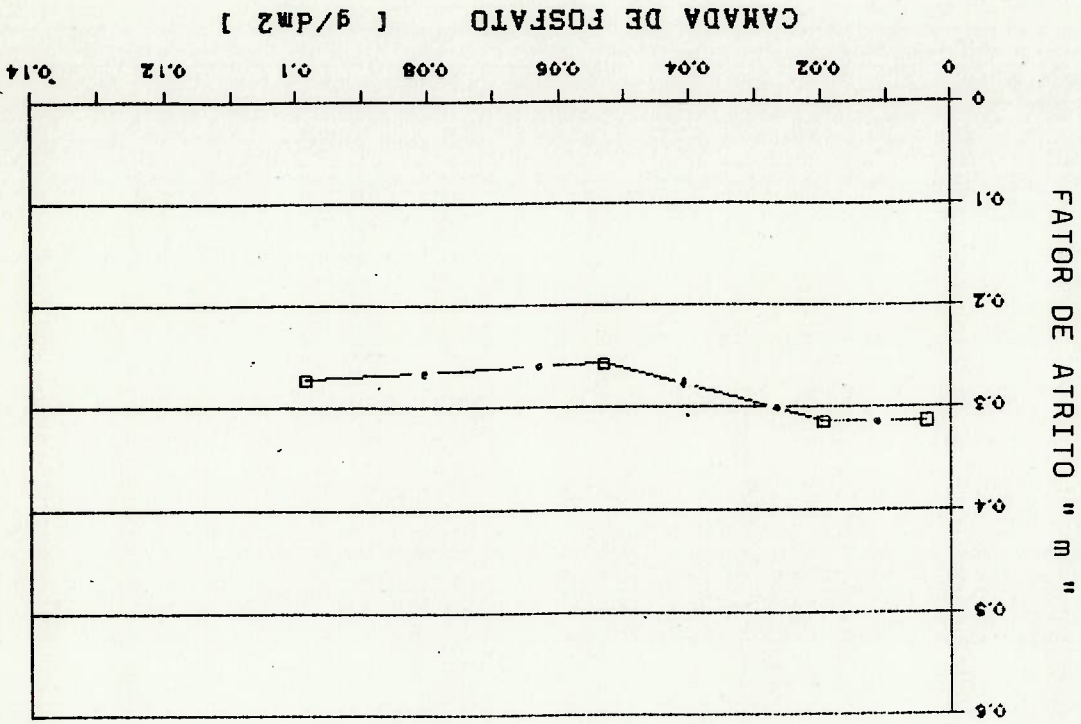
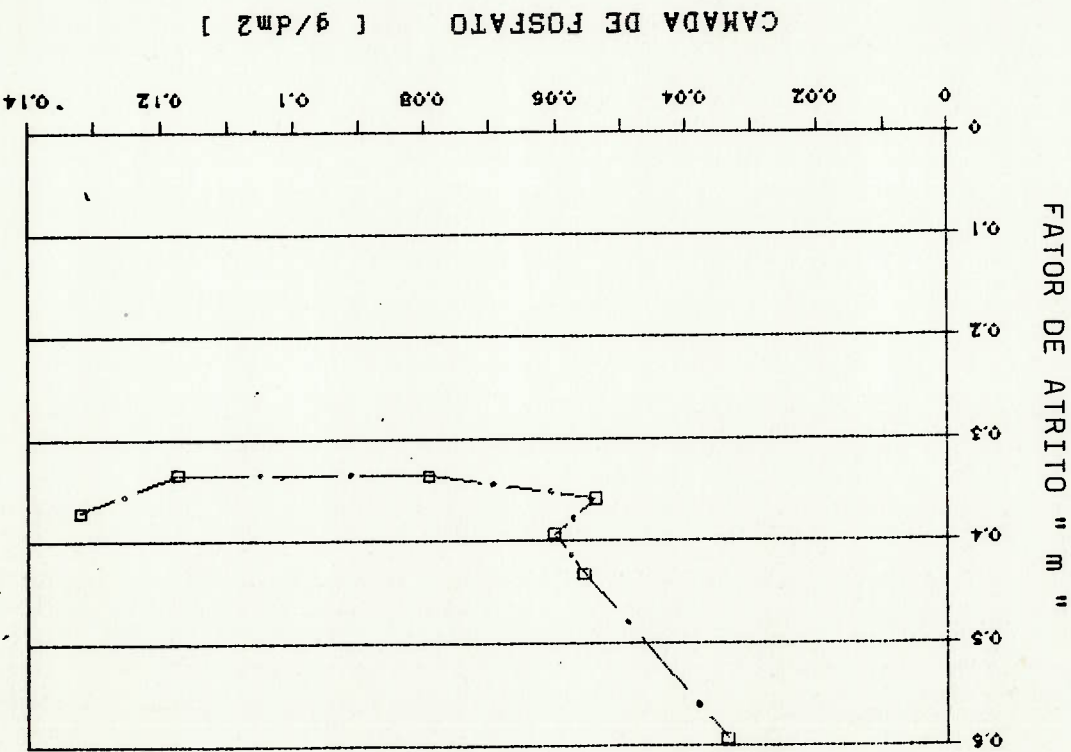


FIGURA 5.52 - Variação do fator de atrito com a camada



Essas figuras revelam que, à medida em que a camada de fosfato

5.53) como fungo da camada de fosfato.

o fator de atrito "m", o qual é apresentado nas figuras (5.48 -

(4.25) e dos esforços obtidos experimentalmente, pode-se calcular

extrusão como fungo da camada de fosfato. Através da expressão

As figuras 5.39 a 5.44 representam a variação da força de

pungo a partir de 4 mm de profundidade.

extrusão, a média dos valores de força ao longo da penetração do

longo da penetração do pungo. Assim, definiu-se como força de

vencido o atrito estático, se mantém praticamente constante ao

revelam que a força de extrusão, a partir do ponto em que é

As tabelas 5.6 a 5.35 e as respectivas figuras 5.9 a 5.38,

CAMADA DE FOSFATO

6.2 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA FORÇA DE EXTRUSÃO EM FUNÇÃO DA

sensível (ponto de saturação).

A partir de 35 min. (2100 s) essa variação deixa de ser

tempos de tratamento entre 01 min. (60 s) e 35 min. (2100 s).

verificar que a camada de fosfato sobre variação sensível entre os

tratamento. Através da análise da figura 5.4a, pode-se

a variação da espessura da camada de fosfato com o tempo de

As tabelas 5.4a a 5.4d e as figuras 5.4a a 5.4d apresentam

DE TRATAMENTO

6.1 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA CAMADA DE FOSFATO EM FUNÇÃO DO TEMPO

 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos ensaios com ferramenta de semi-ângulo de 10° percebe-se com maior clareza o efeito do lubrificante no processo de extrusão (figuras 5.9 a 5.20).

A análise dos resultados obtidos nesses ensaios revela que com o crescimento do comprimento da superfície de contato entre o material e a ferramenta, a eficiência da lubrificação fica comprometida, aumentando a energia dissipada por atrito.

Esse fato é verificado pela análise da variação da força (figura 5.9 a 5.20) entre os pontos de profundidade de penetração 4mm e 10mm , conforme ilustra a figura 6.1.

6.2.1 - Resultados obtidos nos ensaios com ferramenta com semi-ângulo de 10° .

camada de fosfato.

aumento da força de extrusão independentemente da espessura da o intervalo considerado, que o aumento da velocidade causa um extrusão com a velocidade. A análise dessas figuras revela, para As figuras 5.45 a 5.47 apresentam a variação da força de 0,17 a 0,6.

para as três reduções utilizadas, o fator de atrito na faixa de extrusão, tendem a diminuir. As figuras 5.48 a 5.53 apresentam aumenta, o fator de atrito e consequentemente a força de

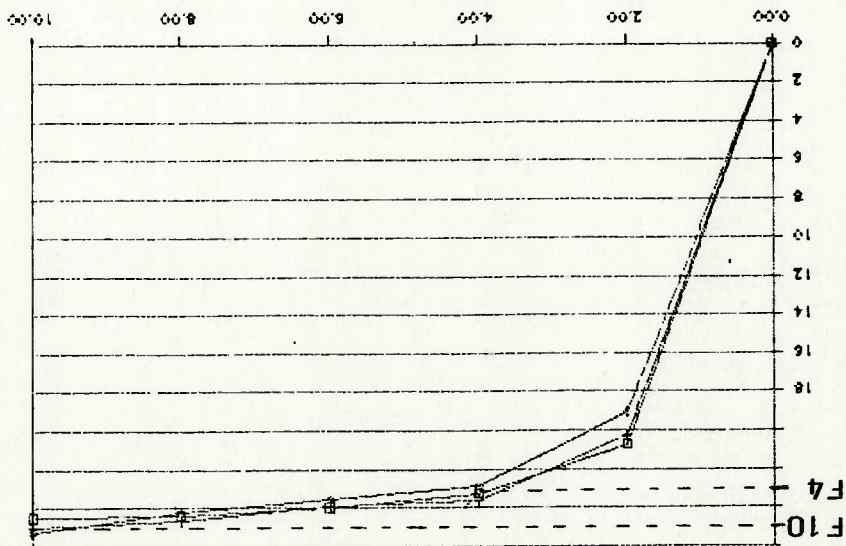
a 5.20).

Portanto, percebe-se que a medida que a redução aumenta, e consequentemente aumenta o comprimento da superfície de contato entre material e ferramenta, a força de extrusão deixa de permanecer constante durante a penetração do punção (figuras 5.17

FIGURA 6.1 - Esquema representativo das figuras 5.9 a 5.20

redução (%) ; d (mín. encontrado) ; d (máx. encontrado)	12.56	16.94	24.75
	0.78 %	0.0 %	8.51 %
	2.61 %	5.88 %	16.67 %

onde: $d = \frac{F_{10} - F_4}{F_4} * 100$ [%]



No caso da ferramenta com semi-ângulo de 18°, verifica-se que para a redução de 24,75% o ensaio não pode ser concluído, pois mesmo com a maior camada de lubrificante ocorre o recalque (figura 5.8). Para as reduções de 12,56% e 16,94%, apenas com as maiores camadas de lubrificante não ocorre o recalque. Entretanto, a força ao longo da penetração não permanece constante.

semi-ângulo de 18°.

6.2.3 - Resultados obtidos nos ensaios com ferramenta com

interfere no mecanismo de lubrificação. fosfato, a qual é influenciada pelas condições do banho, Esse fato parece revelar que a morfologia da camada de redução de 12,56% e 24,75%. para redução de 16,94% é maior daquela verificada para as para redução de 12,56% e 24,75%. Percebe-se que a variação de "m" prova para redução de 16,94% e posteriormente os corpos de prova (zinco) em duas ocasiões distintas. Inicialmente os corpos de prova foram tratados superficialmente (deposição de fosfato de Nos ensaios com ferramenta de semi-ângulo de 14°, os corpos de

semi-ângulo de 14°.

6.2.2 - Resultados obtidos nos ensaios com ferramenta com

Assim para a redução de 24,75%, apesar da força de extrusão ter sido calculada com o mesmo critério dos demais ensaios (média dos valores das forças para penetração entre 4 mm e 10 mm), esse valor calculado tem sua precisão comprometida.

C.1), confirma-se que o resíduo mantém-se constante ao longo dos
 numa segunda etapa, através da análise de resíduos (figura
 termo mostrou-se significativo pela análise da variância.

termo adicional correspondente a interação entre os mesmos. Este
 principais dos dois fatores (espessura da camada e redugão), um
 representativo do processo, deve conter além da soma dos efeitos
 interação entre esses fatores, indicando que o modelo estatístico,
 é influenciado pelos dois fatores descritos acima, bem como pela
 C.2 e tabela C.3), e pode-se verificar que o fator de atrito
 Na primeira etapa realizou-se a análise de variância (tabela

24,75%.

com ferramenta de semi-ângulo de 14° e redugões de 12,56% e
 das observações (tabela C.1) os resultados obtidos nos ensaios
 Essa análise compreende três etapas, utilizando como matriz
 relação aos fatores: espessura da camada de fosfato e redugão.

experimentais que indica a dependência do fator de atrito "m" com
 O apêndice C apresenta a análise dos resultados

CAMADA E A REDUGÃO

6.3 - DEPENDÊNCIA DO FATOR DE ATRITO COM RELAÇÃO À ESPESSURA DA

Esses resultados revelam que para ferramenta de 18° , existe uma
 porção do material que adere à superfície da ferramenta,
 dificultando a extrusão.

valores estimados do fator de atrito. O significado dessa etapa, é mostrar que o modelo aditivo é válido .

Por último, na terceira etapa, mediante o uso da técnica do projeto fatorial a dois níveis, propõe-se um modelo empírico, no intervalo considerado, que representa as observações como função da espessura da camada, redunção e interação entre esses dois fatores .

- espessura da camada de fosfato, no intervalo considerado.
4. A influencia da velocidade na forsa de extrusao depende da
valor de "n" a medida que a camada de fosfato aumenta.
3. O fator de atrito e influenciado pela espessura da camada de
fosfato. Essa influencia e indicada pela tendencia decrescente do
reducao de 24.75 % ; e ferramenta de semi-angulo de 18°).
2. A forsa de extrusao ao longo da penetraao do punao, apos
lubrificaaao (ensaios com ferramenta de semi-angulo de 10° e
os casos onde as relaes geomtricas da ferramenta comprometem a
vencido o atrito estatico, e praticamente constante. Excetua-se
após
1. A variaao da camada de fosfato em funao do tempo de
tratamento, possui um ponto de saturaao a partir do qual essa
variaao deixa de ser sensivel.

CONCLUSOES

CAPITULO 7

- [101] Watkins, H.C., "Cold Forming and Extrusion of Steel", International Metallurgical Review, vol 18, 1973, pp 123 - 146.
- [102] Feldman, H.D., "The Cold Forming of Steel", London, 1961, in ref. [011]
- [103] Avitzur, B., "Metal Forming Processes and Analysis" Mc Graw Hill, New York, 1977, pp 153 - 205.
- [104] Yust, C.S., "Tribology and Wear", International Metals Reviews, vol. 30, 1985, pp 141-154.
- [105] Bresciani Filho, E., "Tribologia na Conformação Plástica", EPUSP/UNICAMP, 1987, pp 43-77.
- [106] Foides, A.G., "Fosfatização como meio de facilitar a deformação a frio", ABM-BOLETIM, 1971.
- [107] Foides, A.G., "Corrosão e tratamento superficial dos metais" ABM, primeira edição, Vol. 1, 1971, pp. 198 - 217.
- [108] Metals Handbook, "Surface Cleaning, Finishing, and Coating", A.S.M., Metals Park, Ohio, vol. 5, nona edição, 1982, pp 434-456.
- [109] Bresciani Filho, E., "Conformação Plástica dos Metais", UNICAMP, 1986, pp 180-232.
- [110] Zavglia, C.A.C., "Contribuição ao Estudo da Trefilação de Fios Capilares de Metais Não Ferrosos", Tese de Mestrado, UNICAMP, 1979, pp 105 - 125.

- [111] Delijaicov, S., "Influencia do Atrito na Força de Extrusão a Frio de uma Liga de Alumínio" Tese de Mestrado, USP, 1982
pp 55 - 96.
- [112] Johnson, W. and Mellor, E.P.B., "Engineering Plasticity", von Nostrand Reinhold Company, London, 1975.
- [113] Avitzur, B., "Analysis of Metal Extrusion", Journal of Engineering for Industry, 1965, pp 57-70.
- [114] Avitzur, B., "Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle", Journal of Engineering for Industry, Nov., vol 86, 1964, pp 305-316.
- [115] Avitzur, B., "Analysis of Wire Draw and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle", Journal of Engineering for Industry, Feb., 1963, pp 89 - 96 .
- [116] Avitzur, B., "Flow Characteristics Through Conical Converging Dies", Journal of Engineering for Industry, vol. 88, 1966, pp 410-420.
- [117] Thomsen, E.G. and Yang, C.T. and Kobayashi, "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing" The MacMillan Company, New York, 1965, in ref. [11] pp 57.
- [118] Wilcox, R.J., "The Cold Extrusion of Metals Using Lubrication at Slow Speeds", J. of Institute of Metals, vol. 87, 1958, pp 289-293.
- [119] Wilcox, R.J., "Further Experiments on the Cold Extrusion of Metals Using Lubrication at Slow Speeds", J. of Institute of Metals, vol. 88, 1959, pp 145-149.

- [201] Anton Pomp, "The Manufacture and Properties of Steel Wire" London 1954, in ref. [03] .
- [211] Thonsen, E.G. and Yang, C.T. and Bierbower, T.B., "An Experimental Investigation of the Mechanics of Plastic Deformation of Metals" Univ. Calif. , vol. 5, 1954 , pp 89-144 in ref. [03] .
- [221] Pugh, H.L.I.D. and Low, A.H., "The Hydrostatic Extrusion of Difficult Metals", J. Inst. Metals , March , 1965, pp 201-217 in ref. [03] .
- [231] Pearson, C.E. and Perkins, R.M. "The Extrusion of Metals", John Wiley & Sons, New York, 1960, in ref. [03] .
- [241] Avitzur, B., " Strain Hardening on Strain Rate Effects in Plastic Flow Through Conical Converging Dies", Journal of Engineering for Industry, Aug. , 1967, pp 556 - 562.
- [251] Norma Internacional ISO 898, parte 1 , April , 1979 , p - 05 .
- [261] Domalski, H.H. and Schucker, " Stahl u. Eisen " , 1970, 90 (20), 1115 in ref. [01] .
- [271] Kiessler, H. and Frober, "Fourth International Meeting of Cold Forming " , BISITS Trans. , 1970 , in ref. [01] .
- [281] Gezelia, F.S., "Technical paper", ASTM, New York, 1969. in ref. [01] .
- [291] Okell, R.E., "Metal Treatment", 1961, 28 (8), 309 in ref. [01] .

[30] Metals Handbook, "Forming", A.S.H., vol 4, edição oito, pp 475-482.

[31] S.A.E. Handbook, 1978, part 1, J 4039 - pp 2.03, J 4169 - pp 4.01.

[32] Sortais, H.C. and Kobayashi, J. Machine Tool Design, 1968, vol 8, p 61, in ref. [01].

[33] Chiaverini, "Aços carbono e aços liga", ABM 1971, pp 258-298.

[34] Bonzel, M., "Le treillage de l'acier", Dunod, décima edição, 1958, p 36.

[35] Box, G.E.P. and Hunter, W.G. and Hunter, J.S., "Statistics for Experimenters", John Wiley & Sons, New York, 1978, pp 208 - 344.

- * Avitzur, B., "Analysis of Metal Extrusion", Journal of Engineering for Industry, 1965.
- * Avitzur, B., "Metal Forming Processes and Analysis", Mc Graw Hill, New York, 1977 .
- * Avitzur, B., "Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle", Journal of Engineering for Industry, vol 86, 1964.
- * Avitzur, B., "Analysis of wire Draw and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle", Journal of Engineering for Industry, 1963 .
- * Avitzur, B., "Flow Characteristics Through Conical Converging Dies", Journal of Engineering for Industry, vol. 88, 1966.
- * Avitzur, B., "Strain Hardening on Strain Rate Effects in Plastic Flow Through Conical Converging Dies", Journal of Engineering for Industry, Aug., 1967.
- * Anton Pomp, "The Manufacture and Properties of Steel Wire", London, 1954.
- * Bresciani Filho, E., "Tribologia na Conformação Plástica", EPUSP/UNICAMP, 1987.
- * Bresciani Filho, E., "Conformação Plástica dos Metais", UNICAMP, 1986 .
- * Box, G.E.P. and Hunter, W.G. and Hunter, J.S. "Statistics for Experimenters", John Wiley & Sons, New York, 1978.

- * Bonzel, H., "Le treillage de l'acier", Dunod, décima edição, 1958, p 36 .
- * Chiverini, "Aços carbono e aços liga " , ABM , 1971.
- * Domalski H.H and Schucker, " Stahl u. Eisen " , 1970.
- * Delijaicov, S. " Influencia do Atrito na Força de Extrusão a Frio de uma Liga de Alumínio", Tese de Mestrado, USP, 1982
- * Foides, A.G., " Fosfatização como meio de facilitar a deformação a frio " , ABM-BOLETIM , 1971.
- * Foides, A.G. " Corrosão e tratamento superficial dos metais", ABM , primeira edição, vol 1, 1971.
- * Feldman, H.D., " The Cold Forming of Steel " , New York, 1961.
- * Gezella F.S., " Technical paper", ASTM, 1969, New York.
- * Johnson, W. and Mellor, E.P.B., " Engineering Plasticity", N.York, 1975.
- * Kiessler, H. and Frober, " Fourth International Meeting of Cold Forming " , BISITS Trans., 1970 .
- * Metals Handbook, " Surface Cleaning, Finishing, and Coating", A.S.M., Metals Park Ohio, vol 5, nona edição, 1982.
- * Metals Handbook, " Forming", A.S.M., vol 4, oitava edição.
- * Norma Internacional ISO 898 , parte 1 , Abril, 1979, p 05.
- * Okell, R.E. , " Metal Treatment", 1961, 28 (8), 309.
- * Pugh, H.L.I.D. and Low, A.H., " The Hydrostatic Extrusion of Difficult Metals", J. Inst. Metals, 1965 .

- * Pearson, C.E. and Perkins, R.N., "The Extrusion of Metals", John Wiley & Sons, New York, 1960.
- * Sorais, H.C. and Hobayashi, J. Machine Tool Design, 1968, vol 8 .
- * S.A.E. Handbook, 1978, part 1, J 4039, J 4169 .
- * Thonsen, E.G. and Yang, C.T. and Kobayashi, "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing", The Macmillan Company, New York, 1965.
- * Thonsen, E.G. and Yang, C.T. and Bierpover, T.B., "An Experimental Investigation of the Mechanics of Plastic Deformation of Metals" Univ. Calif. vol. 5, 1954.
- * Watkins, H.T., "Cold Forming and Extrusion of Steel", International Metallurgical Review, vol 18, 1973,
- * Micox, R.J., "The Cold Extrusion of Metals Using Lubrication at Slow Speeds", J. of Institute of Metals, vol. 87.
- * Micox, R.J., "Further Experiments on the Cold Extrusion of Metals Using Lubrication at Slow Speeds", J. of Institute of Metals, vol. 88.
- * Yust, C.S., Tribology and Wear, International Metals Reviews, vol. 30, 1985 .
- * Zavaglia, C.A.C. "Contribuição ao Estudo da Trefilação de Fios Capilares de Metais Nô Ferrosos", Tese de Mestrado, UNICAMP, 1979 .

G	-	grupos
J*	-	energia externa
L	-	comprimento da parte cilíndrica da matriz
m	-	fator de atrito
N	-	número de observações
NIG	-	graus de liberdade entre os grupos
NIE	-	graus de liberdade dentro dos grupos
NIP	-	graus de liberdade considerando espessuras
NIT	-	graus de liberdade considerando reduções
NII	-	graus de liberdade considerando interações
r	-	vetor de posição
R ₀	-	raio inicial
R _f	-	raio final
SG2	-	quadrado médio entre os grupos
SE2	-	quadrado médio dentro dos grupos
SP2	-	quadrado médio das espessuras
ST2	-	quadrado médio das reduções
SI2	-	quadrado médio das interações
SC	-	total corrigido da soma dos quadrados
SG	-	soma dos quadrados entre os grupos
SE	-	soma dos quadrados dentro dos grupos
SP	-	soma dos quadrados considerando espessuras
ST	-	soma dos quadrados considerando reduções
SI	-	soma dos quadrados considerando interações
V _f	-	velocidade final
V ₀	-	velocidade inicial
W _I	-	potência interna de deformação
W _s	-	potência dissipada por descontinuidade de velocidade
V _{ti}	-	observações por grupo

observações	-	V_{tij}
média das observações por grupos	-	\bar{V}_{ti}
valor médio das reduções	-	\bar{V}_t
valor médio das espessuras de camada	-	\bar{V}_i
grande média	-	\bar{V}
valor esperado	-	\hat{V}_{ti}
semi-ângulo da matriz	-	α
coeficiente de encurvamento	-	β
componente de velocidade	-	Δv
deformação efetiva	-	\emptyset
coeficiente de atrito	-	μ
tensão frontal , tensão trazeira	-	$\sigma_{xt} , \sigma_{xb}$
tensão limite de escoamento	-	σ_0
tensão normal à superfície cônica da matriz	-	σ_θ
tensão normal à superfície cilíndrica da matriz	-	σ_I
tensão de atrito - superfície cônica da matriz	-	σ_R
tensão de atrito - superfície cilíndrica da matriz	-	σ_Z
tensão efetiva	-	σ_{ef}
superfícies de contorno (limite)	-	$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$
tensão de cisalhamento	-	τ

LISTA DE FIGURAS

20	Figura 3.1 - Fluxograma típico para linha de fosfatização ...
22	Figura 4.1 - Geometria da ferramenta de extrusão
23	Figura 4.2 - Campo de velocidade
24	Figura 4.3 - Componentes da velocidade
30	Figura 4.4 - Potência total
31	Figura 4.5 - Zona morta
33	Figura 4.6 - Escocamento do material através de matriz
39	Figura 5.1 - Micro-estrutura do material
40	Figura 5.2 - Corpo de prova para ensaio de tração
41	Figura 5.3 - Curva força X Deslocamento
45	Figura 5.4a - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova - chapa 1-26)
45	Figura 5.4b - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova - chapa 27-34)
46	Figura 5.4c - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova - chapa 35-42)
46	Figura 5.4d - Camada de fosfato em função do tempo de tratamento (corpos de prova - chapa 43-50)
48	Figura 5.5 - Curva de linearidade
50	Figura 5.6 - Ferramenta de extrusão (matriz)
51	Figura 5.7 - Suporte de ferramenta (carcasa)
68	Figura 5.8 - Corpo de prova deformado por recalque
69	Figura 5.9 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 101-103)
69	Figura 5.10 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 104-106)
70	Figura 5.11 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 107-109)
70	Figura 5.12 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 110-112)
71	Figura 5.13 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 201-203)

- Figura 5.14 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 204-206) 71
- Figura 5.15 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 207-209) 72
- Figura 5.16 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 210-212) 72
- Figura 5.17 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 301-303) 73
- Figura 5.18 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 304-306) 73
- Figura 5.19 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 307-309) 74
- Figura 5.20 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 310-312) 74
- Figura 5.21 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 401-403) 75
- Figura 5.22 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 404-406) 75
- Figura 5.23 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 407-409) 76
- Figura 5.24 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 410-412) 76
- Figura 5.25 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 501-503) 77
- Figura 5.26 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 504-506) 77
- Figura 5.27 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 507-509) 78
- Figura 5.28 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 510-512) 78
- Figura 5.29 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 513-515) 79
- Figura 5.30 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 516-518) 79
- Figura 5.31 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 519-521) 80
- Figura 5.32 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 601-603) 80
- Figura 5.33 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 604-606) 81

81	Figura 5.34 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 607-609)
82	Figura 5.35 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 610-612)
82	Figura 5.36 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 707-709)
83	Figura 5.37 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 710-712)
83	Figura 5.38 - Distribuição da força em função da penetração do punção (corpo de prova 810-812)
84	Figura 5.39 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 101-112)
84	Figura 5.40 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 201-212)
85	Figura 5.41 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 301-312)
85	Figura 5.42 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 401-412)
86	Figura 5.43 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 501-521)
86	Figura 5.44 - Valores médios das forças para cada camada (corpo de prova 601-612)
87	Figura 5.45 - Variação da força com a velocidade do punção (corpo de prova 511-512-513)
87	Figura 5.46 - Variação da força com a velocidade do punção (corpo de prova 514-515-516)
88	Figura 5.47 - Variação da força com a velocidade do punção (corpo de prova 517-518-519)
89	Figura 5.48 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 10^\circ / R = 12,56\%$)
89	Figura 5.49 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 10^\circ / R = 16,94\%$)
90	Figura 5.50 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 10^\circ / R = 24,75\%$)
90	Figura 5.51 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 14^\circ / R = 12,56\%$)
91	Figura 5.52 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 14^\circ / R = 16,94\%$)
91	Figura 5.53 - Variação do fator de atrito com a camada ($\alpha = 14^\circ / R = 24,75\%$)

Figura 6.1 - Esquema representativo das figuras 5.9 a 5.20.....	94
Figura C.1 - Gráfico dos resíduos	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeitos de redução do atrito pelo aumento de eficiência da lubrificação	10
Tabela 5.1 - Composição química do material	38
Tabela 5.2 - Características mecânicas	41
Tabela 5.3 - Corpos de prova - chapas	42
Tabela 5.4a - Massa da camada de fosfato (corpo de prova 1-26)	43
Tabela 5.4b - Massa da camada de fosfato (corpo de prova 27-34)	44
Tabela 5.4c - Massa da camada de fosfato (corpo de prova 35-42)	44
Tabela 5.4d - Massa da camada de fosfato (corpo de prova 43-50)	44
Tabela 5.5 - Programa de ensaios	53
Tabela 5.6 - Variação da força (corpo de prova 101-103)	54
Tabela 5.7 - Variação da força (corpo de prova 104-106)	54
Tabela 5.8 - Variação da força (corpo de prova 107-109)	55
Tabela 5.9 - Variação da força (corpo de prova 110-112)	55
Tabela 5.10 - Variação da força (corpo de prova 201-203)	55
Tabela 5.11 - Variação da força (corpo de prova 204-206)	56
Tabela 5.12 - Variação da força (corpo de prova 207-209)	56
Tabela 5.13 - Variação da força (corpo de prova 210-212)	56
Tabela 5.14 - Variação da força (corpo de prova 301-303)	57

Tabela 5.15 - Variação da força (corpo de prova 304-306) 57

Tabela 5.16 - Variação da força (corpo de prova 307-309) 57

Tabela 5.17 - Variação da força (corpo de prova 310-312) 58

Tabela 5.18 - Variação da força (corpo de prova 401-403) 58

Tabela 5.19 - Variação da força (corpo de prova 404-406) 58

Tabela 5.20 - Variação da força (corpo de prova 407-409) 59

Tabela 5.21 - Variação da força (corpo de prova 410-412) 59

Tabela 5.22 - Variação da força (corpo de prova 501-503) 59

Tabela 5.23 - Variação da força (corpo de prova 504-506) 60

Tabela 5.24 - Variação da força (corpo de prova 507-509) 60

Tabela 5.25 - Variação da força (corpo de prova 510-512) 60

Tabela 5.26 - Variação da força (corpo de prova 513-515) 61

Tabela 5.27 - Variação da força (corpo de prova 516-518) 61

Tabela 5.28 - Variação da força (corpo de prova 519-521) 61

Tabela 5.29 - Variação da força (corpo de prova 601-603) 62

Tabela 5.30 - Variação da força (corpo de prova 604-606) 62

Tabela 5.31 - Variação da força (corpo de prova 607-609) 62

Tabela 5.32 - Variação da força (corpo de prova 610-612) 63

Tabela 5.33 - Variação da força (corpo de prova 707-709) 63

Tabela 5.34 - Variação da força (corpo de prova 710-712) 63

64	Tabela 5.35 - Variação da força (corpo de prova 810-812)
65	Tabela 5.36 - Valores calculados para $\alpha = 10^\circ$
66	Tabela 5.37 - Valores calculados para $\alpha = 14^\circ$
67	Tabela 5.38 - Valores calculados para $\alpha = 18^\circ$
116	Tabela C.1 - Matriz das observações
117	Tabela C.2 - Análise de variância preliminar
118	Tabela C.3 - Análise de variância detalhada
120	Tabela C.4 - Algoritmo de Yates
120	Tabela C.5 - Valores calculados
121	Tabela C.6 - Diferença entre valores experimentais (médios) e valores calculados

APPENDICE A

α	$f(\alpha)$	$\frac{5.724}{\alpha} - c \cdot k$	$F(\alpha)$	α	$f(\alpha)$	$\frac{5.724}{\alpha} - c \cdot k$	$F(\alpha)$	α	$f(\alpha)$	$\frac{5.724}{\alpha} - c \cdot k$	$F(\alpha)$
0	1,00000	0,000000	0,000000	31	1,00672	0,37539	0,18926	61	1,03603	0,83776	1,03603
1	1,00001	0,011636	0,006121	32	1,00721	0,38854	0,19501	62	1,03784	0,85632	1,03784
2	1,00003	0,023275	0,011592	33	1,00772	0,40180	0,20283	63	1,03974	0,87549	1,03974
3	1,00006	0,034920	0,017421	34	1,00825	0,41516	0,20972	64	1,04174	0,89500	1,04174
4	1,00010	0,046573	0,023278	35	1,00881	0,42864	0,21669	65	1,04384	0,91484	1,04384
5	1,00016	0,058237	0,029128	36	1,00939	0,44224	0,22373	66	1,04605	0,93503	1,04605
6	1,00023	0,069915	0,034976	37	1,01000	0,45596	0,23086	67	1,04838	0,95559	1,04838
7	1,00031	0,081611	0,040828	38	1,01063	0,46981	0,23807	68	1,05082	0,97653	1,05082
8	1,00041	0,093327	0,046690	39	1,01129	0,48380	0,24537	69	1,05340	0,99787	1,05340
9	1,00052	0,10507	0,052566	40	1,01198	0,49792	0,25277	70	1,05613	1,01961	1,05613
10	1,00064	0,11683	0,058458	41	1,01270	0,51218	0,26026	71	1,05900	1,04178	1,05900
11	1,00078	0,12862	0,064369	42	1,01345	0,52660	0,26785	72	1,06204	1,06438	1,06204
12	1,00093	0,14045	0,070300	43	1,01423	0,54117	0,27556	73	1,06526	1,08745	1,06526
13	1,00109	0,15231	0,076252	44	1,01505	0,55590	0,28338	74	1,06867	1,11099	1,06867
14	1,00127	0,16421	0,082227	45	1,01590	0,57080	0,29131	75	1,07228	1,13503	1,07228
15	1,00146	0,17614	0,088227	46	1,01679	0,58587	0,29937	76	1,07611	1,15958	1,07611
16	1,00167	0,18813	0,094253	47	1,01772	0,60111	0,30756	77	1,08018	1,18467	1,08018
17	1,00189	0,20016	0,10031	48	1,01869	0,61655	0,31589	78	1,08451	1,21031	1,08451
18	1,00212	0,21223	0,10639	49	1,01970	0,63217	0,32437	79	1,08912	1,23653	1,08912
19	1,00237	0,22437	0,11251	50	1,02075	0,64800	0,33299	80	1,09404	1,26335	1,09404
20	1,00264	0,23656	0,11866	51	1,02185	0,66403	0,34178	81	1,09928	1,29080	1,09928
21	1,00292	0,24881	0,12485	52	1,02300	0,68027	0,35073	82	1,10488	1,31890	1,10488
22	1,00322	0,26112	0,13107	53	1,02420	0,69674	0,35986	83	1,11087	1,34768	1,11087
23	1,00354	0,27350	0,13734	54	1,02546	0,71344	0,36918	84	1,11727	1,37717	1,11727
24	1,00387	0,28595	0,14365	55	1,02677	0,73037	0,37870	85	1,12413	1,40740	1,12413
25	1,00422	0,29848	0,15001	56	1,02814	0,74755	0,38843	86	1,13148	1,43840	1,13148
26	1,00459	0,31108	0,15642	57	1,02958	0,76498	0,39838	87	1,13935	1,47020	1,13935
27	1,00498	0,32377	0,16287	58	1,03108	0,78265	0,40857	88	1,14780	1,50284	1,14780
28	1,00538	0,33653	0,16938	59	1,03265	0,80066	0,41902	89	1,15687	1,53636	1,15687
29	1,00581	0,34939	0,17595	60	1,03430	0,81891	0,42973	90	1,16660	1,57080	1,16660

DADOS TÉCNICOS

Concepção:
Máquina Eletro Mecânica e Digital com microprocessador de 8 bits.

Capacidades Máximas:

- 150 KN (Mod. MES-08-150);
- 50 KN (Mod. MES-08-50);
- 20 KN (Mod. MES-08-20);

- e sob consulta.

Dimensões Gerais:

Vide tabela.

Velocidade do Cabecote Móvel:

- 0,3 à 550 mm/min.

Velocidade de Retorno Rápido:

- 550 mm/min.

Curso Máximo do Cabecote Móvel:

- 1200 mm (1500 mm).

Distância Entre Colunas:

- 400 mm (Mod. MES-08-20);
- 610 mm (Mod. MES-08-50 e MES-08-150).

Seleção de Velocidade:

6 velocidades pré-selecionáveis (1, 5, 10, 50, 100 e 500 mm/min.), com ajuste contínuo de 20% à 100% dentro de cada velocidade selecionada.

Letura de Carga:

Digital, 4 1/2 dígitos com 0,5% de precisão de fundo de escala.

Sensor de Carga:

4 sensores pré-selecionados com escala de 10%, 20%, 50% e 100%.

Letura de Velocidade:

Digital, 4 dígitos com 0,5% de precisão E.N.

Letura de Curso (deformação):

Digital, 6 dígitos, com 0,01 mm de resolução.

Indicadores Secundários Digitais:

- Data e horas (ajustáveis);
- Ciclos de tração/compressão (programado e atual).

Modos de Letura:

- Instantâneo da carga;

- Pico máximo;

- Pico mínimo;

- Limite máximo;

- Limite mínimo;

- Valor de calibração de ciclo (máx. e mín.);
- Valor de calibração de ganho.

Controle Remoto:

7 funções, sendo 4 do controle do cabecote além do controle da faixa de velocidade, zero de deformação e início de ciclagem.

Saídas:

- Analógica de carga para traçador XY/T;
- Paralela para impressora (padrão Centronix);
- RS-232 serial, para interface com microcomputador.

Modo de Impressão Gráfica

Via Impressora Matricial:

- Gráfico para um ensaio, gerando uma curva;
- Gráfico para "n" ensaios, gerando gráfico de barras;
- Tabela de um ensaio ou tabela de "n" ensaios.

Modo de Trabalho:

Todo início de impressão acompanha um cabeçote apresentando data, horário, nome da empresa, número do ensaio, além de todos os parâmetros significativos do ensaio.

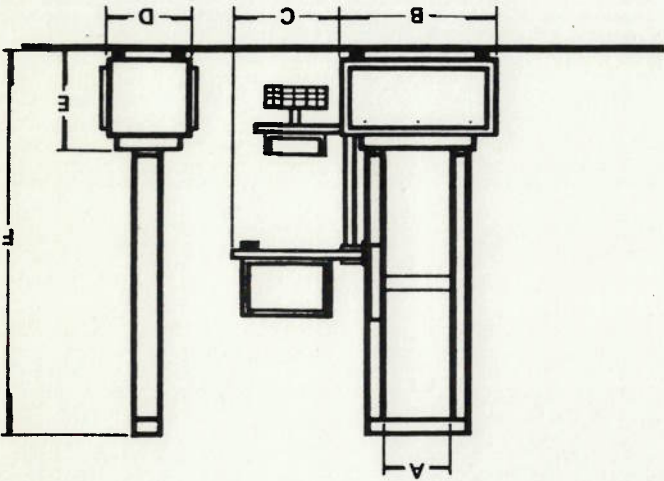
Confiabilidade:

Auto-teste e auto-diagnóstico gerado pelo microprocessador no início de cada ensaio ou toda vez que se liga a máquina.

Alimentação e Energia:

AC, 220V monofásico, 60 Hz. Possui sistema de bateria interna NiCd que mantém constantemente: data, hora e o último estado dos comandos.

Tabela Dimensional:



	A	B	C	D	E	F
150 KN	460	1150	820	700	705	2400
50 KN	360	1000	820	700	705	2400
20 KN	360	1000	820	700	705	2400

Dimensões em milímetros.

OBS.: As dimensões poderão sofrer alterações, sob consulta.

A análise de variância [35], que visa verificar a existência da dependência do fator de atrito com os dois fatores descritos

camada (n) e duas reduções (k).

oito grupos (G) com três repetições (m) para quatro espessuras de

A matriz das observações pode ser interpretada como possuindo

- m1 = valores de "m" para camada de 0.00359 g/dm² (1 min)
- m2 = valores de "m" para camada de 0.01964 g/dm² (5 min)
- m3 = valores de "m" para camada de 0.05299 g/dm² (11 min)
- m4 = valores de "m" para camada de 0.09846 g/dm² (15 min)

onde: R1 = redução 12,56 % ; R2 = redução 24,75 %

	R1	R2
m1	.593	.311
	.575	.321
	.578	.313
m2	.499	.319
	.524	.323
	.510	.303
m3	.478	.254
	.485	.260
	.495	.260
m4	.500	.274
	.499	.277
	.490	.272

TABELA C.1 - Matriz das observações

e reduções de 12,56% e 24,75%.

são aqueles obtidos nos ensaios com ferramenta de semi-ângulo 14º

Os dados experimentais analisados, matriz das observações,

apêndice.

espessura da camada de fosfato e redução, é analisado nesse

A dependência do fator de atrito "m", com relação aos fatores

Comparando o valor encontrado para "sE2", o qual representa o erro experimental, com o valor "sG2", o qual representa o erro entre os grupos, percebe-se que "sG2" é maior que "sE2". Portanto, além do erro experimental existem outros fatores influenciando o erro entre grupos. A significância do efeito desses fatores, pode ser confirmada mediante o teste F.

$$SC = SG + SE$$

$$SE = \sum \sum (Y_{tj} - \bar{Y}_t)^2$$

$$SG = G \cdot \sum (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2$$

$$NIG = G - 1 \quad ; \quad NIE = G(n - 1)$$

$$\frac{SG}{NIG} = sG2 \quad ; \quad \frac{SE}{NIE} = sE2$$

Onde :

QUADRADO MÉDIO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	ENTRE GRUPOS	DENTRO DOS GRUPOS	TOTAL CORRIGIDO
			SG = .312520	SE = .001016	SC = .313537
			NIG = 7	NIE = 16	N-1 = 23
			sG2 = .044645	sE2 = .000063	
QUADRADO MÉDIO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	ENTRE GRUPOS	DENTRO DOS GRUPOS	TOTAL CORRIGIDO

TABELA C.2 - Análise de variância preliminar

acima, será apresentada em duas etapas: análise de variância preliminar e análise de variância detalhada.

Será testado um modelo estatístico o qual prevê que as observações (valores experimentais) possam ser representadas pela soma do valor médio das observações (\bar{y}), o efeito da espessura da camada ($\bar{y}_1 - \bar{y}$), o efeito da redução ($\bar{y}_t - \bar{y}$) e um residuo

Os valores obtidos para SP^2 , ST^2 , SI^2 , os quais representam respectivamente o efeito da espessura da camada, efeito da redução e efeito da interação, são menores que SE^2 , caracterizando que esses três fatores influenciam no erro entre grupos. A significância do efeito desses fatores, pode ser confirmada mediante o teste F.

$$SP^2 = \frac{SP}{NIP} ; ST^2 = \frac{ST}{NIT} ; SI^2 = \frac{SI}{NII}$$

$$NII = (n - 1) * (k - 1)$$

$$NIT = k - 1$$

$$NIP = n - 1$$

$$SI = \sum m \sum \left(\bar{y}_{t1} - \bar{y}_t - \bar{y}_1 + \bar{y} \right)^2$$

$$ST = \sum m \sum \left(\bar{y}_t - \bar{y} \right)^2$$

$$SP = \sum m \sum \left(\bar{y}_1 - \bar{y} \right)^2$$

Onde:

FONTE DE VARIACAO	SOMA DOS GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MEDIO
ESPESSURA	SP =	0.20663
REDUCAO	ST =	0.312520
INTERACAO	SI =	0.003880
ENTRE GRUPOS	SG =	0.337063
	NIP = 3	SP2 = 0.06887
	NIT = 1	ST2 = 0.312520
	NII = 3	SI2 = 0.01293
	NIG = 7	

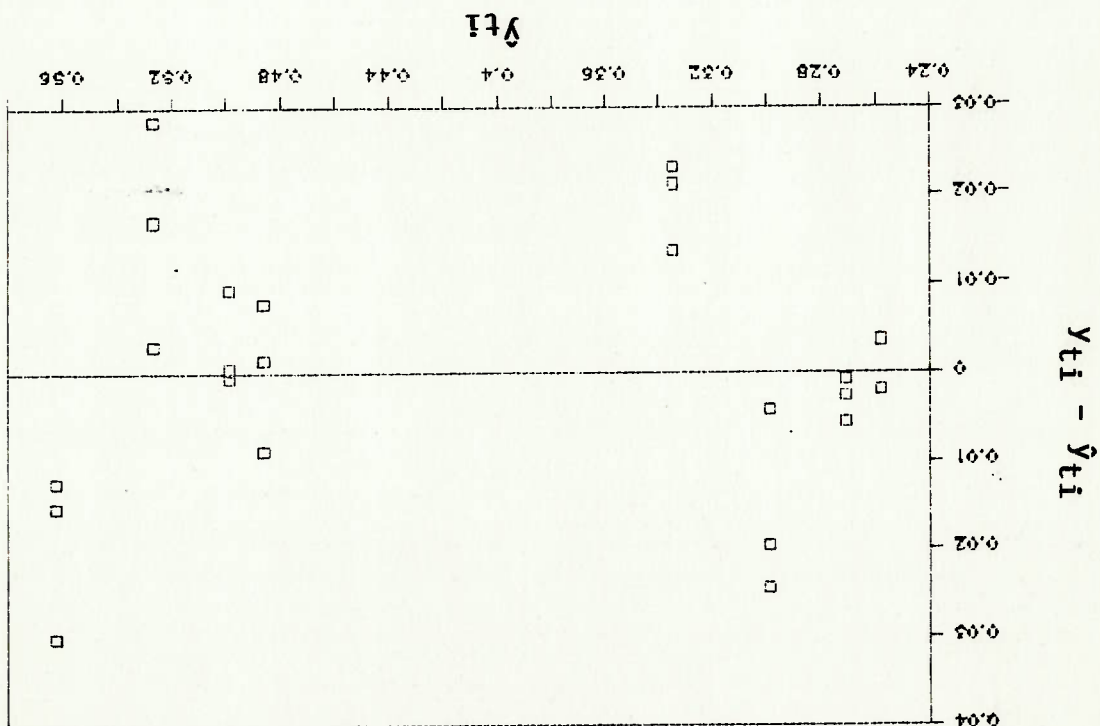
TABELA C.3 - Análise de variância detalhada

$$m = 0.416750 - 0.12225 x_1 - 0.03174 x_2 + 0.011249 x_1 x_2$$

Através do algoritmo de Yates tabela (C.4), mediante o uso da técnica do projeto fatorial a dois níveis, pode-se construir o modelo matemático

Onde : $\hat{y}_{ti} = \bar{y}_i + (\bar{y}_i - \bar{y}) + (\bar{y}_t - \bar{y})$

FIGURA C.1 - Gráfico dos resíduos



A figura (C.1) nos revela que não existe associação entre o tamanho do resíduo e o valor estimado (\hat{y}_{ti}) indicando que o modelo aditivo é adequado.

TABELA C.5 - Valores calculados

m1	.582	.315
m2	.567	.308
m3	.537	.294
m4	.496	.274
R1		R2

Os valores obtidos pelo modelo estão apresentados na tabela (C.5) e os respectivos desvios para os valores experimentais na tabela (C.6)

.582000	.897000	1.667000	4	.416750	M
.315000	.770000	-.48900	2	-.24450	R
.496000	-.26700	-.12699	2	-.06349	E
.274000	-.22200	.044999	2	.022499	RE
					ESTIMATIVA

TABELA C.4 - Algoritmo de Yates

R = redução ; E = espessura da camada

$$\text{Onde : } x1 = \frac{R - \left(\frac{R_{max} + R_{min}}{2} \right)}{\frac{R_{max} - R_{min}}{2}} ; \quad x2 = \frac{E - \left(\frac{E_{max} + E_{min}}{2} \right)}{\frac{E_{max} - E_{min}}{2}}$$

TABELA C.6 - Diferença entre valores experimentais (médios) e valores calculados.

	R1	R2
m1	0	0
m2	.056	-.007
m3	.051	.035
m4	-.222	0