

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR CELSO LUIZ DE
OLIVEIRA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 08/10/91


ORIENTADOR

INFLUÊNCIA DAS RUGOSIDADES SUPERFICIAIS
DA PEÇA E DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE
EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Tese de Mestrado

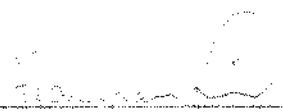
Título da Tese INFLUÊNCIA DAS RUGOSIDADES SUPERFICIAIS
DA PEÇA E DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE
EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA

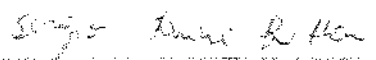
Autor - Celso Lyra de Oliveira

Orientador - Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho

Aprovado por


Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho, Presidente


Prof. Dr. Aécio Zangrandi


Prof. Dr. Sérgio Tonini Junior

Campinas, 08 de Outubro de 1991

AGRADECIMENTOS

Ao Término deste trabalho gostaria de tornar público meu agradecimento às seguintes pessoas e instituições :

Prof. Dr. Ettore Bresciani Filho pelo apoio, orientação e por me levar a compreender a importância de se conduzir um trabalho de pesquisa com rigor científico.

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pela amizade e pela colaboração inestimável em todas as fases do trabalho, em especial durante a realização dos ensaios.

Prof. Ronaldo de Castro Vilela por possibilitar o uso do rugosímetro.

José Luis, Laerte e Rita (DEMa), Ari (DEF) e demais funcionários do DEMa e Comissão de Pós-graduação-FEM.

Centro de Tecnologia da UNICAMP.

Aos demais colegas do DEMa-DEF pela amizade e apoio em nossa convivência diária.

Estudo da Influência das Rugosidades Superficiais da Peça e da Ferramenta no Processo de Extrusão Hidrostática.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da influência das rugosidades superficiais da peça-de-trabalho e da matriz sobre a pressão atuante no processo de extrusão hidrostática do alumínio. São estudados também os regimes de lubrificação presentes no processo através do cálculo dos coeficientes de atrito, usando-se expressões analíticas derivadas da mecânica da conformação plástica.

E, finalmente, são relacionados os acabamentos dos produtos com as qualidades superficiais das matrizes e com as rugosidades iniciais das peças a serem extrudadas, no formato de cilindros apontados.

ABSTRACT

This work presents a theoretical and experimental study related to the influence of the workpiece and die roughnesses on the pressure acting in the hydrostatic extrusion of aluminum. A study of the lubrication regimes of the process is carried out. The friction coefficients are calculated by means of analytical expressions derivated from extrusion mechanics.

Finally, surface roughness of the issuing products is discussed as a function of the die finish and initial roughness of workpieces shaped as little cylinders.

INDICE

	Página
CAPITULO 1 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	
1.1 - Objetivos	01
1.2 - Justificativas	02
1.3 - Referências Bibliográficas	03
CAPITULO 2 - O PROCESSO DE EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA E A EQUAÇÃO BÁSICA DA FORÇA DE EXTRUSÃO	
2.1 - Introdução	04
2.2 - Características do Processo	06
2.3 - Mecânica do Processo	07
2.3.1 - Trabalho de Deformação Uniforme	07
2.3.2 - Trabalho Redundante	08
2.3.3 - Trabalho Devido ao Atrito	09
2.3.4 - Método do Limite Superior	12
2.4 - Referências Bibliográficas	28
CAPITULO 3 - ESTUDO DA MICROGEOMETRIA DAS SUPERFÍCIES	
3.1 - Introdução	30
3.2 - Conceitos Fundamentais	32
3.3 - Classificação das Superfícies	33
3.4 - Diferenças de Forma	35
3.5 - Sistemas de Medida da Rugosidade Superficial	39
3.6 - O Sistema M	39
3.6.1 - Parâmetros Baseados na Profundidade de Rugosidade	43
3.7 - Aspectos Estatísticos	47
3.8 - Técnicas de Medida da Rugosidade Superficial	49
3.9 - Referências Bibliográficas	53
CAPITULO 4 - RELAÇÕES ENTRE GEOMETRIA SUPERFICIAL, LUBRIFICAÇÃO E RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	
4.1 - Introdução à Tribologia	55
4.2 - Regimes de Lubrificação	58

4.3 - Os Regimes de Lubrificação na Extrusão Hidrostática	64
4.4 - A Rugosidade Superficial na Extrusão Hidrostática	67
4.5 - Rugosidade de Superfícies Lubrificadas	69
4.6 - Referências Bibliográficas	71
CAPITULO 5 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	
5.1 - Descrição dos Ensaio	74
5.2 - Máquina Extrusora	75
5.2.1 - Prensa Hidráulica	75
5.2.2 - O Sistema de Extrusão	76
5.2.3 - A Célula de Carga	78
5.3 - Matrizes de Extrusão	82
5.4 - Preparação dos Corpos a Serem Ensaia	86
5.5 - Lubrificantes	89
5.6 - Determinação da Rugosidade	89
5.7 - Referências Bibliográficas	91
CAPITULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISES	
6.1 - Introdução	92
6.2 - Comportamento da Pressão de Extrusão com a Variação da Rugosidade das Peças	99
6.3 - Efeitos da Rugosidade da Matriz Sobre o Processo	103
6.4 - Os Efeitos do Regime Hidrodinâmico	104
6.5 - Características dos Produtos Obtidos	107
6.6 - Referências Bibliográficas	113
CAPITULO 7 - CONCLUSÕES	114
BIBLIOGRAFIA	116

CAPITULO 1

OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

1.1 - Objetivos

O objetivo central do trabalho é a determinação do comportamento da pressão de extrusão ao se variar a rugosidade superficial das matrizes e dos tarugos utilizados no processamento. Para tanto utiliza-se um procedimento experimental em que são ensaiados grupos de peças com níveis de rugosidade bem diferenciados. A conformação plástica a que são submetidas essas peças ao passarem por matrizes, que também apresentam diferentes qualidades de acabamento interno, permite o estabelecimento de relações entre a pressão de processamento e a qualidade superficial dos corpos em estudo.

É feita também uma análise dos esforços presentes no processo de extrusão hidrostática e uma análise dos regimes de lubrificação através de métodos analíticos, os quais permitem o cálculo do coeficiente de atrito na interface peça-ferramenta, necessário para se caracterizar o regime de lubrificação estabelecido.

Em seguida ao estudo da mecânica do processo, passou-se a uma descrição das condições presentes no sistema formado pela interface peça-ferramenta, baseando-se em conceitos da área da Tribologia^[1].

1.2 - Justificativas

A realização desse trabalho se coloca de forma integrada a outros estudos desenvolvidos por um grupo de pesquisadores voltados para a conformação mecânica fina de metais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Esses estudos visam ao aprimoramento de uma sequência de processos de fabricação que possibilitem a obtenção de fios capilares de metais não-ferrosos para aplicações na indústria microeletrônica. A extrusão hidrostática se coloca como o elo inicial dessa sequência, produzindo fios finos prontos para serem utilizados na etapa seguinte, a trefilação.

O esforço no sentido da otimização do processo de extrusão hidrostática visa à produção de fios cada vez mais finos, com bom acabamento superficial ao mesmo tempo em que se procura um maior nível de controle sobre o processo.

Este trabalho procura contribuir para essa otimização através do estudo de alguns aspectos que são relevantes nos processos de conformação plástica como a rugosidade das superfícies e o regime de lubrificação na interface peça-ferramenta.

Através desses estudos pode-se determinar de que forma os acabamentos da peça e da ferramenta se refletem na qualidade do produto e na pressão de extrusão.

1.3 - Referências Bibliográficas

- [1] BRESCIANI F^D, E., Tribologia na Conformação Plástica, Monografia, Vol.2, UNICAMP, Campinas, 1987, pp.77-79.

CAPITULO 2

O PROCESSO DE EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA

E A EQUAÇÃO BÁSICA DA FORÇA DE EXTRUSÃO

2.1 - Introdução

A extrusão hidrostática é um processo no qual uma barra é forçada a passar através de uma ferramenta chamada matriz, usando-se um fluido como meio de transmissão da pressão gerada por uma prensa hidráulica. As matrizes podem ter formas e dimensões variadas e as barras ao passarem por ela têm seu diâmetro reduzido e seu comprimento aumentado [2]

O processo de extrusão hidrostática está representado na figura 2.1. O tarugo é envolvido pelo meio líquido e entra em contato somente com a superfície da matriz. Quando ocorre lubrificação hidrodinâmica, mesmo o contato com a superfície da matriz é evitado. No lado aberto da matriz a pressão é menor do que aquela existente no interior da câmara, o que resulta numa força que faz com que o tarugo passe através do diâmetro menor da matriz. [3,4]

A deformação plástica sob pressão hidrostática é uma operação que permite uma melhora nas propriedades mecânicas da peça devido ao encruamento [5,6]

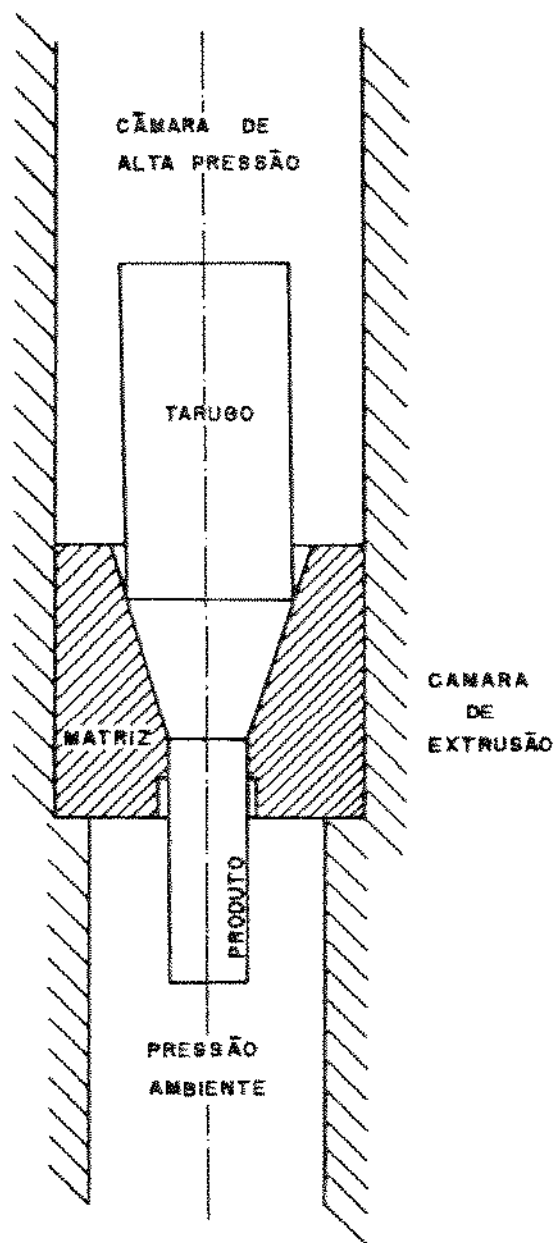


FIGURA 2.1 - O PROCESSO DE EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA

2.2- Características do Processo

As principais características vantajosas são^[7].

1- Eliminação do atrito entre o tarugo e o recipiente. Dessa forma, em contraste com a extrusão convencional, a pressão de extrusão é independente do comprimento do tarugo.

2- Como o fluido pressurizado envolve totalmente o tarugo e lhe dá sustentação lateral, não há possibilidade de que sofra deformações(ou flambagem) exceto através da matriz, o que permite a utilização de tarugos de formas irregulares.

3- O atrito na região matriz-tarugo é reduzido pela presença do lubrificante altamente pressurizado.

4- Possibilidade do uso de matrizes de pequenos ângulos de conicidade que reduzem o trabalho redundante, o que leva a uma redução da pressão total. Isso torna possível o processamento de materiais mais frágeis sem que surjam trincas ou outros defeitos internos.

5- A resistência dos produtos extrudados é maior que a produzida por outros processos. Isso é devido ao fenômeno do encruamento. Como a peça é deformada plásticamente a frio pela ação de grandes pressões isso leva a uma melhoria nas suas

propriedades mecânicas como resistência à tração e dureza.

6- O revestimento das peças metálicas extrudadas por outros metais também é possível, sendo utilizado principalmente no revestimento de cabos.

2.3- Mecânica do Processo

Em um processo de conformação plástica o cálculo da força necessária a sua efetivação deve levar em conta o trabalho total desenvolvido que pode ser dividido em três componentes: [8,9]

- (a) Trabalho de deformação uniforme;
- (b) Trabalho redundante;
- (c) Trabalho devido ao atrito.

2.3.1- Trabalho de Deformação Uniforme

O trabalho de deformação uniforme corresponde simplesmente à energia necessária à deformação plástica do tarugo, desde que não ocorram perdas no processo. Pode ser colocado na forma de pressão de extrusão como:

$$P = \int_0^{\epsilon_1} \sigma \, d\epsilon$$

É o trabalho necessário, por unidade de volume, para se obter a deformação ϵ_1 :

$$\epsilon_1 = \ln R = \ln \frac{A_i}{A_f}$$

Onde A_i e A_f são as áreas das seções transversais do tarugo e do produto, respectivamente.

Deve-se levar em conta que o valor da tensão de escoamento σ corresponde a um determinado valor de deformação ϵ . Para o cálculo da pressão de extrusão, no entanto, é freqüente a utilização de um valor médio da tensão.

2.3.2- Trabalho Redundante

As condições de escoamento para um corpo que está sendo extrudado são bem diferentes daquelas relativas a uma tração longitudinal pura e simples. As seções transversais do tarugo, originalmente planas, não permanecem dessa forma; elas começam a sofrer uma distorção assim que entram na parte cônica da matriz, prosseguindo dentro da mesma.

A figura 2.2 representa o escoamento dentro da matriz cônica. Nota-se que existem duas superfícies (Γ_1 e Γ_2) que definem a região de deformação e onde ocorre uma alteração no módulo e na

direção da velocidade do material. São denominadas superfícies de descontinuidade de velocidade. Diversas possibilidades foram propostas para a forma das mesmas (Figura 2.3).

Considera-se então o trabalho redundante como sendo aquele necessário para que o material atravessasse as superfícies de descontinuidade sem causar mudanças de forma.

O equacionamento do trabalho redundante é obtido através do cálculo das tensões e deformações desenvolvidas, adotando-se formas de superfícies que representem adequadamente as regiões onde ocorrem as descontinuidades de velocidade.

2.3.3- Trabalho Devido Ao Atrito

Na extrusão hidrostática as perdas por atrito estão restritas às regiões de contato matriz-tarugo. No caso de uma matriz cônica com extensão no formato cilíndrico, assume-se que o atrito está presente ao longo dessas duas superfícies.

A determinação do trabalho de atrito requer o estudo tanto das condições de processo (velocidade, relação de redução, acabamento superficial da matriz e da peça) quanto das teorias e modelos relacionados com a lubrificação (ítem 4.2).

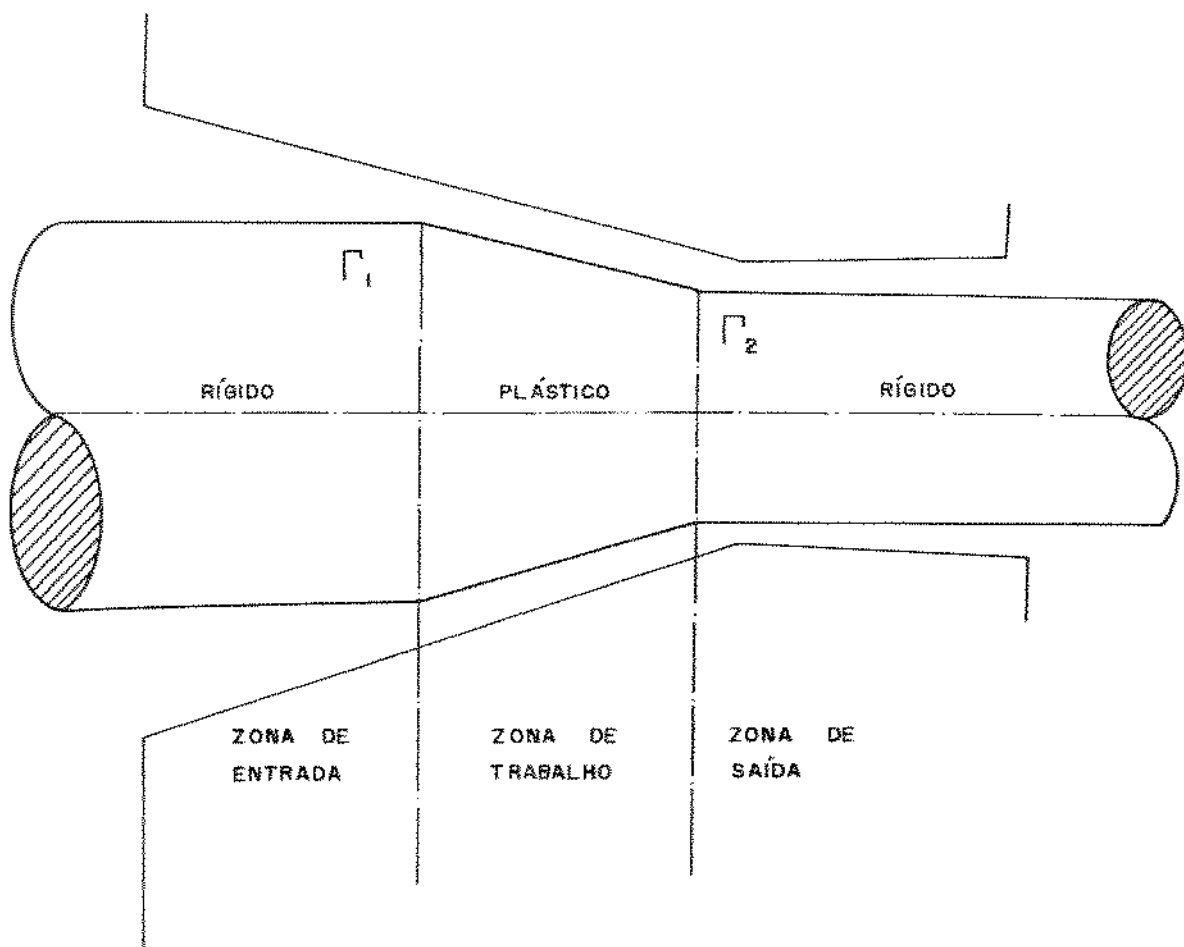


FIGURA 2.2 - ESCOAMENTO ATRAVÉS DA MATRIZ

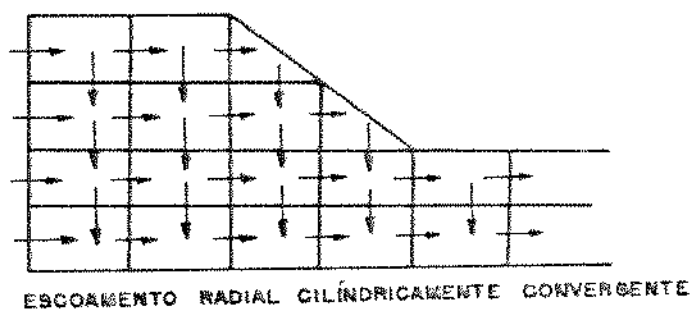
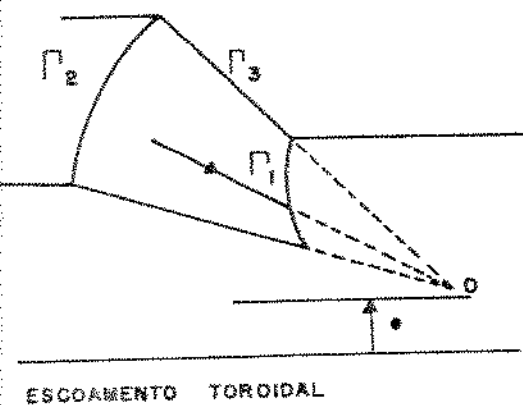
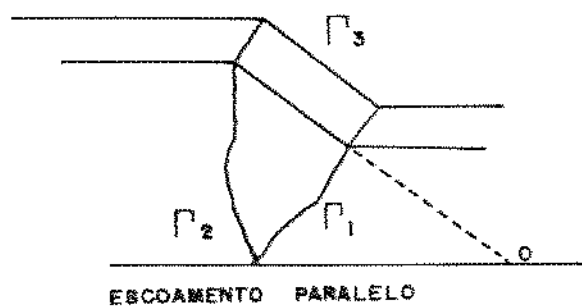
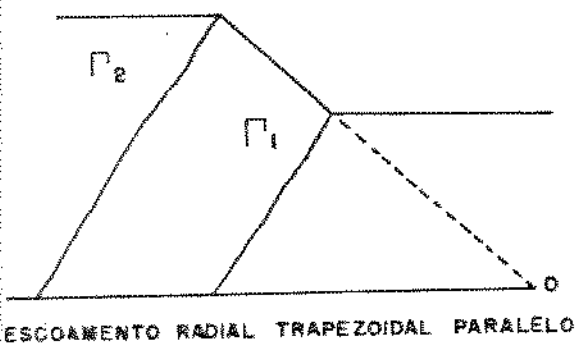
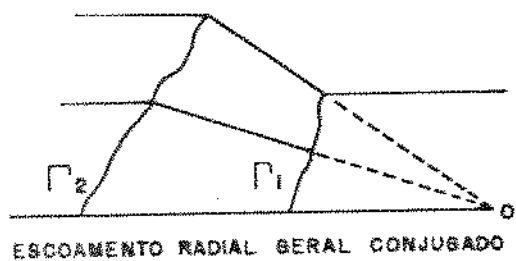


FIGURA 2.3 - CAMPOS DE VELOCIDADE

2.3.4- Método do Limite Superior

O cálculo exato das forças que causam o escoamento dos metais é um trabalho de grande dificuldade. Para que sejam obtidas essas soluções é necessário que tanto o equilíbrio de tensões quanto um campo de velocidades cinematicamente admissível sejam satisfeitos simultaneamente em todos os pontos do corpo que está sendo deformado. Para contornar essa dificuldade existem métodos que fornecem valores menores ou maiores do que as forças reais, os chamados limites inferiores e superiores, respectivamente.^[10]

Nas operações de conformação é do maior interesse a previsão da força que irá, com certeza, causar uma deformação plástica no material, produzindo a desejada mudança de forma. Utiliza-se então o método do limite superior que estabelece que quando um metal escoa, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidades cinematicamente admissível no corpo.

O método do limite superior, apesar das suas limitações, é o que tem apresentado os melhores resultados. Considera tanto o trabalho de deformação uniforme quanto o trabalho redundante e o trabalho de atrito.

O procedimento para a determinação da tensão de extrusão, utilizando-se o método do limite superior, consiste basicamente das seguintes etapas:^[3,4,11-13]

1) Estabelecimento de um campo de velocidades cinematicamente admissível para o corpo, ou seja, um modelo de deformação que atenda às condições de contorno e que se aproxime do escoamento real. O campo de velocidades adotado é o esférico.^[9]

2) Determinação da potência interna ($\dot{W}_i$) correspondente ao campo esférico de velocidades. A potência interna é composta de duas parcelas, uma relativa à deformação uniforme e outra relativa à mudança na direção do fluxo do material e às perdas por atrito;

3) Determinação da potência externa aplicada ($\dot{W}_e$);

4) Estabelecimento da relação $\dot{W}_i \geq \dot{W}_e$

O modelo adota também as seguintes hipóteses:

(a) O material do tarugo se comporta como um material rígido-plástico, isotrópico, homogêneo e contínuo e obedece ao critério de escoamento de von Mises.

A matriz por sua vez é assumida como um corpo rígido.

(b) O modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível, segundo AVITZUR^[11] é o esquematizado na figura 2.4.

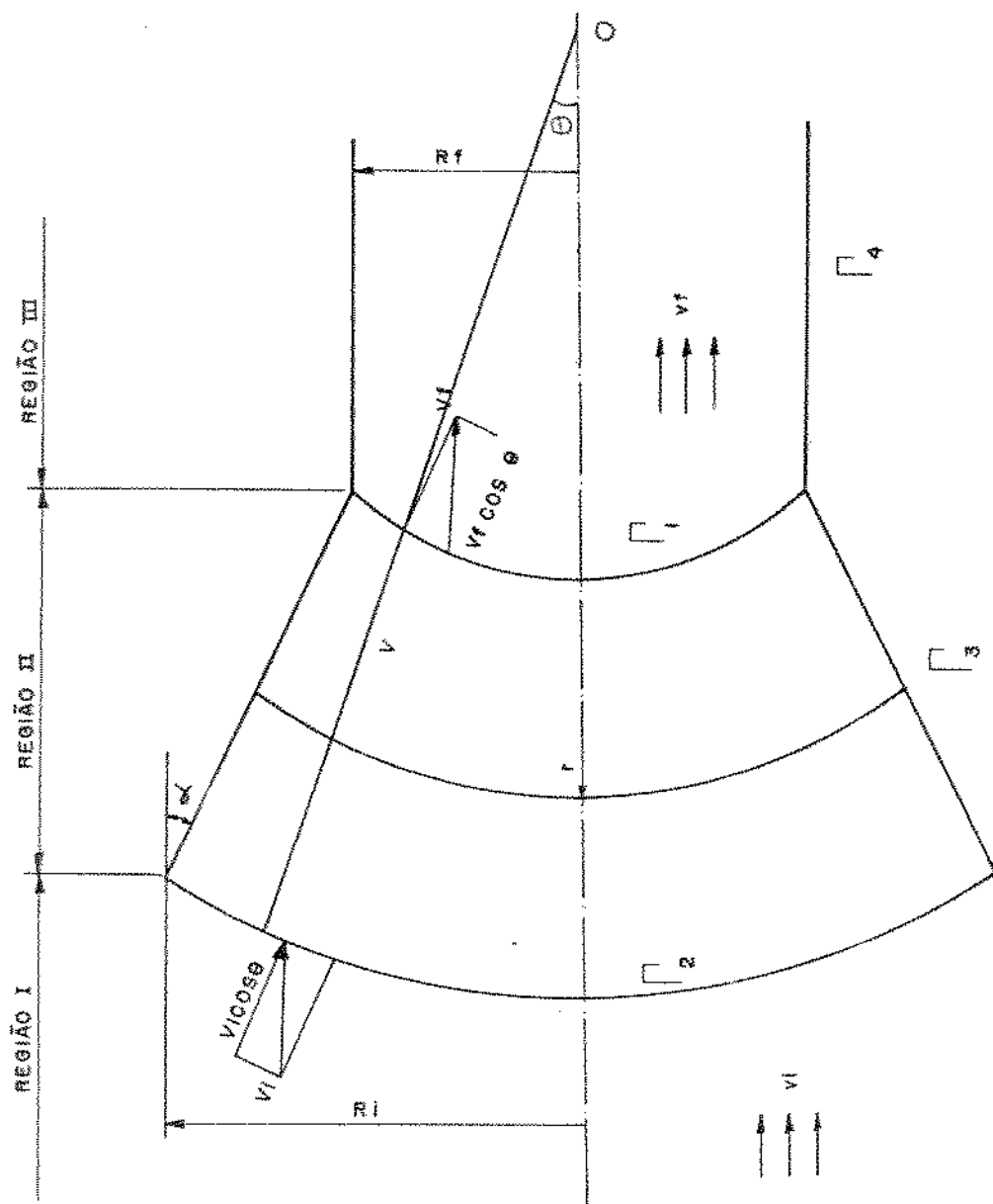


FIGURA 2.4- CAMPO DE VELOCIDADES CINEMATICAMENTE ADMISSÍVEL

O tarugo é dividido em três regiões de velocidade. As superfícies de descontinuidade de velocidade (Γ_1 e Γ_2) são consideradas esféricas e centradas em O, para onde, teoricamente escoam o material. Ao longo das superfícies Γ_3 e Γ_4 , assumidas como cônica e cilíndrica respectivamente, ocorrem as perdas por atrito.

Como na região I o material escoam com velocidade V_i e na região III com V_f , tem-se a seguinte relação, devido à conservação dos volumes:

$$V_i = V_f \left[\frac{R_f}{R_i} \right]^2$$

Na região II a velocidade é dirigida ao vértice (O) do cone. Em um sistema de coordenadas esféricas (r, θ, φ) as componentes da velocidade são:

$$U_r = - V_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^2}$$

$$U_\theta = U_\varphi = 0$$

Ao longo das superfícies Γ_1 e Γ_2 , as velocidades normais a elas são contínuas. A descontinuidade se encontra nas componentes de velocidade tangenciais às mesmas, de magnitude $V_f \sin \theta$ e $V_i \sin \theta$ respectivamente. Essas descontinuidades respondem pela parcela de trabalho redundante, pois se relacionam com as tensões cisalhantes internas responsáveis pela mudança na

direção do escoamento do material de acordo com a geometria das matrizes. Ao longo das superfícies Γ_3 e Γ_4 não há componentes normais de velocidade e, portanto, não existe descontinuidade de velocidades normais às mesmas.

(c) Os modelos de atrito considerados são:

$$\tau = \mu p \quad (\text{modelo de Coulomb})$$

$$\tau = m \tau_0 \quad (\text{modelo da tensão cisalhante constante})$$

A aplicação da teoria do limite superior ao campo de velocidades da figura 2.4 resulta na seguinte expressão para as potências envolvidas:

$$W_e = W_i + W_s \quad (2.1)$$

onde:

W_e = potência externa aplicada;

W_i = potência interna desenvolvida devido à deformação uniforme;

W_s = potência interna devido à mudança na direção do escoamento e às perdas por atrito.

A potência externa pode ser escrita:

$$W_e = - \pi v_f R_f^2 p \quad (2.2)$$

Nas regiões I e III não ocorre deformação e, portanto, não há potência interna de deformação envolvida.

As deformações na região II são escritas no sistema de coordenadas esféricas :

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r} ; \epsilon_{\theta\theta} = \frac{U_r}{r} ; \epsilon_{\varphi\varphi} = \frac{U_r}{r} = - (\epsilon_{rr} + \epsilon_{\theta\theta})$$

$$\epsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} ; \epsilon_{\theta\varphi} = \epsilon_{r\varphi} = 0$$

$$\text{Como } U_r = - v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^2}$$

Então:

$$\epsilon_{rr} = 2 v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^3}$$

$$\epsilon_{\varphi\varphi} = \epsilon_{\theta\theta} = - v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^3}$$

$$\epsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} v_f r_f^2 \frac{\sin \theta}{r^3}$$

$$\epsilon_{\theta\varphi} = \epsilon_{\varphi r} = 0$$

A potência interna necessária unicamente para a deformação é:

$$\dot{W}_i = k \sqrt{2} \int_V \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^*} dv$$

Utilizando-se o critério de von Mises:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^*} dv$$

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \left[\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{r\theta}^2 \right]} dv$$

O que resulta em:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \frac{v_f \cdot r_f^2}{r^2} \sqrt{3 \cos^2 \Theta + \frac{1}{4} \sin^2 \Theta} dv$$

como $dv = 2 \pi r \sin \Theta r d\Theta dr$

tem-se,

$$\dot{W}_i = 4 \pi \sigma_0 v_f r_f^2 \int_0^\alpha \left[\sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \Theta} \sin \Theta \int_{r_f}^{r_i} \frac{dr}{r} \right] d\Theta$$

Após integração com

$$\frac{r_i}{r_f} = \frac{R_i}{R_f} \quad \text{e} \quad r_f = \frac{R_f}{\sin \alpha} \quad \text{tem-se:}$$

$$W_i = 2\pi \sigma_o \frac{v_f R_f^2}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1 - \frac{11}{12}}{\sqrt{\frac{11}{12}}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right\} \ln \frac{R_i}{R_f}$$

Para pequenos semi-ângulos de conicidade da matriz (α) pode-se escrever:

$$W_i = 2\pi \sigma_o v_f R_f^2 \ln \frac{R_i}{R_f} \quad (2.3)$$

Para a potência interna consumida devido às descontinuidades de velocidades ao longo das superfícies Γ_1 e Γ_2 tem-se a seguinte expressão:

$$\dot{W}_{s_{12}} = \int_{\Gamma_1} \tau_o v_e dA + \int_{\Gamma_2} \tau_o v_e dA$$

Como,

$$\Gamma_1: v_s = v_f \sin \theta$$

$$dA = 2 \pi r_f \sin \theta r_f d\theta$$

$$\Gamma_2: v_s = v_i \sin \theta$$

$$dA = 2 \pi r_i \sin \theta r_i d\theta$$

Então :

$$\dot{W}_{s_{12}} = 4 \pi r_f^2 v_f \tau_o \int_0^\alpha \sin^2 \theta d\theta$$

$$\dot{W}_{s_{12}} = 2 \pi v_f R_f^2 \tau_o \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right]$$

Ao longo da superfície cônica Γ_3 a potência é:

$$\dot{W}_{s_3} = \int_{\Gamma_3} \tau_1 v_s dA$$

onde:

$$v_s = v_f r_f^2 \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

$$dA = 2 \pi R \frac{dR}{\sin \alpha}$$

integrando:

$$W_{s_3} = 2 \pi \tau_1 v_f R_f^2 (\cotg \alpha) \ln \frac{R_i}{R_f}$$

Para a potência consumida ao longo da superfície cilíndrica de descontinuidade Γ_4 tem-se:

$$W_{s_4} = \int_{\Gamma_4} \tau_z v_s dA$$

onde:

$$v_s = v_f$$

$$dA = 2 \pi R_f dL$$

integrando:

$$W_{s_4} = 2 \pi \tau_z v_f R_f L$$

A potência total consumida (W_s) ao longo das superfícies de descontinuidade é, então:

$$W_s = W_{s_1} + W_{s_3} + W_{s_4}$$

$$W_s = 2\pi \tau_o v_f R_f^2 \left\{ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha + \frac{\tau_1}{\tau_o} (\cotg \alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{\tau_2}{\tau_o} \frac{L}{R_f} \right\} \quad (2.4)$$

Tomando-se $W_i + W_s$ e igualando-se a W_e tem-se:

$$\frac{P}{\sigma_o} = -2 f(\alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} - 2 \frac{\tau_o}{\sigma_o} \left\{ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + \frac{\tau_1}{\tau_o} \cot \alpha \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{\tau_2}{\tau_o} \frac{L}{R_f} \right\} \quad (2.5)$$

onde:

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{132}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right\}$$

Pelo critério de escoamento de von Mises $\tau_o = \sigma_o / \sqrt{3}$. A aplicação do modelo de Coulomb para o atrito nas superfícies Γ_2 , Γ_4 fornece $\tau = \mu \sigma_\theta$.

$$\text{Na superfície } \Gamma_2 : \sigma_\theta = \sigma_o \left[\ln \frac{R_f^2}{R^2} - 1 \right]$$

$$\text{Na superfície } \Gamma_4 : \sigma_\theta = -\sigma_o$$

Aplicando-se essas relações na equação (2.5) e considerando-se $f(\alpha) = 1$ para ângulos pequenos, que é o caso, chega-se à equação que permite o cálculo da pressão de extrusão :

$$P = \sigma_0 \left\{ 2 \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + 2\mu \left[(\cotg \alpha) \cdot \left(1 + \ln \frac{R_i}{R_f} \right) \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right] \right\} \quad (2.6)$$

Na verdade durante a deformação o valor da tensão limite de escoamento (σ_0) do alumínio não se mantém constante como admitido no desenvolvimento matemático efetuado, pois esse material sofre o fenômeno do encruamento, ou seja, tem a sua tensão de escoamento aumentada ao ser deformado a frio.

Pode-se escrever a tensão limite de escoamento em função da deformação, para temperaturas do tarugo menores que a temperatura de recristalização, como: [14]

$$\sigma_y = K \varepsilon^n$$

Onde os coeficientes K e n relacionam-se à resistência mecânica e ao encruamento, respectivamente.

Através de ensaios de compressão do alumínio (Tabela 2.1) efetuados por BUTTON^[15], chegou-se à curva de escoamento do material (Figura 2.5) cuja expressão analítica é:

$$\sigma_y = 169,76 \varepsilon^{0,256} \quad [\text{MPa}]$$

TABELA 2.1 - Resultados dos Ensaaios de Compressão

Corpo-de-prova: diâmetro inicial $\phi_i = 12,7$ mm,
altura inicial $h_i = 19$ mm

Ensaio	ϕ (mm)	h (mm)	F (N)	$\epsilon = \ln (h_i/h)$	$\sigma_y = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \phi^2}$ (MPa)
1	13,10	18,00	11.901	0,054	88,25
2	13,50	17,20	11.529	0,100	80,50
3	14,00	16,00	16.736	0,177	108,74
4	14,10	15,10	19.339	0,229	123,84
5	14,80	14,30	21.199	0,289	123,25
6	15,20	13,55	23.058	0,338	127,07
7	15,60	13,00	26.405	0,380	138,15
8	16,10	12,00	29.009	0,459	142,47
9	16,60	11,40	30.868	0,516	142,66
10	16,70	11,00	32.356	0,546	147,76
11	16,80	11,50	31.240	0,507	140,90
12	17,50	10,20	35.703	0,622	148,45
13	17,70	10,15	35.703	0,632	145,11
14	19,00	9,00	45.373	0,752	160,02
15	20,00	8,30	50.208	0,833	159,82
16	20,50	7,70	55.787	0,910	169,04

Curva obtida: $\sigma_y = 169,76 \cdot e^{0,256 \epsilon}$ [MPa]

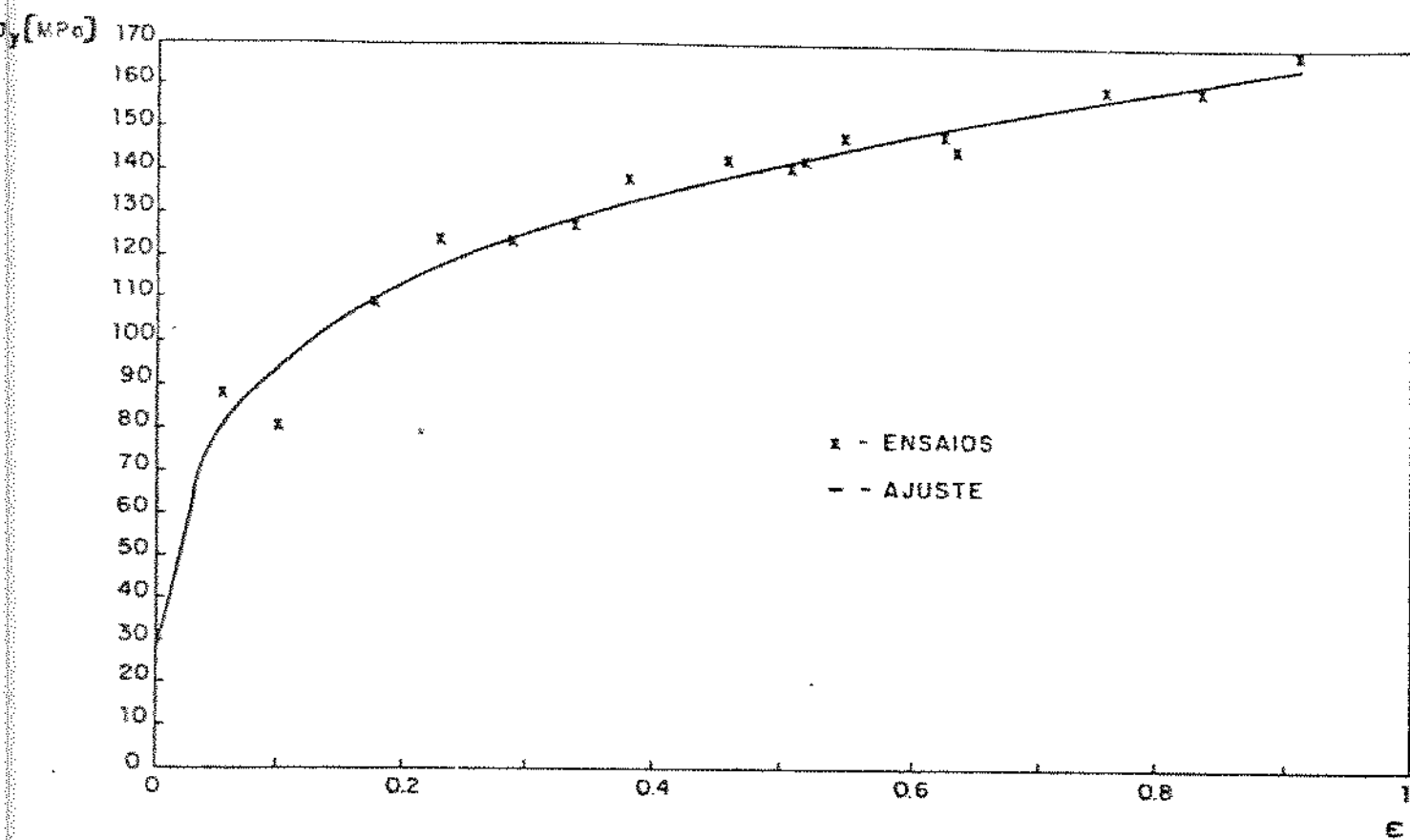


Figura 2.5 - Curva Experimental Obtida nos Ensaio de Compressão

Como a tensão limite de escoamento do material dos tarugos aumenta com o aumento da deformação sofrida, calcula-se uma tensão média σ_m para ser utilizada na expressão 2.6 em lugar de σ_o .

Considerando-se o nível de deformação presente no processo, ϵ_p , pode-se chegar a σ_m (Figura 2.6) através do seguinte procedimento:

$$\sigma_m = \frac{\int_0^{\epsilon_p} \sigma_y d\epsilon}{\epsilon_p} \quad (2.7)$$

Onde:

$$\epsilon_p = \ln \frac{A_i}{A_f} = 1,546$$

Então:

$$\sigma_m = \frac{\int_0^{\epsilon_p} 169,8 \epsilon^{0,256} d\epsilon}{\epsilon_p} = \frac{169,8 \epsilon_p^{0,256+1}}{1,256 \epsilon_p}$$

E obtem-se :

$$\sigma_m = 151,2 \text{ MPa}$$

A expressão que fornece a pressão de extrusão fica:

$$P = \sigma_m \left\{ 2 \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + 2\mu \left[(\cotg \alpha) \left(1 + \ln \frac{R_i}{R_f} \right) \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right] \right\} \quad (2.8)$$

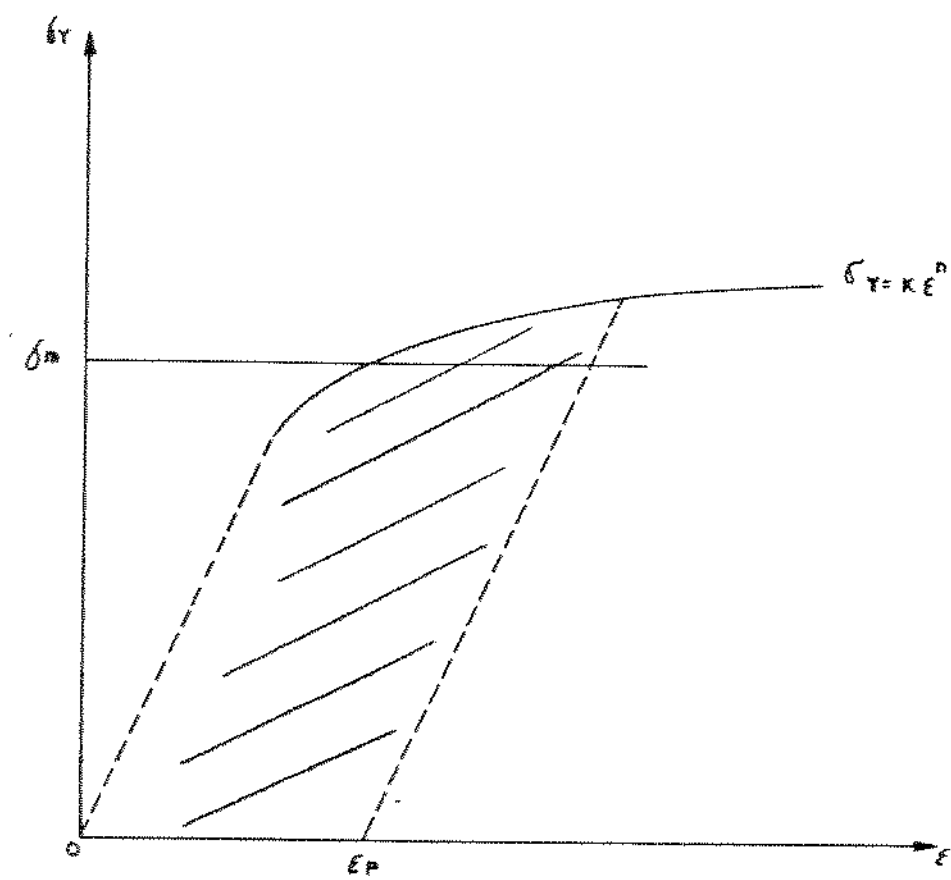


Figura 2.6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TENSÃO MÉDIA

2.4 - Referências Bibliográficas

- [2] BRESCIANI F^o, E. et alli, Conformação Plástica dos Metais, Unicamp, Campinas, 1985, Vol.1.
- [3] AVITZUR, B., Hydrostatic Extrusion, Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME, November, 1965, pp.487-494.
- [4] AVITZUR, B., Metal Forming: Processes And Analysis, Mc Graw-Hill, 1968, Nova York, p.296.
- [5] DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, Ed. Guanabara Dois, 2^a Edição, Rio de Janeiro, 1981, p.125.
- [6] LENGYEL, B. e CULVER, L., Properties of Materials Extruded by Orthodox Hydrostatic Extrusion, Journal of The Institute of Metals, Vol. 97, 1969, pp.97-103.
- [7] PUGH, H.D., et al., Hydrostatic Extrusion - A Review, Annals of The CIRP, Vol.21/2, 1972, p.167.
- [8] ALEXANDER, J.M. e LENGYEL, B., Hydrostatic Extrusion, Mills & Boon Ltd., Londres, 1969, p.29.

- [9] PUGH, H. D., Redundant Work and Friction in The Hydrostatic Extrusion of Pure Aluminium and An Aluminium Alloy, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 6, 1964, pp.362-370.
- [10] HOSFORD, W. e CADDELL, R., Metal Forming: Mechanics And Metallurgy, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1983, pp.143-145.
- [11] AVITZUR, B., Analysis of Wire Drawing And Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, November, 1964, pp.305-316.
- [12] AVITZUR, B., Analysis of Metal Extrusion, Journal of Eng. For Industry, Trans. of ASME, February, 1965, pp.57-70.
- [13] AVITZUR, B., Study of Flow Through Conical Converging Dies, Wire Industry, June, 1982, pp.449-454.
- [14] ALTAN, T. e BOULGER, F., Flow Stress of Metals And Its Application in Metal Forming Analyses, Journal of Eng. For Industry, Nov. 1973, p. 1012.
- [15] BUTTON, S.T., Estudo da Lubrificação Hidrodinâmica na Extrusão Hidrostática, Tese de Doutorado, Unicamp, 1990, p.98.

CAPITULO 3

ESTUDO DA MICROGEOMETRIA DAS SUPERFÍCIES

3.1 - Introdução

Os processos de fabricação acarretam alterações nas superfícies dos corpos sobre os quais exercem a sua ação. Isso ocorre nos processos de conformação plástica, nos quais o mecanismo de lubrificação é o fator de controle. Assim, numa interface real, as rugosidades da peça e da ferramenta irão refletir a história do processamento a que foram submetidas. O mecanismo de lubrificação será diretamente influenciado e irá interagir com as irregularidades superficiais de forma decisiva para a qualidade dos corpos em contato^[16].

No caso específico da produção de matrizes de extrusão as superfícies internas das mesmas, resultantes de torneamento e lixamento, terão os acabamentos característicos desses processos. Isso demonstra a utilidade prática do estudo da microtopografia das superfícies como forma de melhor entender como os processos de fabricação, que geram essas superfícies, podem ter reflexos sobre

os acabamentos dos produtos.

A questão das irregularidades superficiais vem sendo estudada há muito tempo. Já no século XVIII Coulomb estabelecia as leis básicas do atrito e incorporava o conceito dos picos de irregularidade, ou asperezas, que interagindo mecanicamente entre as superfícies em contato seriam, segundo ele, os principais responsáveis pela resistência ao escorregamento^[17]. Leonardo Da Vinci observou que corpos com superfícies suaves apresentavam menor atrito e Ammontons (1706) juntamente com outros pesquisadores franceses da sua época já atribuíam os efeitos de atrito à rugosidade superficial^[18].

Apesar da continuidade das pesquisas somente no século XX foi possível o desenvolvimento de métodos que permitissem a medida direta das imperfeições superficiais. Por volta dos anos cinquenta uma variedade de técnicas de medida se tornaram de uso comum. Entre essas técnicas se destacam: microscopia óptica, microscopia eletrônica e perfilometria. Esta última se mostrou especialmente útil no desenvolvimento de medidas quantitativas do relevo das superfícies.

As superfícies reais, aparentemente lisas, são na verdade constituídas de uma infinidade de saliências e reentrâncias denominadas picos e vales, respectivamente. Esses extremos de elevação podem ser distribuídos sobre uma linha média que represente uma superfície plana idealizada. Se uma superfície aparentemente plana for, na verdade, ligeiramente ondulada, então essa ondulação vai se constituir numa irregularidade superficial de grande comprimento de onda. As irregularidades podem ser

pensadas então como um espectro de comprimentos de onda, onde os comprimentos mais curtos seriam as rugosidades da superfície e os mais longos seriam as variações macrogeométricas na forma da superfície [19].

3.2 - Conceitos Fundamentais

Mesmo a peça ou ferramenta mais cuidadosamente produzida apresenta desvios de suas formas e dimensões nominais. Ao serem analisados esses desvios da superfície real em relação à superfície geométrica concebida em projeto são encontradas duas grandes classes de erros [20]:

(a) Erros Macrogeométricos

São os erros de forma da superfície. Podem ser medidos com instrumentos convencionais e não são levados em conta no que diz respeito à lubrificação.

(b) Erros Microgeométricos

é a rugosidade superficial. Só pode ser medida através de

aparelhos especiais como rugosímetros, perfilógrafos e perfiloscópios.

Como não é possível a determinação dos erros de todos os pontos de uma superfície, a determinação é feita ao longo das linhas que constituem os perfis das superfícies.

3.3 - Classificação das Superfícies

Para efeito de estudo de acabamento superficial as superfícies (Figura 3.1) são classificadas da seguinte forma^[21]:

Superfície Real - é a superfície que limita o corpo, separando-o do meio que o envolve.

Superfície Geométrica - é a superfície ideal prescrita no projeto. Nela não existem erros de forma ou de acabamento.

Superfície Efetiva - Superfície determinada através de instrumentos de análise superficial. A superfície efetiva tende a se aproximar da superfície real com o aumento da precisão de medida.

Perfil Real - Resulta da intersecção da superfície real com um plano perpendicular à superfície geométrica.

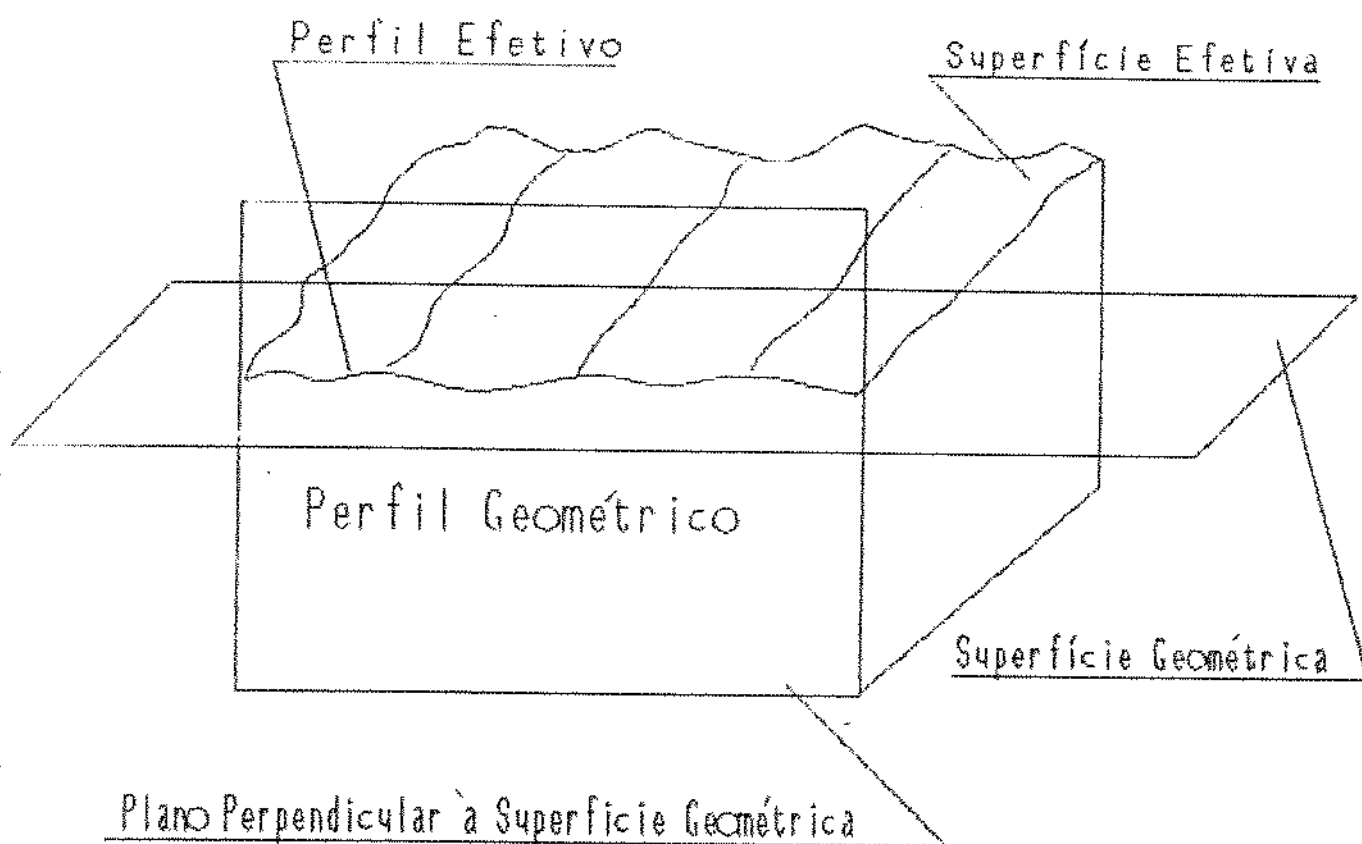


FIGURA 3.1 - GRANDEZAS FUNDAMENTAIS

Perfil Geométrico - Resulta da intersecção da superfície geométrica com um plano perpendicular a ela.

Perfil Efetivo - Imagem aproximada do perfil real obtido por meio de avaliação ou medição.

Passo das Irregularidades Superficiais - Média das distâncias entre as saliências mais pronunciadas do perfil efetivo, situadas no comprimento de amostragem.

Comprimento de Amostragem - Comprimento medido na direção geral do perfil, suficiente para avaliação dos parâmetros de rugosidade.

3.4 - Diferenças de Forma

O que diferencia a superfície real da superfície geométrica são suas diferenças de forma, sejam elas macro ou microgeométricas. Pode-se definir diferença de forma como a totalidade das diferenças da superfície real com relação à superfície geométrica ideal. As diferenças de forma são classificadas em cinco ordens [20].

Diferenças de Forma de 1^a Ordem

São as diferenças que no exame de uma superfície podem

ser verificadas em toda a sua extensão. Essas diferenças são conhecidas como desigualdade, ovalização e cilindricidade. Podem ser representadas esquematicamente através da figura 3.2. Estas diferenças de forma podem ser determinadas por instrumentos convencionais de medida.

Diferenças de Forma de 2^a Ordem

São as diferenças de forma da superfície real que também podem ser comprovadas em exames de detalhes estatisticamente representativos da superfície. Para a maioria das técnicas de medida industriais, são consideradas e medidas as diferenças de forma de 2^a ordem em diante.

São diferenças que se repetem de modo regular ou irregular e cujas distâncias são um múltiplo considerável de sua profundidade. A rugosidade superficial pode ser considerada superposta a uma superfície ondulada. A figura 3.3 representa esquematicamente a diferença de forma de 2^a ordem.

As ondulações são caracterizadas por dois parâmetros:

Altura da ondulação - Média das distâncias entre o ponto mais alto (pico) e o mais baixo de uma ondulação (vale), no perfil efetivo;

Passo da Ondulação - Média das distâncias entre dois picos ou dois vales sucessivos de uma ondulação, no perfil efetivo.

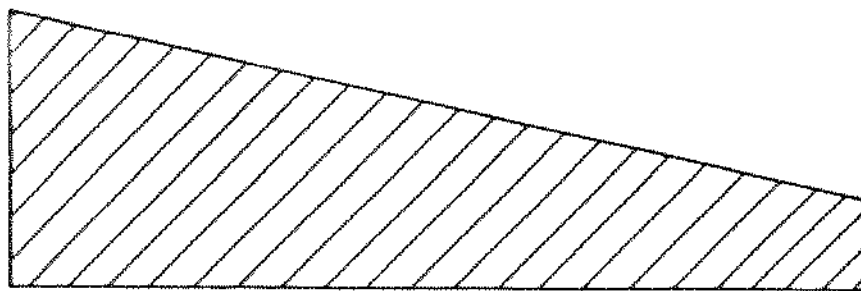


FIGURA 3.2 – DIFERENÇAS DE FORMA DE PRIMEIRA ORDEM

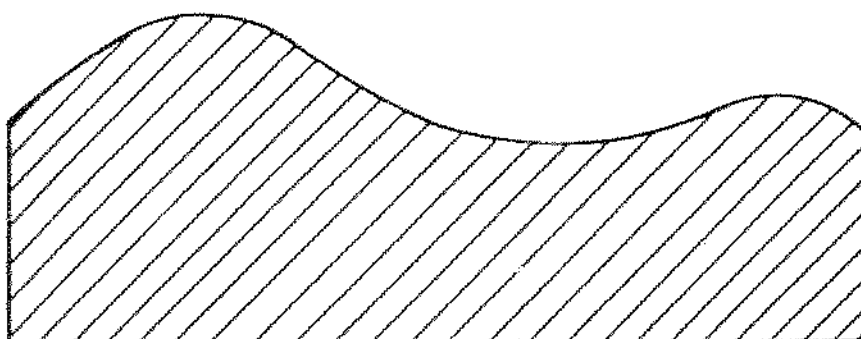


FIGURA 3.3 – DIFERENÇAS DE FORMA DE SEGUNDA ORDEM

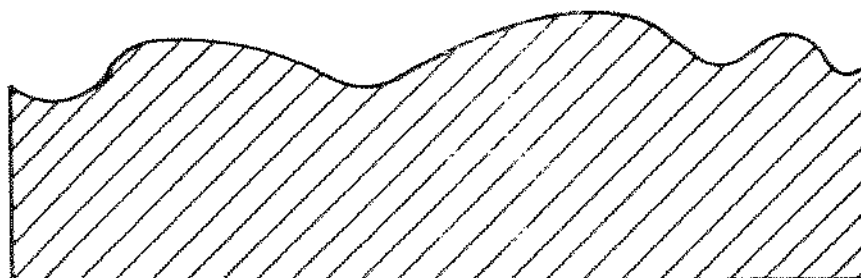


FIGURA 3.4 DIFERENÇAS DE FORMA DE TERCEIRA ORDEM



FIGURA 3.5 – DIFERENÇAS DE FORMA DE QUARTA ORDEM

Diferença de Forma de 3ª Ordem

As diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens têm como característica geral o fato de se repetirem ao longo da superfície de maneira regular ou irregular, sendo que as distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade. A diferença de forma de 3ª ordem é caracterizada por ranhuras ou sulcos, como mostrado na figura 3.4.

Diferenças de Forma de 4ª Ordem

São irregularidades como estrias que podem originar-se, por exemplo, durante o lixamento de uma superfície (Figura 3.5).

Diferenças de Forma de 5ª Ordem

Essas diferenças não podem ser representadas graficamente. Estão diretamente ligadas a alterações sofridas pela estrutura do material resultantes de processos de modificação da superfície por ação química (corrosão, por exemplo).

Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial pode, então, ser definida como resultado da superposição das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens. O seu perfil gráfico pode ser obtido através de aparelhos que registrem as diferenças de forma de 2ª a 5ª ordens.

Na figura 3.6 está representada a composição dos desvios de ondulação com os desvios de 3ª e 4ª ordens (ranhuras, estrias), resultando no perfil completo.

3.5 - Sistemas de Medida da Rugosidade Superficial

Existem dois sistemas básicos de medida que são aceitos internacionalmente: o que se baseia na linha média (M) e o da envolvente (E). O sistema da linha média é o mais empregado, porém alguns países padronizam os dois sistemas. A A.B.N.T. (Associação Brasileira de Normas Técnicas) adota para o Brasil o sistema M [21].

3.6 - O Sistema M

No sistema da linha média todas as grandezas de medida de rugosidade são definidas a partir da conceituação de linha média: linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal forma que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem L (Figura 3.7).

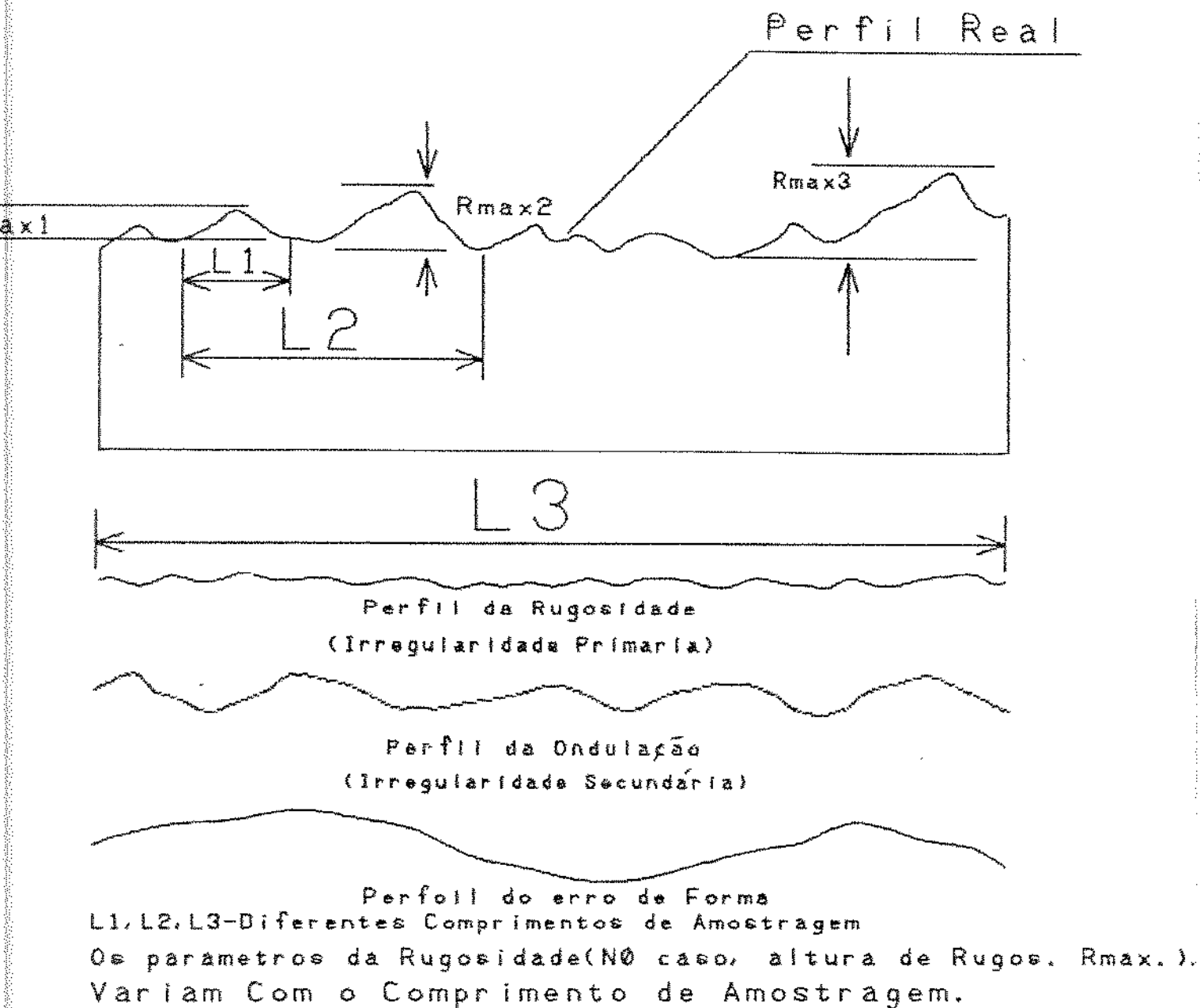


FIGURA 3.6 - COMPOSIÇÃO DOS DESVIOS DE ONDULAÇÃO E RUGOSIDADE

Para um tratamento matemático adequado adota-se a configuração representada na figura 3.8 e pode-se afirmar que, supondo-se que seja conhecido o perfil para um comprimento L, com relação à linha média, a soma das áreas positivas (picos) deve ser igual à soma das áreas negativas (vales).

A linha média satisfará, portanto, à equação:

$$\int_0^L y \, dx = 0$$

Onde os valores de y devem ser tomados com o sinal correspondente.

Sendo y dx a área de uma faixa elementar, a área total dos picos e vales dentro do comprimento de referência L será:

$$A = \int_0^L |y| \, dx$$

Os sistemas de medida de rugosidade, que se baseiam na linha média, podem ser agrupados em três classes:

- (i) Os que se baseiam na medida da profundidade da rugosidade;
- (ii) Os baseados em medidas horizontais;
- (iii) Os que se baseiam em medidas proporcionais;

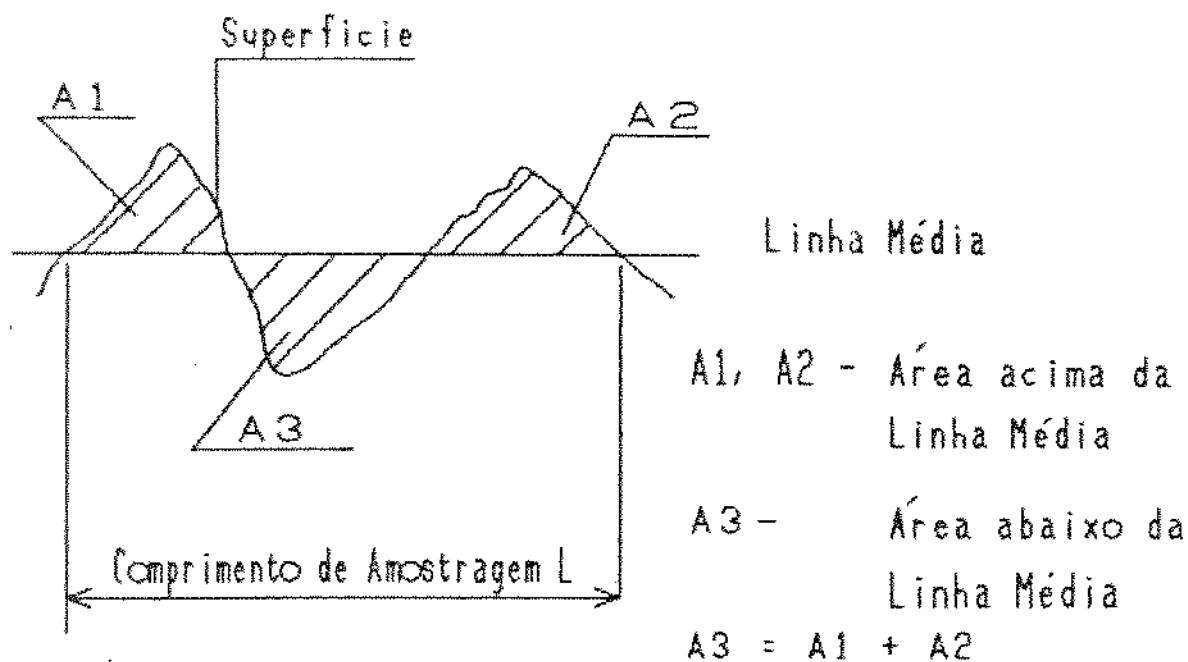


Figura 3.7 - Linha Média

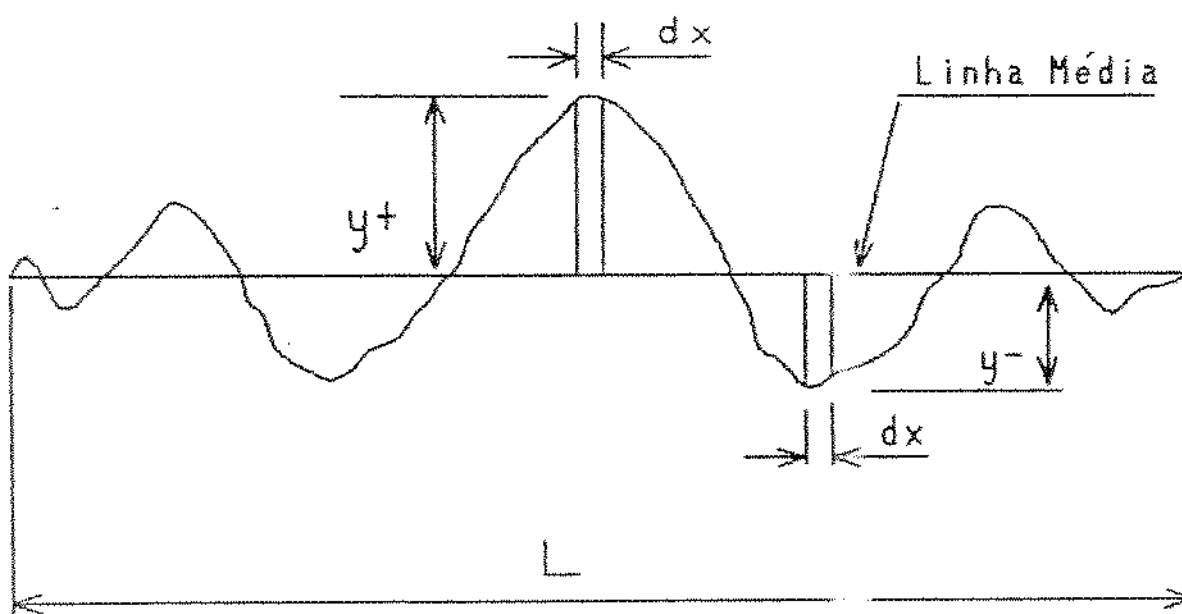


Figura 3.8 - Determinação da Linha Média

Por serem os sistemas que englobam os parâmetros mais utilizados tanto na indústria quanto na pesquisa acadêmica vamos nos referir somente àqueles baseados na profundidade da rugosidade.

3.6.1 - Parâmetros Baseados na Profundidade de Rugosidade

a) Desvio Médio Aritmético (Ra)

É o parâmetro de rugosidade internacionalmente aceito e adotado. Era conhecido em alguns países como CLA (Center Line Average) ou AA (Arithmetical Average). [22] Representa a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média no comprimento de amostragem (Figura 3.9). É definido para um perfil de comprimento L, na direção x como:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L}$$

ou então, aproximadamente,

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

onde, "n" é o número de ordenadas consideradas.

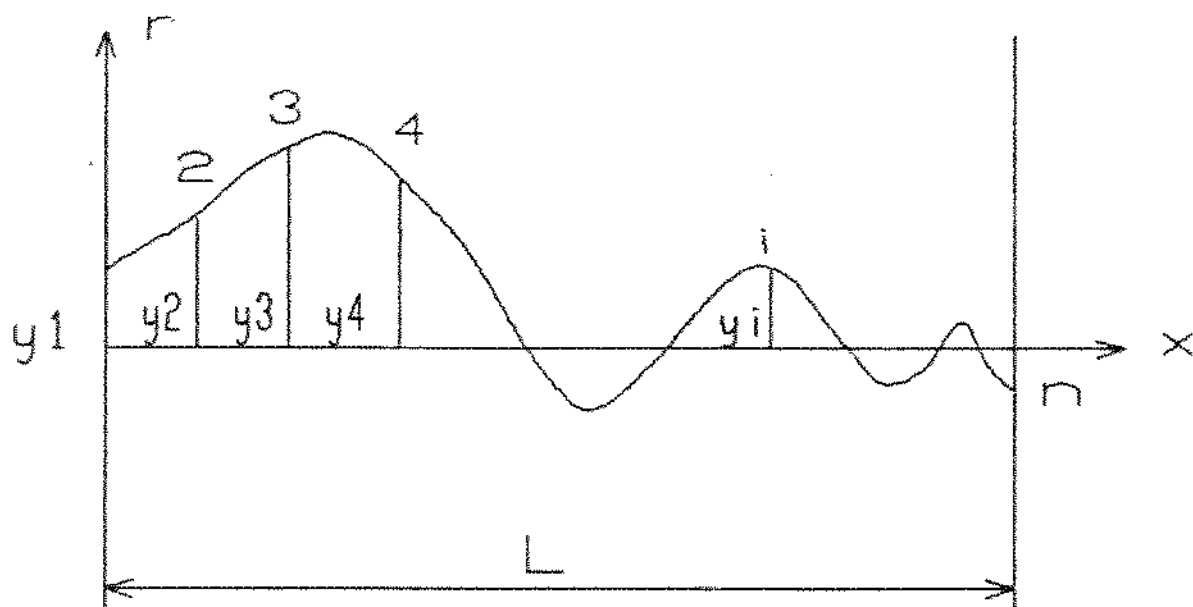


FIGURA 3.9 - DESVIO MÉDIO ARITMÉTICO RA (CLA OU AA)

Pela norma brasileira a avaliação da rugosidade será feita usando-se os valores Ra, por ser esse o parâmetro por ela adotado. Não tem, contudo, um significado físico particular.

Deve-se ressaltar que essa grandeza representa um valor médio e que ela sozinha não pode dar uma indicação completa da textura da superfície. Recentemente novos parâmetros foram estabelecidos, possibilitando a obtenção de informações adicionais sobre textura superficial. São basicamente parâmetros de amplitude e de espaçamento [23,24].

Para medidas de rugosidade são recomendados os valores mínimos de comprimento de amostragem da tabela 3.1 [21].

Tabela 3.1 - Comprimentos de Amostragem

Rugosidade Ra (μm)	Comprimento Mínimo de Amostragem (mm)
0 a 0,1	1,25
0,1 a 2	4
2 a 10	12,5

b) Desvio Médio Quadrático (Rq)

Essa grandeza é bastante utilizada nos E.U.A., onde é denominada RMS (Root Mean Square Average).

É definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média no

comprimento de amostragem.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx}$$

Ou aproximadamente,

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$$

Sendo n = número de ordenadas.

Embora seja um processo válido, a elevação ao quadrado aumenta bastante o efeito da irregularidade que se afasta da média. O valor de Rq (RMS) é cerca de 11% maior que o valor de Ra (AA, CLA).

O Rq é o único parâmetro de rugosidade com um significado físico: é o desvio-padrão da distribuição dos picos e vales e dessa forma é de importância fundamental na tentativa de se descrever a rugosidade superficial através de métodos estatísticos^[25]. As linha médias dos parâmetros Ra e RMS coincidirão apenas no caso de um perfil com distribuição simétrica dos picos.

c) Altura das Irregularidades dos 10 pontos (Rz)

Definida como a diferença entre o valor médio das ordenadas dos 5 pontos mais salientes e o valor médio das ordenadas dos 5 pontos mais reentrantes medidos a partir de uma

linha paralela à linha média, não interceptando o perfil, e no comprimento de amostragem (Figura 3.10).

d) Altura Máxima das Irregularidades (R_{max})

Definida como a distância entre duas linha paralelas à linha média e que tangenciam a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda, medida no comprimento de amostragem (Figura 3.11). É o critério preferido pelas normas alemãs que a designam por R_t , simbologia também adotada pela ISO (International Standardization Organization). Pode ser facilmente utilizada quando se dispõe de aparelhos traçadores de perfis (perfilógrafos).

e) Profundidade Média (R_p)

É a ordenada da saliência mais pronunciada, com origem na linha média, no comprimento de amostragem (Figura 3.12).

3.7 - Aspectos Estatísticos

Os parâmetros que indicam a rugosidade superficial, normalmente R_a ou RMS , têm, no entanto, uma limitação: são incapazes de fornecer informações sobre a textura da superfície. É possível a obtenção de um mesmo valor para esses parâmetros, medindo-se duas superfícies com distribuições de picos e vales

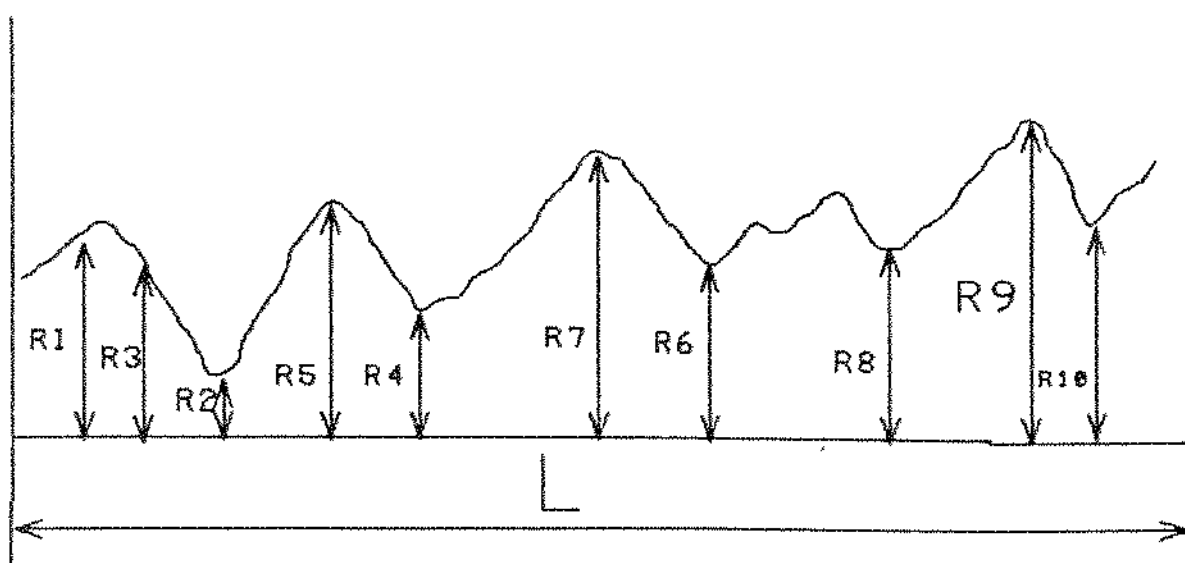


Fig.3.10 -Altura das Irregularidades dos 10 Pontos Rz

$$R_z = \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9}{5} - \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}}{5}$$

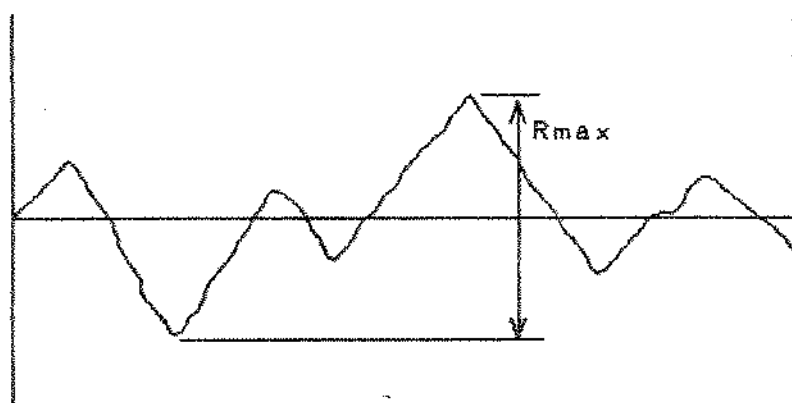


Figura 3.11 - Altura Máxima do Perfil

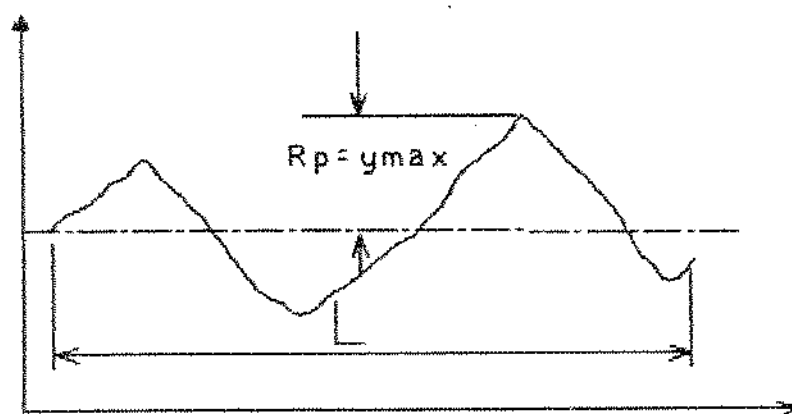


Figura 3.12 - Profundidade Média

completamente diversas uma da outra. Considerando-se as superfícies representadas na figura 3.13, vê-se que os perfis quando medidos apresentarão um mesmo valor de Ra ou RMS mas há uma visível diferença entre eles. Um tem uma textura mais aberta que o outro, o que é uma importante diferença funcional em muitos casos práticos de engenharia.

Uma caracterização mais global da superfície pode ser conseguida pelo uso de um tratamento estatístico derivado das análises da teoria das comunicações. O tratamento da variação aleatória da informação (isto é o traço de uma superfície irregular) leva a dois parâmetros que descrevem a textura : a função autocorrelação que permite distinguir a textura de superfícies que tenham o mesmo valor de rugosidade e a função densidade espectral de potência que revela as frequências dominantes no perfil. O resultado significativo obtido por WHITEHOUSE E ARCHARD [26] indica que qualquer perfil superficial aleatório pode ser completamente caracterizado por dois parâmetros, o valor RMS da distribuição de picos e a distância de correlação, um fator obtido da curva da função autocorrelação.

3.8 - Técnicas de Medida da Rugosidade Superficial

a) Microscopia óptica

A observação microscópica da superfície através da incidência normal da luz revela poucos detalhes, já que é

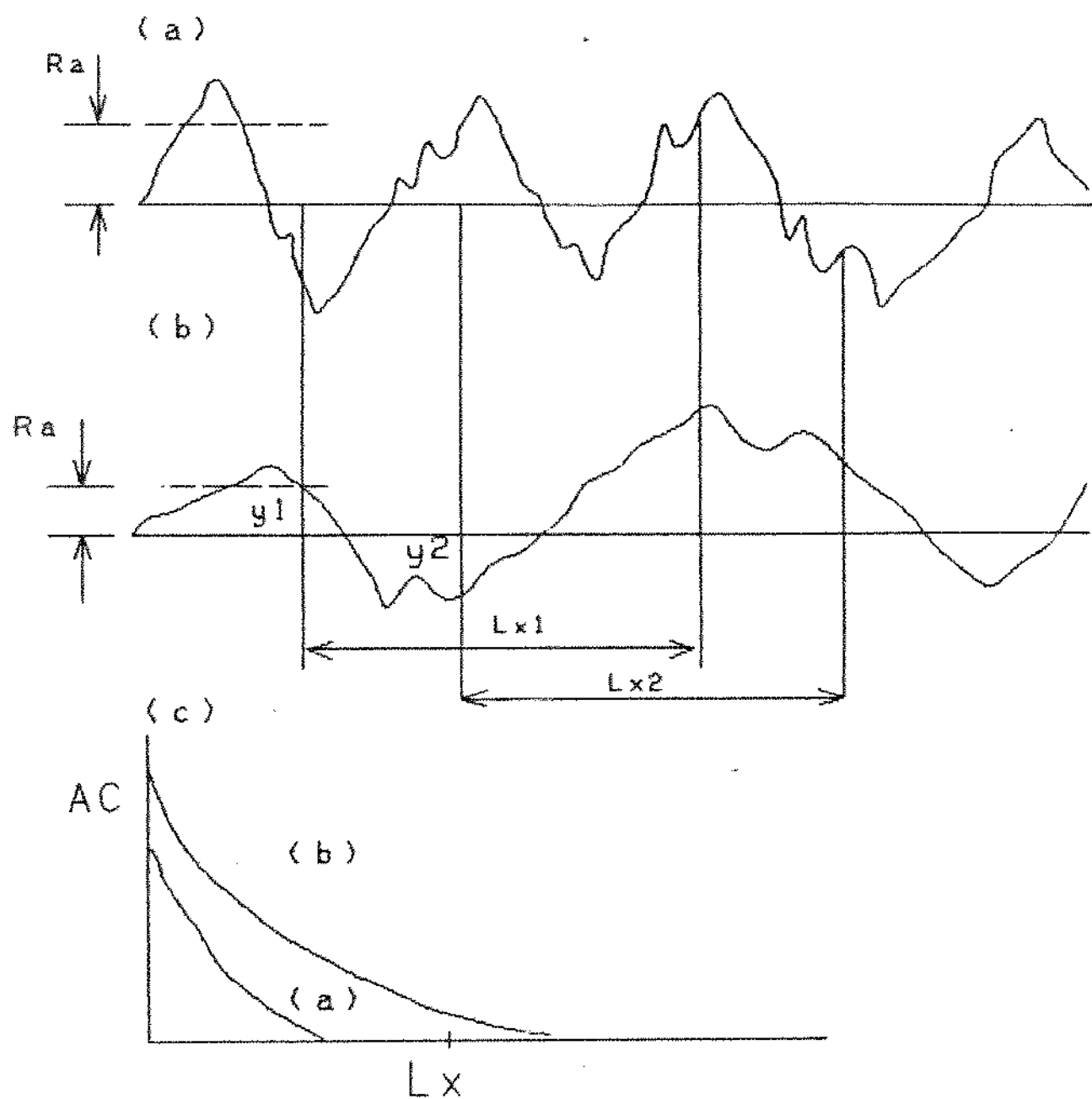


FIGURA 3.13 - A FUNÇÃO AUTOCORRELAÇÃO (AC)

impossível focalizar picos e vales simultaneamente. E essa limitação se torna mais severa com o incremento da ampliação.

Essa desvantagem é parcialmente compensada no microscópio de seção luminosa pelo reflexo da luz incidente na superfície segundo um ângulo baixo. A imagem obtida é, de fato, uma seção através da superfície com escala vertical exagerada. Deve ficar claro que nenhum desses procedimentos resultam em informações quantitativas sem um processamento manual subsequente.

b) Microscopia Eletrônica

Os maiores avanços na observação de aspectos qualitativos de superfícies se devem, sobretudo, ao microscópio de varredura eletrônica (M.E.V.). Trata-se de um microscópio de reflexão no qual um feixe de elétrons é modulado para varrer a superfície. O raio refletido é detectado, amplificado e mostrado num monitor de T.V. Ele combina alta resolução com grande profundidade de foco, criando um efeito tridimensional.

c) Rugosímetro

São aparelhos que se utilizam de apalpadores que possuem em sua extremidade uma ponta que toca a superfície. Se um apalpador for deslocado a uma velocidade constante sobre uma superfície irregular, a variação do seu deslocamento vertical com o tempo representará a variação de altura da seção da superfície com o deslocamento horizontal. Este é o princípio de operação de

uma classe de instrumentos de medida de rugosidade superficial largamente utilizada. Como a média das inclinações da maioria dos picos superficiais é baixa, o movimento vertical do apalpador requer amplificação. Nas versões modernas a amplificação é eletrônica. O cristal do apalpador, um diamante com uma ponta aguda, é preso a um transdutor de cristal piezoelétrico ressonante cuja frequência natural é modulada pelo movimento vertical. O apalpador e o transdutor são montados na extremidade de uma haste com liberdade de movimentos na vertical e que pode ser movimentada sobre a superfície por meio de um mecanismo elétrico de tração. O sinal gerado pelo transdutor é proporcional à diferença instantânea em altura entre o apalpador e uma superfície de referência.

Esse método, no entanto, apresenta algumas desvantagens como a fragilidade do instrumento, custo inicial alto e a possibilidade de que materiais muito macios sejam riscados durante a medida resultando num valor de rugosidade menor que o real.

Mas apesar desses inconvenientes ainda é a técnica preferida tanto em aplicações industriais quanto em pesquisa pela facilidade de realização das medidas [27].

3.9 - Referências Bibliográficas

- [16] SCHEY, J.A., Tribology in Metalworking, American Society for Metals, Metals Park, Junho, 1984, p. 80.
- [17] TABOR, D., Friction - The Present State of Our Understanding, Journal of Lubrication Technology, Vol.103, Abril, 1981, pp.169-179.
- [18] WILCOCK, D.F., Effects of Surface Roughness in Lubrication, Journal of Lubrication Technology, Vol.100, Janeiro, 1978, pp.6-11.
- [19] YUST, C.S., Tribology And Wear, International Metals Reviews, Vol.30, n^o 3, 1985, pp.141-154.
- [20] AGOSTINHO, D.L. et al., Tolerâncias, Ajustes, Desvios E Análise de Dimensões, Ed. Edgard Blücher, 1^a Edição, São Paulo, 1977, pp. 195-206.
- [21] NORMA ABNT NBR 6405/88 (Rugosidade das Superfícies).
- [22] WHITEHOUSE, D.J., The Measurement And Analysis of Surfaces Tribology International, Dezembro, 1974, p.256.

- [23] DREWS, W.E., Surface measurement : An Advancing Technology, Quality Progress, Abril, 1987, pp.43-46.
- [24] NOWICKI, B., Multiparameter Representation of Surface Roughness, Wear, 102, 1985, pp.161-176.
- [25] THOMAS, T.R., Recent Advances in The Measurement And Analysis of Surface Microgeometry, Wear, 33, 1975, pp.205-233.
- [26] WHITEHOUSE, D.J., ARCHARD, J.F., Proceedings of The Royal Society, Londres, 1970, pp.97-121, in Ref.[3], p.144.
- [27] FARAGO, F., Handbook of Dimensional Measurement, Industrial Press Inc., 2^a Edição, Nova York , 1982, pp. 377-384.

CAPITULO 4

RELAT~OES ENTRE GEOMETRIA SUPERFICIAL, LUBRIFICAT~AO E RESIST~ENCIA AO MOVIMENTO

4.1 - Introdu~ao à Tribologia

Diversos e complexos fenômenos ocorrem na interface, quando duas superfícies entram em contato e passam a apresentar uma movimentação relativa entre si. Em anos recentes surgiu uma nova ciência interdisciplinar dedicada exclusivamente ao estudo do que se passa nessas situações: a Tribologia. Através dela se pode fazer uma análise sistemática das informações relativas ao atrito entre os corpos, à lubrificação e ao desgaste.

A consequência mais visível resultante desse tipo de interação é, nos processos de conformação, o desgaste sofrido por cada uma das superfícies, que pode resultar em alterações nas dimensões e na integridade estrutural dos produtos.

O sistema mecânico formado na zona de contato entre os corpos pode apresentar as mais variadas características. O conjunto dos fatores relacionados ao atrito, à lubrificação e ao desgaste que caracterizam uma determinada interface constitui o Tribossistema (Figura 4.1).

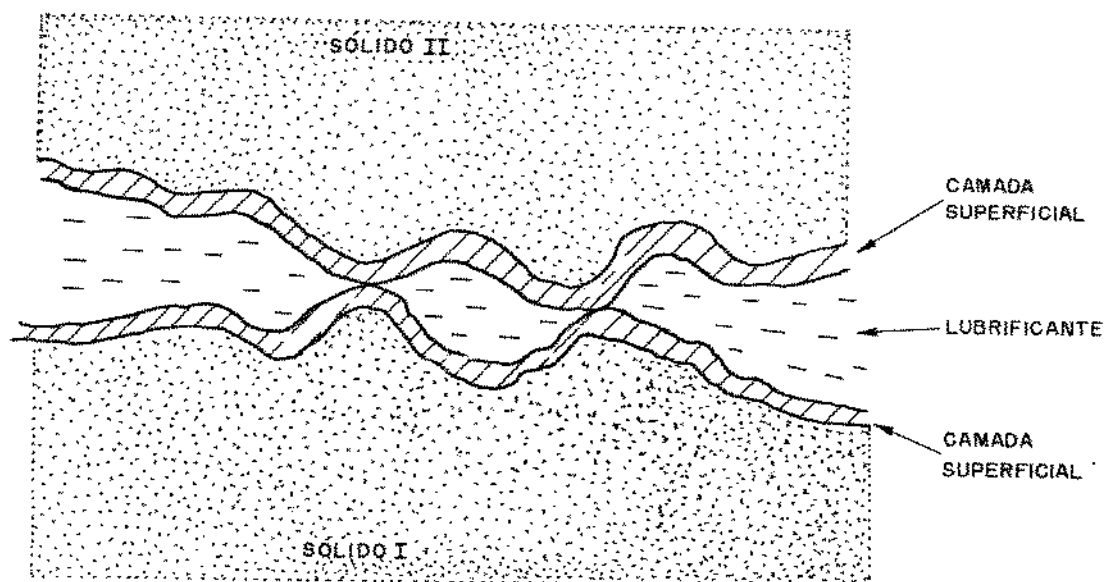


FIGURA 4.1 - TRIBOSSISTEMA SIMPLES FORMADO POR DUAS SUPERFÍCIES
SÓLIDAS EM CONTATO

Entre esses fatores se incluem^[28]:

- A natureza dos corpos em contato (microestrutura, dureza, resistência ao desgaste);
- As condições mecânicas de cada superfície (microtopografia);
- As camadas superficiais geradas por reação ou adsorção;
- Os filmes de lubrificantes formados entre as superfícies;
- A velocidade do movimento relativo entre as superfícies;
- As forças aplicadas;
- As temperaturas.

4.1.1 - Superfícies em Contato

As superfícies reais são na verdade rugosas, em maior ou menor grau. Como consequência desse fato, quando duas superfícies são colocadas em contato elas se tocam na verdade em apenas alguns pontos, mais precisamente nas extremidades das saliências maiores. Em razão disso a verdadeira área de contato não é determinada pelas dimensões macroscópicas das superfícies e sim pelas suas microtopografias, pelas propriedades dos materiais em contato e pelas forças aplicadas na interface^[29].

BOWDEN e TABOR^[30] concluíram através de seus estudos que quando as deformações nos pontos de contato são de natureza elástica a área real de contato é proporcional à carga aplicada elevada a dois terços ($A_r \propto W^{2/3}$). Se a intensidade da carga aplicada for de tal ordem que resulte em deformações plásticas nas saliências então a área de contato real será diretamente

proporcional à carga ($A_r \propto W$).

Essas asperezas superficiais não são responsáveis apenas pelo atrito, elas também ajudam no estabelecimento e na sustentação dos filmes de lubrificantes que eventualmente possam se formar na interface, ajudando na redução do nível de atrito e de desgaste dos corpos.

O comportamento das superfícies do ponto de vista químico também é um fator importante na análise de um tribosistema. Uma superfície recém-trabalhada raramente conserva a composição original do material a não ser em condições muito controladas. Os gases da atmosfera reagem com o material da superfície dando origem a uma lâmina, em geral de óxido, física ou quimicamente adsorvida. Outras impurezas advindas do manuseio da peça também podem se depositar em sua superfície alterando ainda mais as condições iniciais.

A formação dessas camadas dificulta o contato direto metal-metal desempenhando um papel semelhante a um lubrificante.

4.2 - Regimes de Lubrificação

Um fator de fundamental importância presente nos processos de conformação é a lubrificação. Uma presença efetiva do lubrificante durante o processamento resulta numa série de vantagens. O contato da peça com a ferramenta é reduzido, resultando em menor atrito. Com isso se reduz a força necessária

ao processamento e podem ser obtidos produtos de melhor qualidade superficial. O lubrificante também pode desempenhar melhor o seu papel de retirar calor do processo. O menor desgaste e a melhoria na retirada do calor gerado durante a deformação se refletem sobre a ferramenta que tem sua vida útil aumentada^[29].

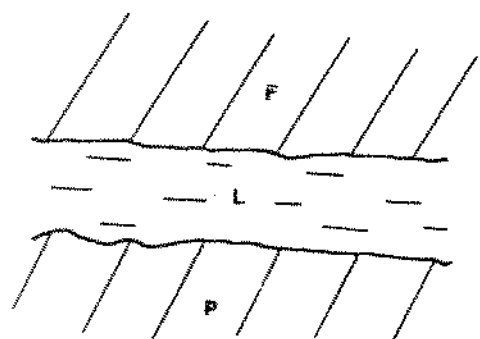
Nos processos de conformação podem ser observados vários regimes de lubrificação, sendo que cada regime é resultante das condições físicas e químicas presentes no sistema considerado tais como propriedades do lubrificante, propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, rugosidade dos corpos em contato, velocidade, temperatura e geometria dos corpos.

Pequenas alterações dessas propriedades podem acarretar a mudança de um regime para outro. No decorrer do processamento mais de um regime pode estar presente nas diferentes regiões da interface.

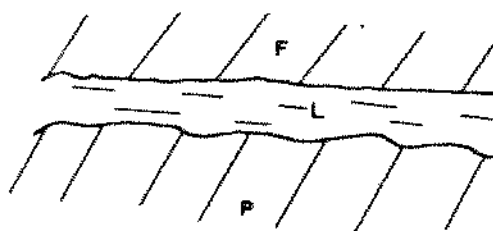
WILSON^[31] descreve os quatro principais regimes. O principal fator que distingue um regime do outro é a espessura do filme de lubrificante relacionada à rugosidade das superfícies em contato como mostrado na figura 4.2.

a) Regime de Filme Espesso

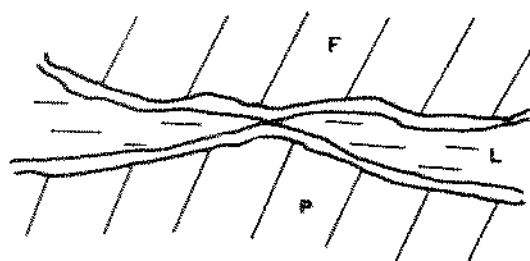
Ocorre sempre que a espessura do filme for maior do que dez vezes a rugosidade RMS das superfícies envolvidas. Nessa situação os corpos se encontram separados por uma camada de lubrificante que pode ser modelada como um meio contínuo entre superfícies lisas.



(a) LUBRIFICAÇÃO DE FILME ESPESSE

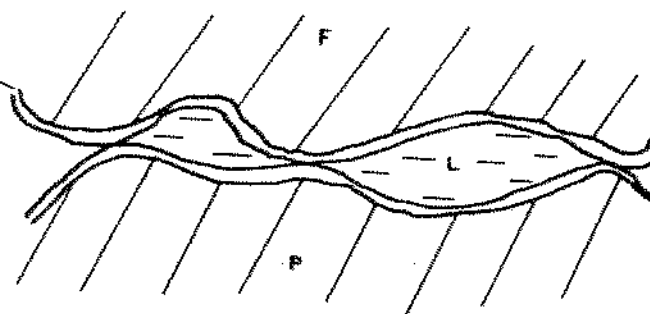


(b) LUBRIFICAÇÃO DE FILME FINO



(c) LUBRIFICAÇÃO MISTA

FILMES DE
CAMADA
LIMITE



(d) LUBRIFICAÇÃO DE CAMADA LIMITE

P - PEÇA
L - LUBRIFICANTE
F - FERRAMENTA

FIGURA 4.2 - REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Nesse tipo de regime o atrito é determinado pelas propriedades físicas do lubrificante (atrito de cisalhamento viscoso), sendo de pouca validade a idéia de um coeficiente de atrito constante.

Como as superfícies estão completamente separadas o desgaste é quase nulo nessa configuração, a não ser pela possibilidade de vir a ocorrer corrosão ou erosão por cavitação devido à presença de partículas estranhas no lubrificante.

Nesse regime a superfície da ferramenta tem pouca influência restritiva na deformação da peça. Como os corpos estão separados, a superfície da peça tende a se deformar como uma superfície livre, o que resulta num aumento de rugosidade. Esse enrugamento do produto é freqüentemente utilizado como um indicador de que o sistema está operando no regime de filme espesso [32,33].

b) Regime de Filme Fino

Quando a espessura média do filme de lubrificante situa-se entre três e dez vezes o valor da rugosidade RMS das superfícies, o sistema está operando no regime de lubrificação de filme fino. Nesse regime existe a possibilidade de contato entre as asperezas superficiais em alguns pontos mas, no entanto, esse contatos suportam uma parcela muito pequena da carga total entre as superfícies.

O nível de atrito é semelhante ao existente no regime de filme espesso com a ressalva de que os contatos superficiais

podem alterá-lo ligeiramente. O desgaste é praticamente desprezível e a rugosidade superficial tanto pode sofrer um ligeiro acréscimo como se manter constante ou mesmo sofrer uma pequena redução no decorrer do processo.

c) Regime de Lubrificação Mista

Se a espessura média do filme situar-se abaixo de três vezes o valor da rugosidade RMS das superfícies uma significativa fração da carga entre as superfícies será suportada pelos pontos de contato entre as asperezas. Se ainda parte da carga for suportada pela camada de lubrificante nos vales ao redor dos pontos de contato, o regime de lubrificação será do tipo misto [34].

Um lubrificante adequadamente formulado conterá compostos que reagirão quimicamente com as superfícies dando origem a finíssimas camadas aderentes de lubrificante (camada limite). Ainda que a espessura dessas camadas seja da ordem do tamanho das moléculas do lubrificante elas podem impedir o contato direto metal-metal, evitando o surgimento de pontos de solda entre a peça e a ferramenta, e evitando o próprio cisalhamento das asperezas.

A modelagem desse tipo de regime apresenta certa dificuldade pois deve levar em conta os processos completamente diferentes atuando nos picos e nos vales. Nestes a camada de lubrificante é relativamente espessa e pode-se aplicar uma versão modificada da teoria de lubrificação de filme fino. Nos picos, contudo, os efeitos físico-químicos tornam-se importantes e um tratamento baseado unicamente na mecânica do contínuo teria sérias

limitações.

O nível de atrito pode variar de 0,05(característico de um regime de filme espesso) até 0,4 que é um valor típico do regime de lubrificação de camada limite. As propriedades físicas e químicas do lubrificante é que vão determinar o nível de atrito.

A rugosidade superficial da peça tende a sofrer uma redução nesse regime a menos que haja um rompimento das finas camadas aderentes à superfície. Nesse caso as saliências podem se soldar à superfície oposta resultando no aumento da rugosidade da peça e no desgaste da ferramenta.

d) Regime de Lubrificação de Camada Limite

O que caracteriza esse regime é o fato de que a carga total entre as superfícies é suportada pelas saliências em contato. Os fatores mais importantes a serem considerados nessa condição são a mecânica de deformação dessas saliências e a física e química superficial dos filmes de camada limite.

A hipótese de um coeficiente de atrito constante é mais realista nesse regime do que nos outros discutidos anteriormente, sendo possível a obtenção de valores próximos a 0,1 sob condições especiais.

Quando o sistema opera sob condições adversas, como a encontrada nos processos de conformação, os coeficientes de atrito são maiores podendo chegar a 0,4 ou mais se as condições levarem a uma ruptura da camada limite.

Se os filmes lubrificantes forem efetivos é provável que

ocorra uma pequena redução no valor da rugosidade superficial da peça, mas se os filmes forem rompidos um considerável aumento da rugosidade usualmente ocorrerá.

4.3 - Os Regimes de Lubrificação na Extrusão Hidrostática

Os regimes de lubrificação presentes na extrusão hidrostática estão associados a cada uma das etapas do processamento.

Na etapa inicial do processo a pressão na câmara é relativamente baixa e como também é baixa a velocidade com que a peça começa a ser deformada estabelece-se, então, um regime de lubrificação de camada limite. Nessa fase não há, ainda, condições que permitam a formação de um filme contínuo de lubrificante entre a peça e a ferramenta [35,36].

Com a elevação dos níveis de pressão e velocidade, numa condição de regime permanente, forma-se entre as superfícies da peça e da ferramenta uma camada de lubrificante pressurizado de natureza hidrodinâmica (filme fino ou espesso) com pressão suficiente para deformar o material e suportar a carga de extrusão. Conforme a deformação da peça vai se processando o lubrificante que ocupa as reentrâncias superficiais na ferramenta e na peça é forçado a sair no mesmo sentido do deslocamento do material que está sendo deformado, contribuindo para uma melhora na lubrificação e na redução do atrito.

HILLIER^[37] obteve a comprovação experimental desse regime ao observar traços do lubrificante pressurizado nos produtos resultantes de seus ensaios.

Logo em seguida ao início do processo existe uma passagem do regime de camada limite para o hidrodinâmico que foi comprovada por FIORENTINO^[38] que através de ensaios construiu um gráfico da pressão de extrusão versus o deslocamento do êmbolo, onde se observa um pico de pressão logo que a peça começa a ser deformada seguido por uma queda que se estabiliza num patamar até o final do processo (Figura 4.3).

A existência do pico de pressão se deve às más condições de lubrificação no início do processo, quando se está num regime de camada limite que se caracteriza por um alto nível de atrito. À medida que se atingem níveis de pressão e velocidade adequados a pressão cai e se estabiliza, pois a tensão necessária para cisalhar o filme é menor que a requerida para se sobrepor à interação das superfícies da peça e da ferramenta.

Segundo WISTREICH^[39] a lubrificação hidrodinâmica, sob certas condições, pode originar defeitos de forma e dimensões no produto. A solução é o uso de baixas velocidades de deformação e o estabelecimento do regime de lubrificação hidrodinâmica com perfil de velocidades adequado. Esse pode ser estabelecido através do uso de corpos-de-prova apontados com ângulo ligeiramente menor que o ângulo de conicidade da matriz o que faz com que se forme um filme contínuo na interface^[31].

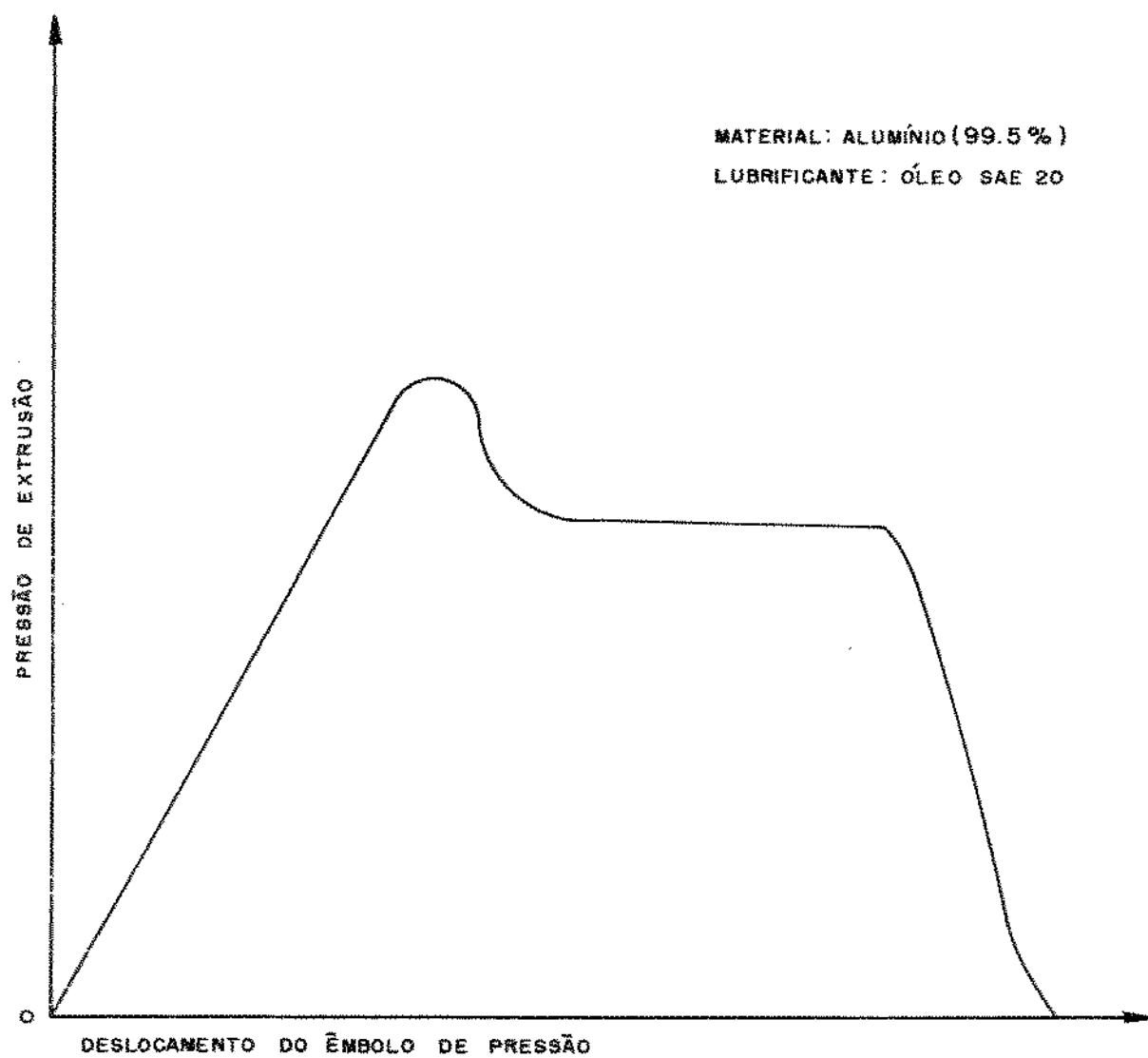


FIGURA 4.3 - NÍVEIS DE PRESSÃO NA EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA

4.4 - A Rugosidade Superficial e o Processo de Extrusão Hidrostática

A análise da influência da rugosidade superficial no processo de extrusão hidrostática tem que ser feita levando-se em consideração que se trata de um processo de conformação plástica. Isso significa grandes diferenças quando se compara, por exemplo, a interação existente entre as superfícies da peça e da ferramenta e o filme de lubrificante na extrusão hidrostática com a configuração encontrada num sistema eixo-mancal, onde normalmente se atinge um regime hidrodinâmico^[40] que impede o contato direto entre as irregularidades das superfícies opostas.

Os processos de conformação apresentam uma importante particularidade que é o fato de haver uma deformação plástica dos corpos durante o transcorrer do processo. No caso particular de extrusão de corpos de alumínio através de matrizes de aço tem-se um alto valor da taxa de deformação dos corpos de prova, com grande redução da seção transversal. A grande deformação a que o metal é submetido resulta na elevação de sua dureza (devido ao fenômeno do encruamento) e na alteração das suas características superficiais. Esse comportamento dos corpos envolvidos significa uma complicação adicional na análise da questão.

No processo de extrusão hidrostática a presença de um regime de lubrificação de filme espesso (hidrodinâmico) não é uma característica comum. Os regimes de lubrificação que se estabelecem com mais frequência são os de filme fino e o regime de

lubrificação misto, nos quais a camada de lubrificante não chega a separar inteiramente as superfícies opostas, possibilitando que algumas saliências superficiais perfurem o filme lubrificante e causem um desgaste no outro corpo.

Num processo em que ocorra a presença de um desses dois tipos de regime a consequência é que o acabamento superficial do produto acaba sendo determinado principalmente pela rugosidade da matriz.

Um outro fator que exerce grande influência no produto é o das posições relativas entre a direção de escoamento do metal e a direção predominante das irregularidades superficiais da ferramenta. Se as direções forem paralelas a espessura do filme formado tende a ser menor e a rugosidade do produto será muito influenciada pela rugosidade da matriz, desde que as demais condições não variem^[41,42]. Não é o caso da extrusão hidrostática onde a direção do fluxo é perpendicular à direção dos sulcos superficiais da matriz, produzidos por torneamento e lixamento.

Nessa visão geral do processo pode-se ter uma idéia da complexidade dos fenômenos envolvidos e se observar a larga diferença existente entre a lubrificação na conformação plástica quando comparada com outros processos.

A forma de se tratar a questão da influência da rugosidade superficial da ferramenta no processo será através do estabelecimento de relações experimentais entre as rugosidades superficiais da ferramenta e da peça, o regime de lubrificação e os seus efeitos sobre a pressão de extrusão.

4.5 - Rugosidade de Superfícies Lubrificadas

O comportamento da superfície de um corpo que está sendo plasticamente deformado está estreitamente relacionado às condições existentes na fronteira desse corpo. No caso da extrusão hidrostática se a camada de lubrificante for espessa o bastante para assegurar uma completa separação matriz-tarugo, então a condição será análoga à encontrada na deformação de superfícies livres na qual ocorre um grande aumento de rugosidade. Isso se explica pelo fato de os grãos individuais não se deformarem todos da mesma maneira mas sim segundo suas orientações cristalográficas e as restrições impostas pelos grãos que os cercam. Os grãos nos quais os planos de deslizamento estão orientados de forma favorável tendem a se deformar mais facilmente. Segundo WILSON^[43] a deformação do tarugo ocorrendo através da camada de lubrificante, portanto sem a restrição da parede da matriz, leva a um aumento da rugosidade que será tanto maior quanto maiores forem a viscosidade e a velocidade de deformação. Na prática o fenômeno é indesejável quando se quer obter uma superfície bem acabada, mas é tolerado quando o produto se destina a aplicações menos exigentes. Um mau acabamento da superfície do produto é uma indicação da ocorrência de um regime de lubrificação de filme espesso (hidrodinâmico)^[44].

Um outro efeito relacionado à lubrificação na extrusão hidrostática é o chamado "stick-slip". É uma indicação de colapso periódico da lubrificação, permitindo o contato direto da peça com a matriz, o que se torna visível na forma de anéis regularmente

espaçados sobre o tarugo. Esse efeito "bambu" é resultante da oscilação da força de extrusão (Figura 4.4), sendo que a frequência de oscilação corresponde à frequência dos anéis na peça [45].

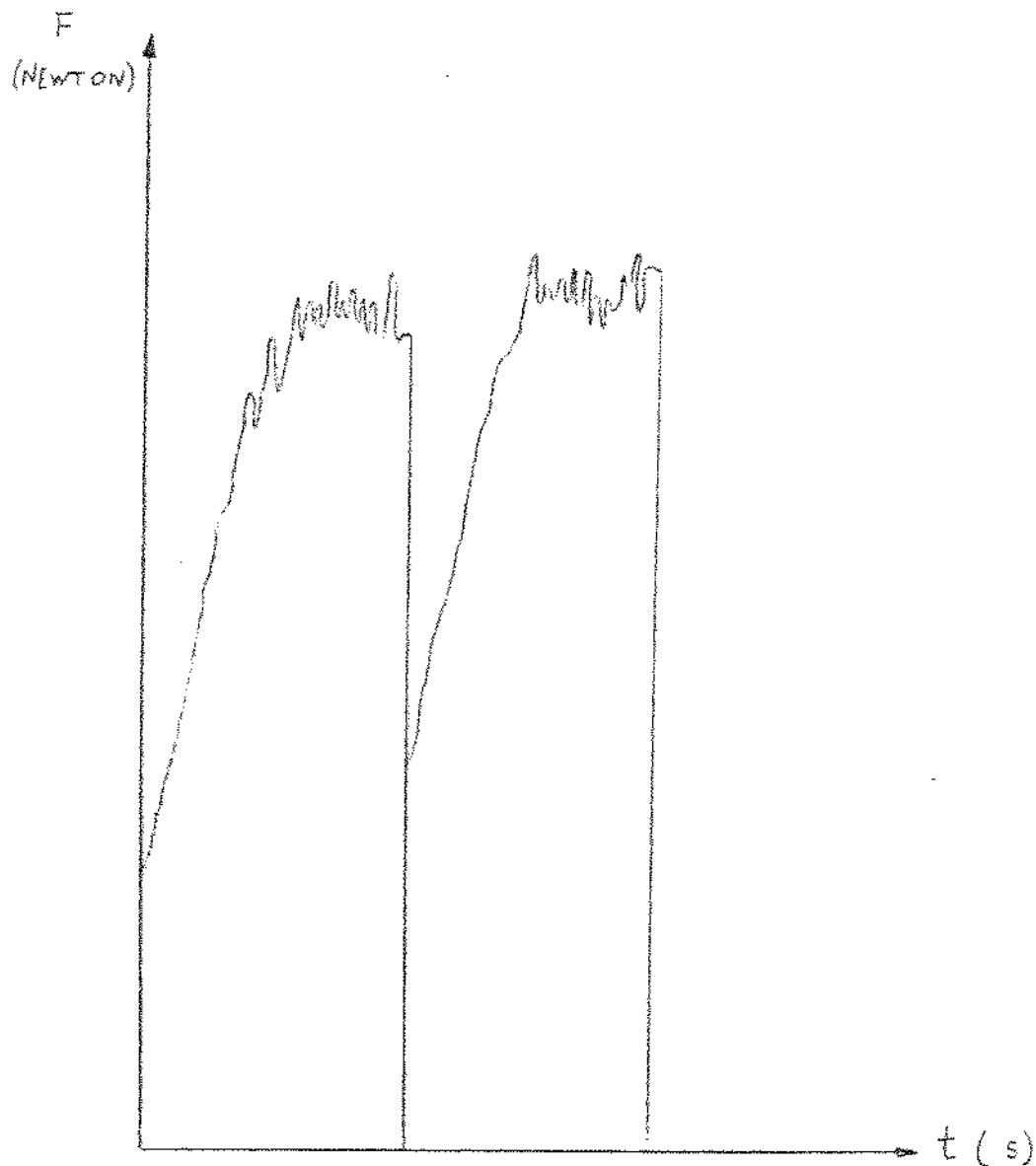


FIGURA 4.4 - O STICK-SLIP

4.6 - Referências Bibliográficas

- [28] Idem ibidem Ref.[19], p. 141.
- [29] RABINOWICZ, E., Friction And Wear of Materials, John Wiley And Sons, New York, 1966, pp. 32-38.
- [30] BOWDEN, F.P. e TABOR, D., The Friction And Lubrication of Solids, Oxford Clarendon Press, 1950, in Ref.[19], p.144.
- [31] WILSON, W.R.D., Friction And Lubrication in Bulk Metal-Forming Processes, Journal of Applied Metalworking, Vol.1, 1979, pp. 7-9.
- [32] PARSONS, B. et al., An Elasto-Plasto-Hydrodynamic Lubrication Analysis of The Plane Strain Drawing Process, J. of Mechanical Engineering Science, Vol.12, 1970, pp.178.
- [33] REID, J. e SCHEY, J.A., Full Fluid Film Lubrication in Aluminum Strip Rolling, ASLE Trans., V.21, 1977, pp.191-200.
- [34] TSAO, Y. e TONG, K., A Model for Mixed Lubrication, ASLE Transactions, Vol.18, 1975, pp.90-95.
- [35] Idem ibidem Ref.[8], p.97

- [36] WILSON, W.R.D., The Temporary Breakdown of Hydrodynamic Lubrication During The Initiation of Extrusion, International Journal of Mechanical Science, Vol.13, 1971, pp. 17 - 28.
- [37] HILLIER, M.J., A Hydrodynamic Model of Hydrostatic Extrusion, The Int. J. of Production Research, Vol.5, 1966, pp.171-181
- [38] FIORENTINO, R.J. et al., Hydrostatic Extrusion of Metals at Batelle, Machinery Lloyd, 17,18, 1963, in Ref.[8], p.168.
- [39] WISTREICH, J.G., Lubrication In Wire Drawing, Proc.Conf. Lub. And Wear, Inst. Mech. Eng., 1957, in Ref.[8], p.102.
- [40] SARGENT, L. B. Jr. e TSAO, Y. H., Surface Roughness Considerations in Metalworking, ASLE Transactions, 23, 1980 pp.70 - 76.
- [41] SCHEY, J.A., Surface Roughness Effects In Metalworking Lubrication, Lubrication Engineering, Junho, 1983, pp.376 - 382.
- [42] TONDER, K., Simulation of Lubrication of Isotropically Rough Surfaces, ASLE Trans., Vol.23, 1980, pp. 326 - 333.

- [43] WILSON, W.R.D., Workpiece Surface Roughening In A Hydrodynamically Lubricated Metal Forming Process, Journal of Lubrication Technology, Janeiro, 1977, pp.10-14.
- [44] RATNAGAR, D., et al., The Surface Deformation of Aluminum Compressed With Viscous Lubricants, Journal of Lubrication Technology, Outubro, 1974, pp.591-594.
- [45] WALLACE, P., et al., The Thick-Film Lubrication In Model Extrusions With Low Extrusion Ratios, Journal of The Institute of Metals, vol.100, 1972, pp.78-85.

CAPITULO 5

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Descrição dos Ensaios

A parte experimental do trabalho se constitui numa série de experimentos realizados através do emprego de uma prensa hidráulica e de um sistema de extrusão conectados por uma célula de carga. Esses experimentos consistem na extrusão hidrostática de pequenas peças cilíndricas de alumínio com diferentes níveis de acabamento superficial. Os tarugos são forçados a passar através de três matrizes cônicas de aço usinadas com diferentes acabamentos da superfície interna. São utilizados dois óleos com viscosidades diferentes, que desempenham simultaneamente os papéis de lubrificante e de meio de transmissão da pressão fornecida pela prensa.

Na parte final do trabalho são feitas experiências onde se extrudam corpos de prova numa condição de regime de lubrificação de filme espesso (hidrodinâmico). Essa condição é mais facilmente alcançada envolvendo-se os tarugos com TEFLON. Os resultados obtidos com relação à tensão de extrusão e ao acabamento dos produtos são comparados então com os valores obtidos nos demais ensaios.

5.2 - Máquina Extrusora

Para a realização dos ensaios propostos utilizamos um equipamento que denominamos máquina extrusora, localizada no Laboratório de conformação Mecânica Fina, do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. Esse equipamento é constituído de uma prensa hidráulica, e um sistema de extrusão no qual são instaladas as matrizes e uma célula de carga.

5.2.1 - Prensa Hidráulica

É o sistema responsável pelo fornecimento de potência. Transmite pressão ao fluido de trabalho que, por sua vez, envolve totalmente o tarugo e força-o a passar pela matriz de extrusão. As características principais da prensa são as seguintes :

- Força máxima de avanço : $4,9 \cdot 10^5$ N
- Velocidade de trabalho máxima : 4 mm/s
- Curso máximo do pistão : 205 mm
- Vão livre entre colunas : 900 mm
- Abertura máxima entre haste e mesa : 1.000 mm

Os componentes principais da prensa e suas características são :

- Motor elétrico de 5 CV, alimentado por rede com tensão de 220 V e frequência de 60 Hz
- Bomba de pistão radial, com vazão de 4 l/min.
- Válvula controladora de velocidade.

5.2.2 - O Sistema de Extrusão

O sistema utilizado encontra-se representado na figura 5.1. é composto por um êmbolo de pressão (2) que comprime o fluido de trabalho contido no recipiente de extrusão (3) o qual é composto de dois cilindros montados com interferência dimensional. A conexão entre o pistão hidráulico e o êmbolo é feita através de uma célula de carga (1). A matriz (5) por onde vai escoar o material do tarugo, adquirindo forma final, apoia-se no fundo do recipiente de extrusão. Como o processamento se dá com o fluido pressurizado, faz-se necessário a colocação de elementos de vedação com a finalidade de se impedir vazamentos. Tanto no êmbolo quanto na matriz são colocados anéis de vedação. No êmbolo é instalado um elemento vedante dinâmico que se desloca durante o processo, enquanto que na matriz a vedação fica por conta de um elemento estático.

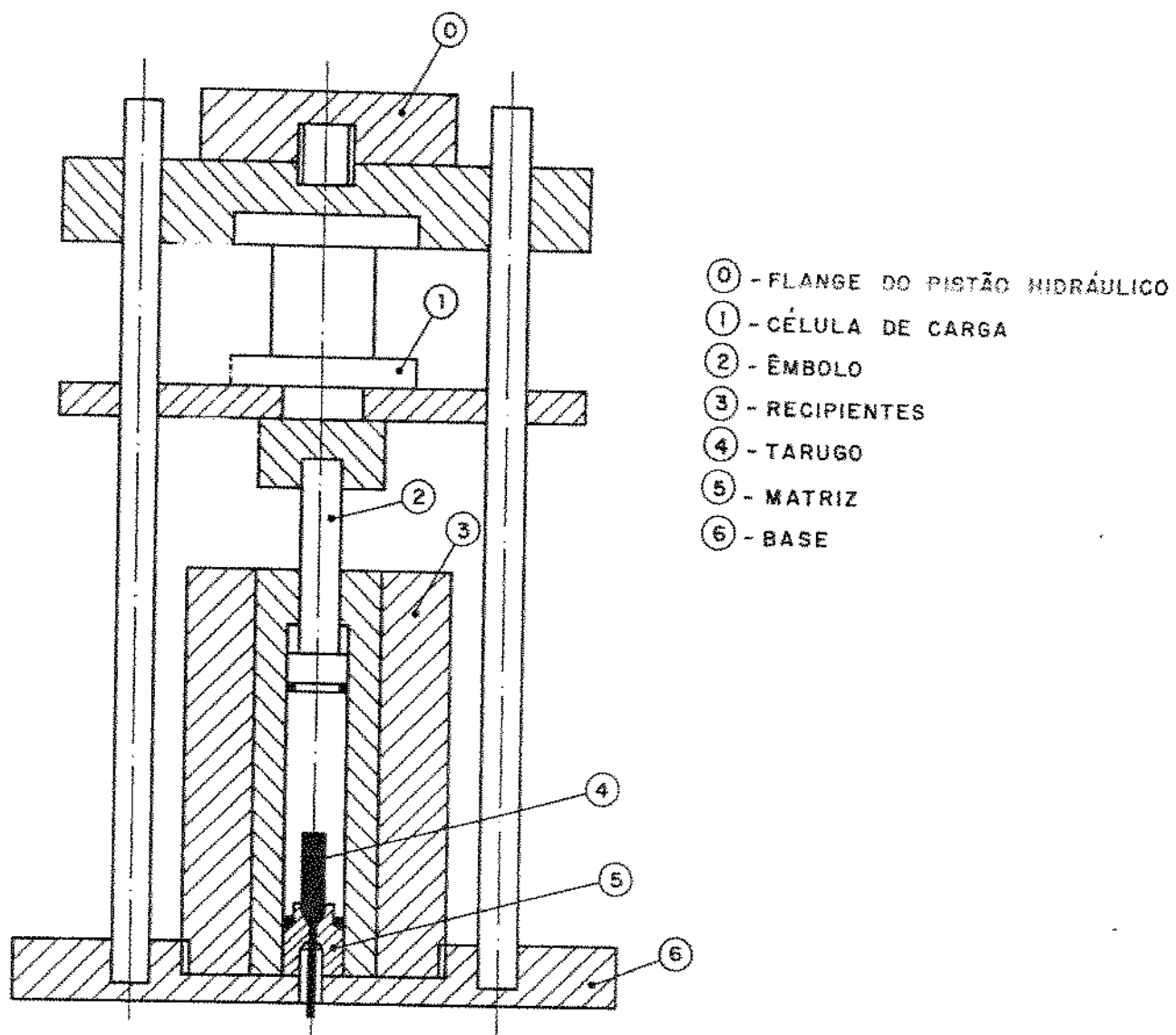


FIGURA 5.1 - O SISTEMA DE EXTRUSÃO

A foto dos diversos componentes do dispositivo pode ser vista na figura 5.2. Esse equipamento de extrusão foi projetado e construído por Button [46]. Já a máquina extrusora completamente montada e em condições de funcionamento é mostrada na figura 5.3.

Recipiente de Extrusão

Durante a compressão do fluido de trabalho o recipiente é submetido a altas pressões internas, da ordem de $2 \cdot 10^3$ MPa; por esse motivo foi construído colocando-se um cilindro dentro do outro, o que é vantajoso em relação ao cilindro monobloco pelo fato de gerar tensões residuais entre os cilindros. Adotou-se para o cilindro exterior diâmetros interno e externo respectivamente iguais a 24,40 mm e 75,50 mm e um diâmetro externo para o cilindro interno igual a 24,80 mm.

O material utilizado tanto para o recipiente quanto para o êmbolo de pressão é o aço-liga VPCW cuja tensão limite de escoamento vale $\sigma_e = 1,57 \cdot 10^3$ MPa à temperatura de trabalho de 30°C .

5.2.3 - A Célula de Carga

A célula de carga (Figura 5.4) faz a conexão entre o pistão da prensa hidráulica e o êmbolo de pressão. É uma peça de aço VPCW e nela são colocados 4 extensômetros. Dois registram as

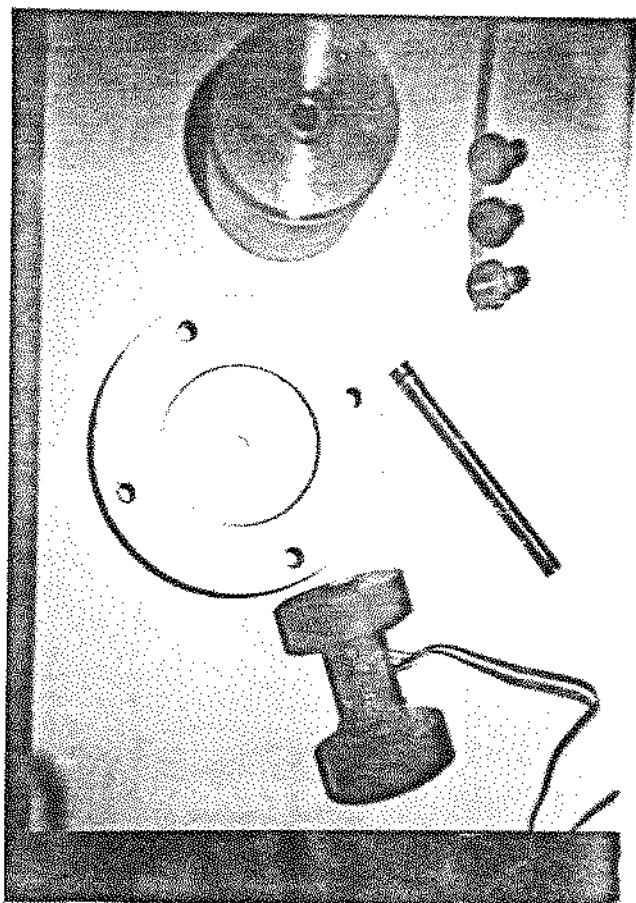


FIGURA 5.2 - OS COMPONENTES DO DISPOSITIVO DE EXTRUSÃO

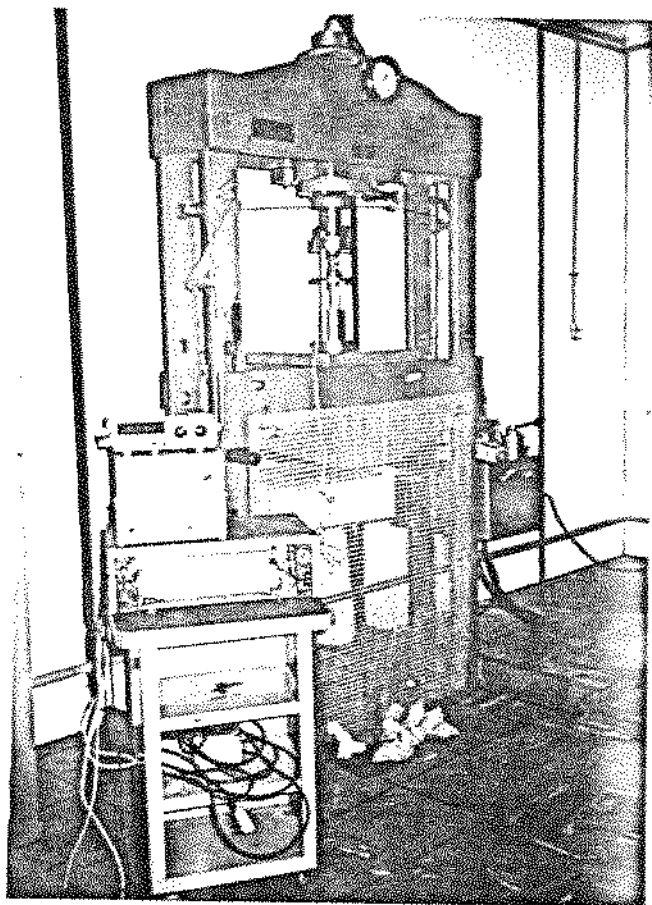
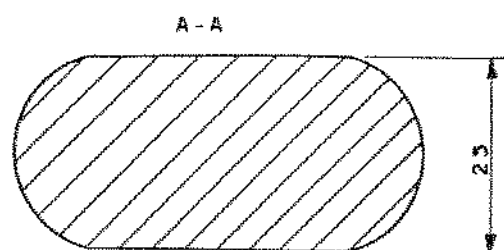
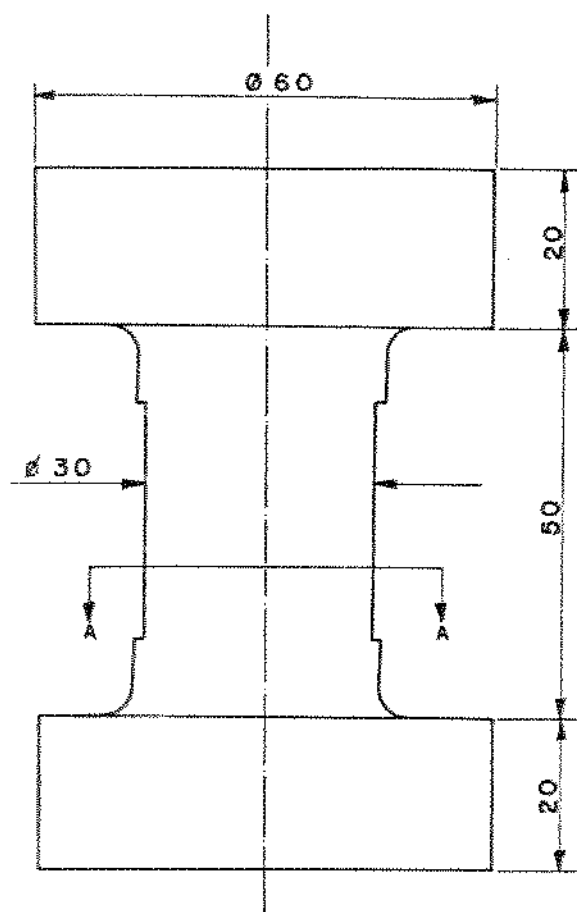


FIGURA 5.3 - A MAQUINA EXTRUSORA



ESCALA: 1.1

MATERIAL: AÇO VPCW

FIGURA 5.4 - CÉLULA DE CARGA

deformações longitudinais e dois as deformações transversais da célula. Os extensômetros funcionam como dois resistores de uma ponte de Wheatstone formada juntamente com as resistências internas de um condicionador de sinais ao qual são ligados. A tensão gerada (em milivolts) com as deformações é ampliada pelo aparelho. O sinal resultante é enviado a um registrador gráfico onde pode ser registrado em papel, possibilitando o cálculo da força desenvolvida durante o processamento com o auxílio da curva de calibração da célula (Figura 5.5). O condicionador de sinais também é ligado a um multímetro digital que permite uma leitura do sinal pelo operador durante os ensaios.

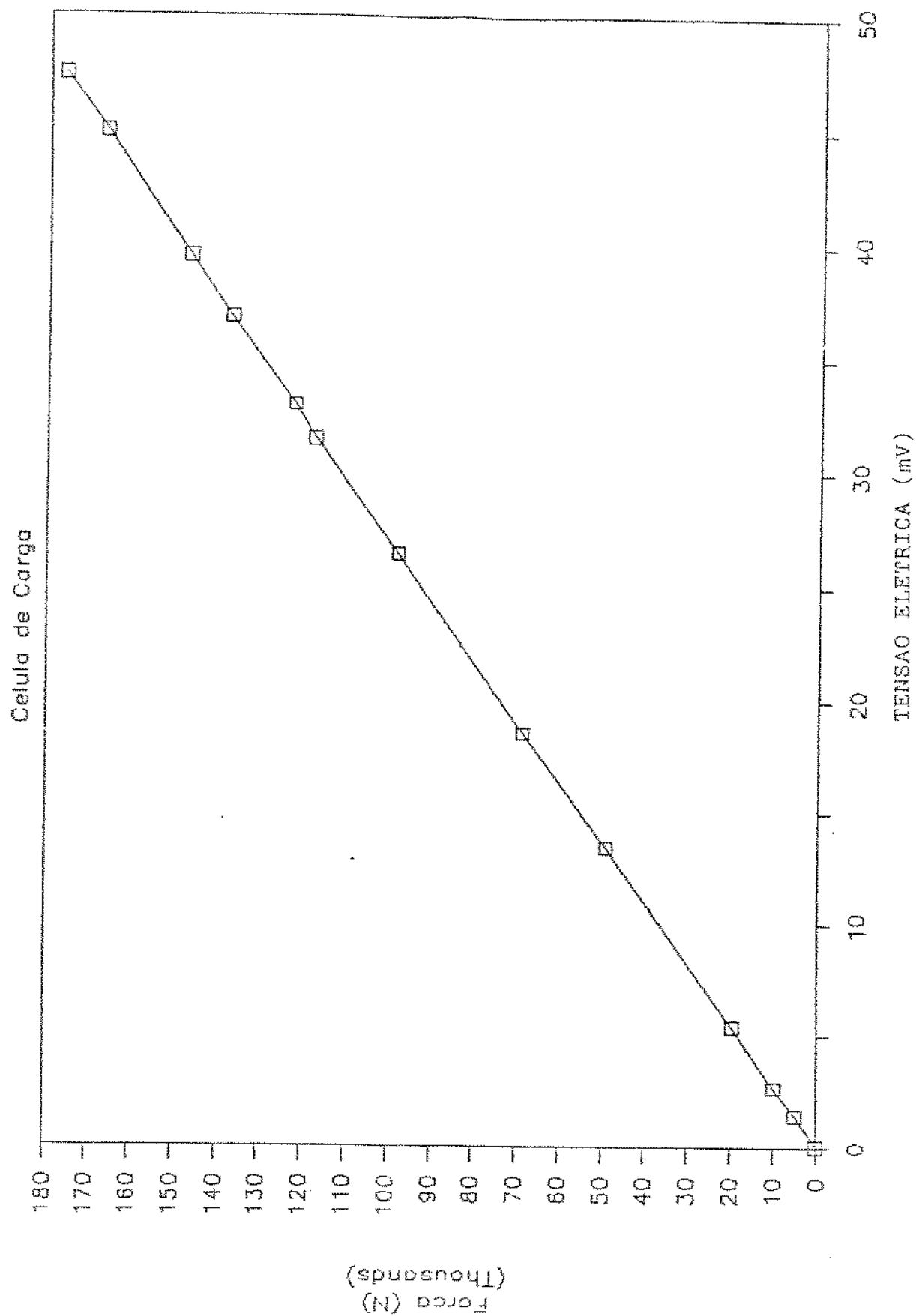
5.3 - Matrizes de Extrusão

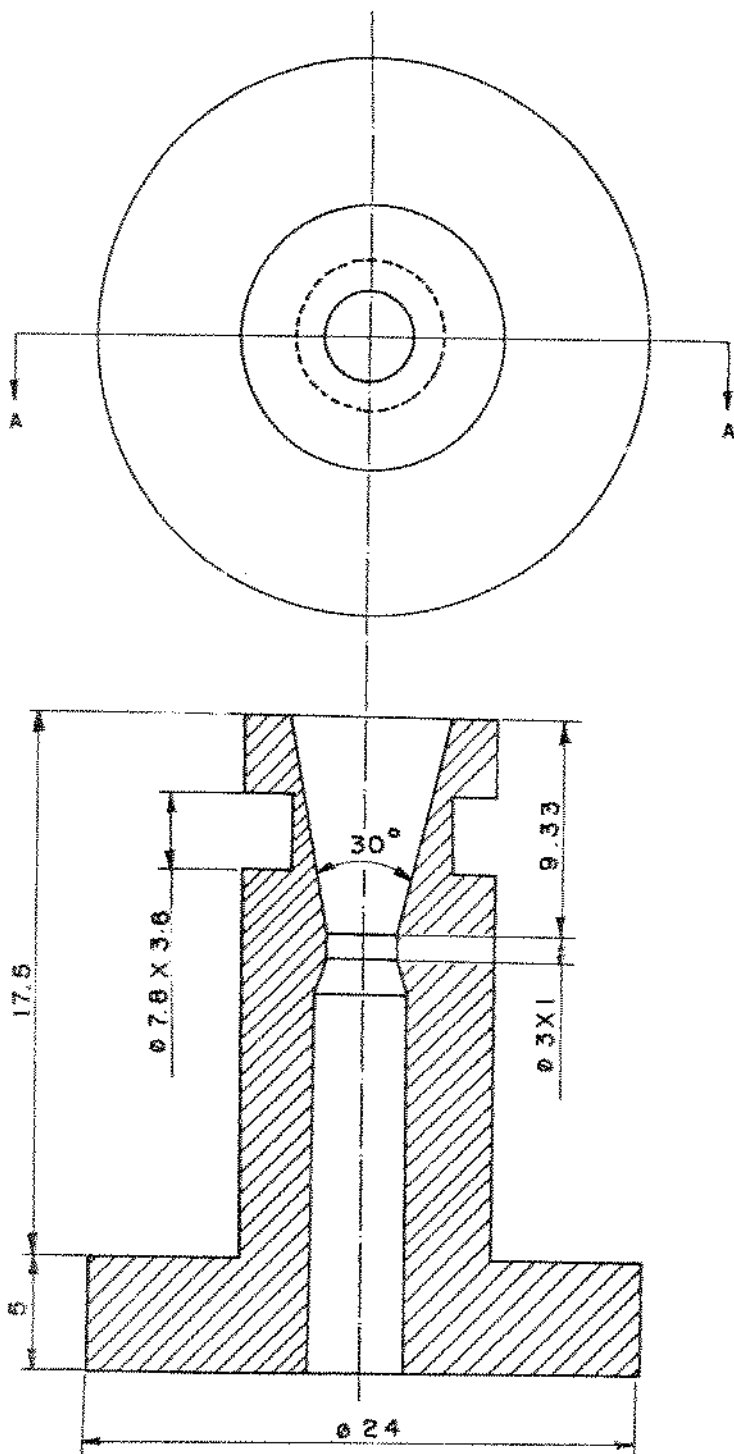
Para a realização dos ensaios foram usadas três matrizes de aço VPCW com as dimensões apresentadas na figura 5.6 e com as propriedades do material dadas pela Tabela 5.1^[47]. Foram construídas com ângulo de cone de 30° , que é um valor próximo do ângulo ótimo para a taxa de redução dos ensaios^[4].

As peças foram produzidas com três níveis diferentes de acabamento das superfícies dos cones internos. Uma peça foi polida, outra permaneceu com o acabamento produzido durante o seu torneamento e a terceira, após ter sido torneada, teve a sua superfície lixada circunferencialmente.

Após terem sido produzidas as peças foram submetidas a um tratamento térmico de têmpera e revenido com o objetivo de

FIGURA 5.5 - Curva de Calibração da
Celula de Carga





MATERIAL: AÇO VPCW TEMPERADO E REVENIDO
 ESCALA: 3:1

CORTE AA

FIGURA 5.6 - MATRIZ DE EXTRUSÃO

Tabela 5.1- Características e Propriedades do aço VPCW

Similares	ASTM A 681 Tipo H 12 AISI H 12=DIN x 37 Cr Mo W 5 1
Composição Química	C=0,35 % , Si=1,00 % , Cr=5,00 % Mo=1,50 % , W=1,35 % , V=0,25 %
Estado de Fornecimento	Recozido, com dureza máxima de 235 HB
Módulo de Elasticidade	$E = 210 \cdot 10^3$ MPa
Temperatura de Têmpera	1.000 - 1.050 °C
Meios de Têmpera	óleo ou banho de sal
Temperatura de Revenido	600 - 650 °C
Dureza Máxima Possível	54 HRc

torná-las mais resistentes às solicitações do processo.

O tratamento consistiu das seguintes etapas indicadas pelo fabricante [47]:

- Aquecimento por uma hora em forno mantido a 1.000°C com as peças colocadas numa caixa com pó de grafita para evitar perdas de material por descarbonetação;
- Imersão das peças em óleo mantido à temperatura ambiente para se conseguir rápido resfriamento (etapa da têmpera);
- Retirada das peças do banho de óleo. As peças são limpas e posteriormente aquecidas durante trinta minutos em forno mantido a 600°C . Após esse período as peças são retiradas e resfriadas ao ar calmo (etapa de revenido).

O último procedimento na preparação das matrizes foi a medição das suas rugosidades internas realizado através do emprego de um rugosímetro.

5.4 - Preparação dos Corpos a Serem Ensaaiados

Para a realização dos ensaios previstos foram produzidos pequenos tarugos de alumínio em quantidade tal que permitisse três ensaios para uma mesma condição de processamento (uma determinada matriz, uma determinada rugosidade da peça e um lubrificante).

Foram preparados um total de setenta e seis corpos de prova assim distribuídos :

- 18 peças polidas;
- " " com acabamento de torno;
- " " lixadas (circunferencialmente);
- " " limadas (circunferencialmente);
- 4 peças com acabamento de torno destinadas aos ensaios nos quais serão revestidas por TEFLON.

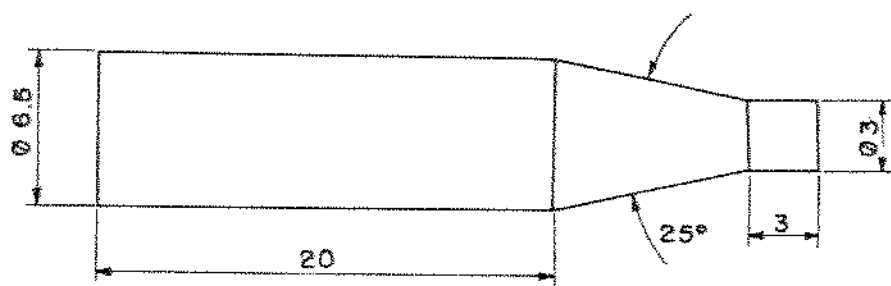
A produção de peças com diferentes acabamentos superficiais tem o objetivo de se conseguir formar um conjunto com quatro classes de rugosidades bem diferenciadas entre si de forma a se alcançar uma melhor definição do papel exercido por esse parâmetro na pressão de extrusão e no acabamento dos produtos.

Os tarugos foram usinados com diâmetro de 6,5 mm e têm uma das extremidades em formato cônico com ângulo de apontamento de 25° , ligeiramente menor que o ângulo de cone da matriz (30°) para permitir uma melhor lubrificação facilitando dessa forma o processamento e também um bom encaixe no furo da matriz (Figura 5.7).

Os produtos a serem obtidos terão também seção circular com diâmetro de 3.0 mm.

O material dos corpos de prova é o alumínio comercialmente puro, contendo 99,5 % em peso de alumínio.

A tensão limite de escoamento (σ_e) desse material vale 185 MPa, obtida através de ensaios de compressão [48].



MATERIAL: ALUMÍNIO
ESCALA: 3:1

FIGURA 5.7 - DIMENSOES DOS CORPOS DE PROVA (MM)

5.5 - Lubrificantes

No processo de extrusão hidrostática o fluido transmissor de pressão desempenha também o papel de lubrificante que se coloca na interface peça-ferramenta na região de deformação.

Foram utilizados dois óleos lubrificantes cujos valores de viscosidade, segundo a SAE (Society of Automotive Engineers) à temperatura de 25 °C são os seguintes [49]:

- óleo SAE 20 W : $\eta = 0,15 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$

- óleo SAE 40 : $\eta = 0,40 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$

5.6 - Determinação da Rugosidade

Para se determinar a rugosidade da superfície cônica interna das matrizes foi utilizado o rugosímetro universal PERTH-O-METER localizado no Centro de Tecnologia da Unicamp. Os valores obtidos foram os seguintes:

MATRIZ	Ra (μm)
Polida	0,34
Acabamento de Torno	0,38
Lixada	1,9

Na determinação da rugosidade dos tarugos de alumínio foi empregado o rugosímetro MITUTOYO SURFTTEST-211 do Departamento de Engenharia de Fabricação da FEM.

Os valores apresentados são médias de várias medições pois o acabamento não é uniforme em todos os pontos da peça. Esse fato é mais relevante no caso das peças lixadas e limadas que, por terem sido trabalhadas manualmente, apresentam grande dispersão entre as medidas efetuadas em diferentes regiões da peça.

PEÇAS	Ra (μm)
Polidas	0,7
Acab. Torno	1,2
Lixadas	3,2
Limadas	9,6

5.7 - Referências Bibliográficas

- [46] BUTTON, S.T., Desenvolvimento de Uma Máquina de Laboratório Para A Extrusão Hidrostática de Metais Não-Ferrosos, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 1985, pp.46-61.
- [47] Catálogo de Aços Para Trabalho À Quente, Aços Villares S. A., São Paulo, 1980.
- [48] Idem Ibidem Ref.[15], p.94.
- [49] Neale, M.J., Tribology Handbook, Newnes-Butterworths, Londres 1973, Seção B-2.

CAPITULO 6

RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 - Introdução

Após a conclusão de todos os ensaios foram determinadas as pressões atingidas em cada um deles. Utilizou-se o fator de cálculo obtido da curva de calibração da célula de carga (Figura 5.5) e o valor da área da seção transversal interna do recipiente de extrusão:

$$P = \frac{F}{A}$$

onde:

$$\begin{aligned} F &= 3.717,23.V & F [N] \\ & & V [mV] \\ A &= 96,94 & A [mm^2] \end{aligned}$$

Foi determinada a pressão em cada ensaio e, ao final de cada série de três ensaios para uma mesma condição de processamento foi calculada a pressão média para essa condição.

As tabelas 6.1 a 6.6 trazem o conjunto de dados experimentais obtidos utilizando-se cada uma das matrizes, os tarugos e os dois lubrificantes.

Tabela 6.1 - Ensaios Utilizando a Matriz 1 e o Lubrificante SAE 20

Corpos de Prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Força Média	Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão			
Polidos	40.140	414	40.885	422	41.630	430	40.885	422	16
Somente Torneados	38.661	398	40.513	418	39.023	402	39.400	406	20
Lixados	36.800	380	39.023	402	37.916	391	37.906	391	22
Limados	38.278	395	37.916	391	39.396	406	38.534	397	15

Força - [N] Pressão - [MPa]

Tabela 6.2 - Ensaios Utilizando a Matriz 2 e o Lubrificante SAE 20

Corpos de prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Força Média	Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão			
Polidos	42.747	441	42.375	438	41.258	422	42.120	434	19
Somente Torneados	41.630	430	42.747	441	32.340	333	38.906	401	97
Lixados	33.457	345	40.140	414	31.967	330	35.182	363	84
Limados	38.661	398	38.661	398	32.712	337	36.681	378	61

Força - [N] Pressão - [MPa]

Tabela 6.3 - Ensaios Utilizando a Matriz 3 e o Lubrificante SAE 20

Corpos de Prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Força Média	Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão			
Polidos	50.548	521	38.661	398	40.140	414	43.120	444	123
Somente Torneados	37.171	383	35.309	364	37.171	383	36.554	377	19
Lixados	36.064	372	34.564	356	35.309	364	35.309	364	16
Limados	36.064	372	34.202	352	35.309	364	35.191	363	20

Força - [N] Pressão - [MPa]

Tabela 6.4 - Ensaios Utilizando a Matriz 1 e o Lubrificante SAE 40

Corpos de Prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Pressão Média	Força Média	Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão				
Polidos	33.084	341	31.967	330	32.830	339		32.624	336	11
Somente Torneados	27.881	287	29.733	306	27.881	287		28.498	293	19
Lixados	28.253	291	29.360	303	28.988	300		28.870	298	12
Limados	29.360	302	27.881	287	29.360	303		28.870	298	15

Força - [N] Pressão - [MPa]

Tabela 6.5 - Ensaaios Utilizando a Matriz 2 e o Lubrificante SAE 40

Corpos de Prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Força Média	Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão			
Polidos	36.426	373	34.564	356	34.937	360	35.309	364	19
Somente Torneados	29.733	306	29.360	303	32.340	333	30.478	314	30
Lixados	32.340	333	31.595	326	32.712	337	32.212	332	11
Limados	30.478	314	29.360	303	33.457	345	31.095	321	42

Força - [N] Pressão - [MPa]

Tabela 6.6 - Ensaios Utilizando a Matriz 3 e o Lubrificante SAE 40

Corpos de Prova	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		Pressão Média	Amplitude da Pressão
	Força	Pressão	Força	Pressão	Força	Pressão		
Polidos	38.278	395	40.140	414	38.661	398	39.023	19
Somente Torneados	33.084	341	34.564	356	33.222	343	33.623	15
Lixados	35.681	368	33.457	345	34.202	352	34.447	23
Limados	34.937	360	32.712	337	33.457	345	33.702	23

Força - [N] Pressão - [MPa]

Os dados experimentais possibilitaram a construção de gráficos que permitem a observação e a interpretação do comportamento da pressão de extrusão em função de alguns fatores como rugosidade inicial das barras extrudadas, rugosidade da matriz e viscosidade do lubrificante.

6.2 - Comportamento da Pressão de Extrusão Com a Variação da Rugosidade das Peças

Nos três gráficos obtidos (Figuras 6.1, 6.2, e 6.3), pode-se observar que há um padrão de variação de pressão. O valor inicial da pressão, obtido nos ensaios nos quais foram utilizadas peças polidas cai quando são utilizadas peças um pouco mais rugosas como aquelas que têm o acabamento resultante somente do torneamento. Isso se deve ao fato de as microcavidades e reentrâncias superficiais permitirem a retenção de uma parcela do lubrificante. Conforme as previsões teóricas admitiam^[50], essa retenção se revela de grande utilidade no decorrer do processo pois com a deformação do tarugo maior quantidade de fluido é arrastada para a zona de trabalho da matriz, tornando a lubrificação mais efetiva e causando uma diminuição na pressão necessária ao processamento.

O fenômeno da retenção superficial de lubrificante é incrementado quando os sulcos superficiais da ferramenta estão posicionados perpendicularmente à direção de deslocamento da

MATRIZ 1 ($Ra=0,34$)

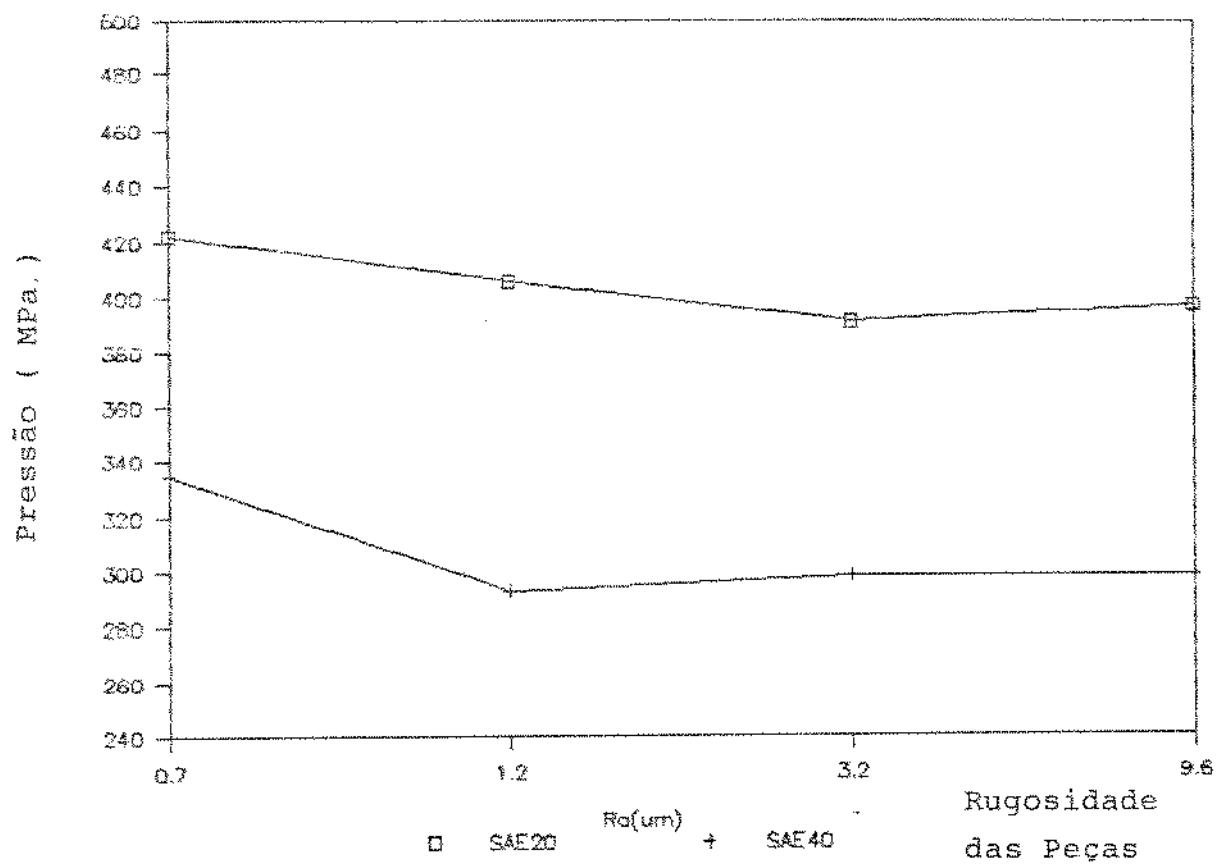


Figura 6.1 - Níveis de Pressão Para Ensaios Com A Matriz 1

MATRIZ 2 (Ra=0,38)

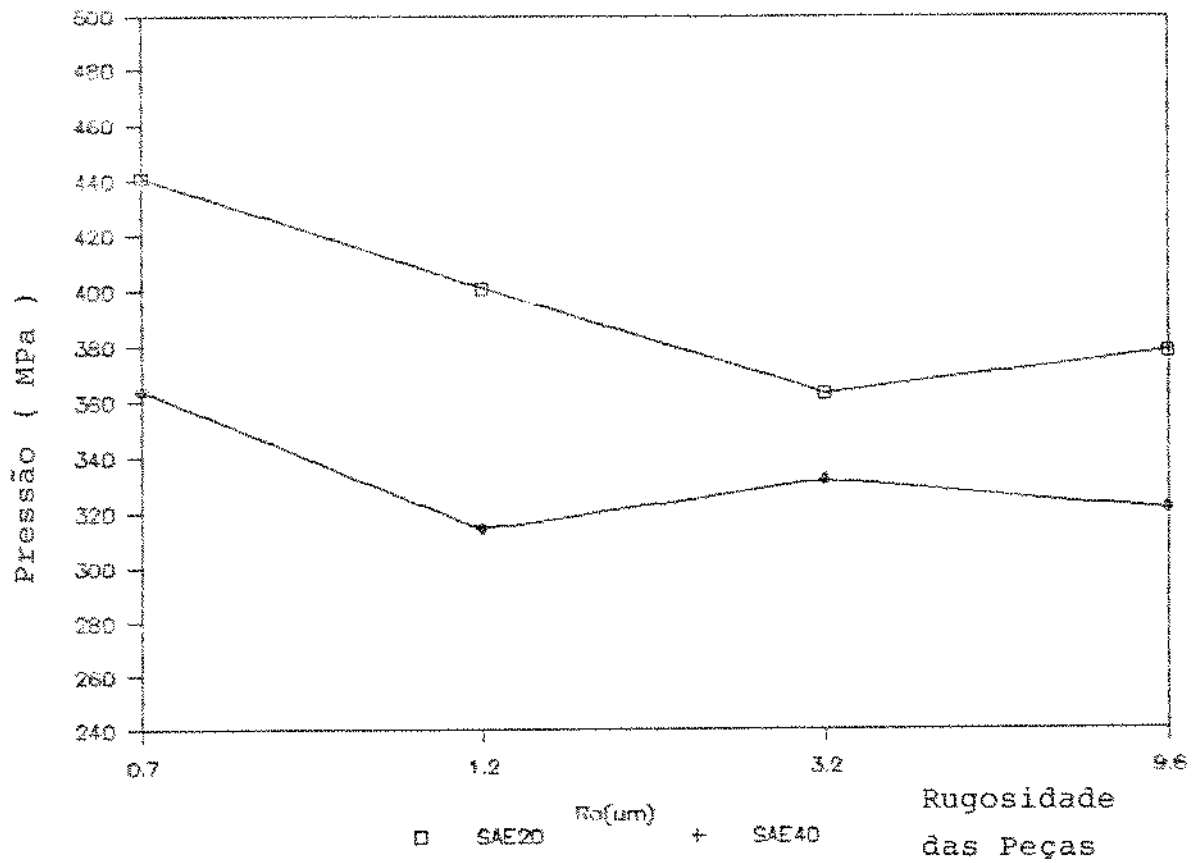


Figura 6.2 - Níveis de Pressão Para Ensaios Com A Matriz 2

MATRIZ 3 (Ra=1,9)

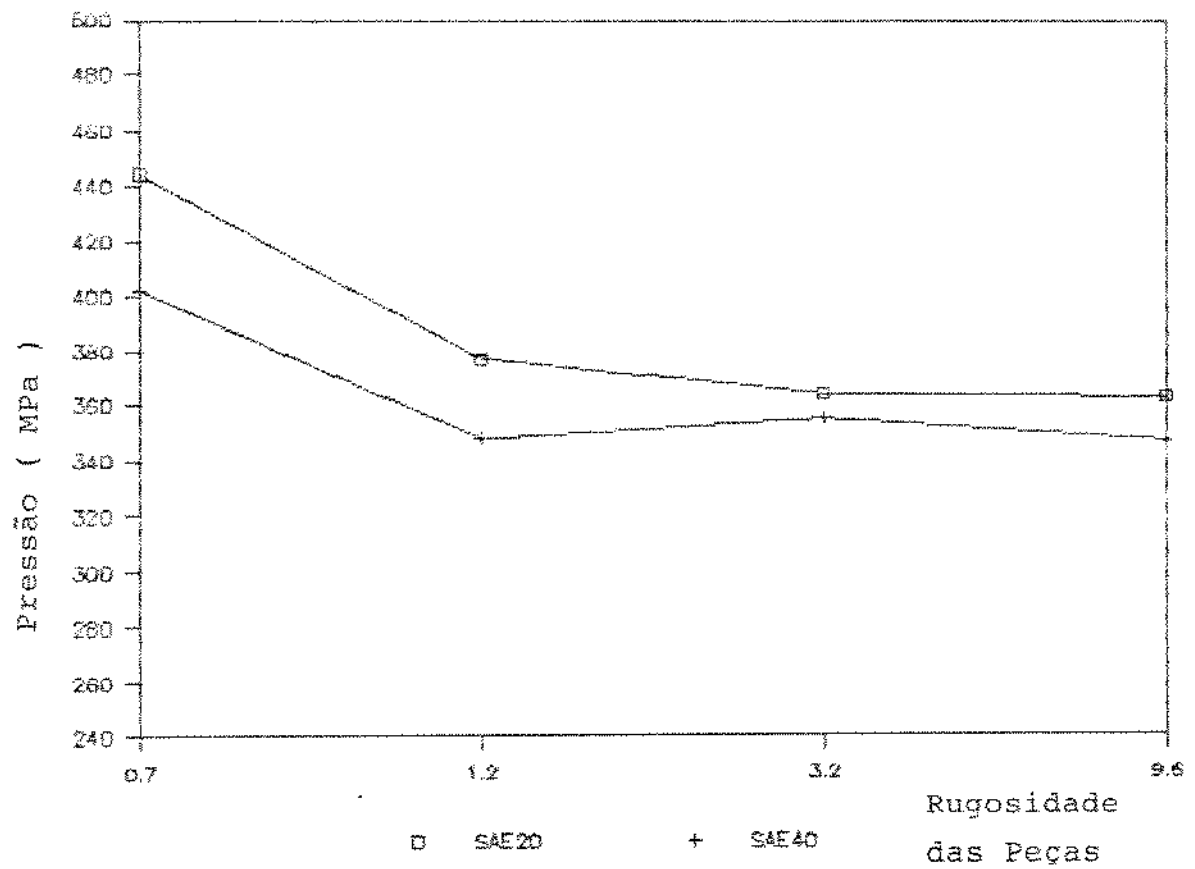


Figura 6.3 - Níveis de Pressão Para Ensaio Com A Matriz 3

peça-de-trabalho através da matriz^[51].

Deve-se ressaltar, no entanto, que quanto mais rugosa a superfície maior a possibilidade de as asperezas perfurarem o filme de lubrificante e entrarem em contato com a superfície oposta. Nesse caso o benefício resultante da retenção de lubrificante na superfície da peça pode ser anulado pelo maior contato entre as asperezas que resulta em maior atrito. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos, onde a pressão de extrusão tende a se manter no mesmo nível nos casos de peças lixadas e limadas.

6.3 - Efeitos da Rugosidade da Matriz Sobre o Processo

Poder-se-ia supor que uma matriz com superfície relativamente rugosa fosse indesejável em qualquer condição de trabalho, admitindo-se que as saliências poderiam perfurar a camada de lubrificante e riscar a superfície da peça^[52]. Por outro lado a produção de uma matriz com acabamento muito bom, implica num processo industrial em maior tempo de operação e maior custo. No entanto, a matriz que tinha a superfície com melhor acabamento não se mostrou, nos ensaios, mais vantajosa que as outras. Com respeito ao acabamento que gerou nos produtos pode-se dizer que não foi diferente do acabamento produzido pelas matrizes de pior qualidade. Já quanto à pressão de extrusão os valores obtidos se situaram num nível mais alto que os obtidos com as

demais matrizes. De maneira geral o nível de pressão baixava conforme se aumentava a rugosidade das matrizes utilizadas nos ensaios tendo como lubrificante o óleo SAE 20.

Com base nessas constatações pode-se afirmar que um nível moderado de rugosidade da matriz favorece o processo, pois resulta num esforço menor de processamento decorrente da melhoria da lubrificação.

6.4 - Os Efeitos do Regime Hidrodinâmico

Com a finalidade de se observar como a formação de um regime de lubrificação hidrodinâmico (filme espesso) afeta a pressão de extrusão, foram realizados ensaios nos quais os tarugos são recobertos por TEFLON nas extremidades cônicas. A grossa camada formada, relativamente às dimensões das saliências, atua como se fosse um lubrificante e permite que o tarugo seja deformado de tal sorte que as superfícies da peça e da ferramenta permaneçam completamente separadas, evitando dessa forma qualquer contato entre as saliências. As deformações sofridas pela peça se dão dentro dessa camada formada pelo TEFLON e pelo óleo e o efeito da rugosidade superficial pode ser desprezado^[53]. Nessas condições o produto obtido terá um superfície bastante rugosa.

Embora a deformação plástica atinja toda a extensão da peça alguns grãos podem sofrer deformações diferenciadas dos demais, segundo as suas orientações cristalográficas e as

limitações impostas pelos grãos circunvizinhos. Além disso bolsões de óleo lubrificante retidos nas microcavidades da peça permanecem praticamente intactos mesmo sob as mais intensas deformações. Esses bolsões são capazes de transmitir todo o esforço da interface para a superfície da peça gerando depressões localizadas e comprometendo a qualidade superficial do produto [54].

Observou-se nesses ensaios uma sensível redução no nível da pressão de processamento devido a uma redução no nível de atrito em comparação à lubrificação mista presente nos ensaios com lubrificantes líquidos (óleos SAE 20 e SAE 40).

Essa redução do atrito pode ser observada através do cálculo do coeficiente de atrito, utilizando-se a Equação 2.8. Entrando-se na expressão com o valor da pressão obtida nos ensaios com a matriz polida (Tabela 6.7) e com os demais parâmetros de processamento, obtém-se μ (Figura 6.4).

Tabela 6.7 - Coeficientes de Atrito

Lubrificação Mista	Pressão [MPa]	μ
Peças Polidas	444	0,1
" Torneadas	406	0,08
" Lixadas	391	0,07
" Limadas	397	0,075
Lubríf. Hidrodín.		
Peças Polidas	292	0,015
" Torneadas	276	0,006
" Lixadas	276	0,006
" Limadas	276	0,006

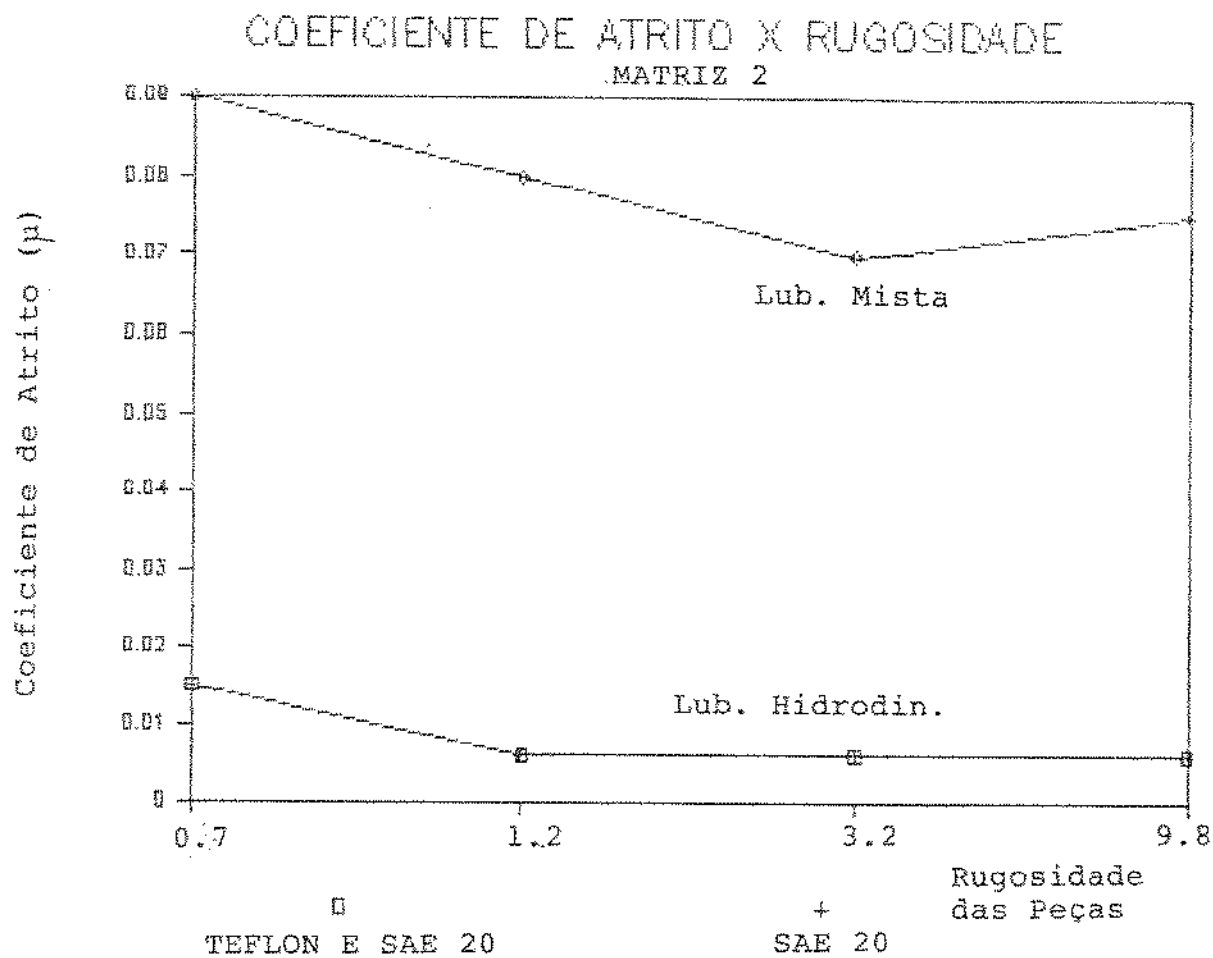


FIGURA 6.4 - Variação do Coeficiente de Atrito com o Regime de Lubrificação

6.5 - Características dos Produtos Obtidos

Os produtos obtidos (Figura 6.5) tem, de modo geral, uma qualidade superficial muito boa. Os valores de rugosidade (Ra) obtidos variaram de 0,20 a 0,50 (ver tabelas 6.8 e 6.9).

Nos ensaios em que foi usado TEFLON e lubrificante, o acabamento dos produtos foi de má qualidade, com muitas ondulações e imperfeições na superfície. Isso também é uma indicação de que foi atingido um regime hidrodinâmico.

Devido ao encruamento sofrido pelo alumínio os produtos apresentam uma variação na sua dureza. Foram medidas essas variações ao longo do comprimento a partir da extremidade por onde se inicia a extrusão (Figura 6.6), obtendo-se o gráfico da figura 6.7.

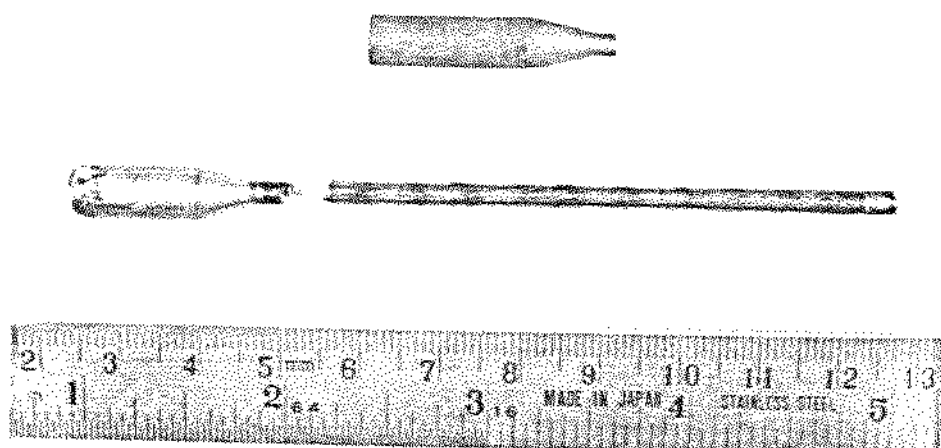


FIGURA 6.5 - OS PRODUTOS

Tabela 6.8- Rugosidade dos Produtos (Ra)

Lubrificante SAE 20
MATRIZ 1

PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,15	0,18	0,20
Torneada	0,25	0,25	0,20
Lixada	0,20	0,22	0,24
Limada	0,24	0,22	0,20

MATRIZ 2

PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,15	0,22	0,20
Torneada	0,18	0,22	0,24
Lixada	0,34	0,37	0,40
Limada	0,28	0,34	0,36

MATRIZ 3

PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,24	0,26	0,25
Torneada	0,30	0,32	0,28
Lixada	0,36	0,38	0,35
Limada	0,38	0,44	0,42

Tabela 6.9- Rugosidade dos Produtos (Ra)

Lubrificante SAE 40

MATRIZ 1

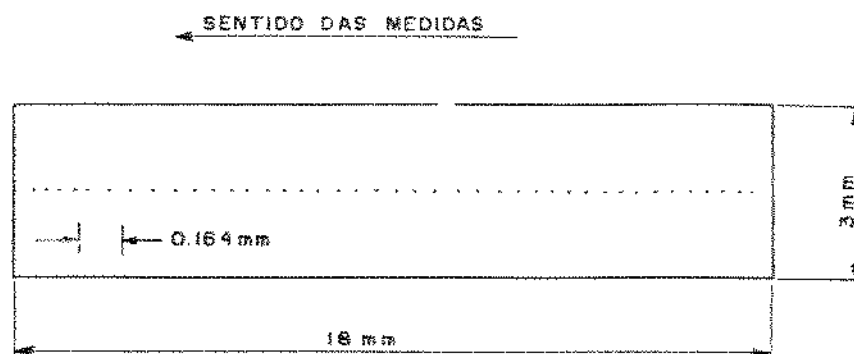
PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,19	0,20	0,23
Torneada	0,22	0,26	0,32
Lixada	0,32	0,32	0,48
Limada	0,56	0,48	0,40

MATRIZ 2

PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,18	0,16	0,22
Torneada	0,16	0,21	0,28
Lixada	0,36	0,38	0,46
Limada	0,54	0,38	0,44

MATRIZ 3

PEÇA	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio
Polida	0,28	0,37	0,25
Torneada	0,40	0,32	0,30
Lixada	0,35	0,37	0,28
Limada	0,30	0,39	0,36



TOTAL DE PONTOS MEDIDOS:77

FIGURA 6.6 - PONTOS DE MEDIDA DE MICRODUREZA VICKERS NA SECAO
LONGITUDINAL DOS PRODUTOS

VARIACAO DA DUREZA

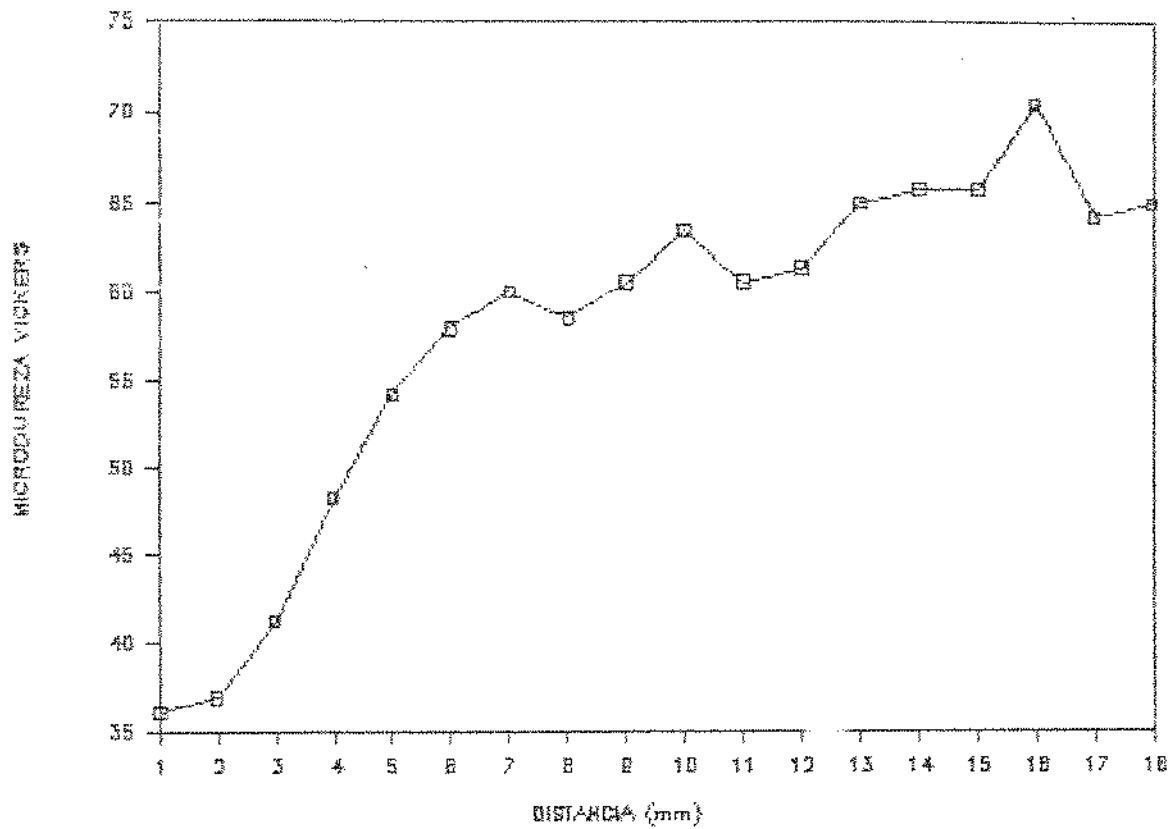


FIGURA 6.7 - A VARIACAO DA DUREZA DOS PRODUTOS

6.6 - Referências Bibliográficas

[50] Idem ibidem Ref.[41], p.378.

[51] Idem ibidem Ref.[40], p.72.

[52] MIZUNO, T. e HASEGAWA, K., Effects of Die Surface Roughness on Lubricating Conditions in The Sheet Metal Compression-Friction Test, Journal of Lub. Technology, 104 1982, pp.23-28.

[53] CHOW, L. e CHENG, H., Influence of Surface Roughness and Waviness on Film Thickness and Pressure Distribution in Elastohydrodynamic Contacts, NASA, C.R.- 2670, 1976, pp.3-4

[54] Idem ibidem Ref.[44], p.591.

CAPITULO 7

CONCLUSOES

- 1 - O incremento no nível de rugosidade das peças resulta em melhoria da lubrificação na zona de deformação da matriz, o que é confirmado pela redução no nível da pressão de extrusão.
- 2 - O efeito de redução da pressão de extrusão proporcionado pelo aumento da rugosidade da peça vai, contudo, até certo nível de acabamento. Para as peças com acabamento muito ruim supõe-se que o efeito positivo tenha sido contrabalançado por um aumento no atrito resultante do maior contato entre as asperezas.
- 3 - Há um decréscimo do nível da pressão de extrusão à medida que são utilizadas matrizes mais rugosas, na presença do lubrificante menos viscoso (SAE 20); para o lubrificante mais viscoso (SAE 40) ocorreu o contrário.
- 4 - Um regime de lubrificação hidrodinâmico pode ser alcançado quando, além do lubrificante normalmente utilizado, recobre-se com TEFLON a extremidade da peça que inicia o contato com a matriz.
- 5 - Os produtos obtidos apresentaram nível de acabamento muito

bom, mesmo quando as peças tinham uma rugosidade inicial elevada.

- 6 - Os produtos resultantes de ensaios nos quais a lubrificação era hidrodinâmica apresentaram qualidade superficial muito ruim, com muitas imperfeições e ondulações como previsto teóricamente

SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade do trabalho deve ocorrer no sentido de um aprofundamento na compreensão dos fenômenos que ocorrem na interface peça-ferramenta, o que pode ser possibilitado através da modelagem matemática da rugosidade superficial e do atrito na zona de deformação.

BIBLIOGRAFIA

- AGOSTINHO, O. L. et al., Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões, Ed. Edgard Blücher, 1^a Edição, São Paulo, 1977, pp. 195 - 206.
- ALEXANDER, J. M. e LENGYEL, B., Hydrostatic Extrusion, Mills & Boon Ltd., Londres, 1949, p.29.
- ALTAN, T. e BOULGER, F., Flow Stress of Metals and Its Application in Metal Forming Analyses, Journal of Eng. for Industry, Novembro, 1973, p. 1.012.
- AVITZUR, B., Analysis of Metal Extrusion, Journal of Eng. for Industry, Transactions of ASME, Fevereiro, 1965, pp.57 - 70.
- AVITZUR, B., Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, Novembro, 1964, pp.305 - 316.
- AVITZUR, B., Hydrostatic Extrusion, Journal of Eng. for Industry, Trans. of ASME, Novembro, 1965, pp. 487 - 494.
- AVITZUR, B., Metal Forming : Processes and Analysis, Mc Graw-Hill, 1968, Nova York, p.296.

AVITZUR, B., Study of Flow Through Conical Converging Dies, Wire Industry, June, 1982, pp.449 - 454.

BOWDEN, F.P. e TABOR, D., The Friction and Lubrication of Solids, Oxford Clarendon Press, Londres, 1954.

BRESCIANI F^O, E. et al., Conformação Plástica dos Metais, UNICAMP, Campinas, 1985, Vol.1.

BRESCIANI F^O, E., Tribologia na Conformação Plástica, Monografia, Vol.2, UNICAMP, Campinas, 1987, pp.77 - 79.

BUTTON, S. T., Desenvolvimento de Uma Máquina de Laboratório Para a Extrusão Hidrostática de Metais Não-Ferrosos, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 1985, pp.46 - 61.

BUTTON, S. T., Estudo da Lubrificação Hidrodinâmica na Extrusão Hidrostática, Tese de Doutorado, UNICAMP, 1990, p.98.

Catálogo de Aços Para Trabalho À Quente, Aços Villares S.A., São Paulo, 1980.

CHOW, L. e CHENG, H., Influence of Surface Roughness and Waviness on Film Thickness and Pressure Distribution in Elastohydrodynamic Contacts, NASA, C.R. - 2670, 1976, pp. 3-4.

DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, Ed. Guanabara Dois, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1981, p.125.

DREWS, W.E., Surface Measurement : An Advancing Technology, Quality Progress, Abril, 1987, pp. 43 - 46.

FARAGO, F., Handbook of Dimensional Measurement, Industrial Press Inc., 2ª Edição, Nova York, 1982, pp. 377 - 384.

FIORENTINO, R. J. et al., Hydrostatic Extrusion of Metals at Batelle, Machinery Lloyd, 17, 18, 1963.

HILLIER, M.J., A Hydrodynamic Model of Hydrostatic Extrusion, The Int.J. of Production Research, Vol. 5, 1966, pp. 171 - 181.

HOSFORD, W. e CADDELL, R., Metal Forming : Mechanics And Metallurgy, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1983, pp. 143 - 145.

LENGYEL, B. e CULVER, L., Properties of Materials Extruded by Orthodox Hydrostatic Extrusion, Journal of The Institute of Metals, Vol. 97, 1969, pp. 97 - 103.

MIZUNO, T. e HASEGAWA, K., Effects of Die Surface Roughness on Lubricating Conditions in The Sheet Metal Compression-Friction Test, Journal of Lubrication Technology, 104, 1982, pp.23 - 28.

NEALE, M. J., Tribology Handbook, Newnes-Butterworths, Londres, 1973, Seccão B-2.

NORMA ABNT NBR 6405/88.

NOWICKI, B., Multiparameter Representation of Surface Roughness, Wear, 102, 1985, pp. 161 - 176.

PARSONS, B. et al., An Elasto-Plasto-Hydrodynamic Lubrication Analysis of The Plane Strain Drawing Process, J. of Mechanical Engineering Science, Vol.12, 1970, pp. 178.

PUGH, H.D. et al., Hydrostatic Extrusion - A Review, Annals of The CIRP, Vol. 21/2, 1972, p.167.

PUGH, H.D., Redundant Work and Friction in The Hydrostatic Extrusion of Pure Aluminium and An Aluminium Alloy, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.6, 1964, pp.362 - 370.

RABINOWICZ, E., Friction And Wear of Materials, John Wiley And Sons, Nova York, 1966, pp. 32 - 38.

RATNAGAR, D., et al., The Surface Deformation of Aluminum Compressed With Viscous Lubricants, Journal of Lubrication Technology, Outubro, 1974, pp. 591 - 594.

- REID, J. e SCHEY, J. A., Full Fluid Film Lubrication in Aluminum Strip Rolling, ASLE Trans., Vol.21, 1977, pp. 191 - 200.
- SARGENT, L. B. Jr. e TSAO, Y. H., Surface Roughness Considerations in Metalworking, ASLE Transactions, 23, 1980, pp. 70 - 76.
- SCHEY, J. A., Surface Roughness Effects in Metalworking Lubrication, Lubrication Engineering, Junho, 1983, pp.376-382.
- SCHEY, J. A., Tribology in Metalworking, American Society For Metals, Metals Park, Junho, 1984, p.80.
- TABOR, D., Friction-The Present State of Our Understanding, Journal of Lubrication Technology, Vol. 103, Abril, 1981, pp.169 - 179.
- THOMAS, T.R., Recent Advances in The Measurement And Analysis of Surface Microgeometry, Wear, 33, 1975, pp. 205 - 233.
- TONDER, K., Simulation of Lubrication of Isotropically Rough Surfaces, ASLE Trans., Vol.23, 1980, pp. 326 - 333.
- TSAO, Y. e TONG, K., A Model for Mixed Lubrication, ASLE Trans., Vol.18, 1975, pp.90-95.

- WALLACE, P., et al., The Thick-Film Lubrication in Model Extrusions With Low Extrusion Ratios, Journal of The Institute of Metals, Vol.100, 1972, pp. 78-85.
- WHITEHOUSE, D.J. e ARCHARD, J.F., Proceedings of The Royal Society, Londres, 1970, pp. 97-121.
- WHITEHOUSE, D. J., The Measurement And Analysis of Surfaces, Tribology International, Dezembro, 1974, p.256.
- WILCOCK, D.F., Effects of Surface Roughness in Lubrication, Journal of Lubrication Technology, Vol.100, Janeiro, 1978, pp. 6 - 11.
- WILSON, W.R.D., Friction And Lubrication in Bulk Metal-Forming Processes, Journal of Applied Metalworking, Vol.1, 1979, pp.7-9
- WILSON, W.R.D., The Temporary Breakdown of Hydrodynamic Lubrication During The Initiation of Extrusion, International Journal of Mechanical Science, Vol. 13, 1971, pp. 17 - 28.
- WILSON, W.R.D., Workpiece Surface Roughening in A Hydrodynamically Lubricated Metal Forming Process, Journal of Lubrication Technology , Janeiro, 1977, pp.10 - 14.
- WISTREICH, J.G., Lubrication in Wire Drawing, Proc. Conf. Lub. And Wear, Inst. Mech. Eng., 1957, p.102.

YUST, C.S., Tribology And Wear, International Metals Reviews, Vol.
30, n^o 3, 1985, pp. 141 - 154.