

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TREFILAÇÃO DE
FIOS CAPILARES DE METAIS NÃO FERROSOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
SETOR DE FABRICAÇÃO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TREFILAÇÃO DE FIOS CAPILARES
DE METAIS NÃO FERROSOS

Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campi
nas - UNICAMP como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ME
CÂNICA, modalidade MATERIAIS E PROCESSOS.

- Campinas -

1979
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao Professor Dr. ETTORE BRESCIANI FILHO, a quem se deve a orientação deste trabalho, pelo incentivo e dedicação demonstrados durante o desenvolvimento do mesmo.

Agradece também aos colegas: ITAMAR FERREIRA, CARLOS TANAAMI e CARLOS HUMBERTO CARDOSO pela colaboração na construção da máquina de trefilar; GILBERTO DOURADO e RITA HELENA B. JACON, pelo auxílio nos trabalhos experimentais; ANTONIO ROBERTO DONADON, pelos serviços fotográficos; LUIZA MARIA DE CAMPOS e MARCOS PÂDULA, pela confecção dos desenhos; MARIA ALAÍDE GOMES CABRAL, pelos trabalhos de datilografia e à toda equipe de apoio e técnica do Projeto TELEBRÁS-MGE, pela indispensável colaboração.

Ressalta ainda o reconhecimento à cooperação das empresas PIRELLI-ISOFIL S.A.; LUBQUIM-HOUGHTON DO BRASIL e IBM DO BRASIL e do CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP).

Finalizando, agradece às TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS S.A. - TELEBRÁS, entidade que permitiu a realização deste trabalho.

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TREFILAÇÃO DE FIOS CAPILARES DE METAIS NÃO FERROSOS

RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvida uma máquina de trefilar de laboratório, com o objetivo de produzir fios capilares de metais não ferrosos, com propriedades mecânicas, metalúrgicas e dimensões controladas. Esses fios são utilizados como elementos de ligação em dispositivos eletrônicos. Os metais mais utilizados na confecção desses fios capilares são o ouro e o alumínio de grau eletrônico e a liga de alumínio com 1% de silício.

Nos ensaios preliminares com a máquina construída foi utilizado o cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP) devido à grande disponibilidade desse metal em forma de fios e às semelhanças entre as propriedades mecânicas de ouro e do cobre.

A máquina de trefilar é dotada de uma desbobinadora, três fieiras de diamante intercaladas com três anéis tirantes e uma bobinadora. Foram utilizados quatro motores de corrente contínua, três deles acoplados aos anéis tirantes e o quarto à bobinadora. Para o controle gradual e sincronizado das velocidades dos diversos motores foi utilizado um sistema eletrônico.

As três fieiras podem ser substituídas por outras três de diâmetros menores após cada passada do fio pela máquina. Foi feito um programa de redução, através do qual partindo-se de um fio metálico com 1mm de diâmetro, pode-se chegar até a faixa de diâmetros considerada como fios capilares (abaixo de 0,150mm).

Foi descrito o processo de trefilação e foram definidas e analisadas as variáveis de influência nesse processo, podendo ser classificadas em: variáveis de matéria prima, variáveis de materiais auxiliares, variáveis de processamento e variáveis de produto final. Algumas variáveis de processamento (força e velocidade de trefilação) foram escolhidas para estudo e verificação da influência desses parâmetros em algumas variáveis de produto final, tais como diâmetro, acabamento superficial do fio e propriedades mecânicas.

Foram efetuadas duas séries de experiências. Na primeira delas, utilizaram-se os três motores a velocidades constantes. Na segunda utilizou-se apenas um motor a três velocidades diferen

tes. Foram verificadas as dimensões dos fios, as propriedades mecânicas e elétricas e as forças de trefilação.

Analizou-se o funcionamento da máquina e os resultados do controle de qualidade dos fios trefilados.

Alguns estudos complementares foram propostos com a máquina construída para o desenvolvimento das teorias da mecânica e da metalurgia da deformação no processo de trefilação de fios capilares.

STUDY OF THE WIRE-DRAWING OF CAPILLARY WIRES OF NON-FERROUS METALS

ABSTRACT

This work is intend to develop a laboratory wire drawing machine. Such machine is designed to produce fine wires of non-metals with controlled mechanical and metallurgical properties and dimensions. These wires are used in the electronic devices as bondings. The most commonly used materials for such capillary wires are the electronic grade Aluminium, Gold or Aluminium - 1% Silicon alloy.

In the preliminary tests of the machine eletrolytic tough pith Copper was used, because the wire form of this material can be obtained easily and it has similar mechanical properties as gold.

The wire drawing machine is designed with a unroller, three diamond dies interlocked with three capstans and a coiler. Four D.C. motors were used three of them coupled to the capstans and the fourth to the coiler. An electronic system was used to control gradually and synchronically the speed of various motors.

The three dies can be replaced by three other dies with smaller diameters after each pass of the wire drawing process. A reduction program was adopted through which wires with capillary diameter (less than 0,150 mm) can be obtained from a original diameter of 1,0 mm.

The wire drawing process are described and their variables are defined and analyzed. The variables can be classified into four groups: raw materials variables, auxiliar materials variables, process variables and final product variables. Some variables of the process (force and speed of wire drawing) are chosen for this study and the verification of the influence of these parameters in term of some of the final product variables, such as diameter , surface finish of the wire and mechanical properties are presented.

Two series of experiments were carried out. In the first experiment, three motors were used at constant speeds. In the other one, only one motor was used at three different speeds. The diameter of the wire and the mechanical and the electrical properties as well as the drawing force were verified.

Both the performance of the machine and the results of the quality control of the drawn wires were analyzed.

Some complementary studies were proposed by using this machine to study mechanical deformation and metallurgical deformation theories of wire drawing.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos do Trabalho.....	1
1.2. Usos dos Fios Capilares de Metais Não-Ferrosos na Indústria de Dispositivos Eletrônicos.....	4
1.3. Referências Bibliográficas	11
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO	13
2.1. Introdução ao Processo.....	13
2.2. Máquinas de Trefilar Industriais	18
2.3. Fieiras de Diamante	20
2.4. Lubrificação	24
2.5. Defeitos em Trefilação	26
2.6. Controle de Qualidade dos Fios.....	28
2.7. Controle das Fieiras	44
2.8. Controle da Lubrificação.....	45
2.9. Referências Bibliográficas.....	46
CAPÍTULO 3 - ANÁLISES DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA NA TRE FILAÇÃO	49
3.1. Variáveis de Matéria Prima	50
3.2. Variáveis de Materiais Auxiliares	53
3.3. Variáveis de Processamento	57
3.4. Variáveis de Produto Final.....	66
3.5. Variáveis Escolhidas para Estudo	67
3.6. Referências Bibliográficas	68
CAPÍTULO 4 - MÁQUINA DE TREFILAR DE LABORATÓRIO	71
4.1. Projeto da Máquina de Trefilar de Laboratório.	71
4.2. Desbobinadora e Bobinadora	72
4.3. Sistema de Lubrificação	77
4.4. Motores	77
4.5. Sistema Eletrônico para Controle de Velocidade	81
4.6. Estrutura	83
4.7. Sistema de Proteção	83

	Pág.
4.8. Acessórios	89
4.9. Dispositivo de Medição de Forças	89
4.10. Fieiras Utilizadas e Programa de Redução.....	98
4.11. Análise do Funcionamento da Máquina	100
4.12. Referências Bibliográficas.....	104
 CAPÍTULO 5 - POSSIBILIDADE DE ANÁLISES TEÓRICAS, SOBRE A MECÂNICA DA DEFORMAÇÃO E A METALURGIA APLICADA À TREFILAÇÃO, COM A MÁQUINA CONSTRUÍDA.....	105
5.1. Introdução	105
5.2. Possibilidade de Estudos sobre a Mecânica da De- formação Aplicada à Trefilação.....	105
5.3. Considerações Gerais sobre a Metalurgia de Defor- mação.....	120
5.4. Estudos Propostos com a Máquina Construída.....	125
5.5. Referências Bibliográficas.....	127
 CAPÍTULO 6 - PROGRAMA DE EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS OBTIDOS	130
6.1. Programa de Experiências	130
6.2. Resultados Obtidos	134
6.3. Discussão dos Resultados	140
6.4. Referências Bibliográficas.....	151
 CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES -.....	152
 CAPÍTULO 8 - BIBLIOGRAFIA	155
8.1. Bibliografia Referida	155
8.2. Bibliografia Consultada mas não Referida.....	160
 SIMBOLOGIA.....	161
 ÍNDICE DE FIGURAS	164
 ÍNDICE DE TABELAS	167

INTRODUÇÃO1.1. Objetivos do Trabalho

O objetivo básico do trabalho é desenvolver uma máquina de trefilar de laboratório que permita conhecer o processo de trefilação de fios metálicos capilares com propriedades mecânicas, metalúrgicas e dimensões controladas para utilização na indústria eletrônica, como elementos de ligação dos circuitos integrados e transistores.

Consultas realizadas junto às principais empresas produtoras de transistores e circuitos integrados do país resultaram na constatação de que os fios capilares de ouro e de alumínio, de elevada pureza, utilizados na construção dos dispositivos são ainda importados⁽¹⁾.

A tecnologia da fabricação de fios capilares de metais não-ferrosos por trefilação a frio é denominada apenas em parte pelas empresas industriais instaladas no país. A produção de fios capilares de cobre é realizada normalmente, contudo a experiência acumulada nessa área se refere mais ao processo de fabricação do que ao projeto e construção de máquinas de trefilar⁽²⁾.

A utilização das máquinas industriais de trefilar fios capilares de cobre para outros metais não-ferrosos como o ouro e o alumínio ainda não foi verificada; contudo é provável que através de uma série de adaptações na máquina seja possível adequá-la as condições especiais de materiais de elevada pureza. Como as máquinas industriais de produção de fios capilares de cobre possuem geralmente um único motor de corrente alternada, com sistema de transmissão mecânica, poderia ocorrer transmissão de vibrações prejudiciais à qualidade dos fios capilares de ouro ou alumínio, pois provocam variações na espessura e nas propriedades mecânicas. No caso do cobre, para uso como condutores elétricos usuais, tais variações não são consideradas como prejudiciais, no nível em que ocorrem comumente.

Outra desvantagem da utilização dessas máquinas para ouro e alumínio é que elas são de grande porte e portanto destinadas a elevada produção, o que não é necessário em se tratando de fios capilares para a indústria eletrônica.

Devido a esses motivos, foi projetada e construída uma máquina de trefilar de laboratório, pequena e versátil, que possa ser utilizada para produzir fios capilares de cobre, ouro, alumínio e outros não-ferrosos especiais.

A máquina é dotada de uma desbobinadora, três fieiras de diamante intercaladas com três anéis tirantes e uma bobinadora. O sistema apresenta velocidades de retirada do fio diferentes entre as fieiras devido a deformação plástica do fio. São utilizados quatro motores de corrente contínua, sendo três deles vinculados aos anéis tirantes e o quarto à bobinadora. Para o controle gradual e sincronizado das velocidades dos diversos motores é utilizado um sistema eletrônico.

A máquina construída permite escolher a faixa de diâmetros com que se deseja trabalhar, desde que seja na faixa dos fios médios e finos (abaixo de 1,6 mm). O número de reduções parciais necessário para se obter a redução total desejada é determinado quando se faz a programação do processo. As três fieiras podem ser substituídas por outras de diâmetros menores, após cada passada de fio pela máquina.

Foi feito um programa de redução, através do qual, partindo-se de um fio metálico com 1 mm de diâmetro, pode-se chegar até a faixa de diâmetros considerada como fios capilares (abaixo de 0,150 mm).

A máquina foi projetada de tal modo a alcançar altas velocidades de trefilação, semelhantes às velocidades industriais. Pretende-se futuramente fazer um estudo comparativo entre algumas teorias da mecânica e da metalurgia da deformação na trefilação e os resultados experimentais; para a formulação dessas teorias na maioria das vezes, os pesquisadores basearam-se em ensaios realizados a baixa velocidade de trefilação⁽³⁾.

Inicialmente foi feito um estudo em fios de cobre, devido à facilidade de obtenção desse metal, para posteriormente ser estendido ao ouro, de elevada pureza e a ligas de alumínio-silício que são os materiais utilizados pela indústria de dispositivos eletrônicos.

Para se avaliar as dificuldades de obtenção de fios capilares de cobre, ouro e alumínio por trefilação é conveniente que se faça uma comparação entre algumas propriedades físicas e mecânicas desses metais recozidos.

Observa-se que os três metais, todos de estrutura cúbica de face centrada, são extremamente dúteis.

O cobre recozido apresenta 38,5% de alongamento e grande valor de limite de resistência à tração/limite de escoamento - ($\sigma_{tr}/\sigma_e=10,1$); sua resistência à tração ($\sigma_{tr}=24,2 \text{ kgf/mm}^2$) é elevada em relação aos demais^(4,5).

O ouro recozido mostra uma resistência ao escoamento quase nula ($\sigma_e=0,34 \text{ kgf/mm}^2$), ou seja, quase não apresenta fase elástica, um limite de escoamento razoável ($\sigma_{tr}=13,3 \text{ kgf/mm}^2$) e um alongamento de 45%⁽⁶⁾.

O alumínio apresenta um considerável alongamento (60%), porém sua resistência à tração é muito baixa (cerca de 6 kgf/mm^2 para o alumínio puro) e portanto, num processo de conformação a frio como a trefilação, mesmo pequenas forças de tração podem provocar a ruptura do fio⁽⁷⁾. As impurezas, principalmente o ferro, o silício e o cobre aumentam a sua resistência à tração; esse aumento pode chegar a 50%.

Outra propriedade que convém observar, pois influi bastante no preço do produto final é a densidade dos três metais: $\rho_{Al}=2,7 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{Cu}=8,9 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{Au}=19,3 \text{ g/cm}^3$ ⁽⁸⁾. Nota-se que a ordem crescente de densidades coincide com a ordem crescente dos preços das matérias primas mantendo maior a discrepância de preço dos fios dos três metais. Entretanto, sabe-se que outros fatores influem no custo dos fios capilares, tais como o processo de fabricação e a disponibilidade da matéria prima nacional.

Deve-se observar também que as condutibilidades térmicas e elétrica variam de forma crescente para os tres metais: alumínio, ouro e cobre.

Outro fator importante, que convém ser mencionado, é a temperatura de recozimento dos metais. Os fios, durante o processo de conformação a frio, sofrem encruamento, ocorrendo consequentemente um aumento da sua resistência mecânica e uma diminuição no seu alongamento devendo então ser submetidos ao recozimento em alguns estágios do processo, para que a conformação possa prosseguir. Como a faixa de temperatura de recozimento de um metal é função, - além de outros fatores de sua temperatura de fusão, verifica-se que a ordem crescente das temperaturas de recozimento é: alumínio, ouro e cobre⁽⁹⁾.

O alumínio principalmente de elevada pureza sofre recozimento a temperaturas próximas à ambiente, portanto verifica-se que esse metal é o mais difícil de ser trabalhado, pois durante o processo, quando o material está com um certo grau de encruamento, permitindo que seja trabalhado, pode ocorrer recozimento e o

fio volta a ter baixa resistência mecânica, podendo até romper-se⁽¹⁰⁾.

Da comparação entre as propriedades dos três metais pode-se prever que serão obtidos fios de cobre e ouro com a mesma facilidade, porém a confecção de fios de alumínio apresentará maior dificuldade.

Devido à semelhança de processamento do ouro e cobre, ao baixo preço do fio de cobre e da facilidade de ser encontrado, as experiências preliminares da máquina de trefilar foram feitas com esse metal.

Primeiramente foram efetuados ensaios para verificar a viabilidade técnica de se trabalhar com um, dois ou três motores na máquina de trefilar.

Foram definidas as variáveis de influência no processo de trefilação e classificadas em: variáveis de matéria prima, variáveis de materiais auxiliares, variáveis de processamento e variáveis de produto final. Foram escolhidas algumas variáveis de processamento, tais como velocidade e esforço de trefilação, para estudo e verificação da influência, desses parâmetros em algumas variáveis produto final, tais como diâmetro, regularidade do diâmetro, propriedades mecânicas e elétricas.

1.2. Usos dos Fios Capilares de Metais Não-Ferrosos na Indústria de Dispositivos Eletrônicos⁽¹¹⁻¹⁴⁾

Os fios capilares são utilizados como elementos de ligação entre os contatos do circuito eletrônico e os terminais externos. Esses fios são utilizados em todos os tipos de microcircuitos: monolíticos, filmes finos e filmes espessos. A seguir será feita uma análise dos circuitos mais comuns, ou seja os monolíticos de silício.

Os fios capilares entram em contato com a área metalizada do circuito integrado e os pinos terminais externos. A primeira ligação, que mais problemas causa é a que precisa ser estudada.

A finalidade da metalização em circuitos integrados é a de interconectar os vários componentes da estrutura difundida. A difusão proporciona estruturas monolíticas de características muito boas, porém é impraticável a soldagem dos fios diretamente sobre os vários componentes dessa estrutura. Emprega-se, portanto, a metalização como interface. Vários materiais podem ser utilizados para a metalização. Os principais são: alumínio, ouro, cromo,

tântalo e titânio.

O alumínio é o mais usado como elemento de metalização devido a uma série de fatores, entre eles: baixo preço, boa aderência aos óxidos, facilidade de sofrer ataque químico seletivo, capacidade de suportar bem as variações de temperatura, capacidade de formar liga com o silício, facilidade de conexão com fios de ouro e alumínio.

Dois tipos de ligação dos fios são mais utilizados: soldagem por termocompressão e soldagem ultrassônica.

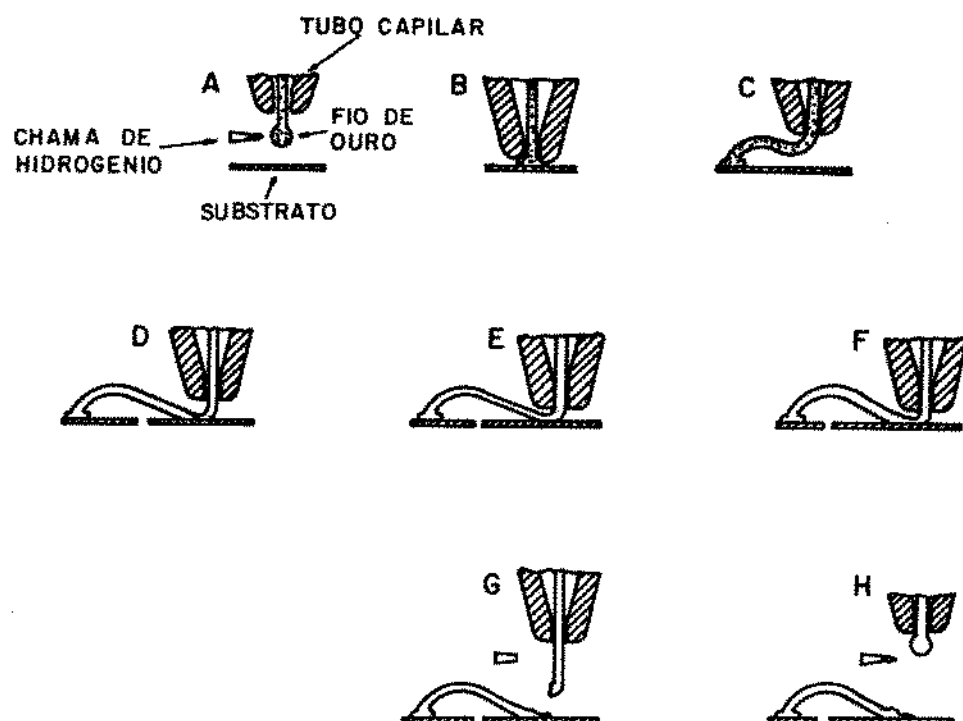
No processo de termocompressão (Fig.1) o fio é introduzido num orifício capilar de um tubo de quartzo aquecido de 150-200°C. O orifício capilar é ligeiramente maior que o diâmetro do fio. A ponta do fio é submetida a uma chama de hidrogênio, formando-se assim uma saliência de metal líquido em forma esférica cujo diâmetro é de aproximadamente duas vezes o diâmetro do fio. Através de um micromanipulador, o operador posiciona a ponta e a pastilha. Um peso de 50 gf ou mais, é usado para acionar a saliência para baixo, na área de ligação que está aquecida a cerca de 300°C. Ao levantar-se o tubo de quartzo, o fio soldou-se e desliza através do orifício capilar. Quando atinge-se um comprimento conveniente de fio, o micromaçarico de hidrogênio é passado pelo fio, produzindo nova esfera na extremidade, preparando assim para nova ligação.

Na soldagem por ultrassom, a máquina de soldagem é semelhante à termocompressão. Nesse caso a ponta soldadora está acoplada a um gerador de ultrassom. Posiciona-se a pastilha através de micromanipuladores e o operador faz o ajuste da ponta soldadora sobre o contato, e também do fio, que é fornecido por uma bobina. Uma vez ajustado o sistema, aciona-se a unidade de ultrassom e uma certa quantidade de energia provoca a soldagem do fio. Essa quantidade de energia é ajustável em potência e duração.

1.2.1. Fios Capilares de Ouro (15-17)

O ouro é o material mais utilizado para a fabricação de fios capilares devido a sua alta ductilidade, boa condutibilidade elétrica e resistência a corrosão. É possível obter pelo processo de trefilação, fios de ouro de até 10 micra.

Em seguida serão analisadas algumas propriedades importantes para os fios capilares de ouro para a indústria eletrônica.



- A - É formada uma esfera de metal fundido na extremidade do fio.
- B - O tubo capilar aquecido comprime a esfera no substrato para formar a ligação.
- C - O tubo capilar é erguido, deixando descer um pedaço de fio e é posicionado para a segunda ligação.
- D,E,F - É formada a segunda ligação e o fio é cortado.
- G - O tubo capilar é erguido.
- H - Prepara-se o fio para outra ligação.

Figura 1 - Sequência de passos da ligação de fios capilares por termocompressão.

A - Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de maior intensidade para os fios capilares são: resistência à tração e alongamento. Pode-se citar como exemplo essas propriedades para um fio de ouro com 25 micra de diâmetro. Para o fio recozido a força de ruptura é de 5,5 a 8,0 gf e o alongamento em 200 mm de comprimento é de 6 a 10%. Para o fio encruado a força de ruptura é maior que 11,0 gf e o alongamento é de 0,5 a 2,0%.

O fio de ouro pode sofrer tratamento de alívio de tensões, obtendo-se o alongamento desejado com uma resistência mecânica aceitável.

B - Pureza

A pureza do fio de ouro é um fator fundamental no controle de suas propriedades mecânicas.

Existem no mercado fios de ouro com três teores de pureza:

(i) 99,99% - Os restantes 0,010% ou 100 ppm consistem geralmente de magnésio, cobre, silício, antimônio e prata. Muitas vezes o ouro vendido como tendo essa pureza, na verdade possui 150-200 ppm de impurezas.

(ii) 99,975% - O ouro com esse teor de pureza fornece um bom fio para ligações, porém não é utilizado para fios muito finos, pois as impurezas presentes diminuem a ductilidade do metal, tornando mais difícil a obtenção de fios extremamente finos.

(iii) 99,999% - Nos fios com essa pureza espectrográfica é uma quantidade relativamente grande de encruamento residual, observou-se uma variação nas propriedades físicas durante o uso. Sabe-se que metais extremamente puros tem velocidade de recristalização muito altas e também recristalizam em intervalos fixos e a temperaturas menores que os metais comercialmente puros. Já foram observados casos em que o ouro recristalizou a temperatura ambiente⁽¹⁸⁾. Utilizando ouro com essa pureza, dificilmente se obteriam fios com as propriedades mecânicas desejadas, portanto, esse teor de pureza parece não ser prático.

Na análise química do ouro, as impurezas gasosas são as mais difíceis de detectar e geralmente causam problemas no estágio da trefilação. Se o fio apresentar vazios devido a desgaseifi

cação, pode ocorrer ruptura durante a trefilação ou após a terminação. Para evitar esse problema, muitos fabricantes de fios trabalham com ouro refinado a vácuo.

C - Compatibilidade Metalúrgica

Uma importante consideração no processo, de ligação de fios capilares em microcircuitos é a compatibilidade metalúrgica dos vários constituintes do sistema de ligação. Isso é importante particularmente em sistemas semicondutores a base de silício, onde altas temperaturas de operação e armazenamento são utilizadas.

Alguns sistemas bimetálicos são instáveis a altas temperaturas, especialmente na presença de certos elementos que atuam como catalizadores na formação de compostos. O sistema ouro-alumínio é de bastante interesse na indústria eletrônica, pelo largo uso de alumínio como material de contato e pela grande utilização de fio de ouro como elemento de ligação.

Quando o ouro e o alumínio são colocados em contato, por uma soldagem ultrassônica ou termocompressão, e o conjunto é aquecido a temperaturas maiores que 200°C , ocorrem mudanças metalúrgicas. Essas mudanças ficam mais complicadas pela presença de silício e oxigênio.

Aquecendo-se esse sistema a 300°C um material vermelho começa a aparecer na interface entre os dois metais. Esse material, conhecido como "praga vermelha" foi identificado como sendo o composto intermetálico Al_2Au , de boa condutibilidade elétrica e mecanicamente resistente. O mesmo sistema aquecido à mesma temperatura, porém em presença do silício e oxigênio apresenta, além da formação da "praga vermelha", um outro composto. Esse composto identificado como AlAu_2 , de baixa condutibilidade elétrica é extremamente frágil, conhecido como "praga branca", foi considerado responsável pela ruptura de algumas ligações em microcircuitos. Inicialmente esse ruptura era atribuída ao composto Al_2Au .

1.2.2. Fios Capilares de Alumínio (19,20)

O uso de fios capilares de alumínio tem crescido muito ultimamente em virtude do menor custo do material, além de outros fatores tais como a compatibilidade metalúrgica.

O processo de termocompressão não é utilizado para soldar fios de alumínio devido a alta oxidação desse metal quando aquecido; portanto a soldagem ultrassônica é o processo mais utilizado nesse caso.

Algumas propriedades dos fios capilares de alumínio podem ser mencionadas:

A - Propriedades Mecânicas e Pureza

Embora o alumínio seja um metal muito dútil, possui baixa resistência mecânica o processo de trefilação de fios capilares utilizando esse metal como matéria prima, apresenta muitas dificuldades.

Para aumentar a resistência do alumínio de modo a se conseguir produzir fios capilares, é necessário introduzir uma certa quantidade de silício, como elemento de liga (cerca de 1%). Essa liga Al-Si requer técnicas especiais de homogeneização para assegurar uma regularidade na distribuição do soluto e, consequentemente nas propriedades mecânicas ao longo de todo o fio.

Alguns fabricantes de fios de alumínio conseguem obter fios de alumínio puro (99,99 e 99,999% de pureza) com diâmetros de até 100 micra.

B - Compatibilidade Metalúrgica

Como elemento mais usual de metalização dos circuitos monolíticos de silício é o alumínio, os fios de alumínio ligados às áreas de contato não apresentarão nenhuma incompatibilidade metalúrgica, pelo contrário, o sistema alumínio-alumínio é o mais recomendado.

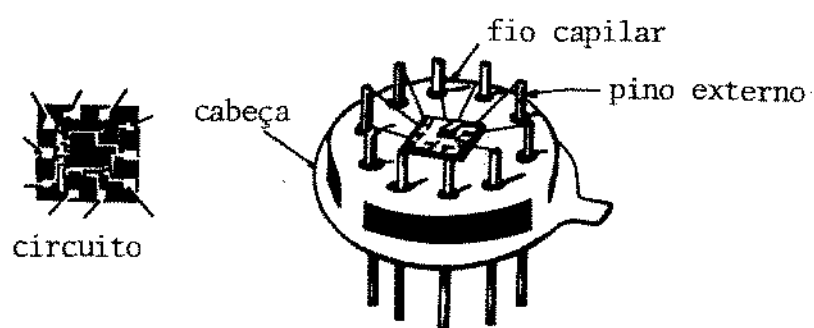


Figura 2 - Esquema de um circuito integrado.

1.3. Referências Bibliográficas

- (1) Primeiro Relatório Técnico de Progresso do Projeto Telebrás MGE, 1º semestre 1977, anexo 9.
- (2) Primeiro Relatório Técnico de Progresso do Projeto Telebrás MGE, 1º semestre 1977, anexo 8.
- (2) WISTREICH, J.G. - The Fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical Reviews, vol.3, nº 10, 1958, pp.98-142.
- (4) Metals Hand Book, American Society for Metals, USA, vol.1, 1975, p.1007.
- (5) BRESCIANI Fº, E.; GOMES, M.R. - Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos, Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 1977, pp.140-141.
- (6) COHN, J.G. - Selected Properties of Gold, Gold Bulletin, vol. 12, nº 1, 1979, p.22.
- (7) Idem ref.(4) p.1197.
- (8) Idem ref.(4) pp.1197, 1203, 1185.
- (9) REED-HILL, R.E. - Princípios de Metalurgia Física, Comp.Ed. Continental, Mexico, 1974, p.221-273.
- (10) Idem, ibidem ref.(9) p.227.
- (11) MAMMANA, C.F.Z. - De Re Semiconductora, Apostilas Pós-Grad. D.E.E., EPUSP, São Paulo, 1959, Seminário nº 10.
- (12) Integrated Circuits Design Principles and Fabrication, Motorola Inc., McGraw-Hill, 1965, pp.344-351.
- (13) STERN, L. - Fundamentals of Integrated Circuits, Hauden Book Co. , N.Y. , 1969, p.56.

- (14) Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics, ed. Charles Harper, McGraw-Hill, N.Y., 1974, p.8-40.
- (15) RAMSEY, T.H. - Metallurgical Behavior of Gold Wire in Thermal Compression Bonding, Solid State Techn., 1973, vol. 16, nº10, pp.44-45.
- (16) SMITH, J.H. and BEVER, M.B. - The Stored Energy, Electrical Resistivity and Tensile Properties of Cold-Worked Gold, Trans. Metall. Society of AIME, 1968, vol.243, p.880.
- (17) Fine Wires for Semiconductors Lead-Bonding - Catálogo da Tanaka Electronics Industry, Tokyo, p.1-5.
- (18) Idem, ibidem ref.(9), p.248.
- (19) Idem ref.(11), ítem 5.3.
- (20) Wire Products for the Semiconductors Industry - Catálogo da Secon Metals Corporation, USA, pp. 1-6.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE FIOS METÁLICOS

2.1. Introdução ao Processo⁽¹⁻⁴⁾:

No processo de trefilação o fio metálico é tracionado, passando através de uma ferramenta oca denominada fieira, onde sofre deformação plástica. Em consequência dessa deformação, o diâmetro do fio é reduzido e seu comprimento é aumentado (Fig.3).

A finalidade do processo de trefilação é a obtenção de fios de dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas.

Comumente a fieira tem o furo com perfil típico como os ilustrados na figura 4. Nesses perfis, simplifiadamente, pode-se distinguir três partes cônicas e uma cilíndrica. A primeira parte cônica é o denominado cone de entrada, que direciona o fio e a segunda é o chamado cone de trabalho onde o metal é deformado. Na parte cilíndrica ocorre o ajuste do diâmetro do fio e a terceira parte cônica é o cone de saída, cuja finalidade é facilitar a saída do fio.

Para cada material há um perfil adequado de fieira, no que diz respeito ao ângulo de entrada, ângulo de trabalho, ângulo de saída e comprimento da parte cilíndrica. O denominado ângulo da fieira, que é o ângulo do cone de trabalho, comumente tem valores compreendidos entre 5 e 25°. O comprimento da parte cilíndrica varia de zero a dois diâmetros.

As fieiras para trefilar fios grossos e médios (até 1,4 mm de diâmetro) são feitas de metal duro com a composição típica de 95% de carboneto de tungstênio e 5% de cobalto, e para os fios finos são feitas de diamante.

Após trefilar um grande comprimento de fio, as fieiras sofrem desgaste. Tanto as fieiras de metal duro quanto as de diamante podem ser recalibradas e repolidas para serem usadas na trefilação de fios de diâmetros maiores. A vida de uma fieira, trabalhando com um determinado diâmetro, é determinada pelo comprimento de fio trefilado sem que a fieira seja recalibrada.

Três parâmetros são comumente utilizados para indicar a variação dimensional do fio no processo de trefilação: alonga-

mento (λ) indica o aumento porcentual que ocorre no fio ao passar pela fieira. A redução de área (β), representa a diminuição porcentual de área que o fio sofre ao ser trefilado. A redução de diâmetro (δ) representa a diminuição porcentual do diâmetro do fio ao passar pela fieira. Na figura 5 observam-se exemplos desses parâmetros.

Geralmente, para determinação de reduções de área velocidades e esforços de trefilação, trabalha-se com as seguintes relações entre os parâmetros de variação dimensional:

$$\lambda = \frac{100 \beta}{100 - \beta} \quad , \quad \beta = \frac{100 \lambda}{100 + \lambda} \quad \delta = 100 \left(1 - \frac{\sqrt{\beta}}{\lambda}\right)$$

Na trefilação de metais não-ferrosos, as reduções de secção por passe (β) são geralmente de 10 a 50%, com 10 a 25% para os mais espessos. Para a obtenção de uma determinada redução de área, são obtidas melhores propriedades mecânicas se forem realizadas várias reduções parciais em vez de uma única redução, mesmo que o material suporte a redução total de área, em um único passe.

Quase todos os metais não-ferrosos são trefilados a frio, sofrendo portanto variações nas suas propriedades mecânicas, devido ao encruamento do fio, sendo aumentados os seus limites de escoamento e resistência a tração e diminuído o seu alongamento. Nas condições em que se deseja uma grande variação de secção, é necessário fazer o recozimento do metal numa determinada etapa do processo, quando o metal atingir um grau de encruamento demasiadamente elevado. Assim, o fio volta a ter a ductilidade necessária para o prosseguimento das reduções.

O recozimento pode ser feito, por longo tempo a temperatura mais baixa ou por tempo menor a altas temperaturas. No primeiro caso, os fornos utilizados geralmente são do tipo poço, no qual é introduzido o carretel. No segundo caso, muitas vezes utiliza-se um forno tunel acoplado com a máquina de trefilar, de modo que o fio faz percurso contínuo, passando pelo forno e prosseguindo com o processo de redução.

O atrito entre a fieira e o fio é um fator de extrema importância no processo de trefilação, sendo portanto necessário o uso de um lubrificante.

As velocidades de trefilação variam de 0,5 a 40 m/s, dependendo da máquina, do diâmetro do fio e do material trefilado. Para os fios finos e capilares pode-se atingir altas velocidades

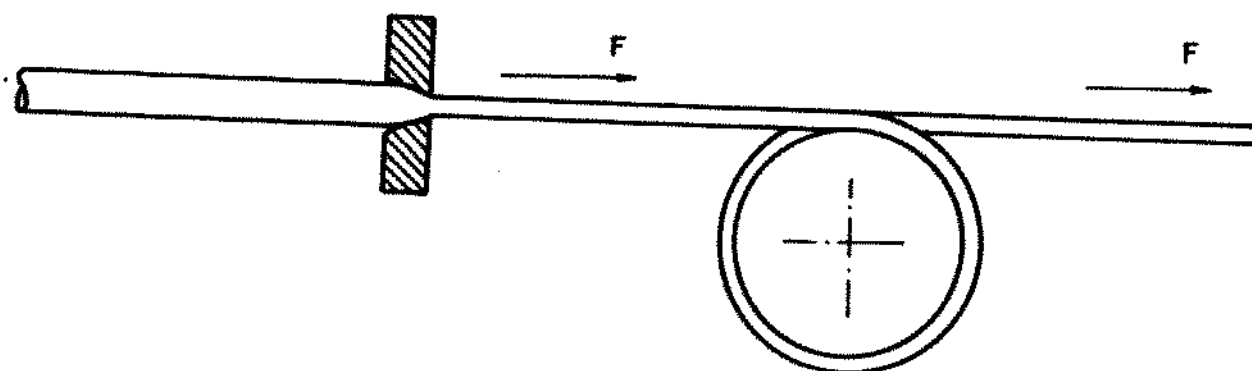
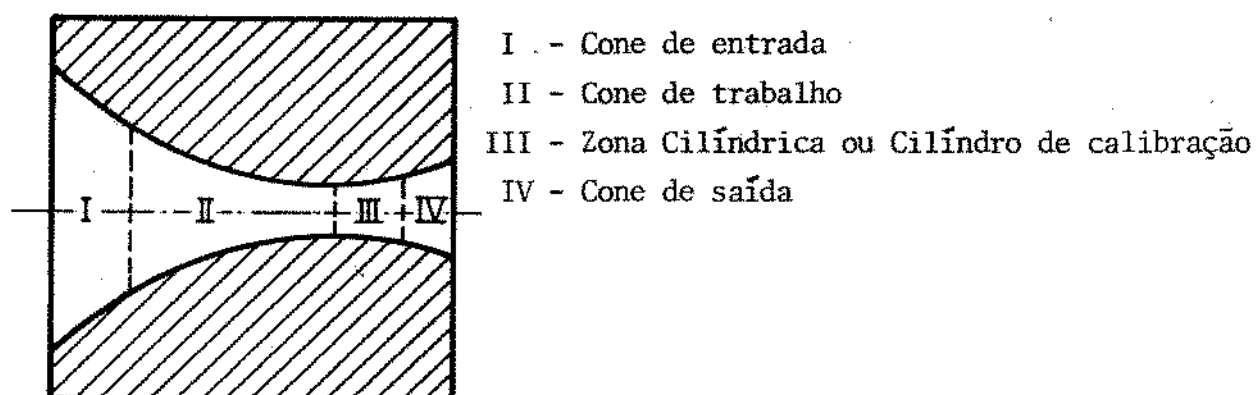
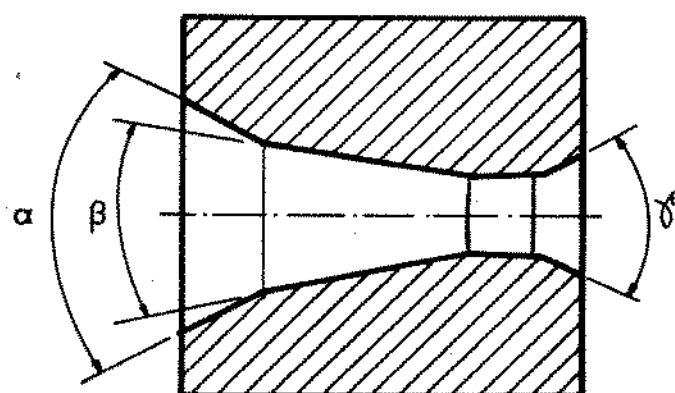


Figura 3. Esquema simplificado do processo de trefilação.

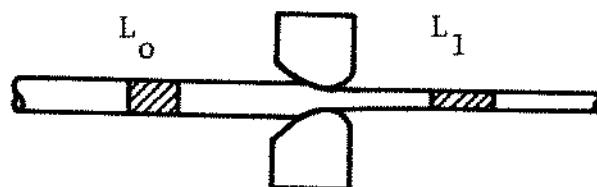


Perfil curvo

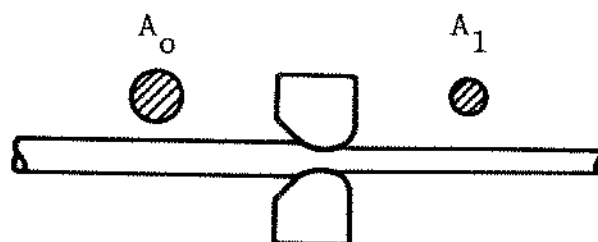


Perfil cônico aproximado

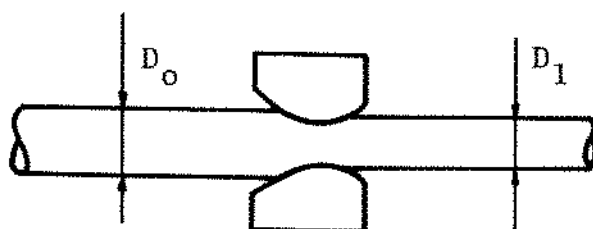
Figura 4. Perfis típicos de uma fieira⁽⁵⁾.



A - Alongamento: $\lambda = \left(\frac{(L_1 - L_o)}{L_o} \right) 100$



B - Redução de área: $\beta = \left(\frac{(A_o - A_1)}{A_o} \right) 100$



C - Redução de diâmetro: $\delta = \left(\frac{(D_o - D_1)}{D_o} \right) 100$

Figura 5 - Pâmetros comumente utilizados para indicar a variação dimensional em trefilação ⁽⁵⁾.

de trefilação, porém com o aumento da velocidade aparecem vários problemas: diminui a eficiência do lubrificante, há dificuldade de dissipação do calor produzido, aumenta o desgaste das fieiras.

Para dar início ao processo de trefilação é necessário fazer o apontamento do fio. Esse apontamento pode ser feito mecânica ou eletroliticamente. Para os fios grossos o apontamento pode ser feito em máquinas industriais com um dos princípios de funcionamento seguintes:

- (a) dois tambores cônicos e calibrados que giram em sentido inverso, afinam a extremidade do fio até o diâmetro desejado;
- (b) afinamento da extremidade do fio por estampagem;
- (c) método do recozimento e alongamento : o fio é colocado entre contatos, por onde passa uma corrente; a extremidade é recozida; os contatos são separados provocando a ruptura do fio que é da forma cônica (fratura taça-cone).

Para os fios mais finos, com diâmetro abaixo de 0,400 mm, o processo de afinamento usado é o eletrolítico.

Na trefilação de cobre, antes de se iniciar o processo, deve-se retirar da barra o óxido superficial formado na operações anteriores de conformação (laminação ou extrusão a quente), para que a vida das fieiras não seja reduzida.

A retirada do óxido de cobre pode ser feita por dois processos: mecânico ou químico.

O primeiro processo, chamado rebarbação, consiste em passar a barra de cobre por uma ferramenta, semelhante a uma fieira invertida, com ângulo de 5 a 6° em relação ao eixo de avanço da barra, provocando a retirada de pequena camada de material da superfície.

O processo de decapagem é constituído por três etapas:

- (a) imersão em ácido sulfúrico, que ataca o óxido de cobre, formando sais solúveis de sulfato de cobre;
- (b) lavagem com jatos de água fria para retirar o excesso de ácido e sais solúveis;
- (c) neutralização da superfície por imersão em solução de tartarato de potássio.

O primeiro processo, embora mais caro, é o que confere melhor acabamento superficial ao fio, porém, quando se deseja um ótimo acabamento superficial, como para os fios capilares de cobre, utilizam-se barras que sofreram decapagem seguida por rebarbação.

2.2. Máquinas de Trefilar Industriais (6-8):

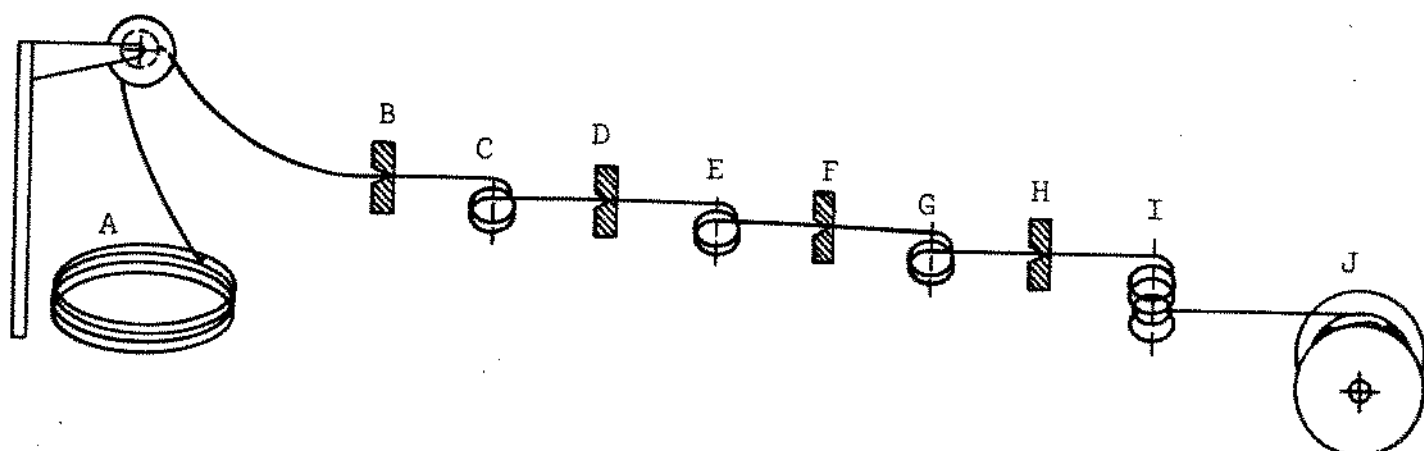
Atualmente as máquinas de trefilar industriais possuem múltiplas fieiras e se constituem de três tipos básicos:

A - Máquina de Trefilar em Série ("Tandem"), com Deslizamento

É constituída de uma sucessão de fieiras intercaladas com anéis tirantes. O sistema é removido por um único motor, funcionando da seguinte maneira:

- (a) o fio parte de uma bobina, passa por uma roldana e se dirige alinhado à primeira fieira;
- (b) na saída da fieira, é puxado por um anel tirante no qual o fio dá um certo número de voltas e gira numa determinada velocidade;
- (c) as voltas são dadas na forma de uma hélice cilíndrica, de passo igual a 1,5 vezes o diâmetro do fio, de tal maneira que o fio - no início da hélice - fique alinhado com a primeira fieira e, na saída da hélice, com a segunda fieira;
- (d) o número de espiras da hélice depende da força de atrito necessária para vencer a força de trefilação da primeira fieira;
- (e) o movimento do fio na forma de hélice provoca um deslizamento lateral do fio no anel;
- (f) o segundo anel, que faz o fio passar pela segunda fieira, gira a uma velocidade maior que o primeiro anel para compensar o aumento de comprimento pela segunda fieira;
- (g) o sistema prossegue dessa forma para as demais fieiras com exceção da última onde o fio é puxado pelo tambor bombinador final.

A figura 6 mostra o esquema de uma máquina desse tipo. A figura 7 apresenta o esquema de translação do fio no anel.



- A - Bobina
- B - 1^a. Fieira
- C - 1^o. Anel tirante
- D - 2^a. Fieira
- F - 3^a. Fieira
- G - 3^o Anel
- H - 4^a. Fieira
- I - Tambor sem deslizamento
- J - Carretel

Figura 6. Esquema de uma máquina de trefilar, em série, com deslizamento.

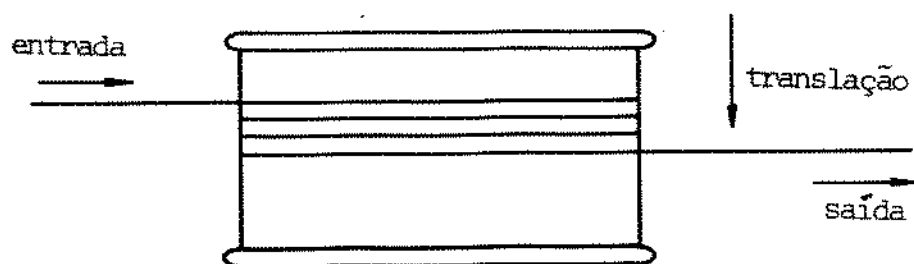


Figura 7. Esquema da translação do fio no anel (10).

As máquinas industriais em série são usadas para trefilar metais não-ferrosos de diâmetros grossos (até 2 mm).

B - Máquinas de Trefilar do Tipo Cônica, com Deslizamento

O funcionamento da máquina cônica é semelhante ao tipo anterior, ocorrendo também deslizamento do fio. A diferença é que nesse caso há melhor aproveitamento do espaço, da máquina. Os cones são formados por anéis de diâmetros diferentes dispostos num mesmo eixo. Os anéis tem diâmetros crescentes à medida que aumenta a redução pois as velocidades angulares são as mesmas e as periféricas aumentam com o diâmetro do anel. A máquina trefiladora opera com dois cones opostos para ter a ida e vinda do fio, através das fieiras. Na figura 8 estão esquematizados - dois cones de uma máquina cônica.

A passagem do fio pelo anel, tanto em movimento axial como em movimento transversal, provoca o desgaste do anel, exigindo a sua retificação periódica para manter a relação entre os diâmetros dos diversos anéis.

As máquinas de trefilar do tipo cônica, com deslizamento do fio, são usadas comumente para trefilação de fios médios e finos (abaixo de 2,0 mm) de metais não-ferrosos.

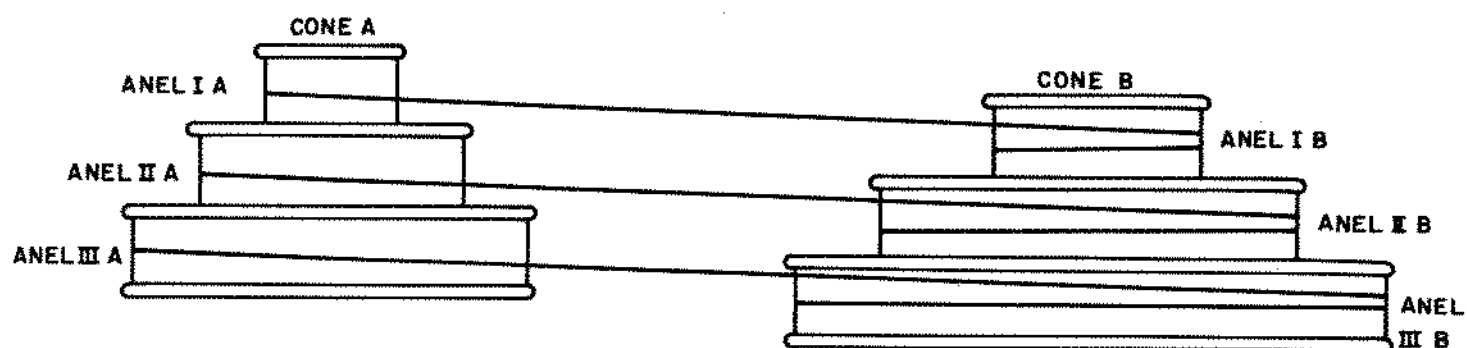
As máquinas cônicas industriais para fabricação de fios capilares de cobre, trabalham com velocidades na faixa de 25-40 m/s e alongamentos na faixa de 18-20%.

C - Máquina de Trefilar sem Deslizamento

Nesse tipo de máquina, usada comumente para trefilar aço, após cada fieira existe um tambor de acumulação de fio de modo que não ocorra deslizamento do mesmo. Cada tambor trabalha com um motor e as velocidades dos tambores são independentes. Essa máquina não é comumente aplicada nos processos de trefilação de metais não-ferrosos devido ao alto custo. A figura 9 mostra o esquema de uma máquina desse tipo.

2.3. Fieiras de Diamante^(4,12,13):

Para a fabricação de fieiras de diamante, utiliza-se geralmente como matéria prima diamantes industriais ou lascas de pedras lapidadas.



Percurso do fio: de IA para IB, IIA, IIB, IIIA, IIIB.

Figura 8. Percurso do fio entre dois cones sucessivos de uma máquina cônica⁽¹⁰⁾.

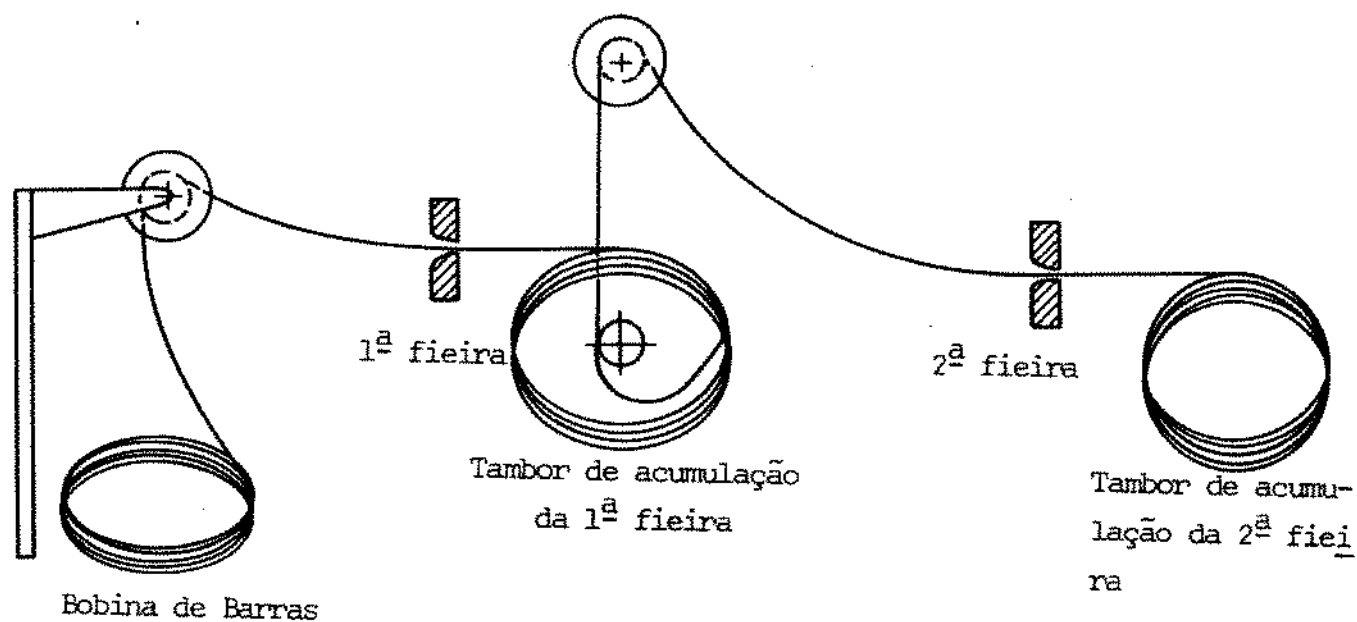


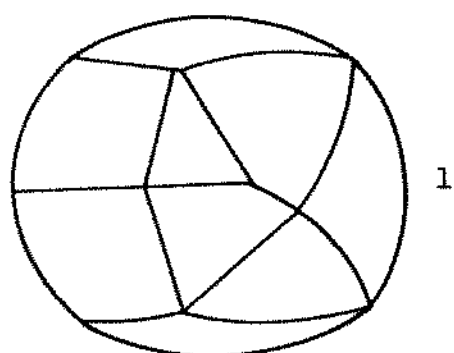
Figura 9. Esquema de uma máquina de trefilar sem deslizamento⁽¹¹⁾.

De acordo com a cristalografia, a resistência do diamante varia segundo as diferentes direções cristalográficas. As direções de maior resistência mecânica são aquelas que conjugam os vértices diagonalmente opostos da célula elementar do reticulado cristalino, ou seja, as direções da família $\langle 111 \rangle$. O eixo do orifício da fieira deve coincidir com uma dessas direções, para que ela tenha uma longa vida. A figura 10 mostra as diversas fases da confecção do orifício de uma fieira de diamante. O orifício é iniciado em uma das fases do bloco de diamante, para a confecção dos cones de entrada e de trabalho, virando-se a peça para a confecção do cone de saída na fase oposta. A seguir, a peça é colocada em uma máquina operatriz polidora onde é feito o acabamento do orifício através de um punção de aço com movimento rotativo e alternante. Dessa forma é feito o arredondamento do orifício e polimento da superfície. O punção de aço é untado com óleo e pó de diamante de granulometria controlada. O mesmo processo é usado para o espelhamento da fieira.

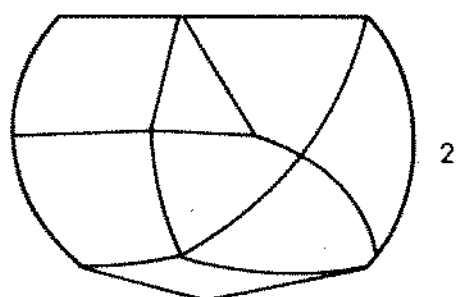
O bloco de diamante é firmemente incrustado em um pequeno suporte que, por sua vez, é preso num montante de latão, aço inoxidável ou cromo-níquel, de diâmetro externo de 25 mm e de espessura de 6 a 12 mm, de acordo com o diâmetro do furo. A figura 11 mostra a montagem de uma fieira de diamante. A finalidade dessa montagem, além de facilitar a manipulação da pedra, é aumentar a vida da fieira devido a dois fatores:

- (a) Durante a trefilação a fieira está submetida a pressões cujas resultantes se direcionam ao exterior. Em determinadas condições, essas tensões podem alcançar valores que provocam a ruptura do diamante. Com a montagem do anel, a tensão que mantém o diamante em seu centro atua em sentido oposto ao das tensões referidas, reforçando a resistência da fieira.
- (b) Durante a deformação do fio a temperatura do interior da fieira pode alcançar valores elevados se o calor não for dissipado rapidamente; portanto a outra função do material da montagem é promover a retirada de calor eficientemente da zona de deformação.

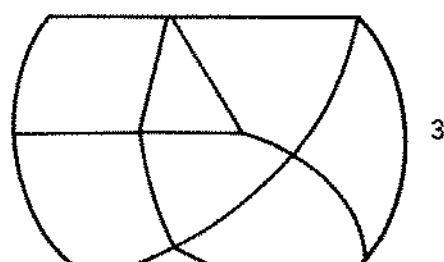
A tolerância na fabricação da fieira de diamante é da ordem de milésimos de milímetro para o diâmetro nominal do furo,



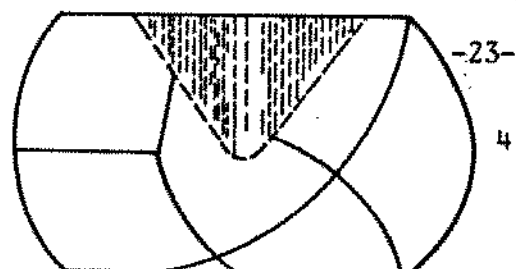
Cristal inicial



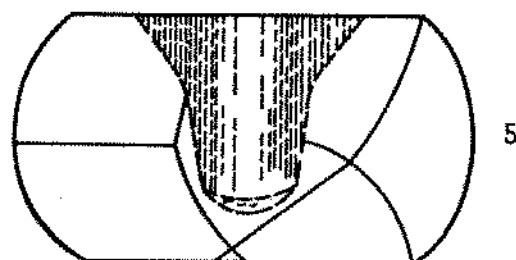
Faceamento



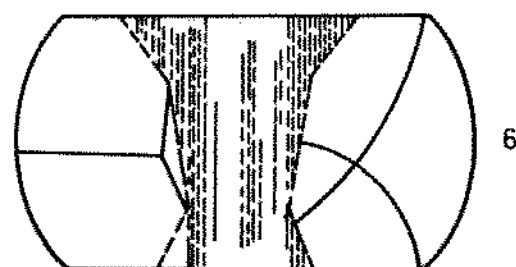
Faceamento



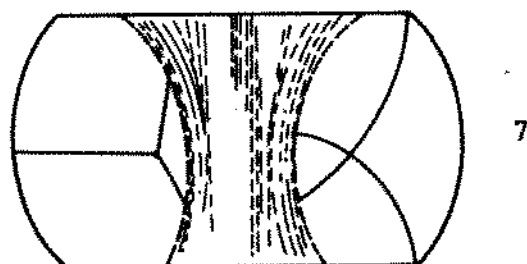
Cone de entrada



Cone de trabalho



Cone de saída



Arredondamento e
Polimento

Figura 10. Diversas fases da fabricação de uma fieira de diamante⁽¹⁴⁾.

é a metade dessa tolerância para a ovalização do furo, que é a diferença entre duas medidas ortogonais. A tolerância é quase sempre de sinal negativo.

O uso de fieiras com a forma correta é muito importante. Se o ângulo de trabalho da fieira for muito grande, o trabalho a frio não é transmitido ao centro do fio podendo provocar fratura do tipo "taça e cone". Se o ângulo de trabalho for muito abaixo do recomendado, há atrito excessivo, possibilitando ruptura do fio por efeitos de tensões internas.

A diferença entre os ângulos de fieiras, empregadas para diferentes materiais está associada com a característica de cada material de transmitir a frio por toda a secção com mais ou menos facilidade, ou seja, está relacionada com a ductilidade do material. Em geral, quanto mais dútil for o material, maior pode ser o ângulo da fieira.

O comportamento da zona cilíndrica é dependente das condições de atrito entre o metal e a fieira. A figura 12 mostra os perfis de fieiras de diamante recomendados para três materiais: cobre; bronze e aço.

2.4. Lubrificação ⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

A escolha do processo correto de lubrificação é uma questão que afeta não somente, o acabamento superficial do fio, como também a duração da vida da fieira. Atualmente, com as altas velocidades de trefilação e máquinas de trefilar de múltiplas fieiras, o lubrificante passou a ter como uma das suas funções principais, a de esfriar a fieira.

A lubrificação tem a finalidade de criar uma película de fluido entre as duas superfícies, metal e ferramenta, com os objetivos de: reduzir o desgaste da fieira, obter um fio com bom acabamento superficial, reduzir a força de tração necessária e esfriar a fieira.

Os fluidos lubrificantes para a trefilação de metais não ferrosos são compostos de líquidos ou sólidos emulsionáveis em água de concentração decrescente com a diminuição do diâmetro do fio. Quando se trefila o cobre na faixa de diâmetros de 2,5 a 1,8 mm, recomenda-se o emprego de uma emulsão com conteúdo graxo de 7,0 a 4,0%. Para diâmetros inferiores deve reduzir progressivamente o conteúdo graxo. Para o diâmetro de 0,015 mm re-

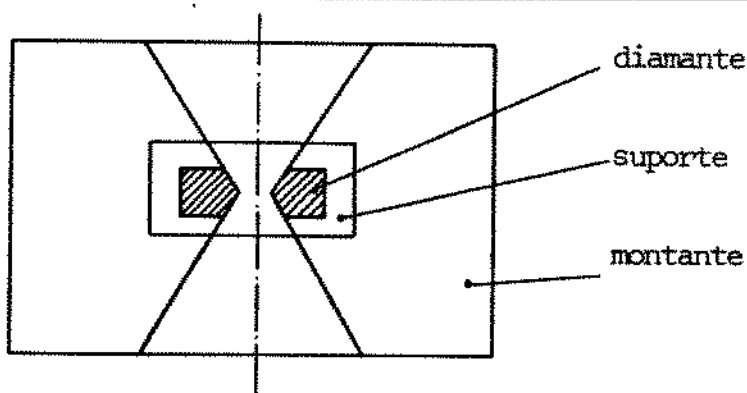
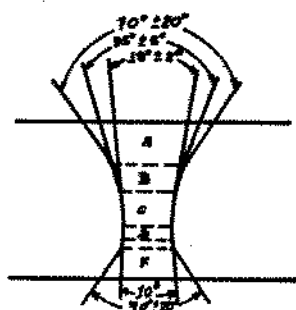


Figura 11. Montagem de uma fieira de diamante.



a) Para fios de cobre

Alturas aproximadas:

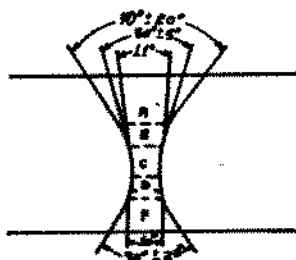
$$A + B + C = 2/3 \text{ altura total}$$

$$D + E + F = 1/3 \text{ altura total}$$

$$D = 30\% \text{ do diâmetro}$$

$$E = 10\% \text{ do diâmetro}$$

$$C = \text{diâmetro}$$

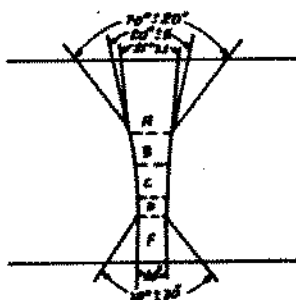


b) Para fios de bronze

Detalhes idênticos a (a) exceto:

C - 100% do diâmetro em D, aumentando para 200% para pequenos furos

$$D = 50\% \text{ do diâmetro}$$



c) Para fios de aço

Detalhes idênticos a (a) exceto:

$$C = 150 - 200\% \text{ do diâmetro, em D}$$

$$D = 100\% \text{ do diâmetro}$$

$$E = 100\% \text{ do diâmetro, em D}$$

Onde: A- entrada, B- aproximação, C- ângulo de redução
D- cilindro, E- alívio de tensões, F- saída.

Figura 12. Ângulos e dimensões gerais de fieiras de diamante utilizadas para trefilar cobre, bronze e aço.

comenda-se 1,5% de conteúdo graxo.

Como exemplos de lubrificantes, pode-se citar emulsões com óleos solúveis, óleo de linhaça, sabões ou graxas animais fracamente ácidas.

As temperaturas usuais de trabalho dos lubrificantes são de 40 a 60°C. Abaixo dessa faixa, a viscosidade é baixa e o fluido não acompanha o fio para dentro da fieira. Acima dessa faixa a emulsão perde a ação lubrificante e refrigerante.

Durante a trefilação, partículas metálicas são incorporadas ao lubrificante.

Essas partículas devem ser retidas em um filtro pois se voltarem a circular podem prejudicar o acabamento superficial do fio e aumentar o desgaste das fieiras.

A lubrificação na trefilação pode ser feita por dois processos de acordo com o tipo de máquina de trefilar: por imersão onde as fieiras estão submersas num banho de lubrificante e por aspersão, onde um jato de lubrificante é dirigido a cada fieira.

A escolha do lubrificante é experimental e deve-se basear nas seguintes informações: tipo de material, a ser trefilado, tipo de máquina, número de reduções a serem feitas e velocidade de trefilação.

2.5. Defeitos em Trefilação (18-19)

Um controle visual do fio, especialmente se for de cobre ou outro metal dútil, pode muitas vezes revelar a causa da ruptura do fio ou de qualquer outro defeito no mesmo. Para se observar o fio deve-se embuti-lo no local da ruptura e examiná-lo num microscópio ótico.

Para melhor controle de qualidade do fio é importante verificar se o defeito se reproduz ou não, a intervalos regulares ao longo de todo o fio.

A seguir será feita uma listagem dos principais tipos de defeitos e de ruptura do fio:

- (a) Quando um fio de cobre se rompe porque a resistência a tração foi ultrapassada, as extremidades rompidas apresentam uma forma irregular e se percebe um estrangulamento perto da ruptura (Fig.13.A).

Esse defeito provavelmente se deve a uma das seguintes causas: pouca lubrificação, lubrificante sujo, sujeira no fio, alongamento excessivo por fieira.

- (b) A resistência a ruptura do metal é reduzida pelas partículas de ferro alojadas no metal laminado, podendo ocorrer ruptura (Fig.13.B). Para eliminar esse defeito deve-se melhorar o processo de laminação.
- (c) As gretas reduzem a resistência a ruptura do material, podendo levar a ruptura do fio (Fig.13.C). Para solucionar esse problema é preciso melhorar o processo de laminação e evitar choques térmicos no fio.
- (d) Quando a redução é demasiadamente grande e a parte cilíndrica é muito curta, o fio pode entrar nessa zona, sob um determinado ângulo (Fig.13.D), resultando em uma deformação desproporcional em um dos lados do fio. Esse defeito pode não causar ruptura imediata do fio, se o diâmetro for grande, porém vai provocá-la alguns passos depois. A ruptura propriamente dita terá o aspecto da figura 13.E. Uma evidência desse tipo de defeito é o aparecimento de irregularidades superficiais no fio chamadas "patas de corvo" (Fig.13.D). Essas irregularidades podem aparecer também quando uma partícula do metal trefilado se aloja na entrada da fieira, deteriorando o perfil do canal (Fig.13.F). Outra possibilidade do aparecimento desse defeito é a presença de inclusões, tais como partículas de ferro, no cobre. Porém, nesse caso as "patas de corvo" aparecem somente próximas a região onde se encontra alojada a inclusão (Fig.13.G). Pode-se distinguir entre o aparecimento desses irregularidades devido a inclusões devido as outras duas causas, pois no primeiro caso não há repetição dos defeitos a intervalos regulares e nos outros casos essa repetição ocorre.
- (e) Uma redução insuficiente em uma fieira com excessivo ângulo de trabalho provoca uma deformação não homogênea. Ocorre a ruptura do fio quando este passa por uma fieira de menor diâmetro (Fig.13.H). A ruptura é do tipo "taça e cone", sendo que o vértice do cone sempre indica a direção do alongamento (Fig.13.I).

(f) O fio trefilado apresenta-se ondulado. Esse defeito provavelmente é causado por partículas metálicas acumuladas na entrada da fieira (Fig.13.J) devido a: forma incorreta da entrada do canal (longa e estreita), polimento incorreto, presença excessiva de resíduos metálicos no lubrificante ou uma combinação dos motivos anteriores. Um controle visual do fio ligeiramente ondulado acusará a presença de ranhuras, que não são contínuas; interrompem-se as vezes e reaparecem depois de um certo intervalo. A figura 13.L mostra um fio de cobre ondulado.

Na tabela I estão listados os eventuais defeitos em trefilação e seus efeitos sobre o produto final e sobre a fieira.

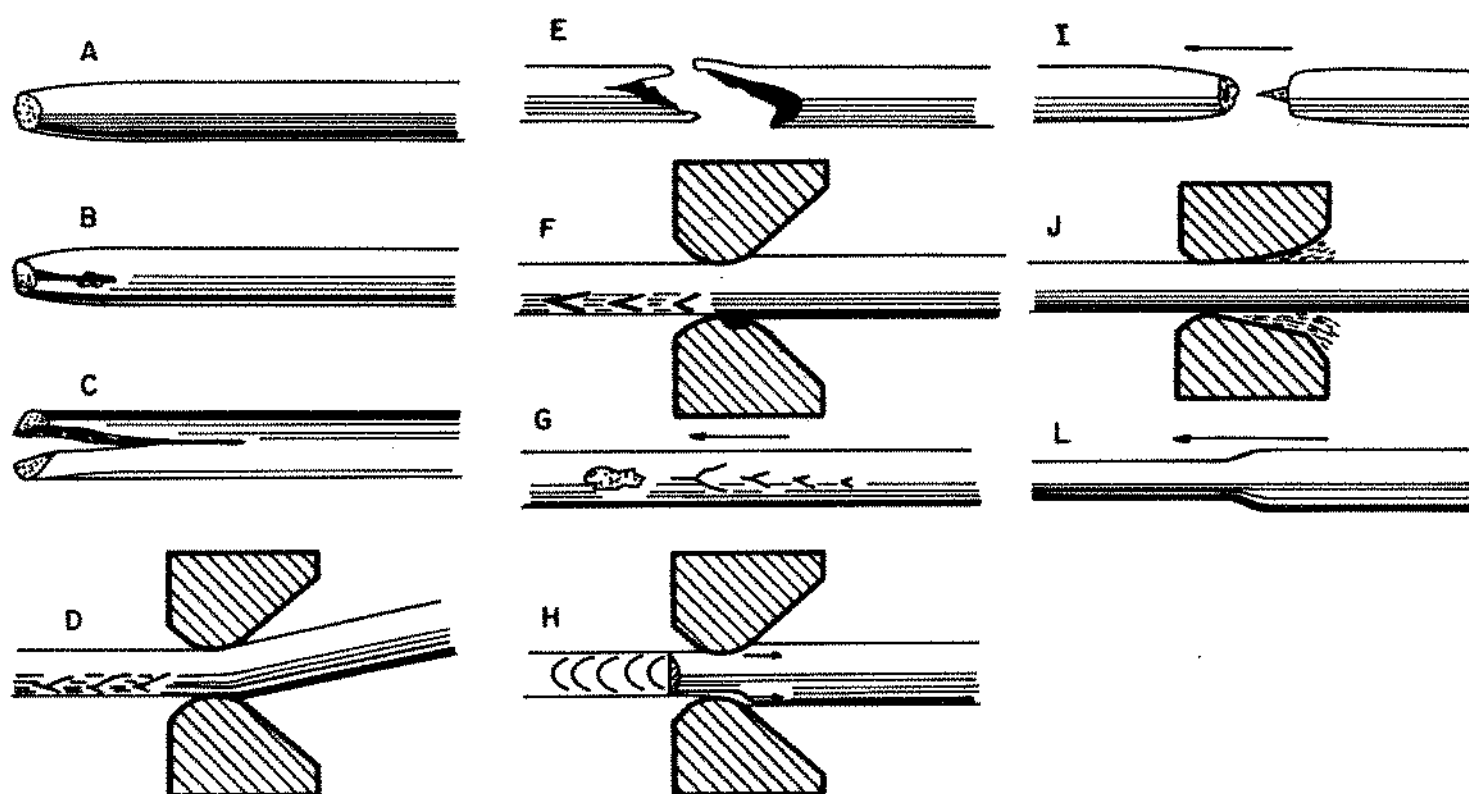
2.6. Controle de Qualidade dos Fios

Foi estabelecido um método de controle de qualidade a fabricação de fios metálicos por trefilação, baseado em visitas técnicas a empresas fabricantes de fios, catálogos de fornecedores e normas técnicas. Para esse método foram considerados os cuidados necessários na fabricação de fios utilizados pela indústria elétrica, acrescentando-se os cuidados especiais requeridos para os fios capilares utilizados pela indústria eletrônica. Nesse estudo é dado maior ênfase aos fios capilares.

Os principais parâmetros do fio que devem ser controlados são: aspecto superficial, dimensões, composição, propriedades mecânicas, propriedades elétricas e embalagem.

O método de controle de qualidade tem quatro etapas com a seguinte ordem cronológica:

- especificação do fio;
- controle de qualidade da matéria prima;
- controle de qualidade do fio durante a trefilação;
- controle de qualidade do produto final.



- A - Ruptura (esforço maior que resist.mec.)
- B - Ruptura (inclusão)
- C - Ruptura (fissura)
- D - Def. "patas de corvo" (fio entrando na fieira sob ângulo)
- E - Ruptura ("patas de corvo")
- F - Def. "patas de corvo" (inclusão na fieira)
- G - Def. "patas de corvo" (inclusão)
- H - Fio maior que diâm. da fieira
- I - Ruptura (devido a def.H.).
- J - Partículas acumuladas na entrada
- L - Fio ondulado (devido a def.J.).

Figura 13. Defeitos em trefilação⁽¹⁹⁾.

Tabela I - Defeitos em Trefilação⁽¹⁹⁾

Imperfeição da Fieira		Efeito sobre o Fio
Diâmetro incorreto		Diâmetro incorreto
Ovalização		Ovalização
Polimento defeituoso		Superfície rugosa
Ângulos agudos		Superfície rugosa
Anéis de estiramento e/ou marcas de estriamento		Superfície rugosa. Arranhamento do fio. O diâmetro pode não ser uniforme. O fio pode romper-se
Diamante mal fixado na fieira		Diamante irregular. O fio pode romper-se
Perfil incorreto; por exemplo: zona de redução oblíqua		Deformação desproporcional do fio, podendo ocorrer ruptura quando o fio volta a trefilar com menor diâmetro.
Saída do fio da fieira em hélice		Fio ondulado
Parte cilíndrica muito curta		O diâmetro do fio trefilado é maior que o da fieira
Parte cilíndrica muito curta e ângulo de entrada muito grande		O fio pode atravessar o canal sob um determinado ângulo, produzindo uma deformação assimétrica (patas de corvo)
Parte cilíndrica demasiadamente longa		O diâmetro do fio é menor que o da fieira e a tensão do fio pode produzir ruptura por excessivo cisalhamento.
Ângulo de redução muito grande		Sobretensão do fio. O diâmetro do fio trefilado é menor que o da fieira; rupturas "taça e cone".
Zona de redução longa e estreita com impurezas no lubrificante (a entrada pode estar bloqueada por impurezas)		Fio ondulado e arranhado
Defeito da Trefilação	Efeito sobre o Fio	Efeito sobre a Fieira
Colocação errada do fio no cone de entrada, apoiando-se somente em um dos lados	Perde o bom acabamento superficial em um dos lados	Sofre desgaste localizado, perdendo o espelhamento
O fio não desenrola suavemente da bobina de alimentação	Mal acabamento, rupturas	Riscos
Ranhuras no cone	Mal acabamento, rupturas	Riscos
Insuficiente conteúdo graxo do	Rugosidade ou ruptura	Fieira demasiadamente seca, desgaste excessivo; pequenas ou grandes gretas.
Excesso de graxa	Ruptura por aderência do fio aos passes de cone	Não influi
Na trefilação múltipla, alongamento	Menor diâmetro por sobretensão do fio	Risco de excessivo desgaste ou ruptura
Na trefilação múltipla, alongamento insuficiente	Ruptura "taça e cone"	Desgaste excessivo

2.6.1. Especificação dos Fios Trefilados

(a) Especificação Dimensional

O fio deve ser contínuo ao longo de todo o comprimento enrolado no carretel, não deve apresentar ondulações, fissuras, asperezas, rebarbas e inclusões. Para os fios mais grossos, quando houver soldagem do tipo topo-a-topo, esta deve ser bem feita, para que a emenda não seja saliente.

Os fios capilares devem ser isentos de qualquer defeito que altere o seu diâmetro, dificultando a sua introdução na máquina de soldagem.

Os diâmetros dos fios capilares utilizados são muito diversificados e os mais comuns estão indicados na tabela II. As tolerâncias admissíveis estão indicadas na Tabela III.

Tabela II - Diâmetros Usuais dos Fios Capilares⁽²⁰⁾

mm	pol
0,010	0,0004
0,013	0,0005
0,015	0,0006
* 0,018	0,0007
0,020	0,0008
* 0,025	0,0010
0,030	0,0012
0,033	0,0013
0,038	0,0015
* 0,050	0,0020

(*) Mais usados pela indústria nacional de dispositivos eletrônicos

Tabela III - Tolerâncias Dimensionais dos Fios Capilares ⁽²¹⁾		
Diâmetro Nominal	Tolerância em Diâmetro (% do Diâmetro Nominal)	Tolerância em Peso(% do Peso Nominal)
0 - 0,013	± 10	± 20
0,013 - 0,13	± 5	± 10
0,013 - 0,26	± 3	± 6

(b) Composição Química

A matéria prima utilizada para os fios de cobre usuais é o cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP), cuja composição química po de ser observada na Tabela IV.

Tabela IV - Composição Química do Cobre Eletrolítico Tenaz (Cu ETP) ⁽²²⁾	
Elemento	%
Cu + Ag	99,9
O	0,01 - 0,07 (nominal = 0,04)
Pb	abaixo de 0,005
Nota: As demais impurezas devem estar em pequena quantidade	

Os fios capilares de ouro devem ser de ouro com pureza mínima de 99,99%. Algumas vezes utiliza-se ouro com pureza de 99,999%.

A composição química dos fios de ouro deve estar de acordo com a Tabela V.

Tabela V - Composição Química dos Fios de Ouro ⁽²³⁾		
Composição (%)		
Elemento	Grau 99,99	Grau 99,995
Ouro, min	99,99	99,995
Prata, max	0,009	0,001
Cobre, max	0,005	0,001
Paládio, max	0,005	0,001
Ferro, max	0,002	0,001
Chumbo, max	0,002	0,001
Silício, max	0,005	0,001
Magnésio, max	0,003	0,001
Arsênio, max	0,003	...
Bismuto, max	0,002	0,001
Estanho, max	0,001	0,001
Cromo, max	0,0003	0,0003
Níquel, max	0,0003	...

Não foi encontrada nenhuma norma técnica com a composição recomendada para o fio capilar de alumínio puro. Sabe-se que os níveis de pureza recomendados são 99,999% e 99,99%. Para os fios capilares de Al-Si a composição recomendada pelos fornecedores é a da Tabela VI.

Tabela VI - Composição Química dos Fios de Liga Alumínio-Silício ⁽²⁴⁾	
Al	99,0% $\pm$ 0,15%
Si	1,0% $\pm$ 0,15%
Total de impurezas	<0,005%

(c) Propriedades Mecânicas

Os fios de cobre para a indústria elétrica são classificados, segundo a ABNT, em três tipos de acordo com as propriedades mecânicas. Esses tipos são: mole ou recozido, meio duro e duro.

As tabelas VII, VIII e IX apresentam as propriedades mecânicas dos três tipos de cobre, em função do diâmetro.

Tabela VII - Fios de Cobre Mole: Propriedades Mecânicas ⁽²⁵⁾		
Diâmetros nominais - mm		Alongamento na ruptura mínimo(% em 250 mm)
acima de	até inclusive	
-	0,020	5
0,020	0,071	10
0,071	0,280	15
0,280	0,560	20
0,560	2,50	25
2,50	7,35	30
7,35	11,68	35

Tabela VIII- Fios de Cobre Meio Duro: Propriedades Mecânicas ⁽²⁵⁾					
Diâmetros nominais (mm)		Limite de resis- tência a tração (kgf/mm ²)		Alongamento na ruptura mínimo(%)	
acima de	até inclu - sive	mínima	máxima	em 250 mm	em 1500 mm
1,00	1,06	37,5	42,0	-	0,88
1,06	1,16	37,0	42,0	-	0,90
1,16	1,32	37,0	41,5	-	0,92
1,32	1,45	36,5	41,5	-	0,94
1,45	1,63	36,5	41,0	-	0,96
1,63	2,05	36,0	41,0	-	0,99
2,05	2,65	35,5	40,5	-	1,03
2,65	3,26	35,0	40,0	-	1,07
3,26	4,11	34,5	39,5	-	1,13
4,11	5,19	34,0	39,0	-	1,22

Tabela IX - Fios de Cobre Duro : Propriedades Mecânicas ⁽²⁵⁾				
Diâmetros nominais (mm)		Limite de resistência a tração mínimo	Alongamento na ruptura mínimo(%)	
acima de	atê inclusive	kgf/mm ²	em 250 mm	em 1500 mm
—	1,29	47,0	—	0,86
1,29	1,83	46,5	—	0,90
1,83	2,30	46,0	—	0,95
2,30	2,59	45,5	—	1,00
2,59	3,26	45,0	—	1,04
3,26	3,66	44,5	—	1,08
3,66	4,11	43,5	—	1,14
4,11	4,62	43,0	—	1,18
4,62	5,29	42,5	—	1,24

As propriedades mecânicas, em função do diâmetro, para os fios capilares de ouro mais utilizados pela indústria eletrônica, com grau de pureza 99,99%, nas condições recozidos com alívio de tensões e encruados encontram-se na Tabela X.

Tabela X : Propriedades Mecânicas dos Fios Capilares de Ouro em Função do Diâmetro para as Seguintes Condições: Recozido (R), com Alívio de Tensões (A.T.) e Encruado (E) (26)

Diâmetro (mm)	Massa (mg/20cm)	Força de Ruptura (gf)			Alongamento		
		E	AT	R	E	AT	R
0,010	0,25-0,37	> 1,8	-	1,0-1,8	0,5-2,0	-	2,0-3,0
0,013	0,42-0,57	> 3,0	-	1,4-3,0	0,5-2,0	-	2,0-3,0
0,015	0,59-0,73	> 4,0	-	2,0-4,0	0,5-2,0	-	2,0-5,0
0,018	0,87-1,09	> 5,0	2,5-5,0	2,0-4,0	0,5-2,0	2,0-5,0	4,0-8,0
0,020	1,10-1,34	> 7,0	4,0-7,0	3,0-6,0	0,5-2,0	2,0-5,0	4,0-8,0
0,025	1,75-2,05	≥ 11,0	7,0-11,0	5,5-8,0	0,5-2,0	2,0-6,0	6,0-10,0
0,028	2,21-2,55	≥ 14,0	10,0-14,0	7,0-10,0	0,5-2,0	2,0-6,0	6,0-11,0
0,030	2,55-2,92	≥ 16,0	11,0-16,0	7,5-11,0	0,5-2,0	2,0-7,0	7,0-12,0
0,038	4,15-4,61	≥ 26,0	15,0-26,0	13,0-20,0	0,5-2,0	2,0-8,0	8,0-13,0
0,050	6,99-7,60	≥ 45,0	30,0-45,0	19,0-27,0	0,5-2,0	2,0-10,0	10,0-15,0

As propriedades mecânicas para os fios capilares de Al-1%Si e para os fios de alumínio puro com diâmetros de até 0,1mm nos estados recozidos, com alívio de tensões e encruados encontram-se respectivamente nas Tabelas XI e XII.

Tabela XI : Propriedades Mecânicas dos Fios Capilares de Liga Alumínio-Silício em Função do Diâmetro para as Condições: Encruado (E) e com Alívio de Tensões (A.T) (27)

Diâmetro (mm)	Massa (mg/20cm)	Força de Ruptura (gf)		Alongamento (%)	
		E	AT	E	AT
0,018	0,12-0,15	7,5-8,5	6,7-7,5	0,5-3,0	0,5-3,0
0,020	0,15-0,19	9,5-11,0	8,0-9,5	0,5-3,5	0,5-3,5
0,025	0,24-0,29	15,0-17,0	13,0-15,0	1,0-4,0	1,0-4,0
0,030	0,35-0,41	21,0-23,0	19,0-21,0	1,0-4,0	1,0-4,0
0,035	0,49-0,54	29,0-32,0	26,0-29,0	1,0-4,0	1,0-4,0
0,038	0,58-0,64	34,0-37,0	31,0-34,0	1,5-4,0	1,5-4,0
0,040	0,64-0,71	38,0-42,0	34,0-38,0	1,5-4,0	1,5-4,0
0,050	0,97-1,15	60,0-66,0	54,0-60,0	1,5-5,0	1,5-6,0

Tabela XII - Propriedades Mecânicas dos Fios de Alumínio em Função do Diâmetro para as Seguintes Condições: Encruado (E), com Alívio de Tensões (A.T.) e Recozido (R) (28)										
Diâmetro (mm)	Pureza (%)			Força de Ruptura (gf)			Alongamento (%)			
	E	AT	R	E	AT	R	E	AT	R	
0,100	99,99	99,99	99,999	80-120	60-80	30-45	0,5-2,0	5,0-15,0	5,0-15,0	
0,125	99,99	99,99	99,999	120-170	80-105	45-70	0,5-2,0	5,0-15,0	5,0-15,0	
0,150	99,99	99,99	99,999	170-250	110-150	65-100	0,5-2,0	10,0-25,0	5,0-20,0	
0,200	99,99	99,99	99,999	300-400	200-270	120-180	0,5-2,0	15,0-30,0	15,0-30,0	
0,250	99,99	99,99	99,999	400-500	300-400	190-280	0,5-2,0	15,0-30,0	15,0-30,0	

(d) Embalagem

Os fios devem ser apresentados em carretéis de vários tamanhos de acordo com o diâmetro. É importante que apresentem um bom enrolamento. Para isso o passo do enrolamento deve ser de 1 a 1,5 vezes o diâmetro do fio.

Para os fios capilares os carretéis são do formato esquematizado na figura 14 sendo que as dimensões são padronizadas de acordo com a máquina de soldagem utilizada. na Tabela XIII estão classificados os carrêteis utilizados para os fios capilares, de acordo com as suas dimensões e na Tabela XIV encontram-se os carretéis recomendados em função da espessura do fio.

Tabela XIV - Carretéis Recomendados em Função da Espessura do Fio ⁽⁴⁾		
Diâmetro (mm)	Encruado	Recozido
menor que 0,013	A,B,C	A,B,C
0,025	A,B,C,D,E	A,B,C
0,038	D,E	D,E
0,050	D,E,F	D,E,F
0,130	E,F	E,F

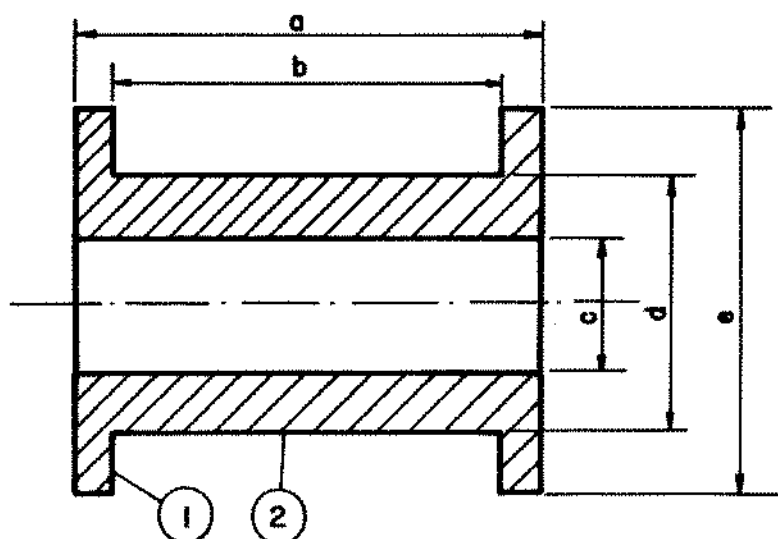
2.6.2. Controle de Qualidade da Matéria Prima

Deve-se fazer um controle de qualidade da matéria prima para a trefilação, verificando se o fio inicial para o processo está obedecendo as exigências das especificações estabelecidas.

(a) Dimensões

O fio deve obedecer as tolerâncias dimensionais estabelecidas para a sua bitola, conforme norma ABNT EB-11⁽²⁵⁾.

O controle dimensional pode ser feito da seguinte maneira: desenvolve-se o fio e enrola-se com a bobinadeira em outro carretel, parando as vezes para verificação do diâmetro e do aspecto superficial.



Observação: As superfícies 1 e 2 devem ser polidas e os cantos vivos quebrados.

Figura 14. Desenho esquemático dos carretéis usados em trefilação⁽²¹⁾.

Tabela XIII - Tipos de Carrêteis ⁽²¹⁾						
Tipo	Material	Dimensões (mm)				
		a	b	c	d	e
A	A1	19,0	16,0	11,2	12,7	15,2
B	A1	19,0	18,3	12,7	13,5	17,4
C	A1	22,2	19,0	11,7	21,5	23,7
D	A1	27,9	26,3	48,8	50,0	58,2
E	Plástico Fenólico Médio	31,8	25,4	10,2	47,6	51,9
F	Plástico Fenólico Grande	22,1	17,3	15,9	101,6	117,6

(b) Composição Química

A composição química deve obedecer às especificações indicadas nas tabelas IV,V e VI. Recomenda-se que sejam retiradas amostras das duas extremidades do fio para que não seja quebrada a continuidade do mesmo.

Para os materiais de elevada pureza, usados em dispositivos eletrônicos uma análise que possui uma sensibilidade adequada é a espectroscopia de massas.

(c) Propriedades Mecânicas

Como os fios iniciais devem possuir uma grande ductilidade para diminuir as etapas intermediárias de recozimento no processo, costuma-se iniciar a trefilação com fios metálicos recozidos, por conseguinte os fios devem estar com as propriedades mecânicas especificadas para os metais recozidos de acordo com o mencionado nas tabelas VII, X e XII.

As propriedades mecânicas devem ser verificadas em amostras de fios em uma máquina de ensaio universal. Geralmente as propriedades mecânicas mais importantes (limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento) são obtidas através do ensaio de tração.

(d) Embalagem

Deve-se verificar se o fio está enrolado no carretel adequado, para a sua bitola de acordo com a Tabela XIV e a figura 14, se o enrolamento é uniforme e se o passo de enrolamento está correto.

2.6.3. Controle de Qualidade dos Fios Durante a Trefilação

É muito importante que se faça um controle de qualidade dos fios durante o processo de trefilação para evitar a perda do trabalho de conformação, devido a defeitos encontrados posteriormente.

Os principais parâmetros do fio que devem ser controlados são os seguintes: aspecto superficial, dimensões e propriedades mecânicas.

(a) Controle Visual dos Fios Durante a Trefilação⁽²⁹⁾

Deve ser feita de tempos em tempos, por exemplo, a cada etapa de reduções, uma observação visual do fio enrolado no carretel, com auxílio de uma lupa ou microscópio para verificar se o enrolamento está uniforme, se não há variações no diâmetro do fio, inclusões e outros defeitos.

Para os fios capilares a observação visual deve ser muito rigorosa, exigindo equipamentos óticos adequados. O procedimento de tal análise é normalizado pelas empresas produtoras de fios capilares.

Não é aconselhável a utilização de fios capilares mal enrolados, contaminados e mecanicamente danificados. No último caso, durante a soldagem por termocompressão, o fio é ligado sob tensão. É necessário enfatizar a importância de não haver marcas de dedos nos fios, pois os resíduos deixados podem entupir o orifício capilar do aparelho de soldagem, da mesma forma que acontece quando há materiais estranhos. Quando se coloca o fio na máquina de trefilar é necessário usar luvas, de preferência de borracha.

(b) Controle das Dimensões do Fio Durante a Trefilação⁽⁴⁾

É de extrema importância a observação das dimensões do fio durante a trefilação. Deve-se verificar periodicamente se o diâmetro do fio está de acordo com o previsto. Para os fios grossos, essa verificação pode ser feita com um micrômetro, porém para os fios capilares a medição do diâmetro pode ser feita, por dois métodos : método da pesagem e método da resistência elétrica.

Método da pesagem⁽³⁰⁾:

Toma-se, por norma, um comprimento de 200mm do fio. Faz-se a pesagem do mesmo em uma balança analítica com alta precisão.

Sabe-se que o volume do fio é:

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \ell = \frac{G}{\gamma}$$

onde D = Diâmetro do fio

G = Peso do fio

γ = Peso específico do material

ℓ = Comprimento do fio

Portanto,

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi \gamma \ell}}$$

Método da Resistência Elétrica ⁽³⁰⁾

Nesse caso mede-se a resistência elétrica do fio. Supondo que a resistividade do metal seja conhecida é possível calcular o diâmetro do fio utilizado a fórmula seguinte:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho \cdot \ell}{\pi \cdot R}}$$

onde,

D = Diâmetro do fio

ρ = Resistividade do metal

ℓ = Comprimento do fio

R = Resistência elétrica do fio

O método da pesagem é o mais utilizado pois é o menos afetado pelos fatores externos. Tanto o peso específico como a resistividade são afetados pela temperatura, porém as variações de temperatura afetam a resistividade em maior grau. consequentemente, o erro é maior nos ensaios de resistência elétrica do que nos ensaios de pesagem.

Dois fatores estão diretamente relacionados com o problema das dimensões do fio, ou seja, o controle das fieiras durante sua utilização e o controle da lubrificação.

(c) Controle das Propriedades Mecânicas do Fio Durante a Trefilação ⁽⁴⁾

Deve-se verificar periodicamente se as propriedades mecânicas dos fios estão de acordo com o esperado. É conveniente que a cada etapa do processo se retire, um pedaço de fio e se faça a verificação do limite de resistência à tração e do alongamento.

Para os fios capilares deve-se utilizar uma máquina de ensaios com baixa capacidade de carga, porém com grande precisão. A norma que ensina o procedimento desses testes com essas máquinas é a ASTM F 219 ⁽³¹⁾.

Caso o fio não esteja com as propriedades mecânicas desejadas, deve-se procurar eliminar o problema modificando as condições do processo , tais como velocidade de trefilação, lubrificação.

Quando ocorre ruptura do fio, este deve ser observado num microscópio ótico. O exame da fratura pode, muitas vezes, indicar a causa da ruptura do fio. É importante verificar se o defeito se reproduz ou não, a intervalos regulares, ao longo de todo o fio.

2.6.4. Controle de Qualidade Final dos Fios

Deve-se fazer um controle de qualidade rigoroso dos fios metálicos após terminado o processo de trefilação.

Os tópicos que devem ser verificados são os seguintes: dimensões, propriedades mecânicas, propriedades de superfície e embalagem (enrolamento).

Os métodos de ensaios são os mesmos dos itens anteriores.

A tabela XV apresenta um critério de rejeição para lotes de fios cobre para a indústria elétrica.

Tabela XV - Quantidade de Amostras do Lote ⁽²⁵⁾		
1	2	3
Quantidade de rolos, carretéis ou bobinas que formam o lote	Quantidade de amostras a ensaiar	Quantidade máxima de amostras defeituosas toleradas
0 a 24	5	0
25 a 49	5	0
50 a 99	10	0
100 a 199	15	1
200 a 299	20	1
300 a 499	30	2
500 a 799	40	3
800 a 1299	55	3
1300 a 3199	75	4
3200 a 7999	115	6

Quando se trata de fios capilares para a indústria eletrônica, deve-se retirar amostras de todos os carretéis. Se for encontrada uma amostra fora das tolerâncias permitidas o carretel deve ser rejeitado.

2.7. Controle das Fieiras (32)

Para o controle de fieiras de diamante de diâmetro inferior a 0,150 mm, recomenda-se o emprego de um microscópio monocular dotado de um coeficiente de ampliação de 50 a 180 vezes. É importante que se tenha uma boa iluminação para o exame das fieiras.

Os seguintes detalhes devem ser observados durante o controle das fieiras: perfil do canal, anéis de estiramento, fissuras, rugosidades, arestas de polimento, diâmetro e ovalização do orifício.

O perfil do canal da fieira deve ter a forma adequada para o metal que está sendo trefilado.

Os anéis de estiramento são marcas em forma de anéis - que aparecem na fieira, originados pelo desgaste na zona de redução. Muitas vezes os anéis de estiramento causam a ruptura prematura da fieira. Os anéis de estiramento são rugosos e de forma irregular, podendo causar ruptura da película de lubrificante, - produzindo portanto o contato do metal com a fieira. Em consequência, as forças que atuam sobre o diâmetro aumentam bruscamente, criando um perigo de ruptura muito maior.

Quando acontece o aparecimento de anéis de estiramento na fieira é necessário recobri-la a um diâmetro superior.

As fissuras verificadas na fieira podem até causar ruptura da fieira. As causas das fissuras são difíceis de se averiguar e requerem um rigoroso exame.

Para evitar o aparecimento de fissuras os seguintes fatores devem também ser controlados:

- a pureza do material trefilado;
- a pureza do lubrificante;
- a precisão da fixação do diamante à montagem;
- o alongamento por fieira da série em questão.

As pequenas fissuras superficiais na zona de redução podem ser eliminadas recalibrando-se a fieira para um diâmetro superior. Quando se utiliza uma fieira fissurada, se esta for uma fieira final, resultará num fio arranhado; se esta for uma fiei-

ra qualquer da série, afetará a vida das fieiras seguintes.

Podem aparecer rugosidades no orifício da fieira como consequência de erros cometidos durante o polimento. Portanto, é necessário corrigir esse erro, fazendo um polimento suficientemente fino, ou rejeitar a fieira.

As arestas de polimento podem surgir em todas as partes do orifício, devido a erros cometidos durante o polimento. Esses defeitos, além de diminuir a vida da fieira, produzem uma superfície rugosa no fio trefilado.

O diâmetro e ovalização do orifício devem ser verificados periodicamente. O diâmetro nominal de todas as fieiras devem estar dentro das tolerâncias permitidas, e também a ovalização do orifício, que é a diferença entre duas medidas ortogonais. A tolerância para fieiras com diâmetros de 0,4 mm ou menos é de no máximo 0,5% do diâmetro.

2.8. Controle da Lubrificação

A lubrificação do fio durante o processo de trefilação é muito importante, devendo ser controlada corretamente. Caso isso não seja feito, surgirão uma série de irregularidades no fio e na fieira tais como rugosidades, anéis de estiramento e outras.

Devem ser verificadas as propriedades do lubrificante como viscosidade, basicidade e a continuidade da lubrificação junto à fieira. Além disso, é importante que o lubrificante seja filtrado toda vez que retorna do recipiente de armazenamento.

2.9 - Referências Bibliográficas

- (1) PAPARONI, F. - Trafilati di Rame, Revista Il Rame, Cisar, nº 11, 1965, pp. 3-10.
- (2) CLEAVER, F.T.; MILLER, H.J. - Wire-Drawing Technique and Equipment, J. Inst. Metals, vol. 78, 1950, pp. 537-555.
- (3) BRESCIANI Fº, E. - Conformação Plástica dos Metais, Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, 1977, pp. 49-57.
- (4) Catálogo da S.A. Philips do Brasil - Informações sobre o Produto Comercial - Fieiras de Diamante, pp. 1-7.
- (5) Idem, ibidem ref. (1), nº 13, p.6.
- (6) Idem, ibidem ref. (1), nº 15, pp. 3-13.
- (7) Idem, ibidem ref. (2), pp. 540-545.
- (8) Idem, ibidem ref. (3), pp. 62-69.
- (9) Idem, ibidem ref. (1), nº 15, p. 5.
- (10) Idem, ibidem ref. (2), p. 117.
- (11) Idem, ibidem ref. (1), nº 15, p. 4.
- (12) Idem, ibidem ref. (1), nº 13, pp. 5-15.
- (13) Catálogo da General Electric do Brasil - Fieiras de Diamante, pp. 1-4.
- (14) Idem, ibidem ref. (1), p. 13.
- (15) Idem, ref. (4), pp. 17-18
- (16) Idem, ibidem ref. (3), pp. 50-51.

- (17) Idem, ibidem ref. (2), pp. 552-553.
- (18) Idem, ibidem ref. (3), pp. 76-81.
- (19) Idem, ref.(4), pp.14-16.
- (20) Catálogo da Secon Metals Corporation - Wire Products for the Semiconductor Industry, New York, p. 8.
- (21) Gold Wire for Semiconductor Lead-Bonding - Norma Técnica da ASTM F72-74, vol. 43, 1975, Philadelphia, pp. 321-325.
- (22) ASME Handbook - Metals Properties, Mc Graw-Hill, New York, 1954, p. 300.
- (23) Standard Specification for Refined Gold - Norma Técnica da ASTM B 562-73, vol. 8, 1975, Philadelphia, pp. 667-669.
- (24) Catálogo da Tanaka Electronics Industry - Wire-Drawing, Tokyo, pp. 5-6.
- (25) Fios de Cobre Nus de Secção Circular para Fins Elétricos: Especificação - Norma Técnica da ABNT EB-11, São Paulo, 1970 , pp. 1-6.
- (26) Idem, ref. (24), p.3.
- (27) Idem, ref. (24), p.6.
- (28) Idem, ref. (24), p.7.
- (29) Catálogo da Secon Metals Corporation - The Relationship Between Gold Wire, Capillary Maintenance, and Device Reability, New York, pp. 4-8.
- (30) Measuring Diameter of Fine Wire By Weighing - Norma Técnica da ASTM, F 205-63, vol. 43, 1975, Philadelphia, pp. 596-598.

(31) Fine Round and Flat Wire For Electron Devices and Lamps - Norma Técnica da ASTM, F 219-67, vol. 43, 1975, Philadelphia, pp. 605-607.

32) Idem, ref. (4), pp. 11-14.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA NA TREFILAÇÃO⁽¹⁾

É difícil analisar o processo de trefilação de fios devido ao grande número de variáveis de influência e da dificuldade em se isolar seus efeitos.

As principais dificuldades experimentais para verificar o comportamento do metal durante a trefilação residem principalmente nas pequenas secções dos fios (no caso de fios finos e capilares) e nas elevadas velocidades de trabalho.

As pequenas dimensões dos fios apresentam dificuldades na aplicação das técnicas convencionais de ensaios mecânicos para determinação da resistência mecânica e ductilidade do fio, ensaios metalográficos, para exames da microestrutura em secções transversais e longitudinais e verificações metalúrgicas, para medições de diâmetros e ovalizações do fio. Além disso, as pequenas dimensões dos fios impedem a observação dos modos de escoamento pelo método visual de traçados de riscos em secções longitudinais, como pode ser feito nos produtos extrudados.

As altas velocidades de trefilação provocam alterações no comportamento do metal, e a observação dessas alterações é muito difícil.

O objetivo básico da análise dos fatores de influência no processo de trefilação é encontrar as melhores condições de trabalho onde se deve obter:

- fios com qualidades mecânicas e metalúrgicas adequadas aos usos específicos.

- alta velocidade de trefilação, para se obter elevada produtividade;

- forças de trefilação baixas para se utilizar máquinas de menor porte, e portanto de menor custo, e para poupar energia.

Foram identificadas as variações de influência no processo de trefilação e classificadas em quatro grupos: variáveis de matéria prima, variáveis de materiais auxiliares, variáveis de processamento e variáveis de produto final. Na tabela

XVI está representada essa classificação.

A seguir serão descritas as variáveis do processo de trefilação, tentando-se analisar algumas delas, sabendo-se de atemão que é difícil isolar os efeitos de interação entre elas.

3.1. Variáveis de Matéria Prima

As variáveis de matéria prima tem grande influência no processo de trefilação. São variáveis de matéria prima: a natureza, a forma e as propriedades do material.

3.1.1. Natureza do Material^(2,3)

Como variáveis que dependem da natureza do material deve-se citar a composição química, a estrutura metalográfica e as condições de fabricação do material.

Os fios de cobre, alumínio e ouro, que servem de matéria prima para a trefilação de fios capilares, devem ser de elevada pureza. A presença de quantidade excessiva de impurezas no metal dificulta o processo de trefilação, principalmente se essas impurezas estiveram distribuídas irregularmente no fio. Muitas vezes e tamanho das inclusões, particularmente os óxidos, é da ordem de grandeza do diâmetro do fio capilar, provocando a ruptura do fio nesse local, durante a deformação. As composições químicas recomendadas para os fios de ouro, alumínio e cobre estão indicadas nas tabelas IV, V e VI.

A estrutura metalográfica do metal, usada como matéria prima para a confecção dos fios deve ser preferencialmente a estrutura do metal recozido, para se conseguir uma maior redução total de área, sem necessidade de recozimento intermediário entre os passes. Conforme pode se observar na figura 43 (itê^m 5.6), quando se faz o recozimento dos metais encruados, a resistência mecânica diminui e a ductilidade aumenta. A estrutura metalográfica de uma secção longitudinal do metal recozido é composta por grãos aproximadamente equiaxiais. Observa-se também, na referida figura, que as propriedades mecânicas do metal também dependem do tamanho de grão, sendo que os grãos muito grandes conferem baixa resistência mecânica ao fio. Recomenda-se portanto que, ao se realizar o tratamento térmico de recozimento para o fio que será usado na trefilação, o processo deve ser interrompido após as duas primeiras etapas (recuperação e recristalização), para que a terceira etapa (crescimento de grãos) não

Tabela XVI : Identificação das Variáveis do Processo de Trefilação

V A R I Á V E I S				
DA MATÉRIA PRIMA	DOS MATERIAIS AUXILIARES	DO PROCESSAMENTO	DO PRODUTO FINAL	
Natureza do material (composição química, condições de fabricação, estrutura metalográfica). Forma do material (diâmetro, ovalização, regularidade do diâmetro, rugosidade superficial, defeitos internos e superficiais). Propriedade do material (propriedades mecânicas, propriedades elétricas, propriedades eletro-químicas).	Natureza do lubrificante - refrigerante (tipo de lubrificante, composição química). Propriedades do lubrificante - refrigerante (viscosidade, temperatura de trabalho, basicidade e conteúdo graxo). Material da ferramenta.	Redução da seção. Programa de redução. Desgaste da fiação. Condições de atrito. Sistema de lubrificação. Temperatura de trabalho na fiação. Velocidade de trefilação. Esforço e potência de trefilação.	Natureza do material (condições de redução, estrutura metalográfica). Forma do material (diâmetro, ovalização, regularidade do diâmetro, rugosidade superficial, defeitos internos e superficiais). Propriedades do material (propriedades mecânicas e elétricas).	

ocorra.

As características dos fios iniciais também dependem dos processos de fundição e conformação utilizados na fabricação dessa matéria prima. Alguns defeitos introduzidos no processo de fundição, como por exemplo, vazios internos e porosidades, podem prejudicar o desempenho do material na trefilação; o efeito dessas imperfeições é semelhante ao efeito das inclusões, isto é, provoca rupturas do fio em algumas etapas do processo. Da mesma forma, durante a extrusão a quente do material, que é o processo mais utilizado para transformar os lingotes fundidos em barras ou fios para a trefilação, podem ser introduzidos alguns defeitos no material, que prejudicam o processamento do fio e podem até provocar o aparecimento de outros defeitos durante a trefilação. Os principais defeitos introduzidos durante a extrusão são: defeitos devido a geometria do lingote; defeitos devido ao estado superficial do lingote (cavidades alongadas, defeitos longitudinais, "chevrons"); defeitos devido a lubrificação (ondulações); defeitos devido ao metal inicial (trincas); e defeitos devido ao desgaste da ferramenta.

3.1.2. Forma do Material

Dentro desse item podem ser classificados as seguintes variáveis: diâmetro do fio, ovalização do diâmetro, regularidade do diâmetro ao longo de todo o fio, rugosidade superficial do fio e defeitos superficiais como inclusões e vazios.

Essas variáveis já foram discutidas no item 2.6; correspondente ao controle de qualidade dos fios.

3.1.3. Propriedades do Material^(4,5)

As propriedades da matéria prima influem tanto na facilidade de processamento do fio, como no uso do produto final.

As propriedades mecânicas do material tais como limites de escoamento, de resistência e alongamento influem bastante no processamento do fio. Conforme já foi explicado, se o metal estiver recozido, estará bastante dútil e facilitará o processo de redução; se estiver encruado, permitirá pouca redução de área, sendo necessário o recozimento intermediário entre os passes.

As propriedades elétricas dos materiais, tais como condutibilidade influem no uso do produto final. O cobre, devido a sua alta condutibilidade elétrica é o elemento mais usado em condutores elétricos. Sabe-se que a pureza do material e o trabalho mecânico influem na condutibilidade elétrica dos metais não-ferrosos, particularmente o cobre. Aumentando-se a pureza desse metal, sua condutibilidade aumenta; o trabalho mecânico a frio tem efeito inverso.

A propriedade eletro-química de resistência à corrosão, influi no uso do produto final, principalmente no caso dos fios capilares usados pela indústria de dispositivos eletrônicos. Uma das razões da grande utilização de ouro como elemento de ligação dos dispositivos eletrônicos e a sua elevada resistência à corrosão.

Na tabela XVII encontram-se algumas propriedades mecânicas e elétricas do cobre, ouro e alumínio recomendadas para os fios iniciais para processo de trefilação, ou seja no estado recozido.

3.2. Variáveis de Materiais Auxiliares

Os principais materiais auxiliares que tem influência na trefilação são o lubrificante, que também atua como refrigerante e o material da fieira.

Como para os fios capilares, as fieiras utilizadas são de diamante, e já foram discutidas no capítulo 2, serão discutidas apenas as variáveis do lubrificante, ou seja a natureza e as propriedades do lubrificante-refrigerante.

3.2.1. Natureza do Lubrificante-Refrigerante⁽⁶⁻⁹⁾

Estão classificados nesse item: o tipo do lubrificante e a sua composição química.

Os lubrificantes, quanto ao tipo, podem ser classificados em secos e úmidos. Os lubrificantes secos são mais utilizados na trefilação de metais ferrosos e os úmidos são bastante utilizados na trefilação de metais não-ferrosos, embora essa não seja uma regra geral, pois o oposto pode ocorrer. Em se tratando de fios capilares, os lubrificantes usados são os úmidos.

A pureza do lubrificante é importante pois influi na sua temperatura de trabalho. Os resíduos metálicos degeneram

Tabela XVII - Propriedades Mecânicas e Elétricas do Cobre, Alumínio e Ouro (recozidos) (4,5)

Propriedades	Cobre	Ouro	Alumínio
Resistividade Elétrica a 20°C (micro-ohm-cm)	1,71	2,35	2,65
Condutibilidade Elétrica a 20°C (% IAS [*])	101,0	73,4	64,9
Módulo de Elasticidade em Tração (kgf/mm ²)	12000	8155	6336
Resistência à Tração (kgf/mm ²)	24,2	13,3	4,8
Resistência ao Escoamento	3,4	0,34	1,2
Alongamento (% em 254 mm para o Cu e Al e % em 50 mm para o Au)	38,5	45	60
Dureza Brinell (esfera = 10 mm; cargas=kgf)	45	25	17

(*) IACS = International Annealed Copper Standard, Correspondente a Condutibilidade de 58 m/ohm.mm².

o lubrificante, devendo portanto ser retirados. As partículas metálicas mais grossas não causam tanto problema à lubrificação, pois decantam espontaneamente no reservatório de lubrificante. As partículas mais finas é que causam problemas. Segundo PAPARONI⁽¹⁰⁾ é extremamente importante retirar as partículas finas de cobre do lubrificante durante a trefilação, pois essas partículas levam à formação de ions de cobre que podem reagir com anions da solução lubrificante, diminuindo sua vida efetiva.

Outro fator que provoca a degeneração do lubrificante é a proliferação de bactérias. Quando isso ocorre, percebe-se por uma mudança de cor e de odor no lubrificante. Deve-se, portanto, efetuar sua troca periodicamente. O período de cada troca de lubrificante varia de acordo com cada caso particular, devendo ser determinado experimentalmente.

Na tabela XVIII observa-se alguns componentes típicos que constituem os lubrificantes de trefilação juntamente com suas funções.

Tabela XVIII - Componentes Típicos de Lubrificantes de Trefilação com suas Funções ⁽¹¹⁾	
Componentes	Funções
Gorduras animais; óleos gordos (vegetais) e sabões solúveis (a base de metais alcalinos, principalmente sódio)	Emulsificantes, agentes umidificantes
Sabões insolúveis (geralmente a base de alcalinos terrosos)	Lubrificantes de alto ponto de fusão
Cal	Agente redutor do escorregamento para sabões secos
Óleo mineral	Portador ou diluente para agentes - quimicamente ativos (usados na lub. de aços).
Grafite, giz e mica	Lubrificantes sólidos
Compostos clorados e sulfurados	Agentes anti-soldagem (lub. de aços).

3.2.2. Propriedades do Lubrificante-Refrigerante (6-9)

As propriedades mais importantes dos lubrificantes são: viscosidade, temperatura de trabalho, basicidade e conteúdo graxo em lubrificantes úmidos.

A viscosidade do fluido lubrificante é muito importante pois se for muito baixa, o lubrificante não penetra efetivamente na região de trabalho da fieira; se for muito elevada haverá um aumento no coeficiente de atrito, devido as forças moleculares do lubrificante; nesse caso o atrito não será tão reduzido quanto se deseja.

A temperatura de trabalho do lubrificante é outra propriedade que influi na lubrificação. Para os óleos vegetais, por exemplo, a temperatura de serviço não deve exceder a 60°C. Para os lubrificantes em emulsão, as temperaturas de trabalho mais adequadas estão compreendidas entre os 38° e 55°C. Se a temperatura do lubrificante ultrapassa a recomendada, diminui a sua viscosidade e consequentemente as propriedades de lubrificante e refrigerante ; além disso as fieiras se desgastam mais depressa.

Quanto à basicidade do lubrificante, para as emulsões os melhores resultados são obtidos quando o valor do pH da emulsão se situa entre 8,5 e 9,6. As substâncias usadas como decapantes reduzem o pH da emulsão; sua presença é notada pela tonalidade verde que adquire o lubrificante. A basicidade pode ser aumentada se for necessário, pela adição de pequena quantidade de uma substância alcalina, como soda cáustica, no lubrificante. Caso haja necessidade essa operação pode ser repetida, horas depois.

O conteúdo graxo de uma emulsão depende do diâmetro do fio a ser trefilado, variando de 7,0 a 1,5% para fios com diâmetros de 2,5 a 0,015 mm respectivamente (2).

A preparação da emulsão requer cuidados especiais. Deve-se adicionar sempre o óleo ou sabão à água, e não o contrário, para que a emulsão seja estável, e portanto suporte grande tempo de serviço antes de se degenerar. É conveniente que as emulsões usadas como lubrificantes tenham pouca quantidade de espuma, pois esta pode bloquear a entrada da fieira. A presença de espuma no lubrificante pode ser eliminada usando um produto comercial anti-espuma, à base de silicone. Outra característica que se requer do lubrificante é que ele não provoque o aparecimento de manchas no fio, depois de acabado.

3.3. Variáveis de Processamento

As variáveis de processamento são de extrema importância na trefilação, pois são as variáveis que exercem maior influência na qualidade do produto final e algumas dessas variáveis, podem ser controladas com mais facilidade do que as variáveis dos outros grupos (matéria prima, materiais auxiliares e produto final).

As principais variáveis de processamento são: redução de secção, perfil da fieira, programa de redução, condições de atrito, desgaste da fieira, sistema de lubrificação, velocidades de trefilação, temperatura de trabalho na fieira, esforços e potência de trefilação.

É muito difícil distinguir as influências de cada variável separadamente, pois a maioria das variáveis é influenciada pelas demais.

A seguir serão discutidas os principais aspectos dessas variáveis.

3.3.1. Redução de Secção, Perfil da Fieira e Programa de Redução

A redução de secção recomendada para cada metal depende da sua capacidade de transmitir trabalho a frio, ou seja da sua ductilidade.

A máxima redução de área possível de ser obtida num passe está limitada pela resistência à tração do fio. Para os metais dúteis como o cobre, a máxima redução é de cerca de 60%, em condições de lubrificação perfeita. Para os metais menos dúteis - como o aço, a redução máxima cai para 25 %, podendo aumentar para 50 % utilizando-se lubrificantes especiais⁽²²⁾. Na prática se adotam reduções menores que as máximas, para permitir a ação lubrificante.

Observou-se experimentalmente que se obtém maior resistência mecânica no fio, se for efetuada uma dada redução de área em vários passes suaves do que em poucos passes intensos. O alongamento nos dois casos será o mesmo. Esse comportamento pode ser explicado, em parte pela maior falta de uniformidade na distribuição da energia de deformação nas grandes reduções.

Pode-se determinar experimentalmente cada condições de trabalho (metal trefilado, material da fieira, velocidade de trefilação, atrito, etc) o ângulo ótimo da fieira, ou seja, o ân-

gulo que confere a menor tensão de trefilação. A obtenção do ângulo ótimo deve-se a dois fatores atuando em sentido contrário sobre a tensão de trefilação: quando se aumenta o ângulo da ferramenta, aumenta a contribuição do trabalho e diminui o trabalho de atrito.

O ângulo ótimo aumenta com o aumento da redução, de área (mantendo-se os demais fatores constantes); é praticamente independente da velocidade de trefilação em lubrificação normal; é influenciado pela natureza do lubrificante.

BONZEL⁽¹²⁾ fez uma análise detalhada da influência do perfil da fieira e da determinação do ângulo ótimo do cone de trabalho, interessado na trefilação de fios de aço. Desse estudo pode-se retirar algumas observações:

(1) A fieira pode ser considerada como um dispositivo cuja finalidade é reduzir a secção do fio, transformando uma parte da tensão de tração em tensão de compressão; esta é induzida pela inclinação do orifício da ferramenta e se distribui irregularmente pelo volume de metal sob deformação. A irregularidade dessa distribuição de tensões é condicionada por vários fatores: eficiência da lubrificação, relação entre o diâmetro de entrada e de saída, perfil da fieira e material da fieira.

(2) O efeito do atrito é alterado pelas condições de lubrificação; coeficientes de atrito elevados provocam uma concentração das tensões de compressão na entrada da ferramenta, enquanto que na saída a tensão predominante é de tração; portanto, à medida que o coeficiente de atrito aumenta, mais acentuada é a tendência da pressão na parede decrescer à medida que o ponto considerado se aproxima da saída.

(3) O perfil da fieira deve ser de tal forma que permita o aparecimento de pressões pequenas e decrescentes na parede interna para evitar o desgaste excessivo da fieira e bom acabamento superficial do fio trefilado, conjuntamente com as condições de trabalho e lubrificação.

(4) Quando o objetivo básico de um trabalho for obter uma redução de secção total num menor número de passes, deve-se utilizar ferramentas com ângulos próximos ao ângulo ideal, ao qual corresponde uma menor força de trefilação, reduzindo o risco de quebra do fio.

(5) Quando o objetivo básico do trabalho for a redução de secção com um encruamento possível, o processo deve ser

feito em muitas reduções menores, e o ângulo da fieira não tem tanta importância; contudo, para se evitar o desgaste da fieira deve-se adotar um ângulo inferior ao ângulo ótimo, lembrando que o ângulo ótimo decresce com a diminuição da redução.

Para se efetuar o programa de redução, vários fatores influem: redução total desejada, metal com que se está trabalhando, material da fieira, tipo de máquina de trefilar, propriedades mecânicas requeridas para o fio e outras.

3.3.2. Condições de Atrito^(9,14)

Quando se coloca duas superfícies em contato, por mais polidas que estejam, as superfícies ainda apresentam saliências e reentrâncias, portanto, a área real de contato será menor que a área aparente. Exercendo uma pressão gradativa sobre elas, aquela de menor resistência ou dureza, sofrerá nos pontos de contato de formações que serão elásticas, a princípio, passando a ser plásticas até atingir a uniões que dificultam o movimento relativo das superfícies. Outro fator que dificulta o movimento relativo dessas superfícies postas em contato, são os campos de forças atrativas das estruturas metálicas, que se deslocam uma em relação à outra. A resistência ao movimento das superfícies é denominada atrito.

As principais consequências do atrito são: geração de calor, perda de potência e desgaste das superfícies. Para se eliminar ou reduzir os efeitos do atrito deve-se provocar a separação efetiva das superfícies, através de uma camada de lubrificante entre elas. Há três tipos de lubrificação de acordo com a espessura da camada de lubrificante: lubrificação hidrodinâmica, lubrificação mista e lubrificação limite.

A lubrificação hidrodinâmica, consiste na criação de uma camada de lubrificante suficiente para provocar separação efetiva das superfícies. O atrito nesse caso é mínimo sendo causado apenas pelas forças moleculares do lubrificante; nesse caso somente ocorre um aumento do coeficiente de atrito quando houver um aumento da viscosidade do lubrificante. Esse tipo de lubrificação tem grandes vantagens: mínimo consumo de fieiras e a possibilidade de elevadas velocidades de trefilação.

Outro tipo de lubrificação é a denominada lubrificação mista, na qual a espessura da camada limite não é suficiente para provocar a separação total das superfícies, havendo contato em

alguns pontos. Nesse caso, à medida que a viscosidade do lubrificante aumenta, maior quantidade de lubrificante entra para a zona de deformação e conseqüentemente o coeficiente de atrito e a força de trefilação diminuem. Esse tipo de lubrificação é bastante sensível à temperatura e à velocidade.

O terceiro tipo de lubrificação corresponde ao contato das superfícies sem nenhuma camada de lubrificante entre elas; é a denominada lubrificação "limite", havendo nesse caso um máximo de atrito, produzindo elevadas temperaturas.

Geralmente a lubrificação, que ocorre nos processos de trefilação é a mista. Uma lubrificação hidrodinâmica ou quase hidrodinâmica é obtida na trefilação de tubos, quando o lubrificante é introduzido sob pressão⁽¹⁵⁻¹⁷⁾.

A maioria das teorias sobre a mecânica da deformação aplicada à trefilação contém erros a respeito da consideração do coeficiente de atrito (μ), pois esse fator é de difícil determinação experimental. É mais correto utilizar-se valores médios para o coeficiente de atrito, uma vez que não se sabe como esse fator varia de ponto para ponto do orifício da fieira.

Alguns autores⁽¹⁸⁻²¹⁾ desenvolveram métodos para a determinação do coeficiente de atrito em trefilação, procurando não utilizar em suas determinações os conceitos de teoria da plasticidade, para que as aproximações adotadas nessa teoria não fossem adicionadas ao erro experimental. A maioria desses trabalhos se baseou em ensaios de trefilação de fios grossos e médios (diâmetros até 0,4 mm). Para determinação dos esforços de trefilação foram utilizadas fieiras bipartidas. O coeficiente de atrito em contrado era função, além do semiângulo da fieira, das forças de trefilação e de separação das duas metades de ferramentas.

Dos trabalhos mencionados, sobre determinação do coeficiente de atrito, algumas considerações podem ser feitas:

(1) Quando o fio está coberto por uma película de lubrificante sólido, por exemplo de sabão, o coeficiente de atrito varia de 0,01 a 0,05, independentemente do material do fio ou da ferramenta. Os valores desse coeficiente varia com os diferentes sabões, porém as diferenças são mascaradas pela influência de outras variáveis.

Observou-se que o coeficiente de atrito cresce com o aumento do ângulo da fieira e do limite de escoamento do metal e decresce com a aplicação de uma contra-pressão. Verificou-se também que o coeficiente de atrito decresce com o aumento da veloci-

dade de trefilação e que para os processos de trefilação a seco a altas pressões, a maior parte do trabalho de atrito foi gasto no cisalhamento interno da película de lubrificante.

(2) Quando são empregados lubrificantes líquidos, ou quando o filme sólido fica com reduzida espessura, devido à passagem do fio pela fieira sem relubrificação, então o coeficiente de atrito varia de 0,08 a 0,15. O valor determinado depende, não somente do tipo do lubrificante, mas também do acabamento superficial da ferramenta.

(3) Para a trefilação a seco a ordem de grandeza do coeficiente de atrito é 0,01 e para a trefilação a úmido é 0,1. Dados mais detalhados para o cobre se encontram na tabela XIX.

Tabela XIX - Valores Típicos do Coeficiente de Atrito na Trefilação do Cobre ⁽¹⁴⁾					
Limite de Resistência (kgf/mm ²)	Lubrificante	Material da Ferramenta	Velocidade (m/s)	Nº de Passes s/ Relubrificação	μ
22	Óleo castor	Diamante	1,5	-	0,10
		Carboneto de Tungstênio		-	0,10
		Aço		-	0,15
31	Estearato de sódio	Aço	1,8	1	0,02- -0,03

3.3.3. Desgaste da Fieira (22,23)

A maioria das fieiras usadas em trefilação de metais ferrosos e não-ferrosos mostra o mesmo modelo de desgaste, manifestada pelo aparecimento de um sulco na fieira na forma de anel, que aumenta os efeitos de atrito, provocando rapidamente a ruptura do fio.

Há muitos fatores que contribuem para o desgaste da fieira:

- (a) lubrificante inadequado ou insuficiente ;
- (b) material estranho incluso no fio;
- (c) insuficiente limpeza da fieira;

(d) velocidade, temperatura e redução elevadas na trefilção;

(e) perfil da fieira incorreto, principalmente ângulo de entrada e extensão da região cilíndrica inadequados;

(f) variações na qualidade do material da fieira.

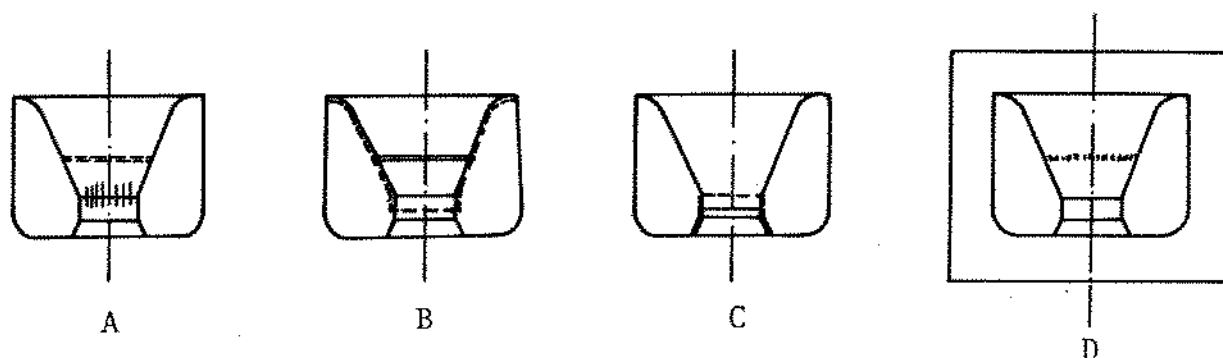
Na prática, a manutenção das fieiras é um ato rotineiro, pois é melhor retirar a fieira de serviço para fazer polimento e recondicionamento antes dela atingir o estágio em que o fio produzido fique fora do diâmetro especificado, ou que apareçam ou-tros defeitos.

A figura 15 mostra as etapas do recondicionamento de uma fieira.

O mecanismo de desgaste em fieiras de metal-duro, foi estudado através de três análises⁽²²⁾: exame metalográfico da fieira, análise espectrográfica do lubrificante e observação de resí-duos de ferramenta radiativas no fio trefilado. A presença do fio éde numerosas manchas de cobalto radiativo, permite concluir que ocorrem soldagens microscópicas entre a matriz de cobalto da ferramenta e o metal do fio. Os grãos de carbonetos da ferramenta são ex-postos, polidos e quebrados. Algumas dessas partículas incrustam-se no fio, sendo provavelmente as responsáveis pelos riscos nas ferramentas e outras apenas contaminam o lubrificante, o que foi verificado pela análise espectrográfica. Não se conhece trabalho semelhante a esse que analisa o mecanismo do desgaste em fieiras de diamante, porém supõe-se que na essência o mecanismo de desgaste é o mesmo.

A intensidade de desgaste varia ao longo da interface metal-fieira, sendo menor no meio, maior na saída e muito maior na entrada da fieira (Fig.16).

O desgaste, e portanto a vida da fieira, depende do material da ferramenta, conforme pode ser verificado na tabela XX.



A = fieira desgastada; B = retirada de material dos cones de entrada e de trabalho; C = retirada de material da região cilíndrica e cone de saída; D = fieira polida e acondicionada

Figura 15 - Estapas do recondicionamento de uma fieira⁽²²⁾.

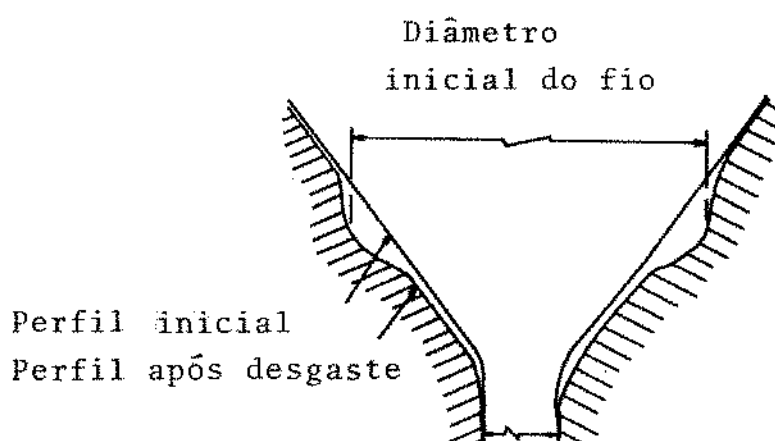


Figura 16 - Perfil de uma fieira desgastada.

Tabela XX - Efeito do Material na Vida Média das Fieiras ⁽²³⁾				
Material da Fieira	Aço Doce	Aço Alto Carbono	Metá Duro	Diamante
Vida da Fieira (km de fio trefilado/ μ m desgastado na fieira).	1,7-6,9	103,5-276,0	345-1380	6,9-55,2x10 ⁶

3.3.4. Sistema de Lubrificação⁽²⁴⁾

As funções da lubrificação na trefilação são muito mais complexas do que aparentam à primeira vista. Pode-se citar algumas dessas funções: reduzir o atrito, manter a temperatura em um nível baixo, prolongar a vida da fieira, conferir brilho ao fio, deixar a superfície do fio escorregadia para a operação subsequente e proteger os fios contra a corrosão, no caso de metais ferrosos.

Como já foi comentado anteriormente, das partículas metálicas incorporadas ao lubrificante as mais espessas são de cantadas no próprio reservatório de lubrificante e os mais finas retornam à máquina de trefilar; portanto é importante que haja um sistema eficiente de filtração dessas micro-partículas, pois elas atuam como abrasivo, prejudicando o fio e a fieira e degeneram o lubrificante.

Alguns fatores podem afetar o sistema de lubrificação, por exemplo: a qualidade da água (basicidade), o tamanho do reservatório, a capacidade de resfriamento do lubrificante (em relação à velocidade de trefilação adotada).

3.3.5. Temperatura de Trabalho na Fieira⁽²⁵⁾

Durante a trefilação dois fatores contribuem para a geração de calor: a deformação do fio e o atrito entre o fio e a fieira. Como às velocidades usuais de trefilação, o calor é gerado em tempos muito curtos, esse fator deve ser analisado levando

do-se em conta as altas temperaturas de trabalho e os grandes gradientes de temperatura.

As elevadas temperaturas na interface fio-fieira podem causar vários problemas, tais como: prejudicar a lubrificação; causar o aparecimento de tensões residuais no fio devido a diferenças de temperatura entre o centro e a superfície; em algumas ligas podem provocar o fenômeno de endurecimento por precipitação, com redução da ductilidade do fio.

Em uma máquina de trefilar com múltiplas fieiras, alguns desses efeitos são acumulativos, a não ser que o fio seja resfriado até a temperatura ambiente antes de entrar na fieira seguinte.

O problema da refrigeração tem sido tratado de forma empírica. Alguns estudos teóricos sobre a distribuição de temperaturas foram feitos⁽²⁶⁻²⁸⁾. A maior dificuldade experimental para esses estudos é a medida de temperatura de fios que se movem rapidamente.

3.3.6. Velocidade, Força e Potência de Trefilação

É difícil analisar a velocidade, a força e a potência de trefilação (trabalho por unidade de tempo) separadamente, pois essas variáveis são mutuamente dependentes, além de sofrerem influências de outras variáveis do processo, como temperatura e condições de atrito.

BARON - THOMPSON⁽²⁹⁾ demonstraram que a tensão de trefilação e, conseqüentemente, a potência diminuem com o aumento da temperatura e com a diminuição da velocidade de trefilação.

BARRAND - GADEAU⁽³⁰⁾, estudando o processo de trefilação de alumínio, concluíram que a velocidade de trefilação não pode ser aumentada além de certos níveis, para se obter maior produção por unidade de tempo. O motivo disso é que mesmo usando lubrificantes especiais, somente se consegue reduções pequenas por fieiras, pois elevando o número de fieiras necessárias para uma determinada redução e a velocidades elevadas o fluido lubrificante pode se decompor, perdendo a sua eficiência. Com base nesses fatos, as velocidades adotadas para a trefilação de alumínio (com diâmetros próximos a 0,02 mm) foi de 40 m/s em vez da velocidade pretendida de 58 m/s.

THOMPSON - FRANCIS⁽³¹⁾ realizaram estudo sobre a trefilação de aço, do qual, podem ser feitas algumas observações:

(1) a força de trefilação não é independente da velocidade; aumentando-se a velocidade, partindo-se da máquina parada, a força de trefilação aumenta rapidamente até praticamente se estabilizar, num valor entre 0,01 a 3 m/s;

(2) a força de trefilação pode, às vezes ser inferior ao limite de elasticidade do metal, por exemplo as taxas entre a tensão de trefilação e a tensão de escoamento para uma redução de 20%, com fieiras de aço e lubrificadas com sabão em pó, foram respectivamente 0,94 e 0,67 para metais cujo sistema cristalino, é cúbico face centrada e cúbico corpo centrado;

(3) a tensão de trefilação é proporcional à redução de área.

Segundo BONZEL⁽³²⁾ a tensão de trefilação varia como ângulo da fieira, havendo um ângulo ótimo para qual a força de trefilação é mínima. Para ângulos pouco abaixo e pouco acima desse ângulo ótimo, a força de trefilação aumenta. Geralmente para esse ângulo ótimo, a força de trefilação se situa abaixo do limite de elasticidade do metal.

3.4. Variáveis de Produto Final

As variáveis de produto final são dependentes das demais variáveis, ou seja das variáveis de matéria prima, de materiais auxiliares e de processamento. Para modificar qualquer das variáveis de produto final, é necessário portanto modificar outras variáveis. A finalidade do controle do produto final é verificar se o processo está bem programado e por conseguinte, se o resultado obtido é o esperado; os métodos de verificação das variáveis de produto final estão indicados no item 2.6.

São variáveis de produto final:

- variáveis que dependem da natureza do material: condições de redução e estrutura metalográfica;

- variáveis relacionadas com forma do material: diâmetro do fio, ovalização do diâmetro, regularidade superficial do fio, defeitos internos superficiais;

- propriedades do material: propriedades mecânicas e elétricas;

- propriedades decorrentes da fabricação: dobramento e soldabilidade.

3.5. Variáveis Escolhidas para Estudo

Das variáveis de processamento algumas foram escolhidas para estudo com a finalidade de estabelecer correlações entre essas variáveis e algumas variáveis de produto final, principalmente estrutura metalográfica, forma do material, propriedades mecânicas e elétricas do material e acabamento superficial do fio.

As variáveis de processamento escolhidas para estudo foram: velocidade de trefilação, número de fieiras por passada de fio pela máquina, e esforço de trefilação.

3.6. Referências Bibliográficas

- (1) BRESCIANI Fº,E. - Análise do Processo de Trefilação de Fios (Trabalho a ser publicado, FEC/UNICAMP).
- (2) DIETER, G. - Mechanical Metallurgy, McGraw - Hill Kogakusha, Tokyo, 1976, p. 239.
- (3) AVENAS,P. e outros - Mise en Forme des Métaux et Alliages , Central National de la Reserche Scientifique, Paris, 1976 , p.357.
- (4) Metals Hand Book, American Society for Metals,vol.1,pp.1008-1009, 1185-1186, 1197.
- (5) COHN, J.G. - Selected Properties of Gold, Gold Bulletin, vol.12, nº 1, 1979, pp.21-24.
- (6) Catálogo da S.A Philips do Brasil - Informações sobre o Produto Comercial Fieiras de Diamante, São Paulo, pp.17-18.
- (7) WISTREICH,J.G. - The Fundamentals of Wire Drawing, Metallurgical Reviews, vol.3, nº 10, 1958, pp.132-133.
- (8) GREENWALD,B.W. - Wire Drawing Lubrificants: A Review/A Preview, Wire Journal, vol.10, May 1975, pp. 74-78.
- (9) COELHO, A.R.Z; MAGNAVACCA, E.H. - Lubrificação a Seco em Trefilação de Arames de Aço-Carbono, Metalurgia, vol.31 , Outubro 1975, pp.651-657.
- (10) PAPARONI,F. - The Drawing of Copper Wire, Wire Industry; Part I, October 1966, pp. 965-973; Part II November 1966, pp.1177-1181; in ref.(4) p.75.
- (11) Idem, ibidem ref (8), p.75.
- (12) BONZEL, M. - Steel Wire: Manufacture and Properties,Engineers Book Shop, New York, 1935, pp. 94-114.

- (13) Id. ibid. ref.(7), pp.112-113
- (14) Id. Ibid. ref.(7), pp. 124-126.
- (15) THOMSON, P.F; HOGGART, J.S. SUITER, J. - Drawing Copper Wire With a Lubricant under Externally Generated Pressure, J. Inst. Metals, vol.95, 1967, pp. 152-156.
- (16) THOMSON, P.F.; HOGGART,J.S. - Drawing Copper Wire with a Pressure Tube and Independently Pressurized Lubricant, J. Inst. Metals, vol. 96, 1968, pp.225-228.
- (17) CHRISTOPHERSON, D.G.; NAYLOR, H. Promotion of Fluid Lubrication in Wire Drawing,Inst.Mech.Eng., vol.169,1955, pp.643-653.
- (18) WISTREICH, J.G. - Investigation of the Mechanics of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., vol.169, 1965, pp.654-665.
- (19) MAJORS, H. - Studies in Cold-Drawing, Part 3: Determination of Friction Coefficient, Transactions of the ASME, January 1956, pp.79-87.
- (20) MacLELLAN, G.D. - Some Friction Effects in Wire Drawing, J. Instit. Metals, vol. 81, 1952-53, pp.1-13.
- (21) YANG, C.T. - On the Mechanics of Wire Drawing, J. Eng. Industry, November 1961, pp.523-530.
- (22) CLEAVER,F.T.; MILLER,H.J. - Wire Drawing Technique and Equipment, J. Inst. Metals, vol. 78, 1950, pp.547-548,543,547,548.
- (23) Id. ibid. ref. (7), pp. 126-129.
- (24) Id. Ibid. ref. (22), pp.552-553.
- (25) Id.ibid. ref. (7), pp. 117-122.
- (26) SIEBEL, E. ; KOBITZSCH, R. - Mitt. K.W. Inst. Eisenforsh, vol.26, 1943, p.91; in ref. (3),p.116.

- (27) KORST, H. - Österr. Ing. Arch., vol. 2, 1948, p. 132; in ref. (7), pp. 117-118.
- (28) RANGER, A.E. - J. Iron Steel Inst. vol. 185, 1957, p. 383; in ref. (7), pp. 118-119.
- (29) BARON, H.G.; THOMPSON, F.C. - Friction in Wire Drawing, J. Inst. Metals, vol. 78, 1950-51, p. 447.
- (30) BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopèdia del Alumíni - Fabrication de Semiproducts (vol. 3), Ed. Urmo, Bilbao, 1968, pp. 226-231.
- (31) THOMPSON; FRANCIS, Iron and Steel Institute, 1931; in ref. (12) pp. 109-110.
- (32) Id. ibid. ref. (12) p. 111.

CAPÍTULO 4

MÁQUINA DE TREFILAR DE LABORATÓRIO

4.1. Projeto da Máquina de Trefilar de Laboratório

Para atingir o objetivo básico deste trabalho, que é o de produzir fios capilares de metais não-ferrosos pelo processo de trefilação a frio, com propriedades mecânicas, metalúrgicas e dimensões controladas, foi necessário projetar e construir uma máquina de trefilação de laboratório. Essa máquina é de pequeno porte e versátil, podendo ser usada para trefilar cobre, ouro, alumínio e outros metais não ferrosos que sejam de interesse.

Como, para os fios capilares utilizados pela indústria de dispositivos eletrônicos é de fundamental importância uma tolerância dimensional estreita e uma regularidade no diâmetro e nas propriedades mecânicas ao longo de todo o fio, foi desprezada a idéia de se construir uma máquina semelhante às industriais. Uma das razões disso é que nas máquinas industriais, sendo de um único motor de corrente alternada, com sistema de transmissão mecânico, provavelmente ocorreria transmissão de vibrações prejudiciais às severas exigências dimensionais que são feitas aos fios capilares. Outra razão é que uma máquina de trefilar industrial é projetada para trefilar um determinado metal e para um determinado número de reduções parciais. Adaptá-la para a trefilação de outro metal ou para outra série de reduções às vezes é possível, mas requer alterações sensíveis. Além disso as máquinas industriais são de grande porte, destinadas portanto a elevadas produções, exigência que ainda não é feita para fios capilares utilizados pela indústria eletrônica.

A máquina construída tem a seguinte composição: uma desbobinadora, três fieiras intercaladas com três anéis tirantes e uma bobinadora. Possui quatro motores de corrente contínua, sendo três deles acoplados aos anéis tirantes e o último à bobinadora. A fim de se tentar evitar, ou diminuir o problema de transmissão de vibrações, o controle das velocidades dos motores é feito por um sistema eletrônico, com controle individual da velocidade de cada motor e um controle geral para os três motores vinculados às fieiras.

O funcionamento da máquina é o seguinte: o fio é desenrolado de um carretel na desbobinadora, passa por uma roldana direcional, é tracionado por um anel tirante, passando através da primeira fieira onde ocorre a primeira redução. Ocorre deslizamento do fio no anel. A seguir o fio sofre mais duas reduções de modo análogo e é enrolado pela bobinadora em outro carretel. Para compensar o aumento de comprimento do fio em cada redução, o segundo motor gira a uma velocidade maior que o primeiro e o terceiro a uma velocidade maior que o segundo. Após cada passada de fio pela máquina, as três fieiras são substituídas por outras três de diâmetros menores e assim sucessivamente até se efetuar a redução total desejada.

Durante todo o processo é efetuada uma lubrificação - por aspersão no material que está sendo trefilado.

As figuras 17 e 18 apresentam respectivamente o desenho geral da máquina com detalhamento dos componentes e uma vista geral da máquina depois de acabada. A figura 19 mostra um detalhe da redução do fio. A seguir serão feitas uma descrição detalhada - dos componentes e uma análise do funcionamento da máquina de trefilar.

4.2. Desbobinadora e Bobinadora

A desbobinadora (Fig.20) é constituída por um recipiente de acrílico onde é depositado o carretel, no qual se encontra enrolado o fio inicial para a trefilação. Uma coluna tubular metálica sustenta o recipiente de acrílico e um suporte metálico onde estão afixadas algumas roldanas e uma haste de alumínio com uma roldana na extremidade que funciona como tensor do fio. O fio sai do recipiente acrílico, passa por uma roldana revestida de feltro, cuja finalidade é retirar eventuais resíduos que contaminam a superfície do fio, passa pelas roldanas e tensor do fio, e sai em direção à primeira fieira, ligeiramente tracionado, com uma tensão apenas suficiente para mantê-lo esticado.

A bobinadora (Fig.21) possui também uma coluna tubular e suporte com roldanas e tensor do fio, semelhantes aos da desbobinadora. Funciona com um movimento de rotação do eixo, onde se encaixa o carretel, e com um movimento de vai e vem do posicionamento do fio ao longo do carretel. Esse movimento de vai e vem é comandado por uma chave inversora, sendo que o percurso máximo dessa oscilação é regulado de acordo com o comprimento do carretel. O passo

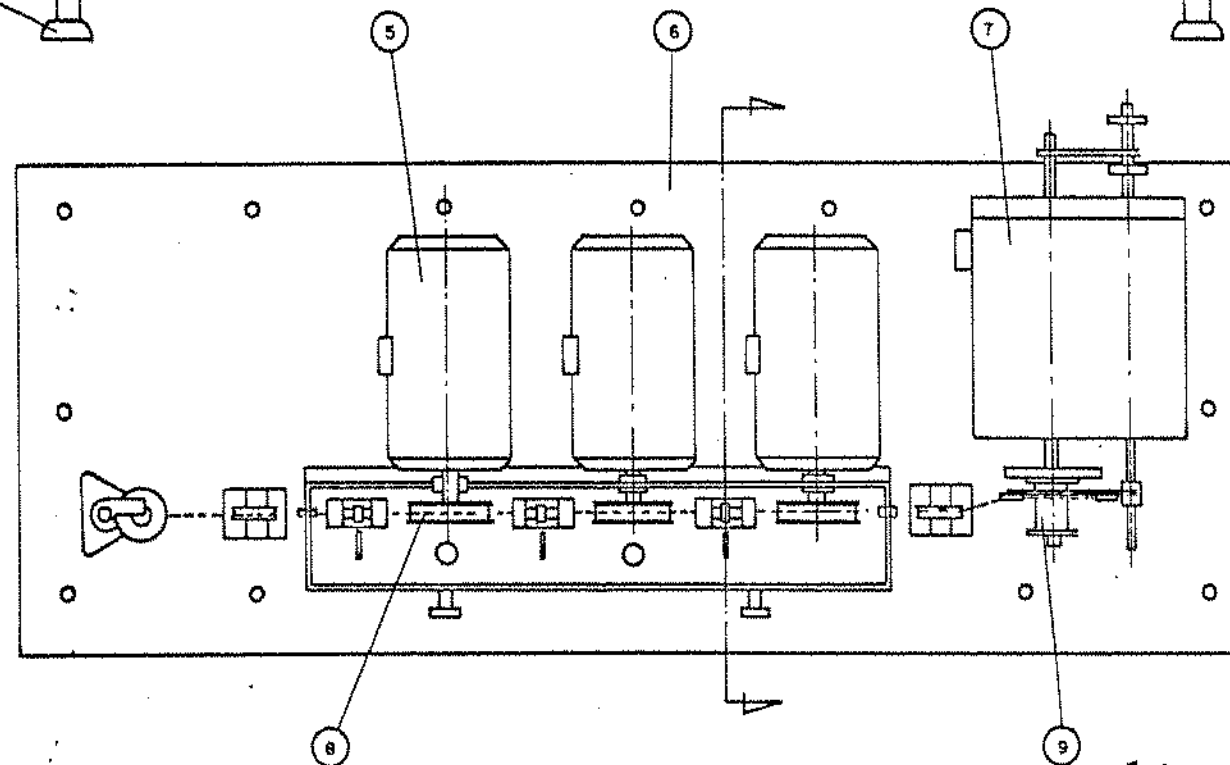
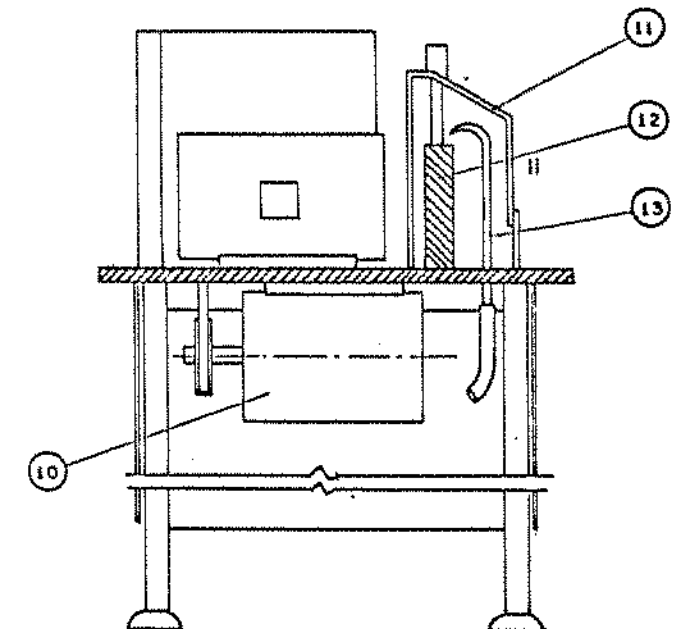
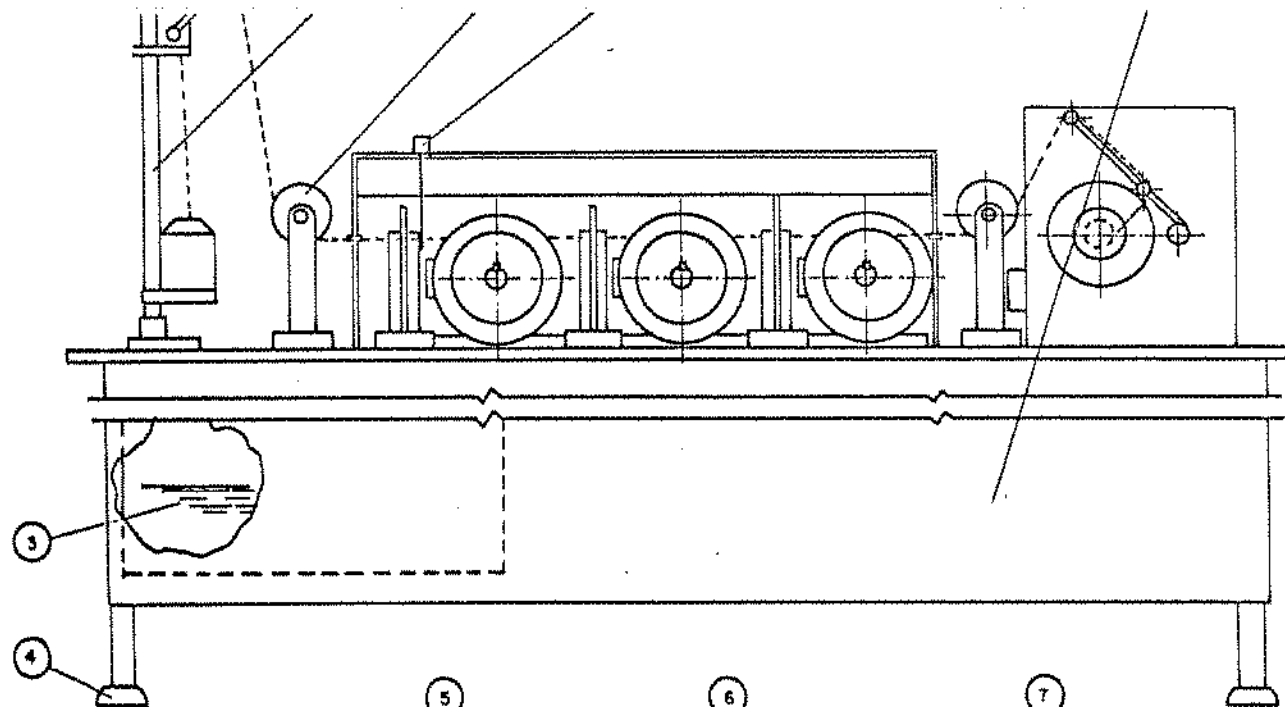


Figura 17- Máquina de trefilar de laboratório:
Detalhamento

- | | |
|----|------------------------------|
| 1 | DESBOBINADORA |
| 2 | ROLDANA DIRECIONAL |
| 3 | SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO |
| 4 | ISOLADOR DE VIBRAÇÃO |
| 5 | MOTOR C.C. DE 2HP |
| 6 | MESA |
| 7 | BOBINADORA |
| 8 | ANEL TIRANTE |
| 9 | CARRETEL |
| 10 | MOTOR C.C. DE 2HP |
| 11 | SISTEMA DE PROTEÇÃO |
| 12 | SUPORTE DA FIEIRA |
| 13 | BICO DIRECIONAL DE ÓLEO |
| 14 | PAINEL DO SISTEMA ELETRÔNICO |
| 15 | MEDIDOR DE FORÇA |

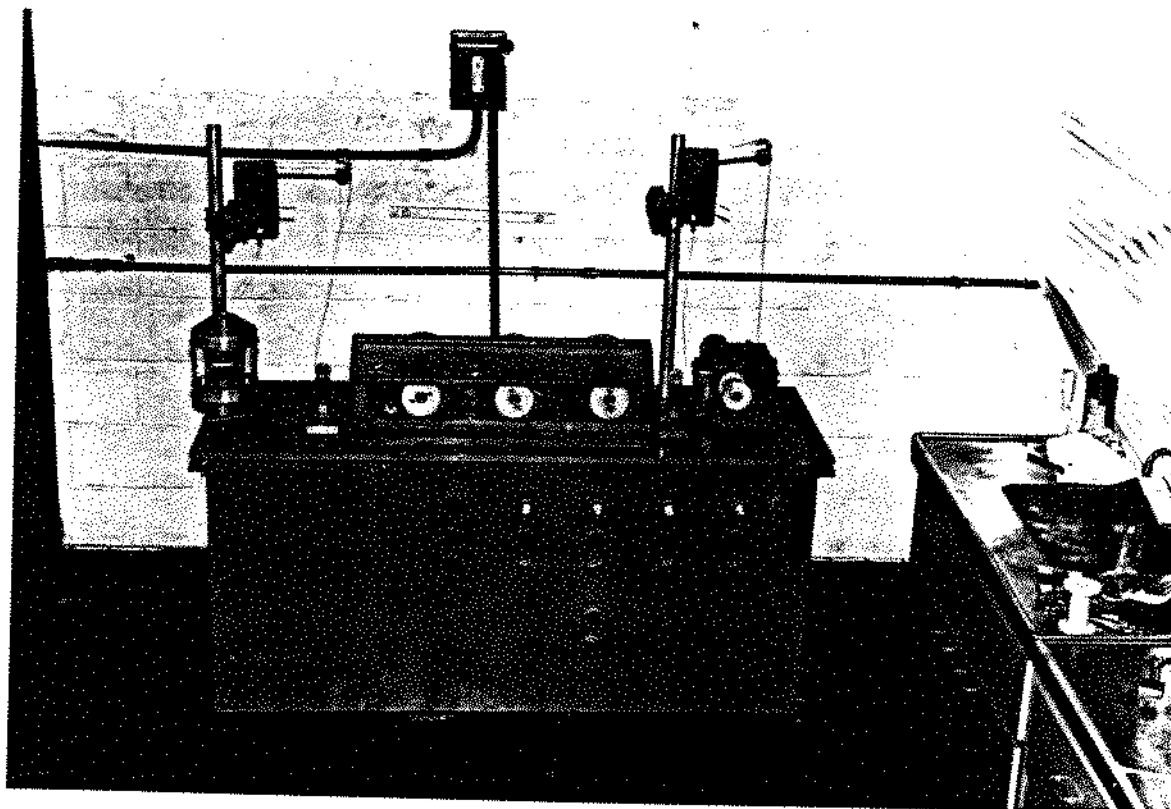


Figura 18 - Vista geral da máquina de trefilar.

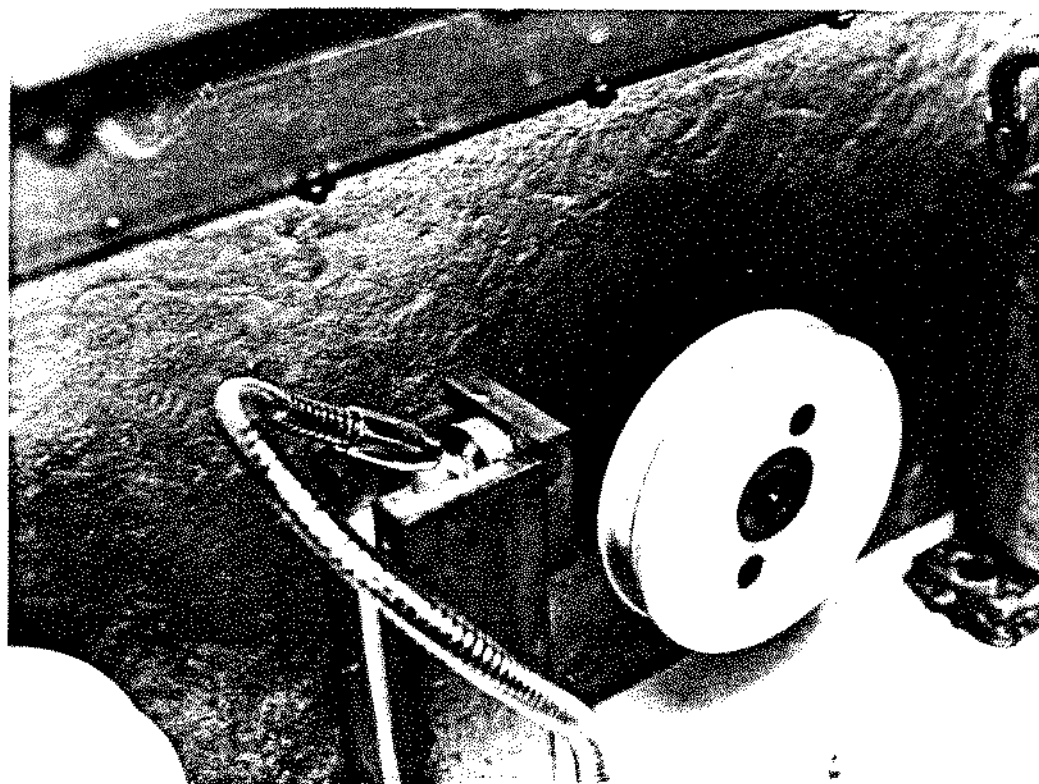


Figura 19 - Detalhe da redução do fio na fieira.

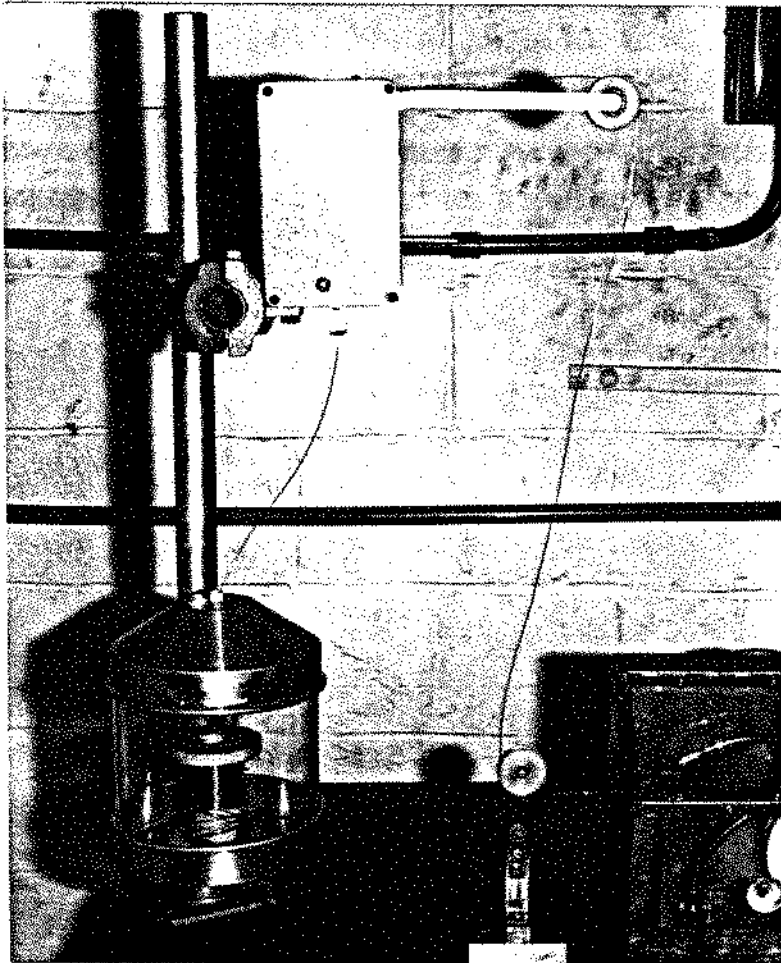


Figura 20 - Desbobinadora

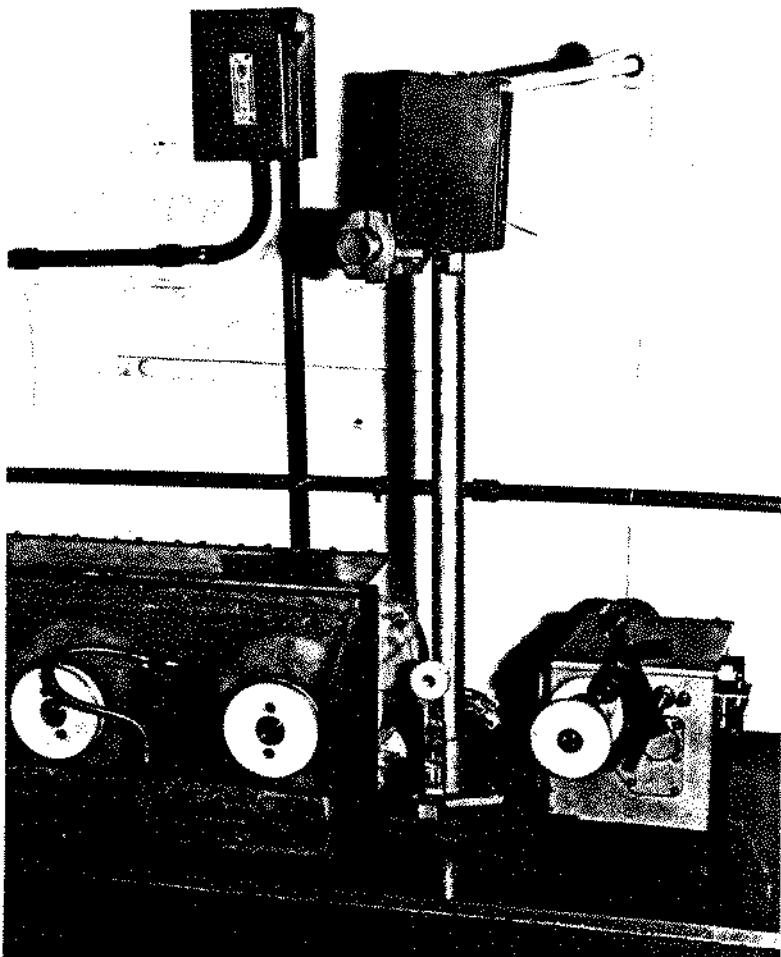


Figura 21 - Bobinadora

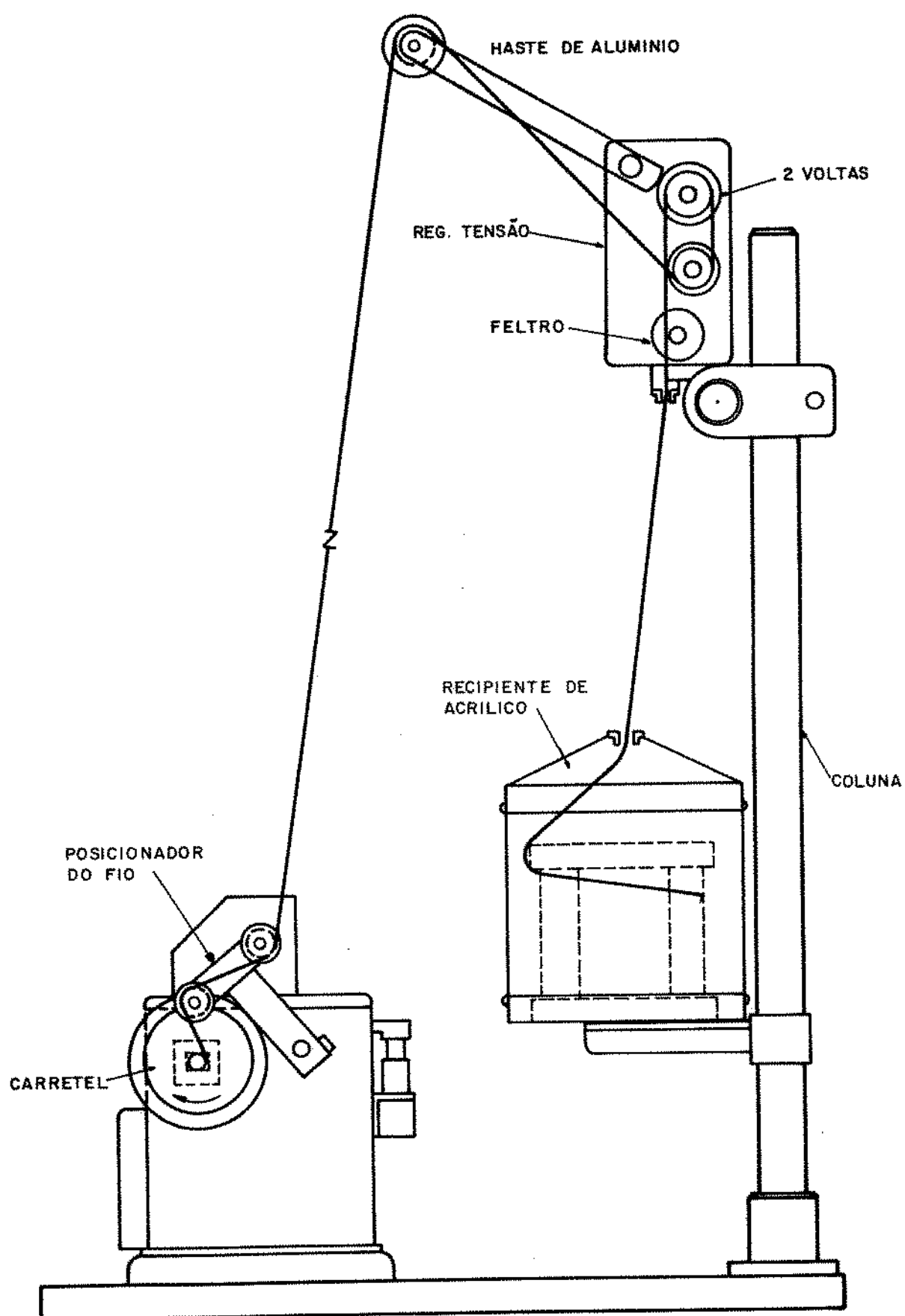


Figura 22 - Bobinadora/desbobinadora: desenho demonstrativo da passagem do fio.

de enrolamento, que deve ser entre 1,0 a 1,5 vezes o diâmetro do fio, é controlado por um sistema de três engrenagens. Um jogo completo de engrenagens permite várias combinações de modo que a variação do passo de enrolamento cubra uma grande faixa de diâmetros (de 0,8 a 0,06mm). Abaixo desses diâmetros, consegue-se passos menores ainda utilizando-se quadro engrenagens. A figura 23 mostra a disposição dessas engrenagens.

Tanto a desbobinadora como a bobinadora foram adquiridas sob encomenda de uma empresa especializada nesse tipo de equipamento.

4.3. Sistema de Lubrificação

O sistema de lubrificação é constituído de uma bomba movida por um motor de corrente alternada de 1/4 HP, com filtro para retirar a sujeira e partículas metálicas incorporadas ao lubrificante, e um reservatório para lubrificante com 30% de capacidade. O lubrificante é enviado pela bomba a três tubos de borracha, tendo um bico direcional flexível em cada extremidade, que irão lubrificar as três fieiras. O retorno ocorre através de dois tubos de borracha.

A figura 24 apresenta o esquema do sistema de lubrificação, com a disposição e a listagem dos elementos constituintes.

O conjunto bomba-reservatório filtro foi adquirido de uma empresa. O filtro original, constituído por malha de grande abertura, foi trocado por um de 400 mesh (com diâmetro de abertura de 0,037 mm), pois com o filtro inicial permaneciam no lubrificante partículas muito finas do metal trabalhado.

O lubrificante utilizado foi uma suspensão de água com 2,0% de TREFIL 1269, lubrificante comercialmente conhecido, à base de óleo solúvel, considerado pelas empresas produtoras de fios como um dos mais adequados para a trefilação de fios finos e capilares de metais não ferrosos.

4.4. Motores

Os motores utilizados para movimentar os anéis e a bobinadora são de corrente contínua do tipo "Shunt", de 2HP, 3000 rpm, alimentação geral de 220 volts, monofásicos, 60 ciclos. Foram superdimensionados porque pretende-se atingir, em uma etapa posterior a altas velocidades de trefilação. As figuras 25 e 26

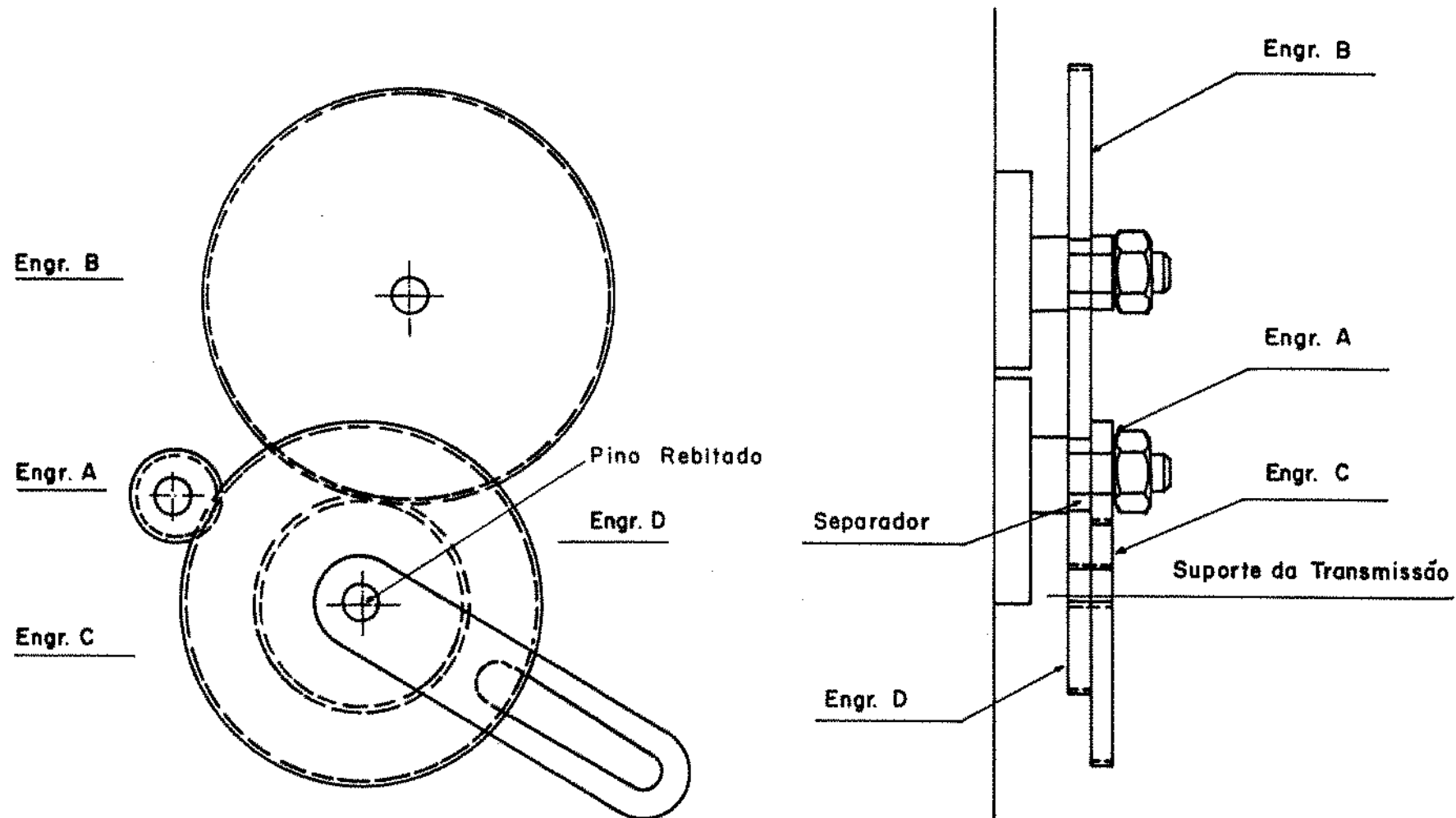
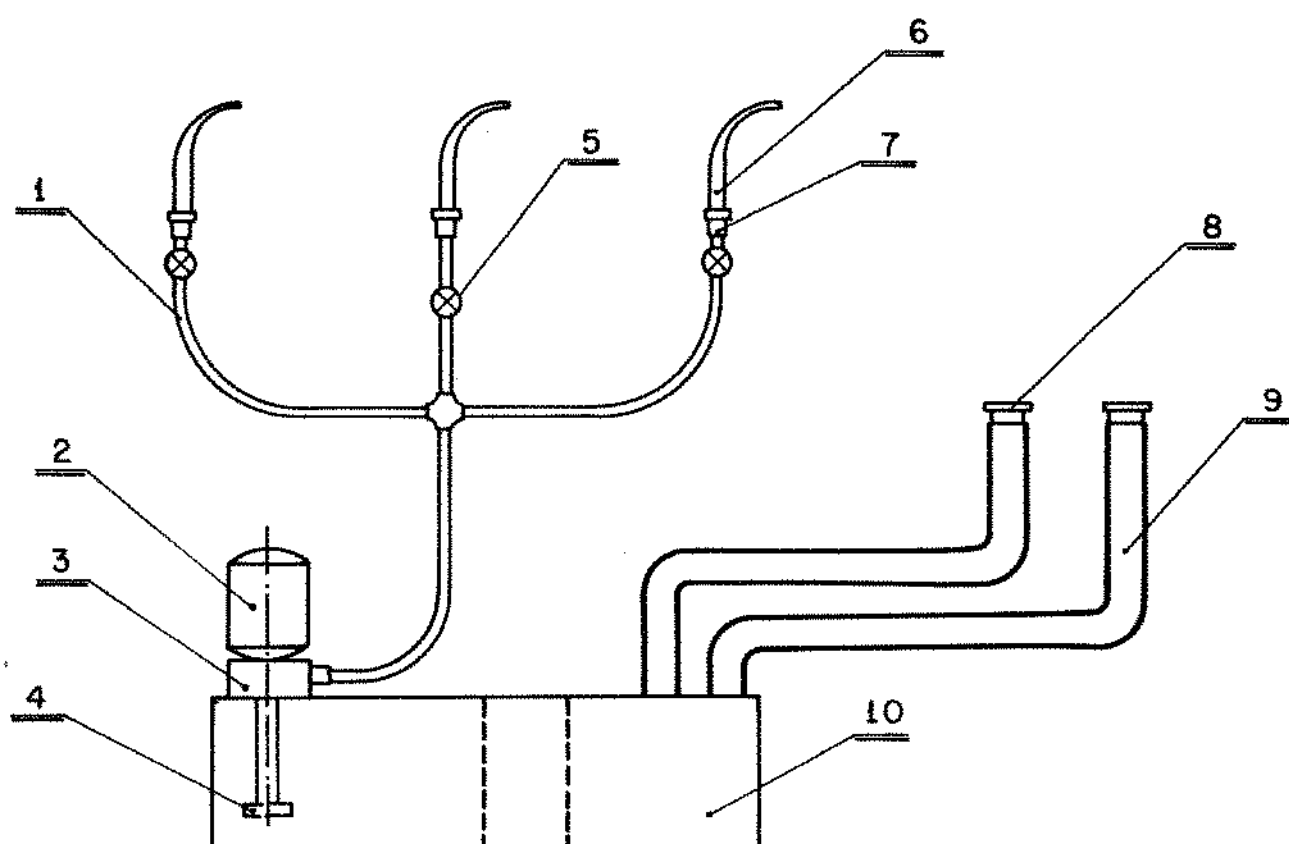


Figura 23 - Detalhe da montagem das engrenagens da bobinadora.



1,9	TUBOS DE BORRACHA
2	MOTOR
3	BOMBA
4	FILTRO
5	VALVULA
6	BICO FLEXIVEL
7,8	CONEXÕES
10	RESERVATORIO

Figura 24 - Sistema de lubrificação da máquina de trefilar.

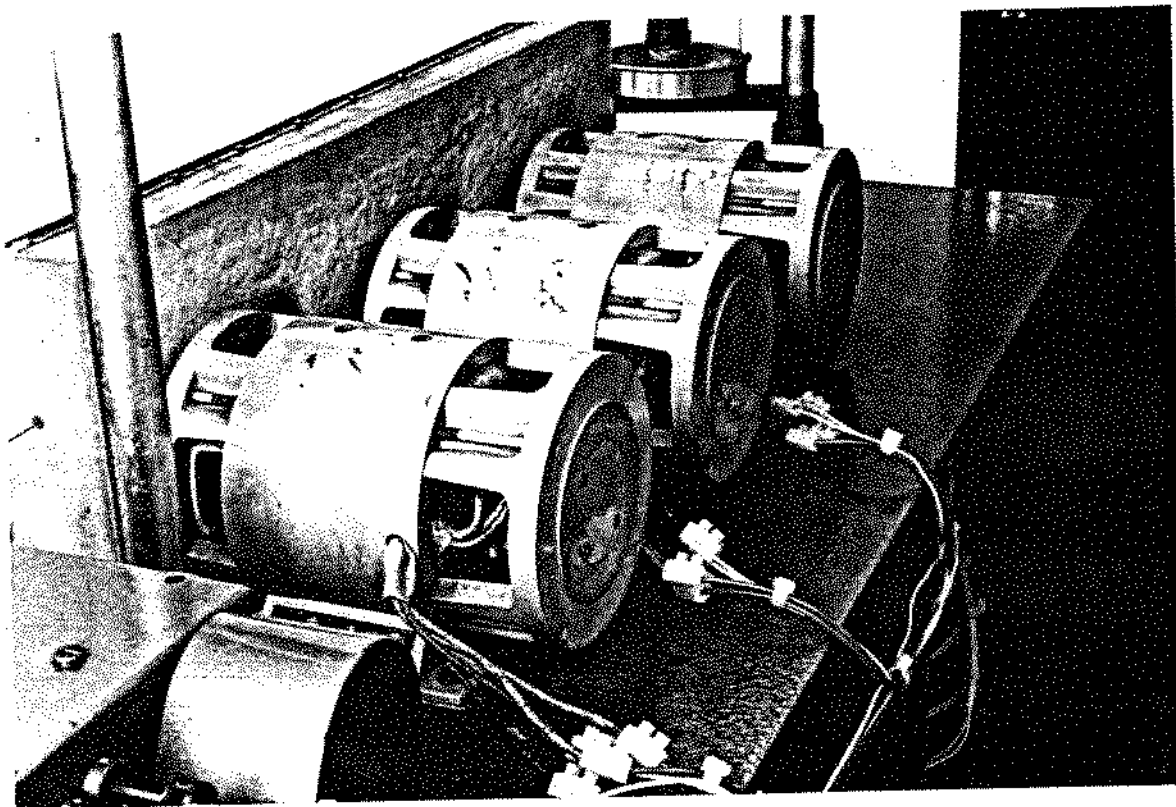


Figura 25 - Localização dos motores acoplados aos anéis tirantes.

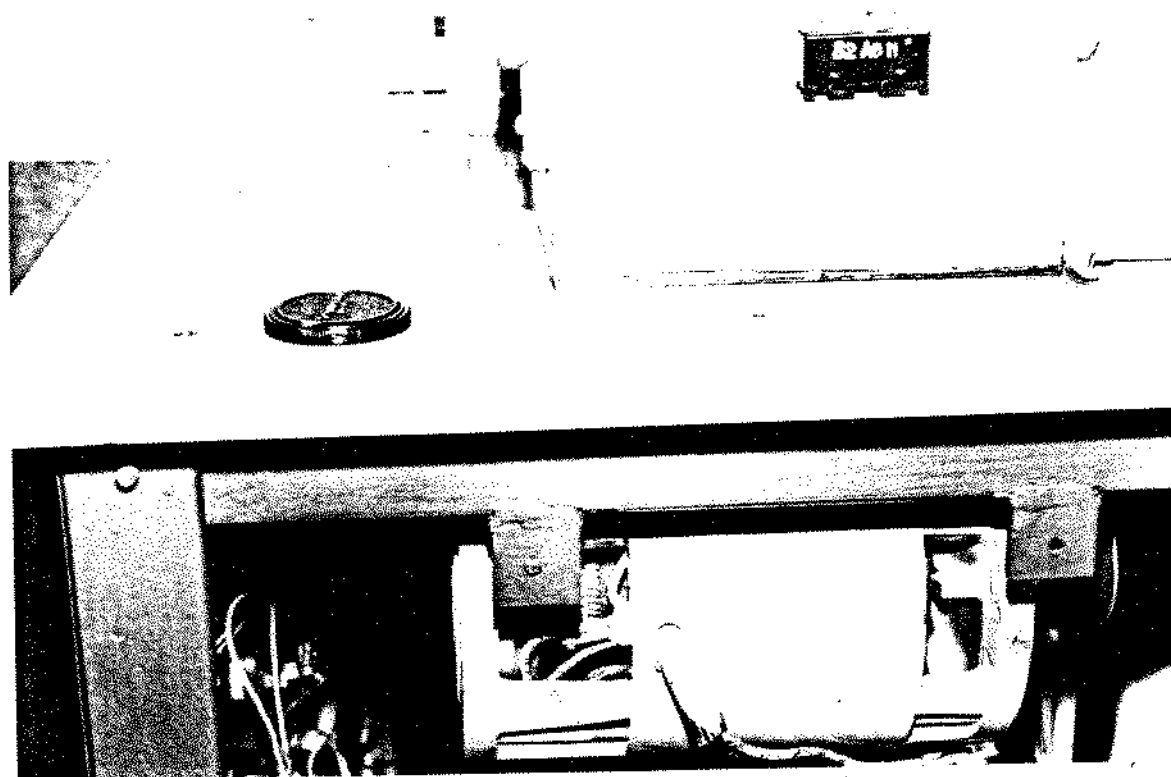


Figura 26 - Localização do motor acoplado a bobinadora.

mostram a localização dos motores na máquina.

As características dos motores, de acordo com o fornecedor, são as seguintes:

- (1) Regulagem de velocidade: 1% com variação de 1 a 100% da carga através da realimentação taquimétrica fotoelétrica.
- (2) Faixa de regulagem: de 0 a 180 volts de corrente contínua (armadura).
- (3) Tensão de campo: 190 volts de corrente contínua (ajustável).
- (4) Aceleração logarítmica : 5 segundos.
- (5) O sistema de proteção inclui:
 - (a) limite de corrente contínua ajustável de 0 a 150% do nominal;
 - (b) velocidade máxima ajustável;
 - (c) proteção contra baixa tensão de linha;
 - (d) proteção contra sobretensão da linha;
 - (f) proteção contra falta de energia.

4.5. Sistema Eletrônico para Controle de Velocidades

O controle das velocidades dos motores é efetuado por um equipamento eletrônico com controle individual para cada motor e controle geral para os três motores acoplados aos anéis tirantes (Fig.27). Desse modo, é possível trabalhar com qualquer motor separadamente, ou dois deles, ou com os três motores. Através do controle geral é possível variar as velocidades dos três motores, mantendo a proporção entre as velocidades dos motores, que devem ser diferentes devido à deformação plástica do fio.

O sistema de controle de velocidades foi adquirido sob encomenda, de uma empresa do ramo.

Na figura 28 pode-se observar à esquerda o circuito do controle individual de um dos motores e à direita a disposição dos circuitos dos três motores na placa de montagem.

O controle de velocidades individual de cada motor é feito variando-se o nível da tensão contínua (DC) sobre o rotor. Essa variação abrange a faixa de 0 a 180 VDC (volts em corrente contínua). A variação de tensão é feita por intermédio de dois SCR (diodos controladores de silício), que formam uma ponte

retificadora juntamente com dois diodos retificadores. Um circuito eletrônico atua sobre os interruptores ("gates") dos SCR, controlando a potência a ser fornecida para o motor e consequentemente, variando a tensão eficaz sobre o motor (de 0-180 VDC).

A figura 29 apresenta o esquema do circuito total de controle de velocidades, inclusive com o controle geral.

4.6. Estrutura

Foi construída uma mesa suporte para a máquina de tre-filar, cuja estrutura foi feita de cantoneiras de aço de abas iguais de 8,8 mm de espessura e o tampo foi construído a partir de uma chapa de aço 1020 com a mesma espessura da aba (Fig.30).

Sobre o tampo foram alojados todos os componentes, exceto a bomba e o reservatório de lubrificante e o sistema eletrônico de controle, os quais foram colocados na parte inferior da mesa. Na figura 17 pode-se observar a localização da bomba e reservatório e do sistema eletrônico de controle na máquina.

A mesa foi revestida, em suas partes laterais, com chapas de aço esmaltadas, para conferir melhor aspecto estético à máquina e protegê-la contra corrosão.

Na parte lateral anterior da mesa foi colocado com um painel de controle para os diversos componentes da máquina, com uma chave magnética geral, uma chave liga-desliga para cada motor e para o sistema de lubrificação, três potenciômetros para o controle geral dos motores e luzes indicativas do funcionamento de cada motor e do sistema de lubrificação.

4.7. Sistema de Proteção

Foi construído um sistema de proteção (Fig.31) cobrindo toda a região de alcance do lubrificante, com as finalidades de: proteger os motores dos respingos do lubrificante, proteger o operador no caso de ruptura do fio e canalizar o lubrificante para o retorno ao reservatório, evitando assim o seu desperdício.

Os materiais utilizados para a construção do sistema de proteção foram os polímeros: poliéster insaturado reforçado com fibra de vidro nas partes laterais posteriores e parte superior e acrílico na parte lateral anterior. A razão de não se usar o primeiro material em toda a extensão do sistema de proteção reside no fato dele ser translúcido, portanto atrapalha a visibilidade do operador.

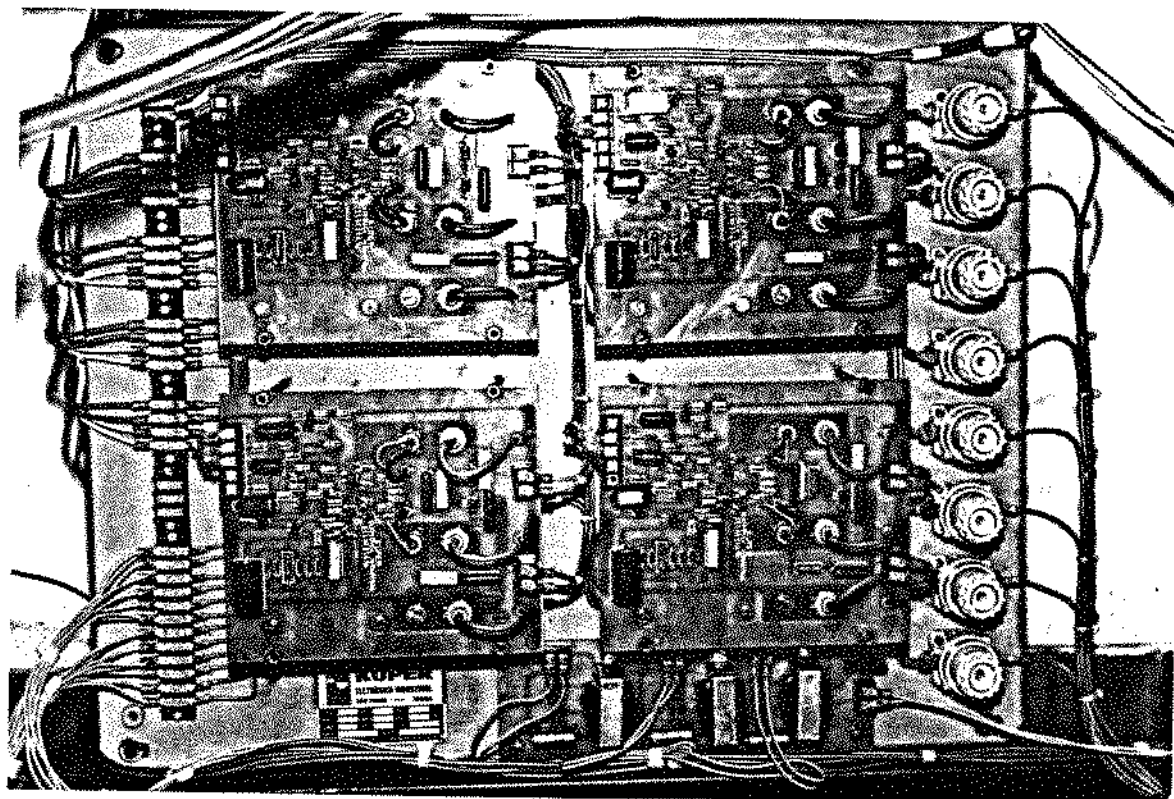
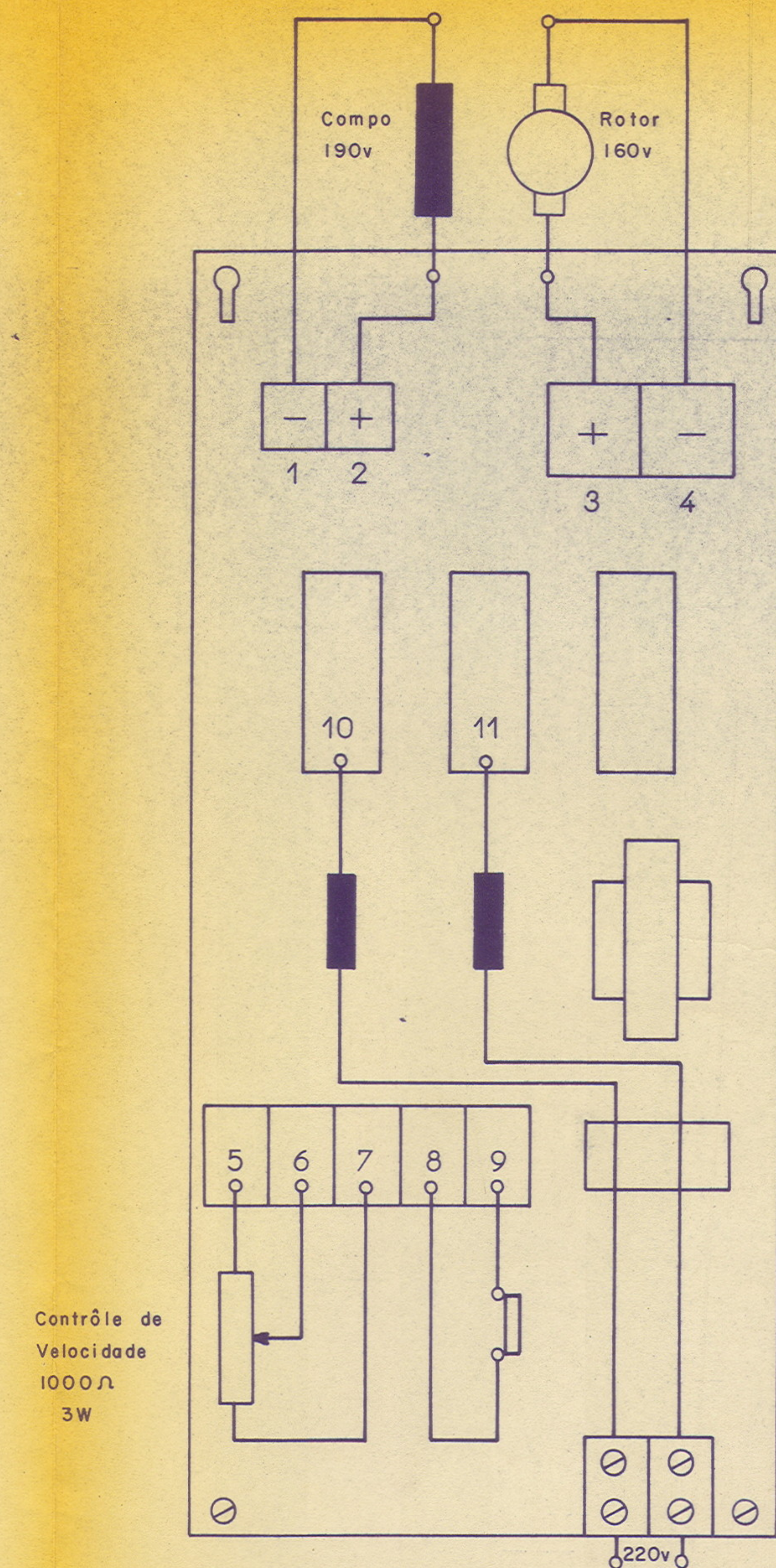
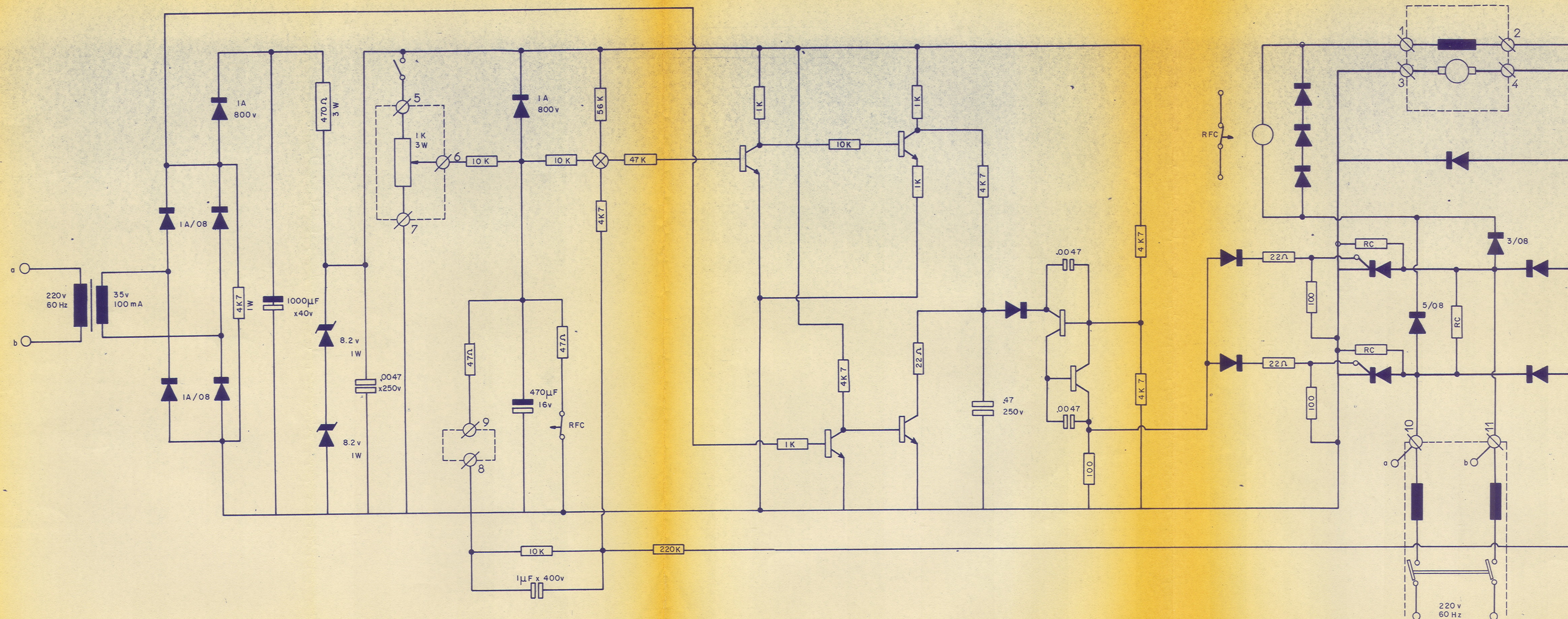


Figura 27 - Sistema eletrônico de controle de velocidades.



PROJETO TELEBRÁS-MGE DEM-FEC-UNICAMP

Nome _____
Fig. 28 **CONTROLE DE VELOCIDADES DA TREFILADORA**

Esc.	Data	Material	Ref.	Cod.
------	------	----------	------	------

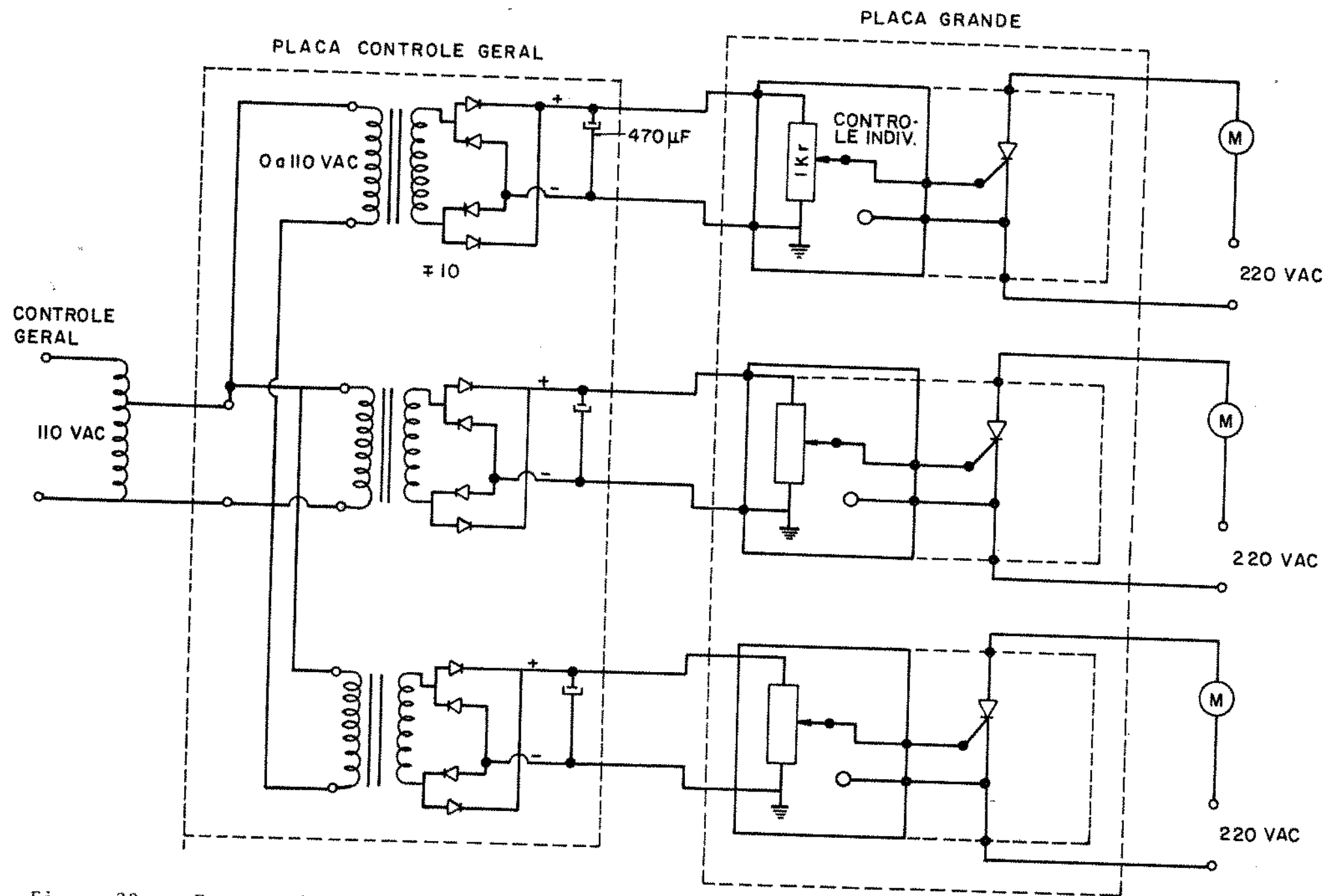


Figura 29 - Esquema do controle de velocidades individual e geral.

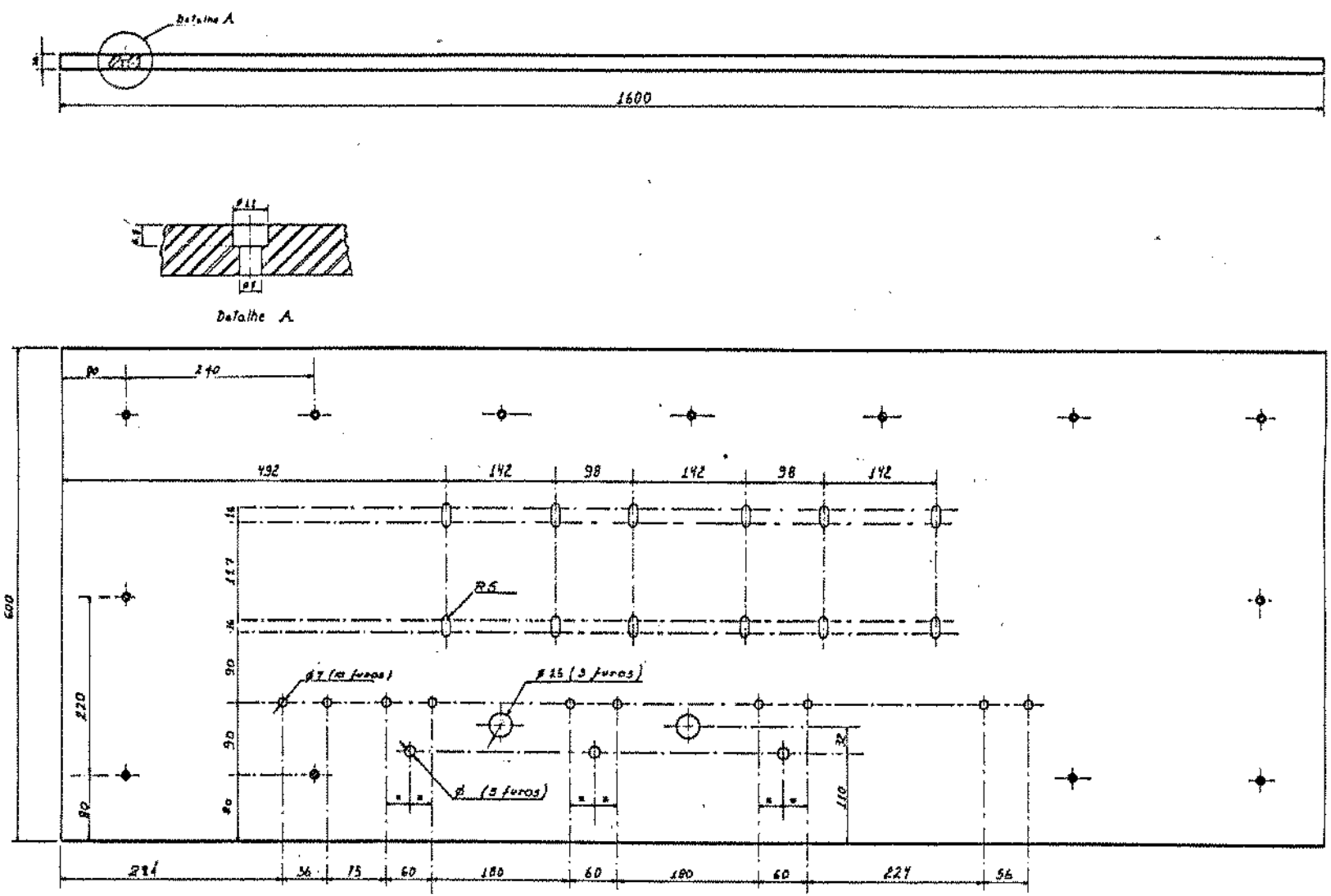


Figura 50 - Tampo da mesa da máquina de trefilar (des. reduz. - tam. orig. em mm; 420x594).

PROJETO TB/MGE			
TCJ-144/76			
Tampo da mesa			ADNT 1020
Esc.	1:1	Des. N° 2 Rev. A2/0001	

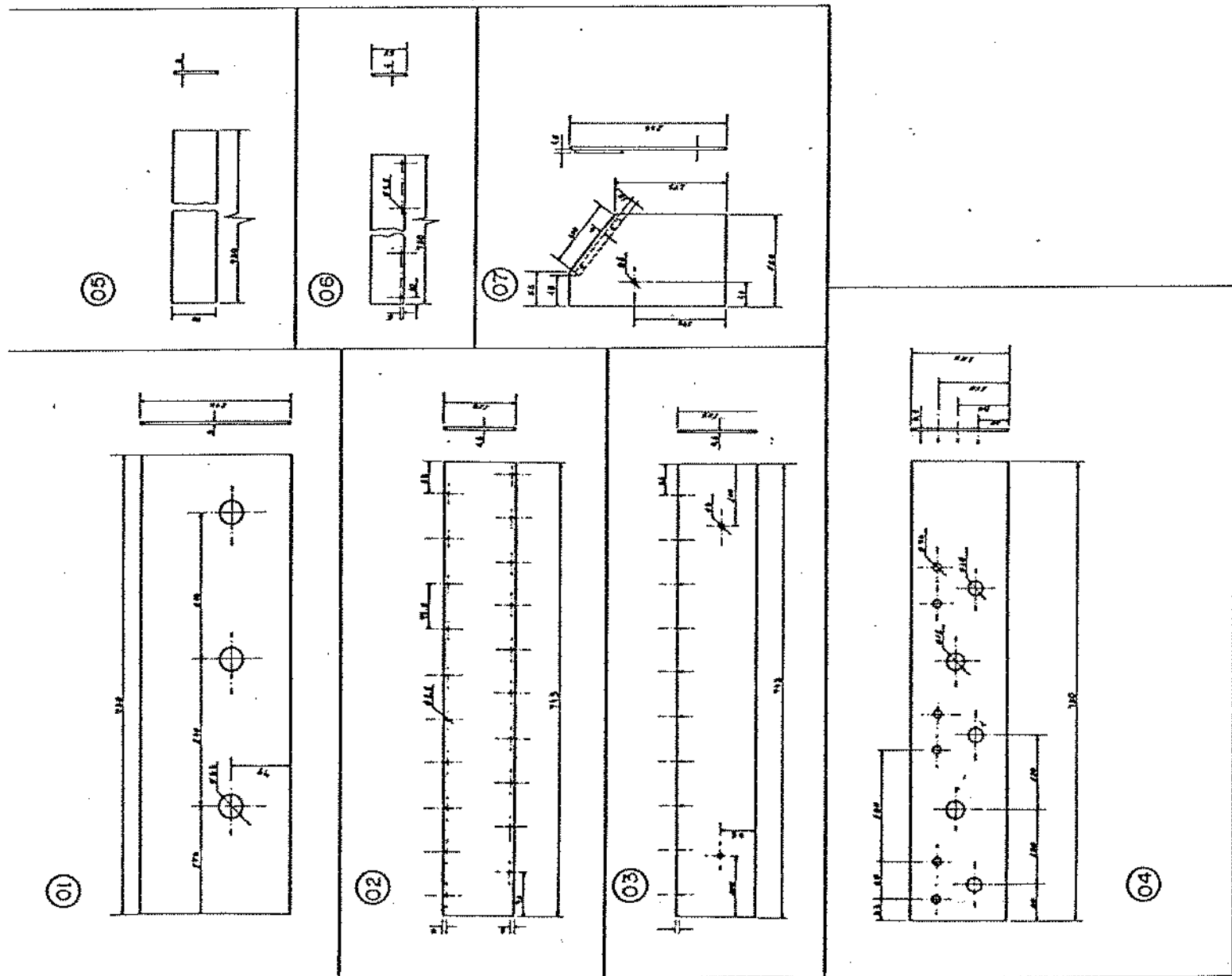


Figura 31 - Sistema de proteção (des.redz. tam. orig. em mm;420x594).

1 00 00

Nº	Qtd	ESPECIFICAÇÕES	MAT.	R/M.	Qtd
01	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
02	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
03	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
04	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
05	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
06	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
07	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
08	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
09	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8
10	1	CAPIA - DIMENSÃO: 1,3 mm	ALU.	0,8	0,8

PROJETO TELEBRAS-MGE DEM-FEC-UNICAMP

Nome: _____

Esc. () Data: _____ Material: _____

Rev. A1/0001 Cód. A1/0001

4.8. Acessórios

Além dos componentes já citados, uma série de outros componentes secundários devem ser mencionados, pois são de fundamental importância para o bom funcionamento da máquina:

(a) roldanas direcionais - são construídas em "nylon" e tem a finalidade de conduzir o fio da desbobinadeira para a primeira fieira e do último anel tirante para a bobinadeira;

(b) suportes para as roldanas direcionais - são construídas em aço 1020, com altura regulável. A figura 32 apresenta a montagem de uma roldana direcional sobre o seu suporte;

(c) anéis tirantes - esses componentes, construídos em "nylon" são afixados nos eixos dos três motores utilizados para a trefilação. O fio é enrolado no anel tirante, que gira junto com o motor, provocando o aparecimento da força de tração que causa a deformação do metal. A figura 33 mostra um anel tirante juntamente com os acessórios necessários para a sua montagem;

(d) porta-fieiras (Fig.34) - são construídas em aço 1020 e tem a finalidade de acomodar as fieiras durante a trefilação. São peças simples, permitindo que as fieiras possam ser trocadas com facilidade. Uma das três porta-fieiras está ligeiramente modificada para acomodar o dispositivo de medição de forças de trefilação (Fig.35). Como as porta-fieiras entram em contato com o lubrificante, sofreram um processo de revestimento galvanoplástico (cadmiação), para evitar sua corrosão;

(e) carretéis - foram construídos carretéis em dois tamanhos com o perfil típico da figura 14. Para a trefilação de fios com diâmetros entre 1,0 a 0,160 mm utilizou-se o primeiro tamanho de carretel (dimensões em mm: a=90, b=70, c=20, d=47, e=75). Abaixo desse diâmetro a força necessária para desenrolar o fio era muito grande, da ordem de grandeza da força de ruptura do fio, sendo portanto necessário utilizar-se um carretel menor e mais leve (dimensões em mm a=50, b=46, c=35, d=35, e=35).

(f) isoladores de vibração - a máquina está apoiada em quatro isolantes da vibração com a finalidade de isolar o equipamento das vibrações externas.

4.9. Dispositivo de Medição de Força ^(2,3)

Para medir as forças de trefilação foi construído um

Figura 32 - Sub.conjunto suporte de roldana (des.redez. - tam. orig. em mm:297x420).

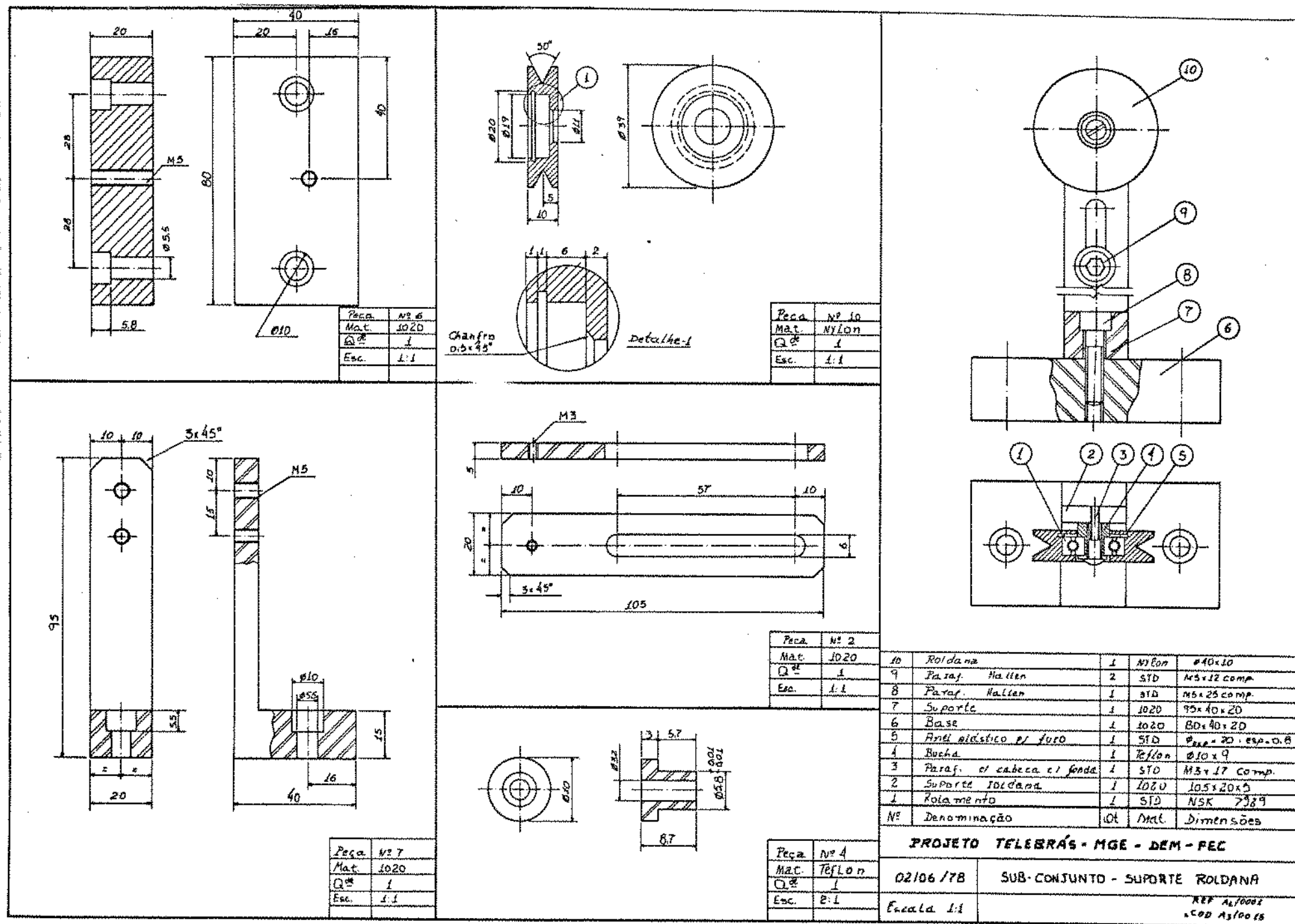


Figura 33 - Sub-conjunto anel tirante (des.reduz.-tam. orig. em mm: 297x420).

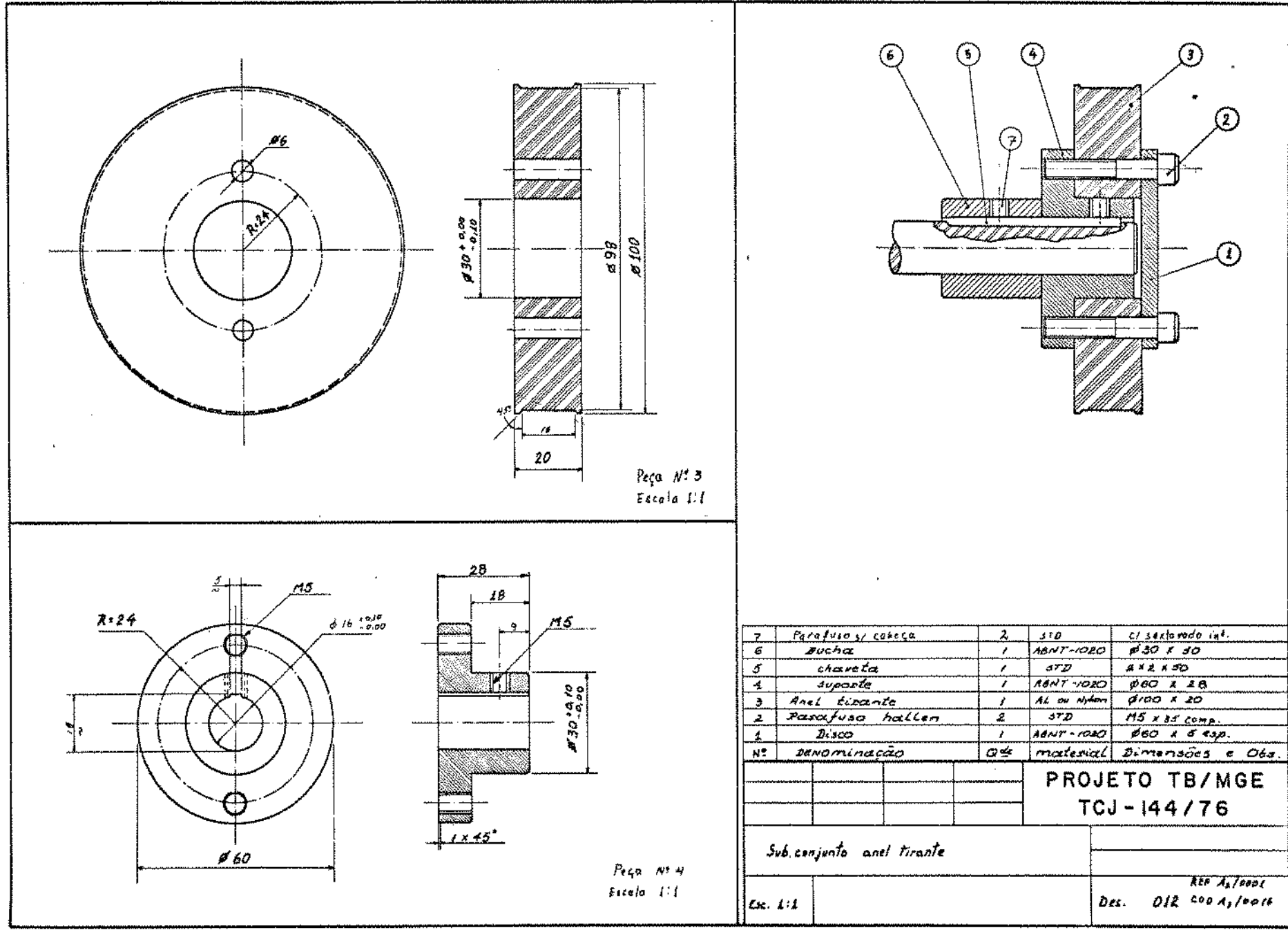
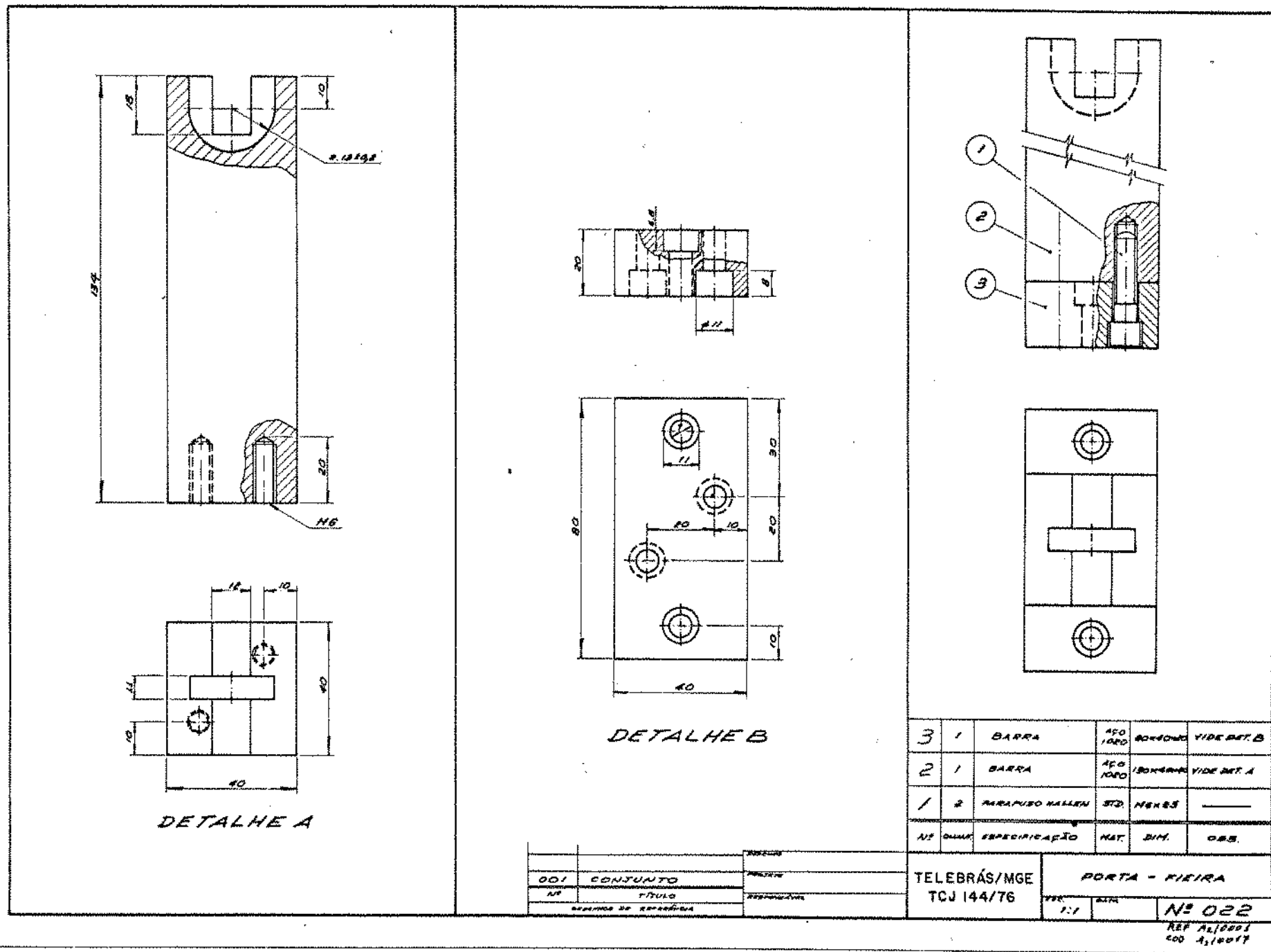


Figura 34 - Sub-conjunto porta-fieira (des. reduz. - tam. orig. em mm: 297x240).



dispositivo mecânico (Fig.35), que funciona da seguinte maneira: a fieira, que permanece solta no suporte, é puxada pelo fio de encontro a um tubo metálico; em consequência ocorre um deslocamento do tubo que, por sua vez, movimenta uma haste flexível na qual estão colocados extensômetros elétricos. Para diminuir o atrito entre o tubo metálico e o suporte da fieira, foi colocada uma bucha de "teflon" envolvendo o orifício por onde o tubo desliza; além disso o tubo foi lubrificado. A haste flexível está apoiada na mesa da máquina de trefilar. Os extensômetros estão ligados a uma ponte de "wheatstone", e a leitura da tensão, que é feita num amplificador, permite a sua conversão para deformação e força.

O método empregado na medição de força baseia-se no princípio da variação da resistência elétrica de um fio, em consequência da variação de seu comprimento sob a ação dessa força. O extensômetro é constituído fundamentalmente de um fio metálico, colado entre duas folhas de papel, o qual é colado sobre o objeto a ser testado. Uma vez colado, ele se torna efetivamente uma parte dessa superfície sofrendo as mesmas deformações da superfície do objeto.

O circuito elétrico empregado foi a "ponte de Wheatstone completa", circuito onde todos os ramos apresentam extensômetros. (Fig. 36). Aplicando-se uma força F na extremidade da haste engastada, esta sofrerá uma flexão, acarretando tensões de tração e de compressão na secção da peça, em consequência os extensômetros sofrerão variação na resistência elétrica, desbalanceando a ponte. Essa diferença de tensão será registrada pelo aparelho de leitura (ponte amplificadora).

Pode-se determinar uma relação entre a força aplicada (P) e a tensão registrada (ΔV) da seguinte forma:

(1) sejam: $\epsilon_1 = \epsilon_3$ = deformação específica do extensômetro devido à tensão de tração

$\epsilon_2 = \epsilon_4$ = deformação específica do extensômetro devido à tensão de compressão e sabe-se que:

$$\epsilon_1 = \epsilon_3 = -\epsilon_2 = -\epsilon_4$$

como

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\text{e } \sigma = \frac{M}{J}y, \text{ onde } J = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{secção retangular}) \text{ e } y = \frac{h}{2},$$

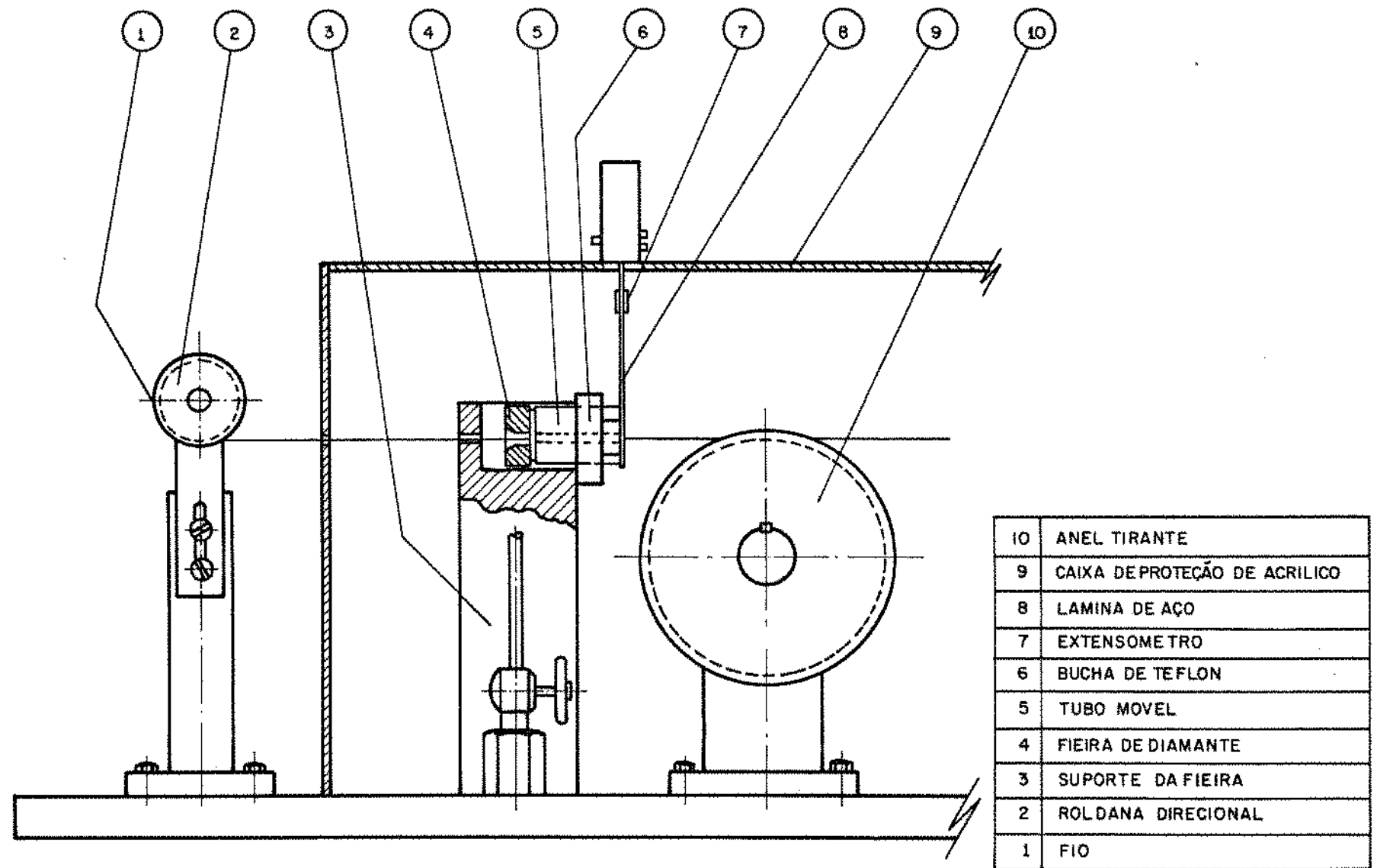
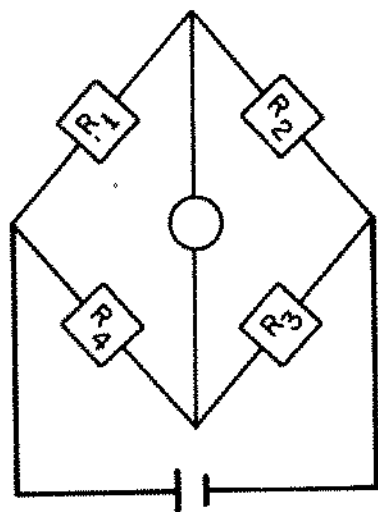
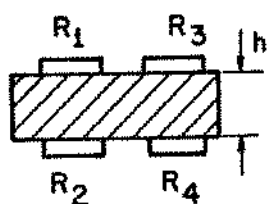


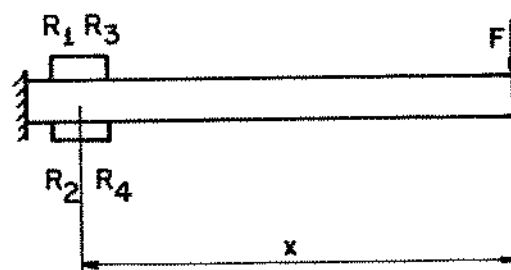
Figura 3 5 - Dispositivo de medição de forças de trefilação.



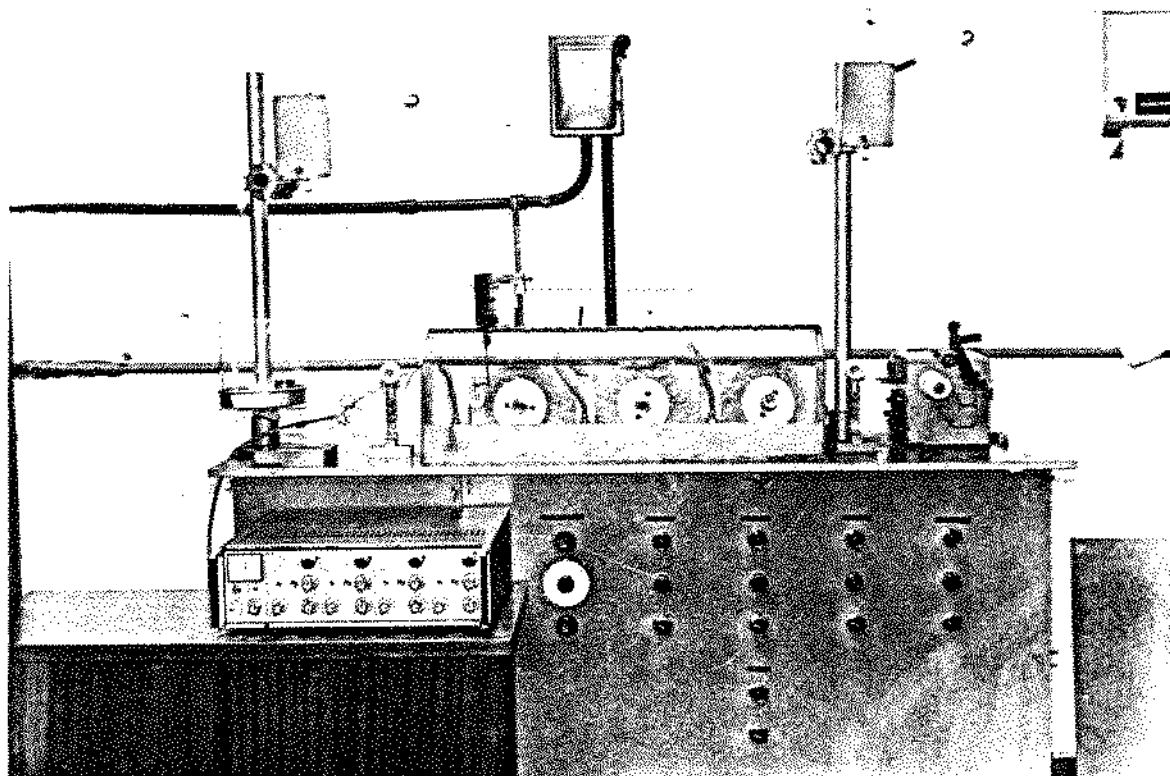
A



B



C



D

Figura 36 - A - Ponte de "Wheatstone" completa; B- representação das resistências na ponte; C - colocação da ponte na haste flexível; D - vista geral da máquina com dispositivo de medição de forças.

portanto: $\sigma = \frac{6M}{bh^2E}$.

Obtém-se a expressão: $\epsilon = \frac{6Fx}{bh^2E}$ (eq.1) ,

sendo: E = módulo de elasticidade do metal da haste;

M = momento fletor da haste;

y = flexão da haste;

(2) a tensão aplicada no galvanômetro (V_g) é dada por:

$$V_g = i_g R_g = \frac{V(R_1 R_3 - R_2 R_4) R_g}{R_2 (R_g + R_3 + R_4) (R_1 + R_4) + R_4 (R_1 R_3 - R_2 R_4)}$$

mas, utilizando-se um aparelho onde a resistência interna é alta, $R_g \gg R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, se obtém:

$$V_g = V \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] ;$$

diferenciando-se a expressão anterior se obtém:

$$\Delta V_g = \frac{V}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right]$$

e definindo a constante de sensibilidade de um extensômetro como o quociente:

$$k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\epsilon}$$

onde, ΔR = variação de resistência do extensômetro;

R = resistência elétrica inicial do extensômetro;

ϵ = deformação específica sofrida pelo extensômetro.

tem-se : $\Delta V_g = V k \epsilon$ (eq.2)

(3) substituindo a equação 1 na equação 2 :

$$F = \frac{6h^2 E \Delta V}{6kxV} , \text{ ou } F = K \Delta V \text{ onde } K = \frac{bh^2 E}{6Vk}$$

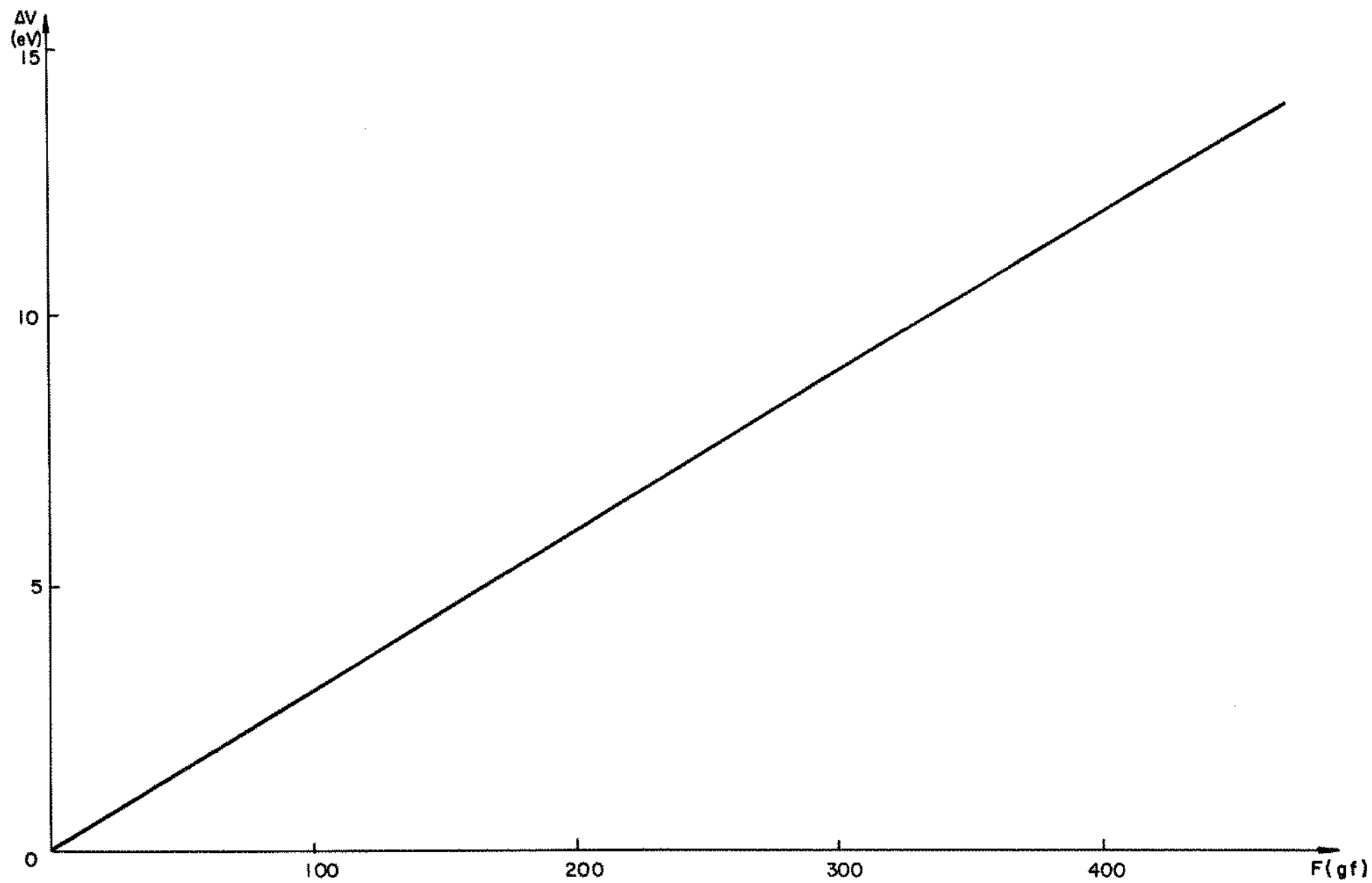


Figura 37 - Aferição do dispositivo de medição de forças.

Observa-se que a força é diretamente proporcional a diferença de tensão. Isso foi aproveitado para construir um gráfico de aferição, aplicando forças conhecidas na haste, verificando a diferença de tensão causada por cada uma delas. Esse gráfico pode ser observado na figura 37.

4.10. Fieiras e Programa de Redução (4)

Foi efetuado um programa de redução para a máquina de trefilar, através do qual é possível se obter um fio de cobre de 0,025 mm de diâmetro partindo-se de um fio com o diâmetro de 1,0 mm. Para calcular o número de reduções parciais necessárias para se obter a redução total desejada, foi fixada a redução de área para cada passe em 18% para fieiras com diâmetros de saída entre 1,0 e 0,05 mm e em 14% para fieiras com diâmetros menores. Embora para o cobre as reduções usuais de área por passe em trefilação sejam de 20 a 25% , em se tratando de fios finos e capilares, recomenda-se diminuir essa taxa, com o intuito de se obter maior resistência mecânica e maior ductilidade do fio; desse modo o fio resiste a maior número de reduções sem recozimento intermédio.

A fim de garantir que o diâmetro final do fio seja exatamente o desejado, recomenda-se quando se efetuar os cálculos da sequência de reduções, que se parta do fim para o início, ou seja, a partir da área do fio final adiciona-se o aumento de área fixado e calcula-se o diâmetro de saída da fieira antecessora e assim por diante. Esse mesmo cálculo pode ser feito a partir do alongamento, verificando-se qual a porcentagem de alongamento correspondente ao aumento de área fixado. Através de um cálculo semelhante ao anterior se obtém também a sequência de fieiras desejada.

Como resultado dos cálculos feitos, para efetuar a redução total do fio de 1,0 para 0,025 mm de diâmetro, obteve-se um programa de redução com 39 reduções parciais ou 13 passadas de fio pela máquina. Na tabela XXI pode-se observar os detalhes desse programa de redução.

As fieiras de diamante adquiridas possuem o perfil adequado para a trefilação de cobre, com as seguintes características:

- Ângulo de entrada: $35^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Ângulo de redução : $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$

Tabela XXI - Programa de Redução de Diâmetro		
Nº de Passadas de Fio	Fieira Nº	Diâmetro de Saída (µm)
1	1	920
	2	836
	3	758
2	4	689
	5	623
	6	565
3	7	513
	8	465
	9	422
4	10	383
	11	347
	12	316
5	13	286
	14	260
	15	236
6	16	213
	17	194
	18	176
7	19	160
	20	145
	21	131
8	22	119
	23	108
	24	98
9	25	89
	26	81
	27	73
10	28	66
	29	60
	30	55
11	31	50
	32	46
	33	42
12	34	39
	35	36
	36	33
13	37	31
	38	27
	39	25
Observação: O diâmetro inicial do fio é de 1,0 mm (ou 1000 µm), e as reduções de área por passe são de 18% para fios de 1000 a 50µm e 14% para fios mais finos.		

- Ângulo de saída : 35° a 2°
- Comprimento da região cilíndrica: 0,2 a 0,4 do diâmetro do orifício.

Observa-se que essas características são adequadas para um metal dútil como o cobre, que suporta grande redução de área. Comparando-se esses valores com a figura 11 (pag.) que apresenta o perfil de fieiras de diamante para vários metais, verifica-se que estão de acordo com os valores recomendados para trefilar cobre.

4.11. Análise do Funcionamento da Máquina

A máquina, no seu projeto original, apresentou desempenho satisfatório, sendo possível a trefilação usando um motor, dois motores e três motores. Os resultados experimentais serão discutidos posteriormente. Será descrito a seguir o procedimento para o funcionamento da máquina, apontando-se alguns defeitos encontrados e apresentando-se algumas sugestões para atenuar os defeitos, melhorando o desempenho da máquina de trefilar.

4.11.1. Procedimento para o Funcionamento da Máquina

Primeiramente prepara-se a emulsão lubrificante que é colocada no reservatório.

Coloca-se o carretel com o fio inicial na desbobinadeira; a extremidade do fio é colocada através das roldanas da desbobinadeira, na roldana direcional e introduzido no sistema de proteção. A seguir, afina-se a extremidade do fio. Esse afinamento pode ser feito por dois métodos: através de uma cuba eletrolítica, onde o cobre funciona como ânodo e uma barra de tungstenio atua como cátodo, ou com método manual, com lixas. O primeiro método é o mais adequado pois é menos trabalhoso, porém ainda não foi utilizado porque se encontra nos primeiros estágios da utilização da máquina e a quantidade de fio trefilado não é muita. Pretende-se adotar esse método futuramente.

Após lixar suficientemente a ponta do fio, esta é, introduzida no orifício da fieira e retirada, do outro lado, por um pequeno alicate ou pinça. Um pedaço de fio é trefilado manualmente, com um comprimento suficiente para que possa ser iniciado o processo de trefilação mecanizado. Para o processo -

de trefilação manual do fio, obtém-se melhor resultado quando se trabalha com dois operadores, um para segurar a fieira e fazer com que o fio entre no orifício perpendicularmente e o outro para esticar o fio e realizar a redução de diâmetro. É importante que o fio ao passar pela fieira não se apoie em nenhum ponto do orifício pois isso provocaria o aparecimento de ondulações no fio que irão prejudicar a sua qualidade. Mesmo tomando todos os cuidados, o fio trefilado manualmente não fica com a mesma qualidade que o fio trefilado com a máquina, portanto é conveniente que se retire esse pedaço da extremidade do fio (na próxima passada de fio pela máquina).

O próximo passo é dar uma volta com o fio ao redor do anel tirante. Inicialmente tentou-se trefilar dando três ou quatro voltas de fio no anel, seguindo recomendação da bibliografia consultada, porém desse modo o funcionamento não foi satisfatório, pois o fio se enroscava formando laçadas no anel, para a seguir quebrar. Experimentou-se então dar apenas uma volta de fio no anel e como a força de tração era suficiente para a trefilação, adotou-se esse esquema como norma para o funcionamento da máquina.

Em seguida repetem-se as operações de afinamento com a colocação do fio na fieira e no anel tirante para a segunda e terceira reduções respectivamente.

Após passar pelo terceiro anel tirante, o fio passa pela roldana direcional e pelas roldanas da bobinadeira e sua extremidade é presa no carretel colado no eixo da bobinadeira na posição horizontal.

Para iniciar o funcionamento da máquina primeiramente liga-se a chave geral, o controle individual de cada motor e o sistema de lubrificação. A seguir inicia-se a movimentação do primeiro motor, bem lentamente, do segundo, terceiro e da bobinadeira. Quando o sistema todo está em funcionamento, aumenta-se as velocidades dos motores, na mesma ordem, até se chegar às velocidades desejadas. A velocidade de cada motor pode ser medida através de um tacômetro mecânico ou de um estroboscópico.

Muitas vezes ocorre ruptura do fio devido a defeitos anteriores do fio ou a falha do operador no início do processo. Nesse caso o processo deve ser reiniciado e a ponta do fio novamente presa no carretel.

Se houver algum problema durante o funcionamento da máquina em que seja necessário desligar o sistema, basta acionar o botão correspondente ao controle geral, juntamente com o po -

tenciômetro da bobinadeira, pois este último não está acoplado ao controle geral.

4.11.2. Alguns Defeitos Apresentados

(a) O sistema de regulação de tensão para o desenvolvimento e enrolamento do fio, respectivamente da desbobinadeira e da bobinadeira mostram-se ineficientes para a faixa de diâmetros trabalhada. Para os fios mais espessos a haste de alumínio do regulador de tensão não aguentou e entortou, necessitando ser substituída. Apenas para os fios mais finos, abaixo de 0,10 mm, foi possível trabalhar com o regulador de tensão. O sistema de enrolamento inicial (Fig.22) mostrou-se também não ser muito eficiente e foi substituído por outro mais simples, no qual se despreza o regulador de tensões. Novo regulador de tensão deverá ser projetado e construído ou adquirido.

(b) O controle geral de velocidades deveria ser utilizado para iniciar o processo automaticamente, deixando-se os potenciômetros individuais de cada motor indicando a velocidade máxima que se deseja de cada motor; através do controle geral se aumentariam as velocidades dos três motores ao mesmo tempo, mantendo as proporções entre elas, até se chegar as velocidades máximas. Esse procedimento foi impossível, na prática, devido a um defeito dos circuitos do terceiro motor que inicia o movimento antes dos outros dois. Os circuitos deverão ser analisados para se encontrar a forma de corrigir esse defeito.

(c) O tamanho do sistema de proteção da máquina inicialmente concebido apresentou-se muito pequeno, principalmente perto da primeira fieira. Houve dificuldade em alojar o primeiro bico de lubrificante pois ficava muito próximo à parede do sistema de proteção. E ainda como o dispositivo de medição de forças foi colocado junto à primeira fieira, a introdução do fio no tubo metálico e na haste flexível desse medidor, devido ao reduzido espaço, apresentou muitas dificuldades, que aumentaram à medida em que a espessura do fio se reduziu.

Para eliminar esse problema deverá ser aumentado o sistema de proteção lateralmente até bem próximo das roldanas direcionais.

(d) O sistema de troca de engrenagens é pouco prático, pois os parafusos que prendem as engrenagens são difíceis de serem retirados. Alguma modificação nesse sistema precisa ser

feita para que essa operação de troca de engrenagens seja mais rápida. Como sugestão, pode-se substituir o pino rebitado (Fig. 23) por um parafuso "allen" e porca; dessa forma todo o sistema de fixação de engrenagens precisa ser ligeiramente modificado.

(e) Os bicos de lubrificação são de comprimentos demasiadamente longos, sendo difícil sua permanência no local desejado. É necessário a sua substituição por bicos mais curtos e de outro material menos elástico, que permaneça na posição desejada, ou então, ser afastada a posição de fixação no tempo da mesa.

(f) Quando a máquina for utilizada para a trefilação de fios capilares de ouro e alumínio, para uso em dispositivos eletrônicos, será necessário acrescentar mais uma etapa no processo que é a limpeza final do fio. Sabe-se que, para esses fios capilares, a contaminação da superfície, por menor que seja, é prejudicial ao processo de soldagem. Acredita-se que o sistema de limpeza já existente na máquina (passagem por uma garra revestida por feltro) é insuficiente. Como sugestão para se tentar resolver o problema a curto prazo, pode-se mencionar a colocação de uma ou duas roldanas revestidas com feltro além da garra já existente. Os pedaços de feltros seriam embebidas numa solução que dissolva o lubrificante e não prejudique a superfície do fio, e seriam trocados periodicamente. Caso isso não resolva o problema, deve-se pensar em reprojeter a última etapa do processo, incluindo a limpeza do fio antes do bobinamento.

4.12 - Referências Bibliográficas

- (1) MARKS, L.S. - Mechanical Engineers Hand-Book, ed. Mc Graw-Hill, New York, 1951, p. 1969.
- (2) DOEBELIN, E.O. - Measurement Systems: Application and Design, Mc Graw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1966, pp. 331-362.
- (3) AMBROSIUS, E.E.; FELLOWS, R.O.; BRICKMAN, A.D. - Measurement and Instrumentation, The Ronald Press Co., New York, 1966, pp. 136-137.
- (4) Catálogo da S.A. Philips do Brasil - Informações sobre o Produto Comercial - Fieiras de Diamante, pp. 9-10.

CAPÍTULO 5

Possibilidades de Análises Teóricas, sobre a Mecânica da Deformação e a Metalurgia Aplicadas à Trefilação, com a Máquina Construída

5.1. Introdução

Através de experiências realizadas com a máquina construída, poderão ser feitas análises teóricas do processo de trefilação, relacionas à mecânica e metalurgia da deformação.

Serão descritas as principais possibilidades de estudos teóricos que o equipamento pode proporcionar, salientando-se que esses não são os objetivos básicos do trabalho, ficando por tanto para uma etapa posterior.

Em relação à mecânica da deformação, a principal pesquisa que pode ser feita é uma comparação entre as tensões de trefilação obtidas experimentalmente com a máquina e as tensões obtidas através de métodos teóricos de análise.

Quanto à metalurgia da deformação aplicada à trefilação, muitos aspectos podem ser estudados, salientando-se a influência do trabalho a frio nas propriedades mecânicas do fio (resistência e alongamento) influência do aquecimento devido à deformação nessas mesmas propriedades mecânicas e a análise das fraturas do fio.

5.2. Possibilidades de Estudos Teóricos sobre a Mecânica da Deformação Aplicada à Trefilação (1)

A mecânica da deformação trata das tensões e deformações desenvolvidas no corpo metálico durante o trabalho de deformação e das forças externas associadas.

O processo de trefilação de fios metálicos vem sendo estudado desde o princípio do século. Diversos autores tentaram estabelecer uma relação entre as forças de trefilação e as variáveis do processo tais como redução de área, ângulo da fieira, atrito entre o metal e a ferramenta; contudo ainda não há uma teoria geral aceita universalmente.

As fórmulas utilizadas para determinar a força de tre

filação devem considerar que a magnitude dessa força depende da energia total utilizada no processo. Tradicionalmente se consideram os seguintes componentes da energia:

(a) energia utilizada para deformar uniformemente o material até uma dada redução de diâmetro;

(b) energia redundante, definida como a energia gasta na distorção interna do material, que não contribui para a mudança de dimensões; e

(c) energia utilizada para vencer o atrito na superfície de contato entre o material e a ferramenta.

Alguns fatores muitas vezes não são considerados na teoria da mecânica da deformação aplicada à trefilação: encruamento do material, variação do coeficiente de atrito, trabalho redundante e região cilíndrica da fieira.

Os principais métodos aplicados a trefilação, e que se baseiam na teoria da plasticidade são: método da energia uniforme, método da divisão em elementos, método do limite superior e métodos corrigidos. Será feita a seguir uma análise dos principais métodos destacando-se as suas vantagens e restrições, porém não será feito o desenvolvimento matemático das expressões para o cálculo da tensão de trefilação originadas nos métodos, pois isso seria um outro estudo complementar. Antes de se tratar desses métodos com mais detalhes, para facilitar o seu entendimento, é conveniente citar os princípios básicos da teoria da plasticidade.

5.1.1. Princípios Básicos da Teoria da Plasticidade (2-6)

A teoria da plasticidade procura descrever o comportamento de um material solicitado mecanicamente, após sofrer o escoamento. O material, nesse caso, já não se encontra no estado de deformação elástica, caracterizado pelo retorno às dimensões iniciais ao ser retirada a carga.

Para se compreender melhor o comportamento plástico do corpo sólido, é necessário observar o gráfico convencional tensão-deformação de um ensaio uniaxial de tração. Até o denominado limite de escoamento (σ_e) existe uma lei básica que descreve o comportamento do sólido, conhecida como lei de Hooke, expressa pela seguinte relação:

$$\epsilon = \sigma/E$$

Após esse limite a deformação deixa de ser unicamente elástica passando a ser também plástica.

Expressar relações matemáticas que descrevem a deformação plástica dos materiais não é simples, pois não existe uma relação linear entre tensões e deformações que descreve o comportamento do sólido, como a lei de Hooke da teoria da elasticidade. As equações matemáticas da teoria da plasticidade não são lineares, pois os parâmetros de plasticidade, correspondentes às constantes elásticas se alteram durante o carregamento. Nota-se portanto que a deformação plástica não depende somente dos estados de tensão inicial e final, os estados intermediários também influem.

A curva de escoamento, ou curva tensão-deformação verdadeiras, é construída tendo no eixo das ordenadas a tensão verdadeira, isto é carga sobre a área instantânea do corpo, e no eixo das abscissas a deformação logarítmica. Essa curva, é a utilizada quando se estuda a plasticidade de um material. Várias tentativas foram feitas para expressar a curva de escoamento matematicamente. A expressão mais usada, válida desde o escoamento até a estricção local, é a seguinte:

$$\sigma_v = K \epsilon_v^n$$

onde se definem os parâmetros:

K = coeficiente de resistência (isto é, tensão para $\epsilon_v = 1,0$)

n = coeficiente de encruamento (que é a tangente da curva com representação logarítmica da equação anterior).

Uma representação típica da curva de escoamento é mostrada na figura 38, onde se observa claramente o fenômeno de encruamento, isto é, endurecimento do material por deformação plástica, pois sempre que se deseja obter uma deformação maior é necessário aumentar a tensão aplicada.

A teoria da plasticidade considera algumas hipóteses simplificadoras para facilitar o estudo:

(a) o material é considerado contínuo, uniforme, isotrópico em suas propriedades e incompressível, isto é, sofre deformação a volume constante;

(b) a deformação elástica é desprezada, pois é muito menor que a deformação plástica, na maioria dos casos;

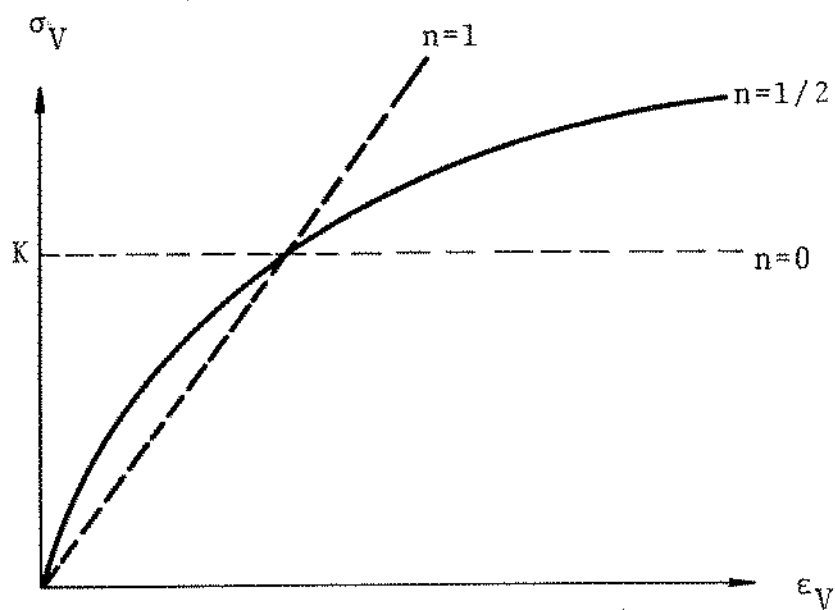


Figura 38 - Gráfico tensão versus deformação verdadeiras num ensaio uniaxial de tensão ou curva de escoamento.

(c) não são considerados os fenômenos estruturais que dão origem a modificações nas propriedades mecânicas dos metais durante sua deformação ou eventual aquecimento subsequente, tais como, o encruamento e o recozimento.

Em alguns problemas particulares é possível levar em conta o encruamento e a anisotropia das propriedades mecânicas, porém na resolução desses problemas essas considerações devem estar bem esclarecidas.

Na teoria da plasticidade é importante determinar as condições de tensão que indicam o início do escoamento plástico, ou seja, estabelecer o limite entre a validade da plasticidade. Com esse objetivo surgiram os critérios de escoamento, sendo os mais importantes os critérios de Tresca e de von Mises.

Um critério de escoamento pode ser estabelecido como função das tensões principais $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, para corpos plasticamente isotrópicos:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = K$$

onde, K = constante do material do corpo associada ao escoamento.

O critério de escoamento da máxima tensão de cisalhamento, ou critério de Tresca estabelece que o escoamento inicia quando a máxima tensão de cisalhamento excede de um valor crítico, ou seja, quando a semi-diferença da maior e da menor tensão principal atinge esse valor; nesse critério, obtém-se a relação:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_{\max} = K \quad \text{com } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

No ensaio de torção, onde atua um estado de cisalhamento puro, a máxima tensão de cisalhamento (k) vale a metade do limite de escoamento obtido no ensaio de tração (σ_0), ou seja:

$$\text{- no ensaio de tração: } \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_0, \sigma_3 = 0$$

$$\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) = 1/2 \sigma_0$$

$$\text{- no ensaio de torção: } \sigma_1 = k, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -k$$

$$\tau_{\max} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) = 1/2 (k - (-k)) = k$$

e portanto, para o critério de Tresca: $2k = \sigma_0$

O critério de escoamento da energia de distorção, ou critério de von Mises, estabelece que o escoamento inicia quando a energia de distorção de cisalhamento elástico excede de um valor crítico. Em termos de tensões principais esse critério pode

ser descrito da seguinte maneira:

$$\frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = K^2$$

Pode-se estabelecer a relação entre a tensão de cisalhamento máximo na tração (k) e a tensão de escoamento na tração (σ_0), ou seja:

- no ensaio de tração: $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

então,

$$\frac{1}{6} \left[(\sigma_0)^2 + (0)^2 + (-\sigma_0)^2 \right] = K^2, \quad 6K^2 = 2\sigma_0^2$$

- no ensaio de torção: $\sigma_1 = +k$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -k$

então,

$$\frac{1}{6} \left[(K^2)(k)^2 + (k)^2 \right] = K^2, \quad 6K^2 = 6k^2$$

Para o critério de von Mises: $6K^2 = 2\sigma_0^2$ ou $\sigma_0 = \sqrt{3} k$

Para os metais frágeis o critério que dá resultados mais próximos a realidade é o de Tresca, e para os metais dúteis o critério de von Mises é o que mais se ajusta, contudo como o primeiro é o mais simples de ser calculado e o erro entre os dois critérios é pequeno, o critério de Tresca é o mais aplicado.

As equações de Levy - von Mises propõem um relacionamento entre as tensões e deformações na deformação plástica. Convém recordar que na teoria da plasticidade, é necessário determinar os incrementos da deformação através da curva de escoamento e obter a deformação total por integração.

As equações de Levy - von Mises, que não consideram a deformação elástica do corpo, nas suas formas mais simplificadas são as seguintes:

$$d_{ex} = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z) \right]$$

$$d_{\epsilon_y} = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_y - \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_x) \right]$$

$$d_{\epsilon_z} = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right]$$

$$d_{\epsilon_{yz}} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \tau_{yz}$$

$$d_{\epsilon_{xz}} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \tau_{xz}$$

$$d_{\epsilon_{xy}} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \tau_{xy}$$

onde ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z representam as deformações devido a tensões normais (σ_x , σ_y e σ_z) nas direções indicadas e ϵ_{yz} , ϵ_{xz} , ϵ_{xy} representam deformações devido a tensões de cisalhamento (τ_{yz} , τ_{xz} e τ_{xy}).

O termo $d\bar{\epsilon}/\bar{\sigma}$ pode ser obtido na curva de escoamento.

5.2.2. Métodos de Análise

A - Método da Energia Uniforme (6,7)

O método da energia uniforme permite calcular aproximadamente e com rapidez os esforços dos processos de conformação plástica. Esse método baseia-se no cálculo do trabalho das forças internas envolvidas no processo.

Alguns fatores não são considerados no método da energia uniforme aplicado à trefilação. São desprezados o trabalho redundante e o trabalho de atrito, ou seja não são considerados respectivamente a forma da ferramenta e a natureza do contato me

tal - ferramenta. Também não é considerada a existência da região cilíndrica da fieira. Desse modo os valores da força de conformação obtidos por esse método são inferiores à realidade.

O encruamento do material pode ser considerado se for conhecida a função $\sigma_0 = f(\epsilon_v)$, obtida através de curvas de escoamento determinadas em ensaios uniaxiais de tensão.

O estado de tensão na região onde ocorre a deformação plástica consiste simplesmente de tensões longitudinais (p) e tensões de compressão radiais (-q) (Fig.39).

O sistema (p, -q, -q) pode ser transformado em (p+q, 0, 0) + (-q, -q, -q), pois este último é hidrostático e portanto não afeta a deformação. Esse caso de deformação é equivalente a um estiramento em tensão uniaxial com:

$$p+q=\sigma_0$$

Assim, as tensões principais para um ponto qualquer são:

$$\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$$

O trabalho de deformação por unidade de volume é:

$$\frac{W}{V} = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{\ell_1}{\ell_0}, \text{ onde } \bar{\sigma}_0 \text{ é a tensão de escoamento média.}$$

A força e, consequentemente, a tensão de trefilação são obtidas através da expressão do trabalho de trefilação.

Como $W = F \cdot \ell_1$, tem-se que

$$F = A_1 \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{\ell_1}{\ell_0} \right) = A_1 \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) = A_1 \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{1}{1-r} \right)$$

onde r = redução de área.

$$\text{Portanto: } \sigma_t = \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{1}{1-r} \right)$$

B - Método da Divisão em Elementos ⁽⁸⁾

O método da divisão em elementos é um um pouco mais elaborado que o método anterior, pois considera além do trabalho de deformação uniforme o trabalho de atrito, porém não considera o trabalho redundante. O encruamento pode ser levado em conta utilizando-se valores médios do limite de escoamento.

Para o cálculo da tensão de trefilação primeiramente

isola-se um elemento diferencial de material dentro da zona de deformação e se estabelece sobre ele o equilíbrio estático de tensões. Supõe-se que as tensões sobre as superfícies transversais do corpo livre são normais, uniformemente distribuídas e sem componentes de cisalhamento. Considera-se que prevalecem as condições de simetria cilíndrica e que para incrementos dx na região de deformação, as tensões transversais variem de uma quantidade $d\sigma_x$.

Na região de deformação são supostas uma pressão normal p e uma tensão de cisalhamento τ ($\tau = \mu p$), conforme indicado na figura 40.

Fazendo-se equilíbrio estático na direção longitudinal, aplicando-se o critério de Tresca à equação obtida e integrando-se a equação diferencial resultante obtém-se a tensão de trefilação.

$$\sigma_t = \bar{\sigma}_0 \left(\frac{1+B}{B} \right) \left[1 - (1-r)^B \right]$$

onde:

$B = \mu \cot \alpha$, com μ = coeficiente de atrito e α = semiângulo da fiação.

Esse método fornece resultados mais corretos para pequenos ângulos de ferramenta. À medida que o ângulo vai aumentando, vai diminuindo a exatidão do método porque está aumentando o trabalho redundante, que não é considerado nos cálculos.

C - Método do Limite Superior (10-12)

No método do limite superior é feita uma análise mais rigorosa que nos métodos anteriores. O método se baseia no teorema do limite superior, o qual estabelece, que quando um corpo escoar, o trabalho das forças externas é menor ou igual do trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidades cinematicamente admissível no corpo.

Em termos gerais, o procedimento para a obtenção do limite superior de tensão em um processo de deformação é o seguinte:

(a) estabelecer um campo de velocidades (V^*) para o corpo, que atenda as condições nos limites e se aproxime do escoamento real;

(b) determinar a potência interna, ou seja trabalho por

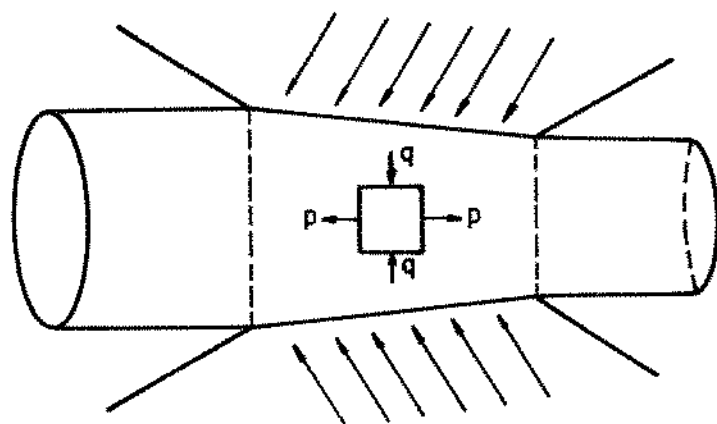


Figura 39 - Ilustração das tensões aplicadas num elemento do corpo deformado (método da energia uniforme)⁽¹⁾

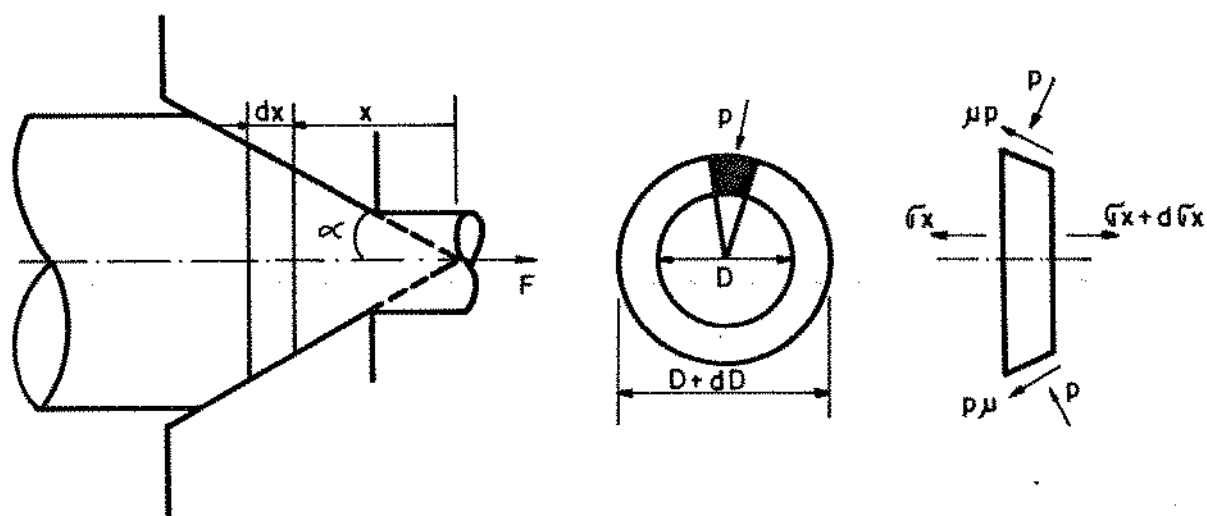


Figura 40 - Ilustração do método da divisão em elementos aplicado à trefilação⁽⁹⁾.

unidade de tempo ($\dot{W}_i^*$), devido a deformação plástica, correspondente ao campo de velocidades; esse termo é composto de duas parcelas, a primeira consta dos pontos do corpo onde a velocidade é contínua e a segunda consta dos pontos das superfícies de descontinuidades;

(c) determinar a potência das forças exteriores ($\dot{W}_e$);

(d) estabelecer a desigualdade $\dot{W}_e \leq \dot{W}_i^*$.

AVITZUR^(11,12) fez uma análise rigorosa do método do limite superior aplicado aos processos de trefilação e extrusão, abrangendo ferramentas com ângulos pequenos e ângulos maiores e considerando o atrito segundo os modelos da camada limite e de Coulomb.

A seguir serão descritas as hipóteses adotadas pelo autor em sua análise e apresentados os resultados.

Foram adotadas as seguintes hipóteses:

(1) o material do fio é considerado rígido - plástico, isto é, não apresenta recuperação elástica, e incompressível e obedece o critério de escoamento de von Mises;

(2) a fieira é considerada como um corpo rígido;

(3) o modelo da zona plástica é o modelo de SACHS⁽¹³⁾, que desenvolveu um método para determinar a forma da região de deformação, através do qual se observa a deformação ocorrida sobre grelhas gravadas sobre o plano central de peças partidas e semi-processadas. Na trefilação a zona plástica é limitada pelas superfícies cônica da matriz e esféricas da entrada e da saída do material na matriz (Fig.41);

(4) o modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível pode ser visto na figura 42. Admite-se um vértice virtual para o cone de trabalho. O fio é dividido em três regiões de velocidades contínuas;

(5) a perda de energia durante o processo se dá por atrito, devido ao contato do material com a superfície da fieira e por descontinuidade de velocidades;

(6) modelos de atrito:

(i) Atrito de Coulomb : $\tau = \mu \sigma$

(ii) Camada limite : $\tau = m\tau_0$, onde m = espessura da camada limite.

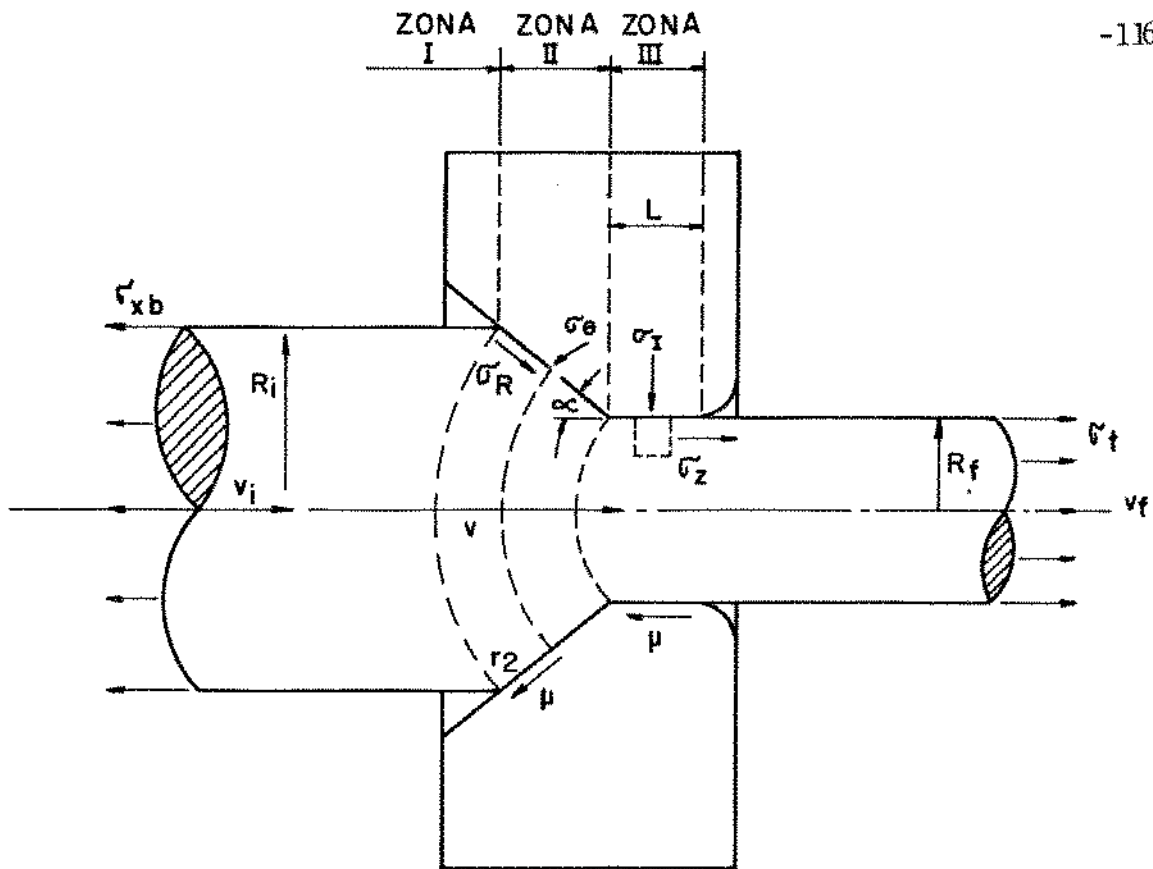


Figura 41 - Modelo da zona plástica adotado por Avitzur, para a trefilação⁽¹⁴⁾.

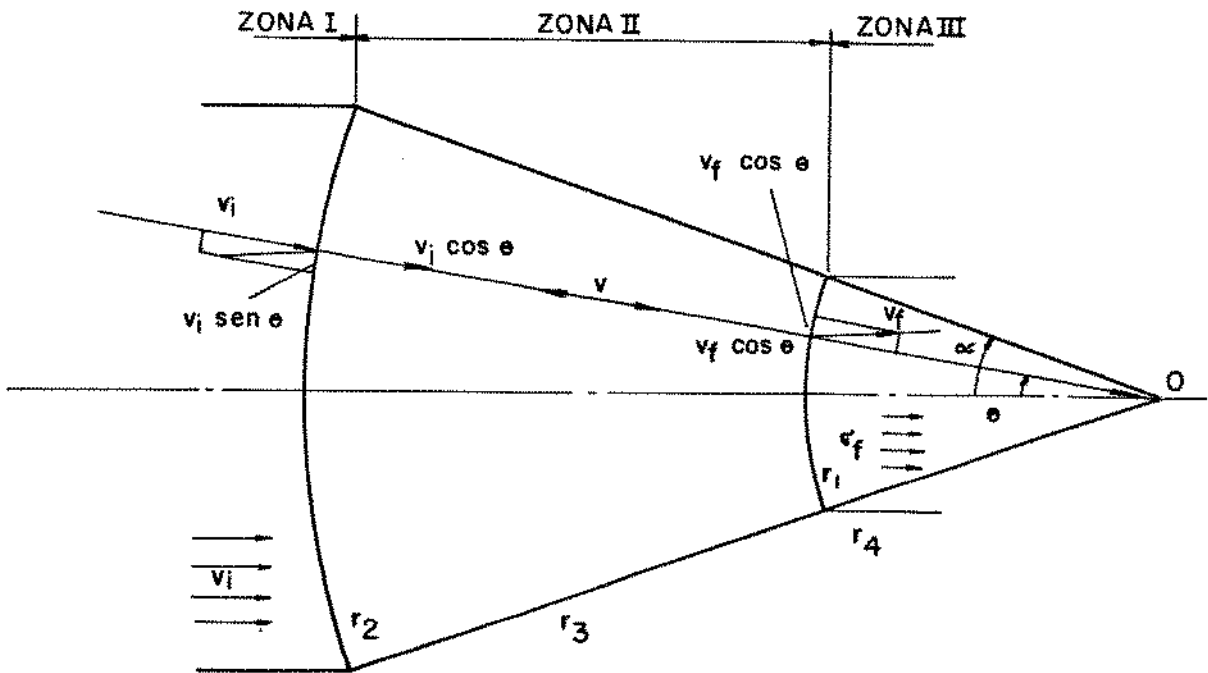


Figura 42 - Modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível, adotado por Avitzur⁽¹⁴⁾.

Nas expressões anteriores:

σ_{xb} = tensão exercida no fio, na entrada da fieira;

α = semiângulo da fieira;

R_i = raio inicial do fio;

R_f = raio final do fio;

L = comprimento da região cilíndrica da fieira;

m = constante da camada limite

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

D - Métodos Adaptados⁽¹⁵⁾

Vários autores desenvolveram expressões para o cálculo da tensão de trefilação a partir dos métodos de cálculo da energia uniforme, da divisão em elementos e do limite superior, introduzindo fatores de correção para compensar as limitações do modelo físico-matemático adotado em cada método. Esses fatores de correção são obtidos geralmente por experiências.

A tabela XXII mostra as fórmulas obtidas pelos autores, pela ordem cronológica de seu surgimento, observando-se em qual método foram baseados.

Observou-se que a mecânica da trefilação é muito mais complicada do que aparenta à primeira vista, pois ocorrem interações entre as principais variáveis, que são muito grandes

Os resultados obtidos para fieiras com grande ângulo foram:

(i) assumindo atrito de Coulomb:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_o} = \frac{\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + 2\mu \left(\cot \alpha \right) \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} - \ln \frac{R_i}{R_f} \right]}{1 + 2\mu \frac{L}{R_f} \left(\ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right)}$$

(ii) assumindo modelo de atrito da camada limite:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_o} = \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \left(\cot \alpha \right) \left(1 - m \ln \frac{R_i}{R_f} \right) + m \frac{L}{R_f} \right\}$$

Os resultados para fieiras de pequeno ângulo foram:

(i) assumindo atrito de Coulomb:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_o} = \frac{\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + 2 \left\{ 1 + \frac{\mu}{\sin \alpha} \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} - \ln \frac{R_i}{R_f} \right] \right\} \ln \frac{R_i}{R_f} + 2\mu \frac{L}{R_f} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \sin \alpha}{1 + 2\mu \frac{L}{R_f}}$$

(ii) assumindo modelo de atrito da camada limite:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_o} = \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \sin \alpha + 2 \left[\frac{m}{\sqrt{3} \sin \alpha} + 1 \right] \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{L}{R_f}$$

Tabela XXII - Expressões Teóricas para a Tensão Média de Trefilação (15)

Autores	Tensão Média de Trefilação	Método Adotado	Observações
Sachs (16)	$\sigma_t = \left(\frac{1+B}{B} \right) \bar{\sigma}_0 \left[t \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^B \right]$	B	
Pomp, Siebel e Houdremont (17)	$\sigma_t = \left(1 + \mu / \alpha \right) \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$	A	
Sachs e Van Horn (18)	$\sigma_t = \left(1 + B \right) \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$	A	
Korber e Eichinger (19)	$\sigma_t = \left(\frac{1+B}{B} \right) \bar{\sigma}_0 \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^B \right] + \left(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 \right) \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}}$	B	Considera o trabalho redundante.
Davies e Dokos (20)	$\sigma_t = \left(\frac{1+B}{B} \right) \sigma_0 \left\{ \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^B \right] \left(1 - \frac{K}{\sigma_0 B} \right) + \frac{K}{\sigma_0} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right\}$	B	Considera além do trabalho redundante, o encruamento material.
Siebel (21)	$\sigma_t = \left(1 + \mu / \alpha \right) \bar{\sigma}_0 \ln \left(A_1 / A_2 \right) + \frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \alpha$	A	Considera o trabalho redundante.
Whitton (22)	$\sigma_t = \left(\frac{1+B}{B} \right) \bar{\sigma}_0 \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^B \right] + \frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \alpha^2 \left(\frac{1-r}{r} \right)$	B	Considera o trabalho redundante.
Yang (23)	$\sigma_t = \left(\frac{G}{1-G} \right) \bar{\sigma}_0 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{1-G} - 1 \right]$	B	Considera a região cilíndrica da fiação.
Trozera (24)	$\sigma_t = H - \left(H + M \right) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{G-1} + M \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1-D} - \frac{BG}{G-1} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$	B	Semelhante ao estudo de Yang, porém considera encruamento.
Avitzur (25)	$\sigma_t = \left[f(\alpha) + \frac{m}{\sqrt{3}} \cotg \alpha \right] \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right) \bar{\sigma}_0$	C	

Métodos adotados: A - Método da Energia Uniforme, B - Método da Divisão em Elementos, C - Método do Limite Superior.

Nas expressões acima : $\beta = \mu \cotg$; $K =$ coeficiente da curva de endurecimento linear $\bar{\sigma} = \sigma_0 + K\epsilon$; $G = (1 + \mu \cotg \epsilon) / (1 - \mu \cotg \epsilon)$; $H = \frac{AG}{G-1} - \frac{BG}{(G-1)^2}$;

$M = \frac{CG}{(G-1)^2}$; A, B, C, D = constantes da curva característica do material expressa por $\bar{\sigma} = A + B\epsilon + C \exp(D\epsilon)$; para os ângulos usados em trefilação

$f(\alpha) = 1$; $r =$ redução de área.

para serem ignoradas, portanto devem ser consideradas as teorias que levam em conta essas interações.

Algumas das teorias que apresentaram melhores resultados, comprovadas experimentalmente por SPINOSA-LARRAGUIBEL-NEGRONI⁽¹⁵⁾, foram as teorias de SIEBEL⁽²¹⁾ e AVITZUR⁽¹²⁾.

5.3. Considerações Gerais sobre a Metalurgia da Deformação⁽²⁶⁻²⁹⁾

O estudo da deformação plástica dos metais, sob o aspecto metalúrgico, desenvolveu-se através do estudo do comportamento dos monocristais. Sabe-se que os metais apresentam seus átomos dispostos de forma regular e repetitiva com estrutura cristalina, na maioria dos casos, de três tipos: cúbica de corpo centrado, cúbica de faces centradas e hexagonal compacta.

As propriedades mecânicas dos metais dependem, além da natureza do cristal, da existência de defeitos na rede cristalina. São três os principais tipos de imperfeições cristalinas : defeitos pontuais, defeitos de linha e defeitos de plano.

Os defeitos pontuais são vacâncias ou ausência de átomos da rede cristalina, ou a presença de átomos estranhos ao reticulado, em posições intersticiais ou substituindo átomos da rede. Os defeitos de linha são as discordâncias de linha ou de hélice. Os defeitos de plano são as falhas de empilhamento, nas quais ocorre modificações na ordem de empilhamento dos planos cristalinos. Outro defeito de plano é o contorno de grão.

Enquanto que a deformação elástica, que resulta apenas na separação de átomos da rede cristalina, é feita na mesma direção em que uma tensão normal é aplicada, para a deformação plástica a direção não é a mesma. Para que um monocristal seja deformado plasticamente, é necessário que uma tensão de cisalhamento crítica seja ultrapassada. Essa tensão de cisalhamento pode provocar o aparecimento de dois mecanismos fundamentais de deformação chamados deslizamento e maclação. Através do deslizamento os planos atômicos se movimentam, um em relação ao outro. Na maclação, sob a ação de esforços tangenciais, os átomos de planos reticulares são deslocados de frações de distâncias atômicas produzindo uma distorção na rede, de modo que a zona deformada é uma imagem especular do cristal da matriz, com relação a um plano chamado "plano de macla".

O deslizamento é o mecanismo mais comumente responsã-

vel pela deformação plástica dos metais a frio ou a quente. Esse fenômeno ocorre devido ao movimento de discordâncias e com maior facilidade segundo alguns planos cristalográficos, geralmente os planos de maior densidade atômica, e segundo algumas direções cristalográficas que são as que correspondem a maior aproximação dos átomos. Esses planos e essas direções preferenciais definem os sistemas de deslizamento, que dependem muito da estrutura cristalina de metal e da temperatura. O deslizamento é iniciado quando a tensão de cisalhamento, atuando no plano de deslizamento, atinge um certo valor, que corresponde à tensão de escoamento na curva tensão-deformação.

Quando o cristal está sendo deformado plasticamente, a tensão de cisalhamento necessária para a continuidade do processo de deformação aumenta e esse fenômeno é denominado endurecimento pela deformação plástica, ou encruamento. O encruamento é causado por fatores que dificultam a movimentação das discordâncias. Os principais fatores que freiam o movimento das discordâncias são: impurezas isoladas, intersecção entre discordâncias, precipitados e empilhamento de discordâncias formando "barreiras". Em geral o encruamento é menor quando somente atua um sistema de deslizamento, aumentando à medida em que o número de sistemas aumenta.

A maioria dos trabalhos tecnológicos é efetuada com materiais policristalinos, constituídos por muitos grãos orientados aleatoriamente. Para aplicar os conhecimentos da teoria das discordâncias, desenvolvida a partir da deformação de monocristais, para os policristais surgem algumas dificuldades criadas pelos fatores:

- (a) os contornos de grãos;
- (b) o escoamento plástico do agregado, pois a deformação de um grão é restrita pelos grãos vizinhos com diferentes orientações;
- (c) os metais não puros ou ligados, que podem introduzir a presença de uma nova fase.

Os contornos de grãos são locais de elevada energia superficial, possuindo alta concentração de impurezas, portanto atuam como barreiras para as discordâncias. Para haver continuidade no processo de deslizamento do metal, ocorre a introdução de complexos modos de deformação dentro de cada grão. Segundo

alguns autores, para haver continuidade na deformação plástica dos agregados policristalinos, cada cristal deve deslizar segundo cinco sistemas de deslizamento. Desse modo pode-se concluir - que deformando-se plasticamente um policristal a temperatura ambiente, o encruamento é maior que no caso do monocristal.

Foi verificado que os contornos de grãos exercem marcante influência nas propriedades mecânicas dos metais. Quanto menor o tamanho dos grãos, maior é a quantidade de contornos de grãos e maiores são o encruamento e os limites de escoamento e de resistência. O efeito do tamanho de grão é mais marcante no limite de escoamento, que no limite de resistência, pois nos estágios finais da deformação, próximos ao limite de resistência, o mecanismo predominante é o da interferência das discordâncias com os contornos de grão, sendo mínimo o efeito do tamanho dos grãos.

Quando trabalha-se com metais de pureza comercial ou com ligas metálicas, a presença de um elemento B em uma estrutura de átomos A, pode ocasionar três tipos de compostos: há solubilidade total ou parcial de B em A, apresentando uma ou duas fases; não há solubilidade de B em A formando duas fases; há interação entre B e A formando compostos intermetálicos para determinadas composições.

As soluções sólidas apresentam maior resistência à deformação que o metal solvente puro. O efeito endurecedor é proporcional ao conteúdo de soluto. Para as ligas metálicas constituídas de duas fases, sendo a matriz dútil e a segunda fase frágil, as suas propriedades mecânicas são dependentes da forma com que a segunda fase se distribui pela matriz. Se as partículas da fase frágil estão uniformemente distribuídas na matriz, obtém-se ótimas condições de resistência e ductilidade do material. Os compostos intermetálicos, na sua maioria, são frágeis e duros, apresentando elevada resistência ao escoamento e ductilidade de quase nula.

O trabalho mecânico a quente é aquele realizado em uma faixa de temperatura e de tempo onde o encruamento é eliminado. O mesmo não acontece no trabalho mecânico a frio, sendo esse processo utilizado às vezes com o intuito de endurecer certos metais que não podem ser endurecidos por tratamentos térmicos. Aumentando-se o trabalho a frio, que pode ser medido em termos de redução de área, provoca-se uma elevação dos limites de escoamento e de resistência e diminuição na estrição e alongamento do metal (Fig.43). O aumento da resistência devido a deforma -

ção plástica, ou taxa de encruamento, pode ser visualizada na curva de escoamento pela sua inclinação; as taxas de encruamento - mais elevadas correspondem aos maiores expoentes de encruamento (n) na curva de escoamento.

O trabalho a frio provoca uma orientação dos grãos na direção do escoamento, ou seja da maior deformação do metal, caracterizando um tipo de textura do material. O tipo de textura formada depende de vários fatores: da estrutura cristalográfica do material, da temperatura, da deformação e da textura prévia do material. A textura mais simples resultante da deformação do metal é a fibracão, podendo ser cristalográfica, devido a reorientação dos grãos durante a deformação, ou mecânica, devido ao alinhamento de inclusões e vazios na direção de escoamento.

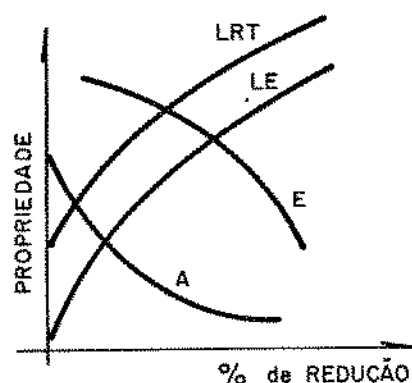
No tratamento térmico de recozimento, o metal é aquecido até uma certa temperatura, denominada temperatura de recristalização, permanecendo nessa temperatura por um certo tempo, de modo a perder o encruamento, e portanto amolecer. Esse processo pode ser dividido em três estágios (Fig.43):

(a) recuperação, onde são aliviadas as tensões internas provocadas pelo trabalho a frio, não alterando a macroestrutura dos grãos deformados nem as propriedades mecânicas do metal;

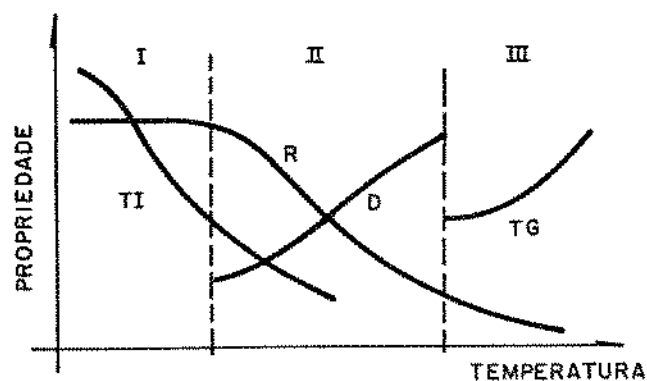
(b) recristalização, fenômeno através do qual a estrutura encruada é substituída por outra constituída por novos grãos isentos de deformação, nucleados e crescidos a partir dos grãos encruados. A recristalização, pode ser observada no microscópio metalográfico. As propriedades mecânicas do metal são amplamente modificadas nesse estágio, ocorrendo diminuição nos limites de escoamento e resistência e aumento na ductilidade.

(c) crescimento de grão, estágio que ocorre a temperaturas mais altas, ou se o processo de recozimento for muito prolongado, devendo ser evitado pois não confere boas propriedades mecânicas ao metal.

O estágio mais importante do processo de recozimento é a recristalização. A temperatura de recristalização, que costuma ser estimada como a metade da temperatura de fusão do metal, não é uma temperatura rigorosamente fixada, pois depende de outros fatores de influência na recristalização como natureza do metal, quantidade de deformação prévia, tamanho de grão inicial. Para haver a recristalização é necessário uma deformação a frio mínima; quanto menor for essa quantidade de deformação maior deve ser a temperatura para a recristalização. Aumentando-se o tempo de duração do tratamento é possível diminuir a temperatura, porém



Influência do trabalho a frio no limite de resistência à tração (LRT), limite de escoamento (LE), alongamento (A) e estricção (E).



Modificação das propriedades na recuperação (I), recristalização (II) e crescimento de grão (III); onde TI=tensão interna, R=resistência, D=Dutibilidade e TG=Tamamho de Grão.



Macroestruturas: I' = encruada
I = recuperada
II = recristalizada
III = com grãos crescidos

Figura 43 - Trabalho a frio, recuperação, recristalização e crescimento de grão⁽²⁸⁾.

a temperatura tem um efeito mais acentuado que o tempo, além disso existe um tempo crítico, abaixo do qual não ocorre a recristalização. A temperatura de recristalização diminui com o aumento da pureza do material.

O trabalho mecânico a quente é o realizado acima da temperatura de recristalização. No trabalho a quente é possível realizar elevadas deformações pois a recristalização ocorre junto com a deformação. O limite de escoamento permanece constante para uma dada temperatura de trabalho, diminuindo à medida que a temperatura aumenta; como consequência desse fato, para o trabalho a quente necessita-se um menor esforço para uma dada deformação do que para o trabalho a frio.

5.4. Estudos Propostos com a Máquina Construída

5.4.1. Estudos sobre a Mecânica da Deformação

Com a máquina de trefilar construída muitos estudos sobre a mecânica da deformação podem ser realizados, destacando-se um estudo comparativo entre as tensões obtidas experimentalmente com a máquina e as tensões obtidas através de métodos teóricos de análises. Convém observar que a maioria dos métodos teóricos existentes foram desenvolvidos através de experiências em que foram utilizadas velocidades muito baixas. Entretanto, a máquina construída permite a realização de experiências a velocidades mais altas, semelhantes aos níveis empregados nas condições de operação industrial e tornando possível a observação da influência da velocidade na tensão de trefilação dos métodos, e a verificação da validade dos métodos teóricos para esses níveis de velocidade.

5.4.2. Estudos sobre a Metalurgia da Deformação

No processo de trefilação de fios finos e capilares de metais não-ferrosos, vários estudos podem ser feitos sob o ponto de vista da metalurgia da deformação. Algumas verificações relacionadas com o encruamento do material podem ser feitas, como por exemplo, a observação da uniformidade do trabalho a frio através da secção transversal do fio (núcleo e superfície), verificação da influência da intensidade de trabalho a

frio e do nível da temperatura nas propriedades mecânicas do fio (limite de escoamento e de resistência e alongamento). Todos esses estudos devem ser feitos com auxílio de observações de macro e micrografias dos fios. A maior dificuldade experimental é a confecção de amostras devido às pequenas dimensões dos fios.

Outro tipo de estudo que pode ser proposto é sobre o modo da fratura do fio, procurando identificar as prováveis causas dessas fraturas. Geralmente as fraturas são causadas por variáveis de processo mal ajustadas, tais como forças, velocidades de trefilação, condições de lubrificação; ou podem ser causadas por falta de homogeneidade do material como a presença de inclusões e vazios. Pode-se, com a ajuda do microscópio eletrônico, verificar as formas das fraturas do fio e comparar com as teorias existentes sobre o assunto^(30,31); é possível também relacionar a frequência do aparecimento de fraturas no fio com a pureza do material, observando-se se há inclusões no local da ruptura.

5.5 - Referências Bibliográficas

- (1) WISTREICH, J.G. - The Fundamentals of Wire - Drawing
Metallurgical Reviews, vol.3, nº 10, 1958, pp. 98-115.
- (2) JOHNSON, W.; MELLOR, P.B. - Engineering Plasticity, van Nostrand,
London, 1973, p. 13.
- (3) THOMSEN, E.G.; YANG, C.T.; KOBAYASHI, S. - Plastic Deformation
in Metal Processing, Mac Millan Co., New York, 1965, pp. 17 e
87.
- (4) MASTEROV, V.; BERKOVSKY, V. - Theory of Plastic Deformation and
Metal Working, Mir Publishers, Moscow, 1975, pp. 74-95.
- (5) DIETER, G.E. - Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill, Kogakusha,
Tokyo, 1976, pp. 72-102.
- (6) BRESCIANI Fº, E. - Conformação Plástica dos Metais (Fundamentos
da Mecânica da Conformação Plástica), Apostila Pós-Graduação
DEM/UNICAMP, Campinas, 1978, pp. 55-82.
- (7) ROWE, G.W. - Conformado de los Metales, ed. Urmo, Bilbao, 1972,
pp. 79-95.
- (8) Idem, ibidem ref. (7), pp. 143-158.
- (9) Idem, ibidem ref. (7), p. 154.
- (10) Idem, ibidem ref. (6), pp. 90-92.
- (11) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through
Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, Series B,
NOVEMBER, 1963, pp. 89-96.
- (12) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through
Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Series B,
vol. 86, nº 4, 1964, pp. 305-316.

- (13) DELIJAICOV, S. - Análise da Extrusão de Barras Cilíndricas em Matriz Cônica pelo Método do Limite Superior, Seminário Pós-Graduação EPUSP, São Paulo, 1978, p. 52.
- (14) Idem, ibidem ref. (11), pp.
- (15) ESPINOSA, R.; LARRAGUIBEL, J.S.; NEGRONI, F. - Analisis Teórico Experimental de las Expresiones para Predecir la Tension Media de Trefilacion, Anais da V Conferência Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, pp. 369-377.
- (16) SACHS, G. - Zur Theories des Ziehvorgangs, Z. angew, Math. Mech., vol. 7, 1927, p. 235, in ref. (15), p. 376.
- (17) POMP, A.; SIEBEL, E.; HOUDREMONT, E., Mitt. K.W. Inst. Eisenforsch, vol. 11, 1929, p. 553, in ref. (15), p. 376.
- (18) SACHS, G.; VAN HORN, K.R. - Practical Metallurgy, Cleveland O (A.S.M.), 1940, in ref. (15), p. 376.
- (19) KÖRBER, F.; EICHINGER, A., Mitt. K. W. Inst. Eisenforsch, vol.22, 1940, p. 57, in ref. (15), p. 376.
- (20) DAVIS, E.A.; DOKOS, S.J. - Theory of Wire Drawing, Journal Applied Mechanics, vol. 11, 1944, p. A 193, in ref. (15), p. 376.
- (21) SIEBEL, E. , Stahl u. Eisen, vol. 66-67, 1947, p. 171, in ref. (15), p. 376.
- (22) WHITTON, P.W. - The Calculation of Drawing Force and Die Pressure in Wire Drawing, J. Inst. Metals, vol. 86, 1958, pp. 417-421.
- (23) YANG, C.T. - On The Mechanics of Wire Drawing, Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind., vol. 89, 1961, pp. 523-525.
- (24) TROZERA, P.A., Trans. ASM, vol. 57, 1964, p. 309, in ref. (15), p. 376.

- (25) Idem, ibidem ref. (12), p. 308.
- (26) Idem, ibidem ref. (3), pp. 16-29.
- (27) Idem, ibidem ref. (5), pp. 150-187.
- (28) Idem, ibidem ref. (6), pp. 165-179.
- (29) BARRETT, C.R.; NIX, W.D. - The Principles of Engineering Materials, Prentice-Hall Inc., New York, 1973, pp. 225-235.
- (30) Idem, ibidem ref. (5), pp. 247-288.
- (31) REED-HILL, R.E. - Principios de Metalurgia Física, Comp. Editorial Continental, México, 1972, pp. 635-696.

CAPÍTULO 6

PROGRAMA DE EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS OBTIDOS

6.1. Programa de Experiências

A matéria prima escolhida para as experiências iniciais com a máquina de trefilar foi fio de cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP), recozido, com 1 mm de diâmetro. As razões dessa escolha foram o baixo preço do metal, facilidade de ser encontrado na forma de fios e semelhança entre as propriedades mecânicas desse metal e do ouro.

As características dessa matéria prima (composição, tolerâncias dimensionais, propriedades mecânicas e elétricas) encontram-se na tabela XXIII. Observa-se que a composição química do material corresponde à especificada para o cobre eletrolítico tenaz (Tabela IV) e que as propriedades mecânicas e tolerâncias dimensionais estão de acordo com a classificação de fios de cobre para fins elétricos da ABNT⁽¹⁾, no estado recozido.

6.1.1. Descrição dos Ensaios Preliminares

Inicialmente foi estudada a viabilidade técnica de se trabalhar com um, dois ou três motores com a máquina construída. Foram efetuados alguns ensaios preliminares, durante os quais não foram efetuadas medições da velocidade, nem da força de trefilação. A única finalidade desses ensaios foi a de verificar o desempenho da máquina nas três condições de funcionamento.

Para esses ensaios, seguindo recomendação bibliográfica para máquinas de trefilar convencionais⁽²⁾, foram dadas três voltas do fio nos anéis tirantes. Dessa maneira a máquina apresentou desempenho satisfatório, funcionando com apenas um motor, a baixas velocidades, porém a velocidades mais altas ocorreram problemas de formação de laçadas no anel, que provocavam posteriormente a ruptura do fio. Trabalhando com dois ou três motores, aumentou-se proporcionalmente o número de laçadas formadas.

O número de voltas de fio no anel foi então modificado para apenas uma. Colocando-se a máquina em funcionamento, verificou-se que a força de tração era suficiente para provocar a deformação plástica do fio, portanto, adotou-se esse núme-

Tabela XXIII - Características do Fio de Cobre Usado como Matéria Prima para a Trefilação (Cu ETP)			
Composição Química (De Acordo com Pirelli S.A.)			
Elemento		Quantidade	
Cu		99,96%	
O		0,02%	
S		7 ppm	
As		2 ppm	
Ag		8 ppm	
Fe		6 ppm	
Sb,Ni,Pb,Bi,Te,Zn,Sn,Cd		menos que 1 ppm	
Propriedades Mecânicas			
Resistência à Tração (kgf/mm ²)		26,1	
Alongamento (%em 200 mm)		30,2	
Propriedades Elétricas			
Resistividade(microohm/cm)		1,77	
Condutibilidade(% IACS)		99,10	
Dimensões			
Diâm.Nominal (mm)	Class.AWG.	Diâm.Mín. (mm)	Diâm.máx(mm)
1,024	18	1,020	1,030

ro de voltas como norma para o funcionamento da máquina, na faixa de diâmetros de 1 mm até os fios capilares. Desta maneira a máquina apresentou funcionamento satisfatório com um, dois e três motores.

Iniciou-se a seguir uma série de reduções com um motor, a baixas velocidades, partindo-se do fio de 1 mm de diâmetro, com o objetivo de determinar qual a máxima redução total de área, obtida sem recozimento intermediário entre os passes. Nessas experiências também não foram verificadas as propriedades dos fios. Dessa sequência de reduções verificou-se a viabilidade de se efetuar uma redução total de área de cerca de 99,7%, sem recozimento intermediário, ou seja foi possível reduzir o fio de 1 mm de diâmetro para 0,055 mm, em 30 reduções parciais.

6.1.2. Descrição dos Ensaios Realizados

Foram efetuadas duas séries de ensaios. Na primeira delas, trabalhou-se com três motores a velocidades baixas, por exemplo $V_1 = 4,4$ m/s, $V_2 = 5,3$ m/s e $V_3 = 6,8$ m/s para a primeira sequência de reduções. Para as demais sequências as velocidades dos três motores foram praticamente as mesmas, variando muito pouco devido às diferenças de diâmetros do fio de passe para passe, e conseqüentemente, diferenças entre o alongamento do fio ao passar pelas fieiras.

Nessa série de reduções partiu-se de um fio de cobre recozido com 1,0 mm de diâmetro, chegando-se a um fio de 0,055 mm. Foram verificadas as propriedades mecânicas, o diâmetro do fio e a regularidade do diâmetro em cada etapa do processo. Também foram verificadas as propriedades elétricas, foram efetuadas micrografias de seções longitudinais do fio e observações visuais do fio em algumas etapas do processo. A força de trefilação foi medida junto à primeira fieira.

Após cada passada de fio pela máquina, foi retirada uma amostra, desprezando-se a extremidade do fio (cerca de 1,5 mm), que correspondia à parte do fio trefilada manualmente, que apresentava muitos defeitos introduzidos pelo operador. Desta amostra foram retiradas seis amostras menores (de 200 mm), três para as verificações das propriedades mecânicas, através de ensaios de tração e três para verificações do diâmetro, segundo as normas ASTM F 72-74⁽³⁾ e F 205-63⁽⁴⁾, respectivamente. As amostras utilizadas para a verificação do diâmetro foram aproveitadas para verificar as propriedades elétricas e para a confecção das amostras

metalográficas, porém para os dois casos foram utilizadas apenas uma amostra de cada etapa. A observação visual do fio foi feita através de uma lupa e de um microscópio ótico binocular.

Na segunda série de ensaios foi utilizado apenas um motor, porém a três níveis de velocidade. Partiu-se de um fio com 0,176 mm de diâmetro, obtido na série anterior, chegando-se a 0,055 mm. Nesse caso a força de trefilação foi medida em cada redução de área. O objetivo dessa série foi verificar a influência da velocidade nas propriedades do produto final e na força e potência de trefilação. Foi utilizado apenas um motor com o intuito de se eliminar as eventuais influências dos outros motores na força de tração que provoca a primeira redução.

Nessa série de experiências foram verificadas as mesmas propriedades que na série anterior, adotando-se o mesmo procedimento experimental.

Não foram efetuadas medições da ovalização dos fios devido a dificuldades experimentais encontradas ao se efetuar o embutimento de secções transversais de fios muito finos. A maior dificuldade encontrada foi obter realmente uma secção perpendicular do fio, com o equipamento convencional de metalografia. Não foi encontrada nenhuma norma sobre o procedimento desses ensaios e, nos catálogos de fios capilares, essa medida também não foi muito citada.

Além dos ensaios já mencionados, foram efetuadas também medições da intensidade das vibrações transmitidas em vários pontos da máquina (base, sistema de proteção, porta-fieiras e outros), quando o equipamento funcionava às velocidades de trabalho e às velocidades máximas dos motores, que correspondem a uma velocidade do fio de 153 m/s (para um anel tirante de 100 mm).

Os seguintes equipamentos de ensaios foram utilizados:

(a) máquina de ensaios Instron 1122 para verificação das propriedades mecânicas;

(b) tacômetro mecânico para verificação das velocidades dos motores (Deumo, com apalpador mecânico);

(c) ponte amplificadora para leitura da deformação dos extensômetros do sistema de medição de forças (Philips, com quatro canais);

(d) micrômetro para verificação das dimensões dos fios médios (Mitutoyo, modelo NO 193-111);

(e) balança analítica para verificação das dimensões dos fios finos e capilares (Mettler, modelo H 33 AR);

(f) medidor de vibrações, com alta sensibilidade para verificar a intensidade das vibrações propagadas na máquina (leitura de meia amplitude de onda)(Philips, modelo PR 9252);

(g) aparelhagem completa para polimento e ataque metalográfico para confecção das amostras metalográficas (Presi, modelo Mecapol - 2B);

(h) microscópio metalográfico para observar e fotografar as amostras metalográficas (Olimpus, modelo PME);

(i) medidor de resistência elétrica de quatro pontas, para verificar as propriedades elétricas dos fios, com sensibilidade para leitura de mili-ohms (Keithley, modelo 32295 A).

6.2. Resultados Obtidos

Na tabela XXIV encontram-se os resultados da primeira série de experiências, observando-se a sequência de reduções, força de trefilação junto à primeira fieira e propriedades mecânicas do fio. Os valores médios das medições de diâmetro dos fios e a resistividade elétrica para essa série de ensaios podem ser vistos na tabela XXV.

A figura 44 apresenta macrografias de secções longitudinais do fio inicial e de um fio capilar. Na figura 45 é apresentada uma sequência de micrografias de secções longitudinais dos fios em vários estágios da primeira série, fazendo-se uma comparação com as propriedades mecânicas do fio correspondentes a esses estágios.

Os resultados da segunda série de ensaios podem ser observados na tabela XXVI, na qual se encontram a sequência de reduções, forças de trefilação e propriedades mecânicas para os três níveis de velocidade. Os resultados das verificações do diâmetro e da resistividade elétrica dos fios, para a segunda série de experiências podem ser vistos na tabela XXVII.

Na tabela XXVIII encontram-se os resultados das medições da intensidade das vibrações propagadas na máquina.

Na tabela XXIX e figura 46 observa-se uma comparação entre as tensões de trefilação encontradas experimentalmente e as tensões encontradas segundo as expressões de SIEBEL⁽⁵⁾ e AVITZUR⁽⁶⁾. Essas expressões foram escolhidas para a comparação

Tabela XXIV - Resultados dos Ensaio Preliminares com Três Motores							
Passes Nº	Sequência de Reduções			Redução Total(% Diâmetro)	Força de Trefilação na 1ª. Redução Parcial (kgf)	Propriedades Mecânicas	
	D ₁ (µm)	D ₂ (µm)	D ₃ (µm)			Limite de Resistência(kgf/mm ²)	Alongamento (% em 200mm)
1	920	836	758	24,3	-	27,3	24,5
2	689	623	565	25,4	-	39,1	24,0
3	513	465	422	25,3	-	41,5	23,5
4	383	347	316	25,3	-	44,6	19,5
5	286	260	236	25,4	-	43,5	18,0
6	213	194	176	25,1	-	45,2	15,0
7	160	145	131	25,6	0,320	46,6	13,5
8	119	108	98	25,2	0,168	46,7	12,7
9	89	81	73	25,5	0,120	46,1	11,3
10	66	60	55	24,6	0,070	47,2	7,5

OBS: O fio inicial é de cobre ETP recozido com as seguintes características:

$D = 1000\mu m, A = 30,2\% \text{ em } 200 \text{ mm}, \sigma_t = 26,1 \text{ kgf/mm}^2.$

Tabela XXV - Dimensões dos Fios e Resistividade Elétrica
na Primeira Série de Ensaio

Passe Nº	Diâmetro Nomi- nal de Saída (μm)	Diâmetro Medi- do (μm)	Erro (%)	Resistivi- dade Elé- trica (micro.ohm/ cm)
1	758	-	-	-
2	565	565,9	+0,2	1,87
3	422	418,8	-0,8	1,91
4	316	313,7	-0,8	1,91
5	235	235,1	-0,04	2,0
6	176	175,3	-0,4	2,02
7	131	129,4	-1,2	-
8	98	97,5	-0,5	-
9	73	72,4	-0,8	-
10	55	54,7	-0,5	2,29

Tabela XXVI - Resultados dos Ensaios Preliminares com um Motor e Três Velocidades Diferentes para cada Redução										
Redução Nº	Diâmetro de Saída (μm)	Força de Trefilação(kgf)			Propriedades Mecânicas					
		F ₁	F ₂	F ₃	Limite de Resistência(kgf/mm ²)			Alongamento(%em 200mm)		
					σ_1	σ_2	σ_3	A ₁	A ₂	A ₃
1	160	0,304	0,326	0,338	48,2	47,7	46,7	13,4	13,6	13,5
2	145	0,296	0,304	0,314	48,3	47,8	47,6	13,4	13,2	13,0
3	131	0,242	0,266	0,272	49,7	47,9	48,0	12,7	12,8	12,5
4	119	0,198	0,206	0,216	49,0	47,6	49,3	13,0	12,5	12,2
5	108	0,164	0,174	0,182	49,7	48,1	48,4	12,8	12,2	12,0
6	98	0,154	0,161	0,164	49,2	50,1	49,4	12,5	13,0	11,9
7	89	0,120	0,124	0,134	49,0	49,3	49,5	12,7	12,5	11,7
8	81	0,098	0,101	0,104	50,4	49,5	49,6	12,4	12,2	11,5
9	73	0,086	0,094	0,098	49,2	49,4	49,7	11,8	12,3	9,5
10	66	0,070	0,070	0,070	49,4	49,7	50,2	10,5	11,0	8,5
11	60	0,056	0,056	0,060	50,2	49,9	50,5	9,0	9,5	7,5
12	55	0,036	0,036	0,036	49,7	50,1	50,9	7,5	7,0	7,0

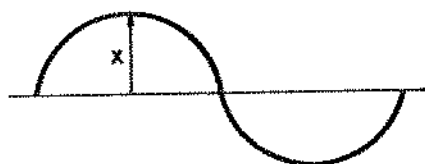
OBS: O fio inicial é de cobre ETP recozido quando com 1000 μm .

Dados do Fio: D= 176 μm , A= 15,0% em 200 mm, $\sigma_f = 45,2 \text{ kgf/mm}^2$. As velocidades de trabalho foram: $V_1 = 4,6 \text{ m/s}$, $V_2 = 6,6 \text{ m/s}$ e $V_3 = 15,3 \text{ m/s}$. As reduções de área foram de 18% para cada passe.

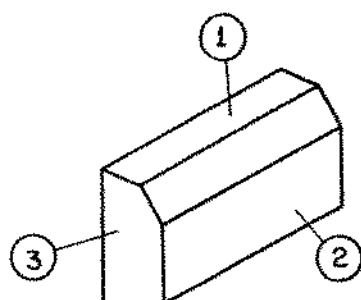
Tabela XXVII - Dimensões dos Fios e Resistividade Elétrica na Segunda Série de Ensaios										
Redução N°	Diâmetro Nominal de Saída (µm)	Diâmetro Medido (µm)			Erro (%)			Resistividade Elétrica (microhm/cm)		
		V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
1	160	160,1	160,3	159,7	+0,06	+0,1	-0,1	-	-	-
2	145	144,6	144,3	144,8	-0,3	-0,5	-0,1	1,70	1,81	1,80
3	131	129,4	129,7	130,0	-1,2	-1,0	-0,8	-	-	-
4	119	118,1	-	117,0	-0,7	-	-1,7	1,9	-	1,98
5	108	108,4	108	107,7	+0,4	0	-0,3	-	-	-
6	98	97,9	97,6	96,1	-0,1	-0,4	-4,0	-	-	-
7	89	-	89,1	88,3	-	+0,1	+0,1	1,9	2,23	2,30
8	81	-	81,2	79,9	-	+0,2	-0,1	-	-	-
9	73	-	72,3	71,8	-	-0,9	-1,6	-	-	-
10	66	-	-	64,4	-	-	-2,4	-	-	-
11	60	-	59,2	59,8	-	-1,3	-0,3	-	-	-
12	55	54,8	54,8	54,2	-0,4	-0,4	-1,4	2,30	2,04	2,35

Tabela XXVIII - Resultados de Medições da Intensidade das vibrações Propagadas na Máquina.

(X = valor de meia amplitude em μm)

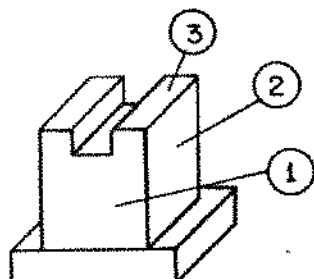


A - Sistema de Proteção



	V.trab.	V.máx.
Plano 1	X = 0,2	X = 3
Plano 2	X = 0,6	X = 8
Plano 3	X = 0,8	X = 10

B - Porta-Fieira



	V.trab.	V.máx.
Plano 1	X = 0,4	X = 3
Plano 2	X = 0,4	X = 3
Plano 3	X = 0,4	X = 4

C - Tampo da Mesa

V.trab.	V.máx.
X = 0,5	X = 2

Obs: V_t = velocidade de trabalho

V_{max} = velocidade máxima dos motores.

porque foram as que deram melhores resultados de acordo com o estudo realizado por SPINOSA-LARRAGUIBEL-NEGRONI⁽⁷⁾.

Uma comparação análoga é feita para a segunda série de ensaios na tabela XXX e figura 47.

6.3. Discussão dos Resultados

6.3.1. Controle de Qualidade dos Fios

O controle de qualidade dos fios capilares estabelecido no capítulo 2, pode ser aplicado apenas parcialmente nas experiências realizadas, devido a falta de aparelhagem adequada.

Para se obter as melhores condições de trabalho, seria necessário fazer verificações das propriedades mecânicas e dimensões logo após o processamento do fio; e se caso essas propriedades não estivessem de acordo com o esperado, deveriam ser modificadas as condições de operação da máquina. Para isso deveriam ser retiradas amostras de comprimentos suficientemente grandes para se fazer tantos ensaios de tração quanto fossem necessários (mais de três ensaios para grandes dispersões). O mesmo deveria ser feito em relação às medições de diâmetro, através de micrômetro ou pelo método de pesagem.

Como não existiriam em nossos laboratórios, na época em que foram realizados os ensaios de trefilação, micrômetro especial para medir fios e nem a máquina de ensaios de tração adequada, foram retiradas amostras em cada etapa e analisadas após o término de todos os ensaios. As experiências de medições de diâmetro foram feitas posteriormente com micrômetro adquirido e pelo método da pesagem e as propriedades mecânicas foram verificadas em uma empresa industrial. Quando três ensaios não eram suficientes para se obter uma distribuição de medidas com pouca dispersão, não havia possibilidade de se fazer mais ensaios.

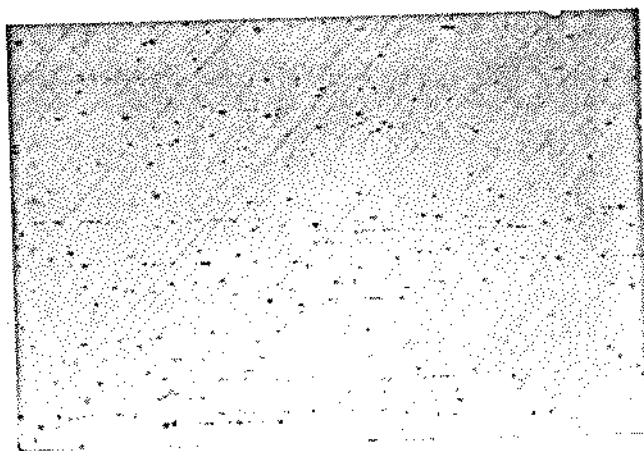
6.3.2. Dimensões dos Fios

As tolerâncias dimensionais dos fios na primeira e segunda série apresentaram-se dentro da especificação (Tabela III). A maioria dos erros percentuais em diâmetro foi próximo a 1,0% e de acordo com a especificação, as tolerâncias admissíveis para os fios capilares variam de 3 a 10% , conforme o diâmetro do fio.

Com o aumento da velocidade de trefilação, notou-se nos valores de diâmetro medidos uma ligeira tendência a se distan

Tabela XXIX - Comparação entre as Tensões de Trefilação Experimentais e as Tensões de Trefilação segundo Expressões de SIEBEL ⁽⁵⁾ e AVITZUR ⁽⁶⁾ para a Primeira Série de Ensaios.				
Diâmetro (μm)		Tensão de Trefilação (Kgf/mm^2)		
Inicial	Final	Exp.	Siebel	Avitzur
176	160	13,5	9,9	15,3
131	119	13,0	9,6	15,7
98	89	16,0	10,2	15,7
73	66	16,6	10,8	15,7

Obs: Para os cálculos utilizaram-se os seguintes valores:
 $\mu = 0,1$ (estimado) , $\bar{\sigma}_0 = 22,5 \text{ kgf/mm}^2$ (determinado experimentalmente), $\alpha = 0,3 \text{ rd}$ e $f(\alpha) = 1$.



A - $d = 1 \text{ mm}$



B - $d = 131 \mu\text{m}$

Figura 44 - Macrografias de secções longitudinais de um fio inicial ($d=1\text{mm}$) e de um fio capilar ($d=0,131 \text{ mm}$), onde se observa a fibração mecânica do metal. (Aumento = 200 vezes).

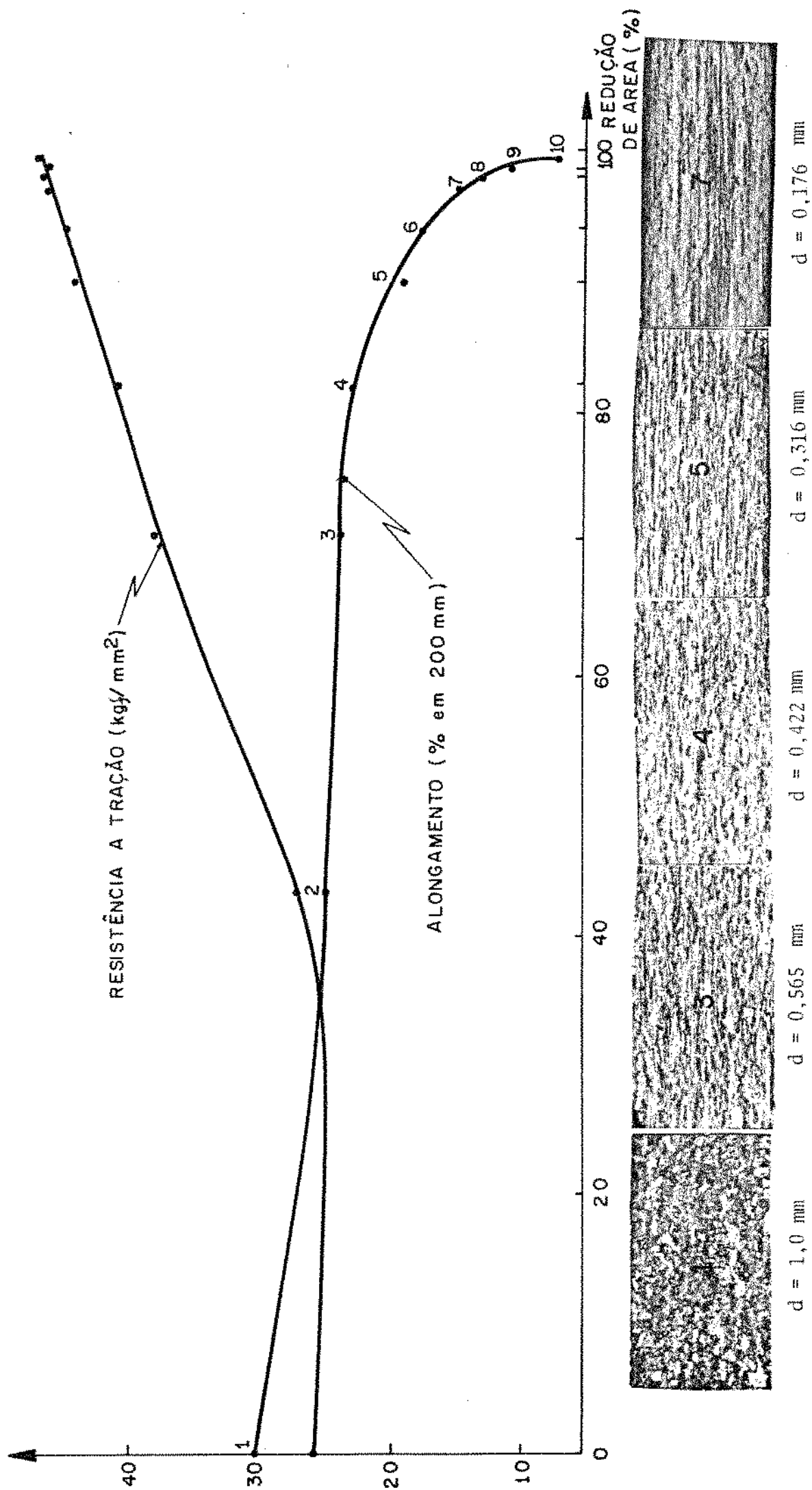


Figura 45 - Comparação entre as propriedades mecânicas do fio em várias etapas e micrografias de seções longitudinais nessas etapas. (Aumento = 200 vezes).

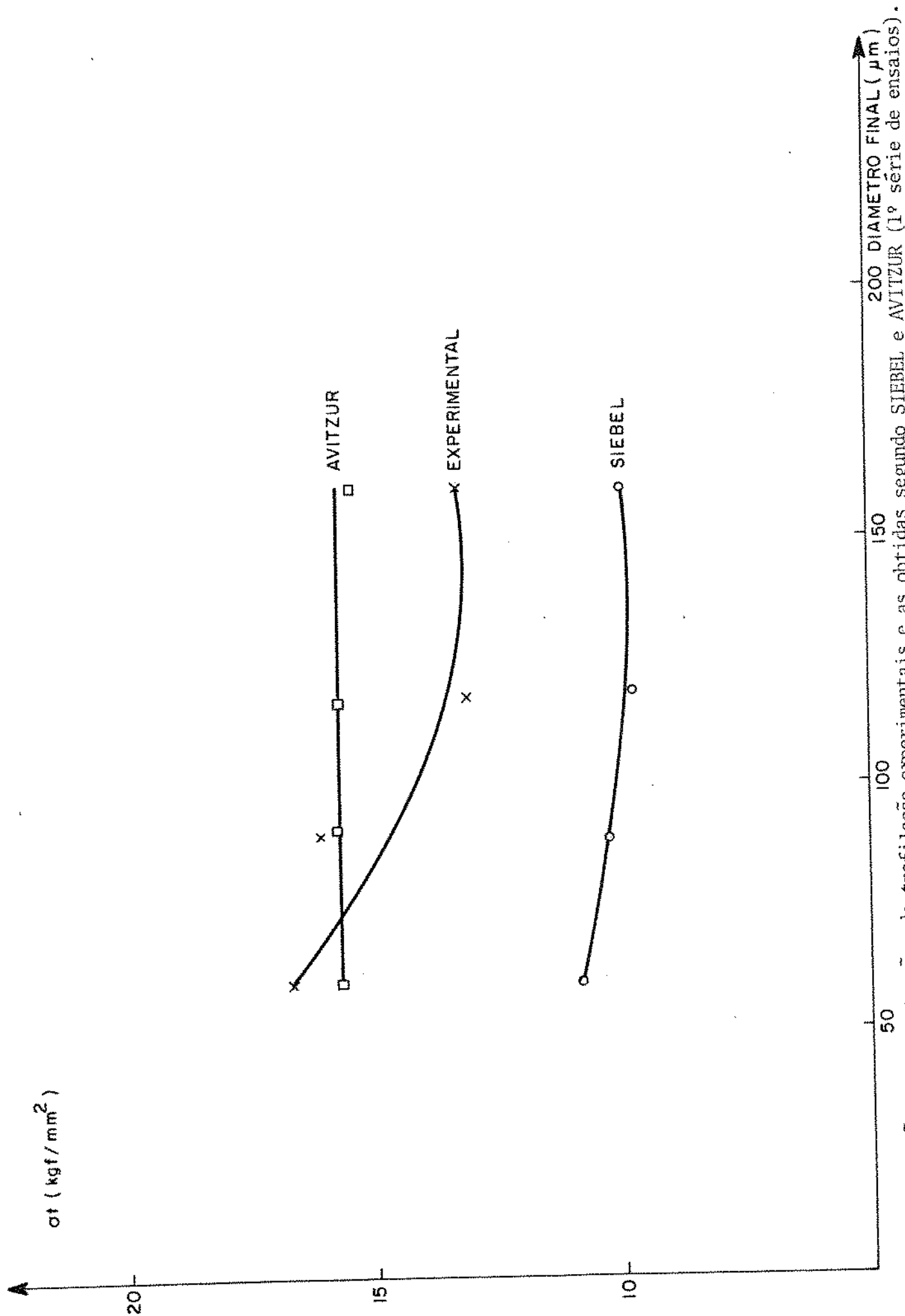


Figura 46 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais e as obtidas segundo SIEBEL e AVITZUR (1ª série de ensaios).

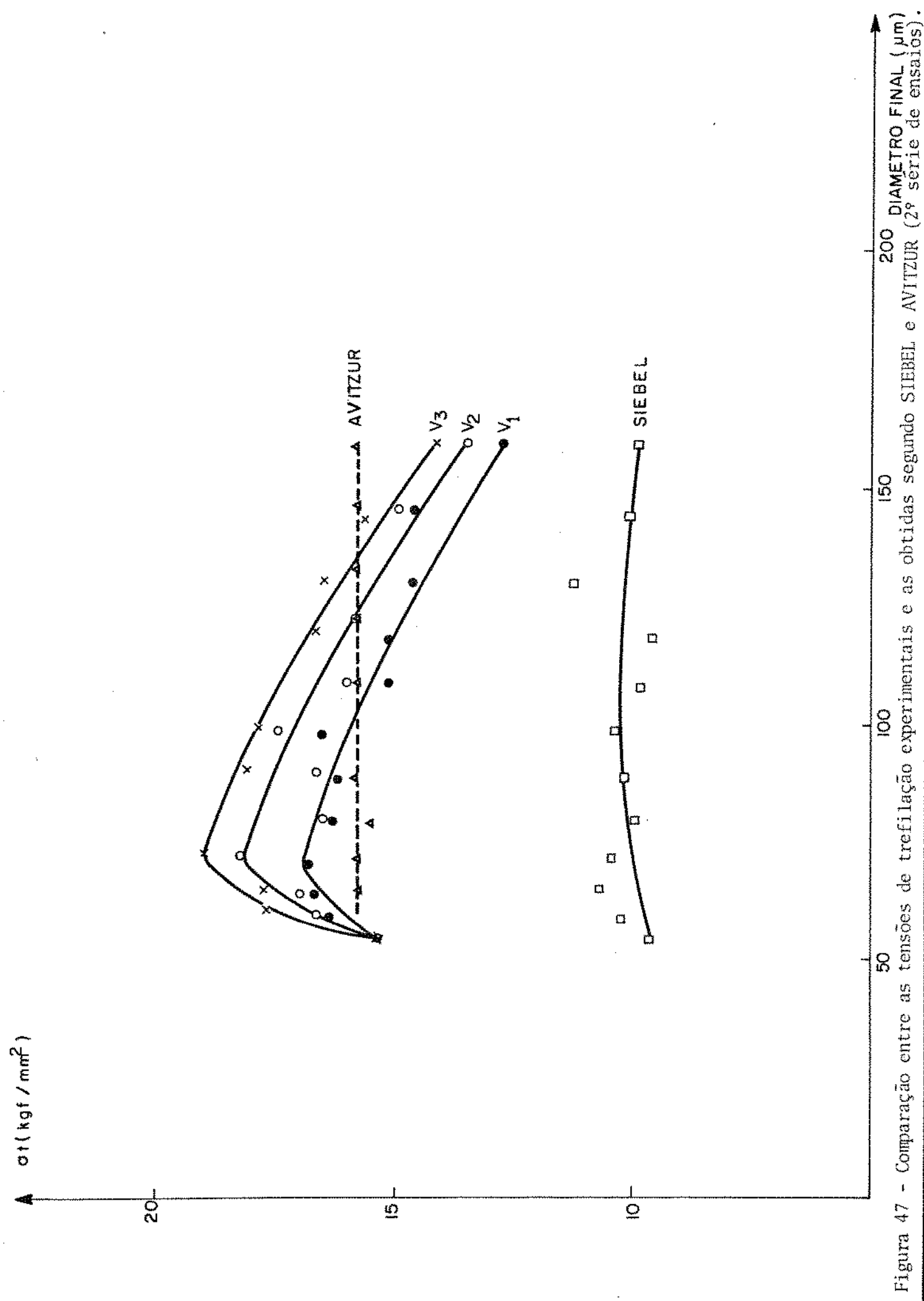


Figura 47 - Comparação entre as tensões de trefilação experimentais e as obtidas segundo SIEBEL e AVITZUR (2ª série de ensaios).

ciarem dos valores nominais pelo lado negativo. Porém como os valores dos erros foram muito baixos, os diâmetros dos fios trefilados a velocidades V_3 (15,3 m/s) podem ser considerados satisfatórios. É necessário realizar novos ensaios a velocidades mais altas para comprovar essa tendência. Se o acréscimo percentual do erro com a velocidade for tão baixo, quanto pareceu ser nos ensaios realizados, é provável que quando se conseguir trefilar às altas velocidades almejadas (30-40 m/s), os fios ainda estarão dentro da especificação dimensional.

Quando à regularidade do diâmetro, em ambas as séries os fios apresentaram bom resultado, quando observados no microscópio e comparando-se as medidas de diâmetros das três amostras. As ondulações observadas visualmente correspondiam, na maioria das vezes, a erros do operador na colocação do fio na máquina.

6.3.3. Forças de Trefilação

Da primeira série de reduções pode-se verificar que, com o dispositivo de medição de forças construído foi possível efetuar a medição de forças de trefilação de fios com diâmetros abaixo de 0,176 mm. Para verificar as forças de trefilação em fios mais grossos, deve-se modificar as dimensões da haste metálica do dispositivo de medição de forças.

Na segunda série de experiências observou-se claramente que a força de trefilação aumentou com a elevação da velocidade. Essa constatação coincide com as conclusões de alguns pesquisadores (8,9).

Observou-se também que para os fios com diâmetros abaixo de 0,073 mm os valores da força encontrados forma praticamente constantes. Acredita-se que o motivo desse comportamento seja a amplitude da escala do aparelho de leitura da deformação dos extensômetros (ponte amplificadora), pois para deformação mais baixas a leitura destas no visor torna-se mais imprecisa. É necessário verificar o dispositivo de medição de forças em outro aparelho amplificador, com visor de leitura amplo, ou digital, de modo que seja possível diferenciar as leituras de deformações para os fios finos. Caso as forças de trefilação para esses fios se mantiverem constantes, mesmo usando aparelho de leitura mais preciso, então será necessário aperfeiçoar o dispositivo de medição de forças.

6.3.4. Propriedades Mecânicas dos Fios

Através da figura 45, correspondente à primeira série de ensaios observou-se claramente o efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas do metal, ocorrendo um aumento da resistência mecânica e uma diminuição do alongamento com a diminuição porcentual da área da secção transversal do fio. O efeito do encruamento também foi notado pela comparação entre as micrografias das secções longitudinais correspondentes a algumas etapas do processo e as propriedades mecânicas.

Da segunda série de ensaios (Tabela XXVI) observou-se que a resistência mecânica do fio à tração aumentou com a elevação da velocidade e o alongamento diminuiu, porém alguns valores fugiram dessa tendência geral. Provavelmente isso ocorreu devido a inexperiência na manipulação da máquina de ensaio, o que tornaria necessário efetuar mais de três ensaios de tração, devido a dispersão encontrada nos resultados. Outro fator que influenciou para o desvio de alguns pontos foi o uso de acessórios da máquina de ensaios que não eram os mais adequados para se efetuar ensaios de tração em fios capilares; a célula de carga utilizada foi de 100 kgf, sendo usadas para os ensaios as escalas mínimas do aparelho, que não eram recomendadas pelo fabricante; outro problema foram as garras utilizadas para prender os fios capilares, que também não eram as recomendadas para esses tipos de ensaios.

6.3.5. Propriedades Elétricas

As medidas das propriedades elétricas dos fios verificadas na primeira e segunda séries de ensaios apresentaram resultados aparentemente de acordo com o esperado, ou seja a resistividade elétrica aumentou com o aumento do encruamento do metal, e consequentemente a condutibilidade elétrica diminuiu. Porém, observa-se que entre o valor inicial e final da resistividade elétrica (1,77 e 2,3 micro-ohm.cm) correspondentes respectivamente a valores de condutibilidade elétrica de 99,10 e 74,0% IACS; portanto houve uma redução de 25%, valor muito grande de um metal como o cobre eletrolítico tenaz, que segundo referência bibliográfica⁽¹⁰⁾ deve diminuir cerca de 4% para 8% de redução de área. Essa constatação leva a crer que os ensaios para medir a resistividade elétrica dos fios não foram corretos. Realmente não foi obedecida a norma técnica para esses tipos de ensaios⁽¹¹⁾ por falta de aparelhagem adequada (ponte dupla de Kelvin ou potenciômetro

de alta sensibilidade). O aparelho utilizado para os ensaios (medidor de resistência elétrica de quatro pontas), embora seja muito sensível, não é indicado para ensaiar fios capilares.

6.3.6. Vibrações

Os resultados das medições de vibrações propagadas na máquina quando os motores estavam em funcionamento foram muito baixos. Nos locais mais críticos, que são os lados do porta-fieira, a máxima intensidade medida (meia amplitude de onda) foi de $0,4\mu\text{m}$. Como para os fios capilares, por exemplo de $55\mu\text{m}$ de diâmetro as tolerâncias dimensionais máximas permitidas são de 10% do diâmetro, portanto de $5,5\mu\text{m}$. Nesse caso as vibrações transmitidas na máquina não vão tirar o fio da faixa de diâmetros permitidas. Nem mesmo às velocidades máximas dos motores, que correspondem a uma velocidade do fio de 153 m/s, a vibração tiraria o fio da especificação. Isso significa que na máxima velocidade de trabalho almejada (40 m/s), as vibrações do equipamento não vão prejudicar a qualidade do fio.

6.3.7. Comparação entre Tensões de Trefilação Determinadas Experimentalmente e segundo Expressões de SIEBEL⁽⁵⁾ e AVITZUR⁽⁶⁾

Da comparação entre as tensões de trefilação experimentais e as determinadas segundo teorias de SIEBEL e AVITZUR para a primeira série de ensaios pouca coisa se pode observar devido ao reduzido número de pontos. Nota-se que aparentemente os valores obtidos segundo AVITZUR são os que mais se aproximam dos valores experimentais; essa constatação é confirmada na segunda série de ensaios. Contudo deve-se observar que as expressões dos autores citados não consideram a influência da velocidade na tensão de trefilação.

Os valores da tensão de trefilação obtidos segundo SIEBEL e AVITZUR são aproximados pois, o coeficiente de atrito foi estimado, em vez de ser determinado experimentalmente e além disso o limite de escoamento do metal utilizado nessas expressões foi o valor médio entre o determinado para o fio inicial e para o fio final, determinando a constância das tensões de trefilação em relação ao aumento do encruamento.

Em face das aproximações feitas na utilização das expressões teóricas da tensão de trefilação, não foi possível fa

zer comparações mais detalhadas sobre a mecânica da deformação aplicada à trefilação, com as experiências realizadas.

6.3.8. Propriedades Metalúrgicas

Sobre a metalurgia da deformação aplicada à trefilação foram efetuadas apenas duas observações. Na primeira delas verificou-se a fibração cristalográfica do material devido ao trabalho a frio (figura 45), pela orientação da estrutura metalográfica na direção da deformação principal (direção de trefilação). Na figura 44, onde se encontram macrografias de secções - longitudinais do fio, observou-se a fibração mecânica do metal, pela orientação das inclusões na direção da deformação principal. Verificou-se que esse tipo de fibração já existia de processos de conformação anteriores à trefilação efetuada.

6.4. Referências Bibliográficas

- (1) Fios de Cobre Nus de Secção Circular para Fins Elétricos : Especificação - Norma Técnica da ABNT EB-11, São Paulo, 1970, pp.1-6.
- (2) PAPARONI, F. - Trafilati di Rame, Revista Il Rame, Cisar , n° 15, 1965, pp. 3-14.
- (3) Gold Wire for Semiconductor Lead - Bonding - Norma Técnica da ASTM F72-74, vol.43, 1975, Phyladelphia, pp.321-325.
- (4) Measuring Diameter of Fine Wire By Weighing - Norma Técnica da ASTM, F205-63, vol.43, 1975, Phyladelphia, pp.596-598.
- (5) SIEBEL, E., Stahlu. Eisen, vol.66-67, 1947, p.171, in ESPINOSA e outros, Anais da V Conferência Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, p.376.
- (6) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Series B , vol.86, n° 4, 1964.
- (7) ESPINOSA, R.; LARRAGUIBEL, J.S.; NEGRONI, F. - Analisis Teorico Experimental de las Expresiones para Predecir la Tension Media de Trefilacion, Anais da V Conferência Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, pp.369-377.
- (8) BARON, H.G.; THOMPSON, F.C. - Friction in Wire Drawing, J.Inst. Metals, vol.78, 1950-51, p.447.
- (9) BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopedia del Aluminio - Fabrication de Semiprodutos (vol.3), Ed. Urmo, Bilbao, 1968, pp.226-231.
- (10) Metals Handbook, American Society for Metals, USA, vol.1 , p.1204.
- (11) Standard Method of Test for Resistivity of Electrical Conductor Materials - Norma Técnica da ASTM, B 193-72a, vol.6, 1975, Philadelphia, pp.362-365.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

- (1) O funcionamento da máquina foi satisfatório para as velocidades de trabalho adotadas. Porém, algumas modificações deverão ser feitas, com relação aos componentes da máquina para que o desempenho melhore às altas velocidades e para os fios mais finos (diâmetros abaixo de 0,073 mm).

Os principais componentes que necessitam ser modificados são:

- (a) o regulador de tensões da bobinadeira e desbobinadeira ;
- (b) o circuito do controle individual de velocidade do terceiro motor;
- (c) o dispositivo de medição de forças.

- (2) Da primeira série de experiências, com três motores em funcionamento, a velocidades praticamente constantes, foi possível verificar a viabilidade de se realizar três reduções parciais por passe, sem prejudicar a qualidade final do fio.

- (3) Da segunda série de experiências, com um motor em funcionamento, porém a três níveis de velocidade, pode-se observar o seguinte:

(a) a força, e portanto, a tensão de trefilação aumentam com o aumento da velocidade;

(b) a resistência mecânica à tração do metal aumenta e o alongamento diminui com o aumento da velocidade;

(c) os valores médios dos diâmetros dos fios diminuíram com o aumento da velocidade, porém os valores dos erros percentuais de diâmetro verificados foram muito baixos, e portanto, à velocidade máxima de ensaio (15,3 m/s) os diâmetros estavam dentro das tolerâncias dimensionais;

(d) o dispositivo de medição de forças não apresentou

sensibilidade para medir forças de trefilação de fios com diâmetros abaixo de 0,073 mm;

- (4) As intensidades das vibrações transmitidas na máquina em funcionamento foram mínimas, e nos níveis em que ocorreram não vão prejudicar a qualidade dos fios, através de ondulações.
- (5) Da comparação entre as tensões de trefilação experimentais e as determinadas segundo expressões teóricas de SIEBEL e AVITZUR, pode-se através de uma primeira estimativa verificar que a teoria que fornece resultados mais próximos aos resultados experimentais é a de AVITZUR. Convém salientar que para os estudos mais precisos é necessário determinar experimentalmente o coeficiente de atrito utilizado nas expressões. A variação do limite de escoamento com o encruamento também deve ser considerada para se obter valores mais exatos da tensão de trefilação.
- (6) As rupturas do fio se deram mais devido a erros de manipulação da máquina, do que devido a defeitos do material (inclusões e vazios) ou devido a problemas relacionados com o processamento. Chegou-se a essa conclusão devido a constatação de que o número de rupturas diminuiu à medida em que se otimizou o processo e o operador se ambientou com o equipamento. Além disso as rupturas ocorreram com maior frequência em regiões danificadas (laçadas) devido à trefilação manual.
- (7) Os resultados experimentais, tanto da verificação das dimensões como da verificação das propriedades mecânicas, são influenciados pela habilidade do operador nesses tipos de ensaios, que apresentam uma certa dificuldade devido as pequenas dimensões das amostras. À medida em que o operador vai adquirindo experiência, os erros experimentais vão diminuindo. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho, que foram realizados por operador inexperiente, podem conter erros devido a essa falta de habilidade. Esses erros deverão ser minimizados nas próximas experiências.
- (8) Para se determinar se os fios capilares obtidos através da máquina de trefilar de laboratório preenchem todos os requi-

sitos para serem utilizados pela indústria de dispositivos eletrônicos, além do controle de qualidade já efetuado, é necessário que se faça uma comparação minuciosa entre as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos fios obtidos e dos fios importados. Com os fios de cobre, não foi possível fazer essa comparação, pois o cobre não costuma ser utilizado como elemento de ligação em microcircuitos. Nas próximas etapas de trabalho (trefilação de ouro e da liga alumínio-silício), haverá condições para se fazer esse tipo de comparação.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFIA

8.1. Bibliografia Referida

- (1) AMBROSIUS, E.E.; FELLOWS, R.O; BRICKMAN, A.D. - Measurement and Instrumentation, The Ronald Press Co., New York, 1966.
- (2) AVENAS, P. e outros - Mise en Forme des Metaux et Alliages, Central National de la Reserche Scientifique, Paris, 1976.
- (3) ASME Handbook - Metal Properties, McGraw Hill, New York, 1954.
- (4) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Throught Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, Series B, November 1963, pp. 8996.
- (4) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Throught Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Series B, vol.84, nº 4, 1964, pp. 305-316.
- (5) BARON, H.G.; THOMPSON, F.C. - Friction in Wire Drawing, J. Inst. Metals, vol.78, 1950-51, pp.415-462.
- (6) BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopédia del Alumínio Fabrication de Semiprodutos (vol.3), Ed.Urmo, Bilbao, 1968.
- (7) BARRET, C.R.; NIX, W.D. - The Principles of Engineering Materials, Prentice - Hall Inc., New York, 1973.
- (8) BONZEL, M. - Steel Wire: Manufacture and Properties, Engineers Book Shop, New York, 1935.
- (9) BRESCIANI Fº., E. - Conformação Plástica dos Metais, Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, SP, 1977.
- (10) BRESCIANI Fº., E. - Conformação Plástica dos Metais (Fundamentos da Mecânica da Conformação Plástica), Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, SP, 1978.

- (11) BRESCIANI, F^o., E. - Análise do Processo de Trefilação de Fios (Trabalho a ser publicado, UNICAMP/FEC).
- (12) Catálogo da Tanaka Electronics Industry - Fine Wires for Semiconductors Lead-Bonding, Tokyo.
- (13) Catálogo da Secon Metals Corporation - Wire Products for the Semiconductors Industry, New York.
- (14) Catálogo da S.A. Philips do Brasil - Informações sobre o Produto Comercial Fieiras de Diamante, São Paulo.
- (15) Catálogo da General Electric do Brasil - Fieiras de Diamante.
- (16) Catálogo da Tanaka Electronics Industry - Wire - Drawing, Tokyo.
- (17) Catálogo da Secon Metals Corporation - The Relationship Between Gold Wire Capillary Maintenance, and Device Reability, New York.
- (18) CHRISTOPHERSON, D.G.; NAYLOR, H. - Promotion of Fluid Lubrification in Wire Drawing, Inst. Mech. Eng., vol. 169, 1965, pp. 1965, pp. 643-653.
- (19) CLEAVER, F.T.; MILLER, H.J. - Wire Drawing: Technique and Equipment, J. Inst. Metals, vol. 78, 1950, pp. 537-562.
- (20) COELHO, A.R.Z.; MAGNAVANCCA, E.H. - Lubrificação a Seco em Trefilação de Arames de Aço-Carbono, Metalurgia, vol. 3, Outubro, 1975, pp. 651-657.
- (21) COHN, J.G. - Selected Properties of Gold, Gold Bulletin, vol. 12, nº 1, 1979, pp. 21-24.
- (22) DELIJAICOV, S. - Análise da Extrusão de Barras Cilíndricas em Matriz Cônica pelo Método do Limite Superior, Seminário Pós-Graduação EPUSP, São Paulo, 1978.

- (23) DIETER, G.E. - Mechanical Metallurgy, McGraw - Hill Kogakusha, Tokyo, 1976.
- (24) DOEBBELIN, E.O. - Measurement Systems: Application and Design, McGraw - Hill Kogakusha, Tokyo, 1966.
- (25) ESPINOSA, R.; LARAGUIBEL, J.S.; NEGRONI, F. - Analisis Teórico Experimental de las Expresiones para Precedir la Tension Media de Trefilacion, Anais da V Conferencia Inter-Americana de Tecnologia de Materiais, São Paulo, 1978, pp.369-377.
- (26) GOMES, M.R.; BRESCIANI, F., E. - Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1977.
- (27) GREENWALD, B.W. - Wire Drawing Lubrificants: A Review a Preview, Wire Journal, vol.10, May 1975, pp.74-78.
- (28) Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics, ed. Chales Harper, McGraw - Hill, New York, 1974.
- (29) Integrated Circuits: Design Principles and Fabrication, Motorola Inc. McGraw - Hill, 1965.
- (30) JOHNSON, W.; MELLOR, P.B. - Engineering Plasticity, van Nostrand, London, 1973.
- (31) MacLELLAN, G.D. - Some Friction Effects in Wire Drawing, J. Inst. Metals, vol.81, 1952-53, pp.1-13.
- (32) MAJORS, H. - Studies in Cold - Drawing, Part 3, Trans.ASME, January 1956, pp.79-87.
- (33) MAMMANA, C.I.Z. - De Re Semiconductora, Apostilas Pós-Grad. D.E.E., EPUSP, São Paulo, 1959.
- (34) MARKS, L.S. - Mechanical Engineers Handbook, ed. McGraw - Hill, New York, 1951.
- (35) MASTEROV, V.; BERKOVSKY, V. - Theory of Plastic

- Deformation and Metal Working, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- (36) Metals Handbook, American Society for Metals, New York , vol.1, 1975.
 - (37) Norma Técnica da ASTM F 72-74 - Gold Wire for Semiconductor Lead - Bonding , vol.43, Philadelphia, 1975.
 - (38) Norma Técnica da ASTM B 562-73 - Standard Specification for Refined Gold, vol.8, Philadelphia, 1975.
 - (39) Norma Técnica da ABNT EB-11 - Fios de Cobre Nus de Secção Circular para Fins Elétricos: Especificação, São Paulo, 1970.
 - (40) Norma Técnica da ASTM F 205-63 - Measuring Diameter of Fine Wire By Weighing, vol.43, Philadelphia, 1975.
 - (41) Norma Técnica da ASTM B 193-72a - Standard Method of Test for Resistivity of Electrical Conductor Materials ,vol.6, Philadelphia, 1975.
 - (42) PAPARONI, F. - Trafilati di Rame, Revista Il Rame, n°s.6 a 23, Cisar, Milão, 1963 a 1970.
 - (43) Primeiro Relatório Técnico de Progresso do Projeto Telebrás MGE, 1º Semestre 1977, Anexos 8 e 9.
 - (44) RACETTE, J.H.; HALL, R.N. - Diffusion and Solubility of Copper in Extrinsic and Intrinsic Germanium, Silicon and Galium Arsenide, J.Applied Physic, vol.35, February 1964, pp.379-397.
 - (45) RAMSEY, T.H. - Metallurgical Behavior of Gold Wire in Thermal Compression Bonding, Solid State Tech., vol.16, 1973, pp.44-45.
 - (46) REED-HILL, R.E. - Principios de Metalurgia Física, Comp. Editorial Continental, México, 1972.
 - (47) ROWE, G. - Conformado de los Metales, ed.Urmo, Bilbao, 1972.

- (48) SMITH, J.H.; BEVER, M.B. - The Stored Energy, Electrical Resistivity and Tensile Properties of Cold - Worked Gold, Trans. Met. Society of AIME, vol. 243, 1968, p. 880.
- (49) STERN, L. Fundamentals of Integrated Circuits, Handen Book Co., New York, 1969.
- (50) THOMSEM, E.G.; YANG, C.T.; KOBAYASHI, S. - Plastic Deformation and Metal Working, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- (51) THOMSON, P.F. ; HOGGART, J.S.; SUITER, J. - Drawing Copper Wire with a Lubrificant under Extremally Generated Pressure, J. Inst. Metals, vol. 95, 1967, pp. 152-156
- (52) THOMSON, P.F. ; HOGGART, J.S. - Drawing Copper Wire with a Pressure Tube and Independently Pressurized Lubrificant, J. Inst. Metals, vol. 96, 1968, pp. 225-228.
- (53) YANG, C.T. - On The Mechanism of Wire Drawing, Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind., vol. 89, 1961, pp. 523-530.
- (54) WHITTON, P.W. - The Calculation of Drawing Force and Die Pressure in Wire Drawing, J. Inst. Metals, vol. 86, 1958 , pp. 417-421.
- (55) WISTREICH, J.G. - The Fundamentals of Wire Drawing , Metallurgical Reviews, vol. 3, n° 10, 1958, pp. 97-142.
- (56) WISTREICH, J.G. - Investigation of the Mechanism of Wire Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 169, 1965 , pp. 654-665.

8.2. Bibliografia Consultada mas não Referida

- (1) ANDERSON, O.L.; CHRISTENSEN, H.; ANDREATCH, P. - Technique for Connecting Electrical Leads to Semiconductors, J.Appl. Phys., vol.28, August, 1957, p.923.
- (2) BACKOFEN, W. - Fundamentals of Deformation Processing, Syracuse University Press, New York, 1964.
- (3) CHASTON, J.C. - Industrial Uses of Gold, Inst.Metals Reviews, March 1977, p.25.
- (4) CAIRNS, J.H. e Outros - The Structure and Mechanical Properties of Heavily Deformed Copper, J.Inst. Metals, vol.99, 1971, pp.93-97.
- (5) NUTTING, J. and NUTTALL, J.L. - The Maleability of Gold, Gold Bul., 1975, nº 2, pp.2-5.
- (6) RABINOWICZ, E. - Friction and Wear of Materials, ed. Wiley Interscience, New York, 1965.
- (7) ROWE, G.E. - Wire Manufacture Int. Metals Reviews, December 1977, pp.341-354.
- (8) SCHAEFFER, L. - Trefilação de Arames de Aço com Lubrificação sob Pressão Hidrostática, Engenharia na Indústria, nº 18, p.50, Junho 1975.
- (9) SCHEY, J.A. - Metal Deformation Process - Friction and Lubrification, M.Dekker Inc., New York, 1970.
- (10) SHMIDT, R. - Mechanism of Lead Failures in Thermocompression Bonds, Trans. Electron Devices, vol. ED-9, p.506, November 1962.

SIMBOLOGIA

σ_{tr}	= limite de resistência à tração
σ_e	= limite de escoamento
σ_t	= tensão de trefilação
ρ_{Me}	= densidade do metal
λ	= alongamento porcentual do fio
β	= redução porcentual de área
δ	= redução porcentual de diâmetro
D	= diâmetro do fio
α	= ângulo de entrada da fieira
β	= ângulo de trabalho
γ	= ângulo de saída
ρ	= resistividade elétrica do fio
l	= comprimento do fio
R	= resistência elétrica do fio
G	= peso do fio
γ	= peso específico do material
ϵ	= deformação específica do extensômetro
E	= módulo de elasticidade do material
M	= momento fletor
y	= flexão da haste
V_g	= tensão aplicada no galvanômetro
K	= constante de sensibilidade de um extensômetro
ΔR	= variação de resistência do extensômetro
R	= resistência elétrica inicial do extensômetro
F	= força que provoca deformação na haste flexível
σ_V	= tensão verdadeira
ϵ_V	= deformação verdadeira
K	= coeficiente de resistência (isto é, tensão para $\epsilon_V=1$)

- n = coeficiente de encruamento
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$ = tensões principais
- k = máxima tensão de cisalhamento
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = tensões normais segunda as três direções cartesianas
- $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ = deformações devido às tensões normais anteriores, respectivamente
- $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ = tensões de cisalhamento
- $\epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{xy}$ = deformações devido às tensões de cisalhamento anteriores
- p = tensão de tração longitudinal no elemento em deformação
- q = tensão de compressão radial no elemento em deformação
- W = trabalho de deformação
- ℓ_0 = comprimento inicial do fio
- ℓ = comprimento final do fio
- A_0 = área inicial do fio
- A_1 = área final do fio
- r = redução de área
- α = semiângulo da fieira
- μ = coeficiente de atrito
- B = $\mu \cot \alpha$
- $\vec{V}^*$ = campo de velocidades
- $\dot{W}_i^*$ = potência interna (ou trabalho por unidade de tempo)
- $\dot{W}_e$ = potência das forças externas
- m = espessura da camada limite (ou fator de cisalhamento)
- σ_{xb} = tensão exercida no fio, na entrada da fieira (contra-pressão)
- R_i = raio inicial do fio
- R_f = raio final do fio
- L = comprimento da região cilíndrica da fieira
- O = origem do sistema de coordenadas esféricas
- r, θ, ϕ = coordenadas do sistema de coordenadas esféricas

r_1, r_2, r_3, r_4 = superfícies do modelo de campo de velocidades cinematicamente admissível

V_i = velocidade do fio na entrada da fieira

V_f = velocidade do fio na saída da fieira

$$G = \frac{1 + \mu \cot \alpha}{1 - \mu \cot \alpha}$$

$$H = \frac{AG}{G-1} - \frac{BG}{(G-1)^2}$$

$$M = \frac{GC}{(G-1+D)}$$

A, B, C, D = constantes da curva característica do material, expressa por $\bar{\sigma} = A + B\bar{\epsilon} + C \exp(D\bar{\epsilon})$

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

1	- Sequência de Passos da Ligação de Fios Capilares por Termopressão	6
2	- Esquema de um Circuito Integrado.....	10
3	- Esquema Simplificado do Processo de Trefilação	15
4	- Perfis Típicos de uma Fieira	15
5	- Parâmetros Comumente Utilizados para Indicar a Variação Dimensional em Trefilação	16
6	- Esquema de uma Máquina de Trefilar em Série, com Deslizamento	19
7	- Esquema da Translação de Fio no Anel	19
8	- Percurso do Fio entre Dois Cones Sucessivos de uma Máquina Cônica	21
9	- Esquema de uma Máquina de Trefilar sem Deslizamento.	21
10	- Diversas Fases da Fabricação de uma Fieira de Diamante	23
11	- Montagem de uma Fieira de Diamante	25
12	- Ângulos e Dimensões Gerais de Fieiras de Diamante Utilizados para Trefilar Cobre, Bronze e Aço.....	25
13	- Defeitos em Trefilação	29
14	- Desenho Esquemático dos Carretéis Usados em Trefilação	39
15	- Etapas do Recondicionamento de uma Fieira.....	63
16	- Perfil de uma Fieira Desgastada.....	63
17	- Máquina de Trefilar de Laboratório: Detalhamento....	73
18	- Vista Geral da Máquina de Trefilar	74
19	- Detalhe da Redução do Fio na Fieira	74
20	- Desbobinadora	75
21	- Bobinadora.....	75

22	- Bobinadora/Desbobinadora: Desenho Demonstrativo da Passagem do Fio	76
23	- Detalhe da Montagem das Engrenagens da Bobinadora.....	78
24	- Sistema de Lubrificação da Máquina de Trefilar	79
25	- Localização dos Motores Acoplados aos Anéis Tirantes..	80
26	- Localização do Motor Acoplado à Bobinadora	80
27	- Sistema Eletrônico de Controle de Velocidades	84
28	- Controle de Velocidades da Trefiladora	85
29	- Esquema do Controle de Velocidades Individual e Geral.	86
30	- Tampo da Mesa da Máquina de Trefilar.....	87
31	- Sistema de Proteção	88
32	- Sub-Conjunto Suporte de Roldana	90
33	- Sub-Conjunto Anel Tirante	91
34	- Sub-Conjunto Porta-Fieira	92
35	- Dispositivo de Medição de Forças de Trefilação.....	94
36-A-	Ponte de "Wheatstone" Completa; B- Representação das Resistências na Ponte; C- Colocação da Ponte na Haste Flexível; D- Vista Geral da Máquina com Dispositivo de Medição de Forças.....	95
37	- Aferição do Dispositivo de Medição de Forças	97
38	- Gráfico Tensão Versus Deformação Verdadeiras num Ensaio Uniaxial de Tensão	108
39	- Ilustração das Tensões Aplicadas num Elemento do Corpo Deformado (Método da Energia Uniforme).....	114
40	- Ilustração do Método da Divisão em Elementos Aplicado à Trefilação	114
41	- Modelo da Zona Plástica Adotado por Avitzur, para a Trefilação	116
42	- Modelo do Campo de Velocidades Cinematicamente Admissível, Adotado por Avitzur	116
43	- Trabalho a Frio, Recuperação, Recristalização e Crescimento de Grão	124

44	- Macrografias de Secções Longitudinais de um Fio Inicial (d=1 mm) e de um Fio Capilar (d=0,131 mm), onde se observa a Fibração Mecânica do Metal	142
45	- Comparação entre as Propriedades Mecânicas do Fio em Várias Etapas e Micrografias de Secções Longitudinais nessas Etapas.....	143
46	- Comparação entre as Tensões de Trefilação Experimentais e as Obtidas Segundo SIEBEL e AVITZUR (1 ^a . Série de Ensaaios)	144
47	- Comparação entre as Tensões de Trefilação Experimentais e as Obtidas Segundo SIEBEL e AVITZUR (2 ^a . Série de Ensaaios).....	146

INDICE DE TABELAS

Pag.

I - Defeitos em Trefilação	30
II - Diâmetros Usuais dos Fios Capilares	31
III - Tolerâncias Dimensionais dos Fios Capilares	32
IV - Composição Química do Cobre Eletrolítico Tenaz (Cu ETP)	32
V - Composição Química dos Fios de Ouro	33
VI - Composição Química dos Fios de Liga Alumínio-Silí- cio	33
VII - Fios de Cobre Mole: Propriedades Mecânicas	34
VIII- Fios de Cobre Meio Duro: Propriedades Mecânicas ..	34
IX - Fios de Cobre Duro: Propriedades Mecânicas	35
X - Propriedades Mecânicas dos Fios Capilares de Ouro em Função do Diâmetro para as Seguintes Condições: Recozido, com Alívio de Tensões e Encruado	36
XI - Propriedades Mecânicas dos Fios Capilares de Liga Alumínio para as Condições: Encruado e com Alívio de Tensões	36
XII - Propriedades Mecânicas dos Fios de Alumínio em Função do Diâmetro para as Seguintes Condições: En- cruado, com Alívio de Tensões e Recozido	37
XIII- Tipos de Carretéis	39
XIV - Carretéis Recomendados em Função da Espessura do Fio	38
XV - Qualidade de Amostras do Lote	43
XVI - Identificação das Variáveis do Processo de Trefila- ção	51
XVII- Propriedades Mecânicas e Elétricas do Cobre, Alumí- nio e Ouro (Recozidos)	54
XVIII- Componentes Típicos de Lubrificantes de Trefilação com suas Funções	55

XIX	- Valores Típicos do Coeficiente de Atrito na Trefilação do Cobre.....	61
XX	- Efeito do material na Vida Média das Fieiras	64
XXI	- Programa de Redução de Diâmetro	99
XXII	- Expressões Teóricas para a Tensão Média de Trefilação	119
XXIII	- Características do Fio de Cobre Usado como Matéria Prima para a Trefilação	131
XXIV	- Resultados dos Ensaios Preliminares com Três Motores	135
XXV	- Dimensões dos Fios e Resistividade Elétrica na Primeira Série de Ensaios	136
XXVI	- Resultados dos Ensaios Preliminares com um Motor e Três Velocidades Diferentes para cada Redução	137
XXVII	- Dimensões dos Fios e Resistividade Elétrica na Segunda Série de Ensaios	138
XXVIII	- Resultados de Medições da Intensidade das Vibrações Programadas na Máquina	139
XXIX	- Comparação entre as Tensões de Trefilação Experimentais e as Tensões de Trefilação Segundo Expressões de SIEBEL e AVITZUR para a Primeira Série de Ensaios...	141
XXX	- Comparação entre as Tensões de Trefilação Experimentais e as Tensões de Trefilação Segundo Expressões de SIEBEL e AVITZUR para a Segunda Série de Ensaios.	145