

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO E AVALIAÇÃO DA
TEMPERATURA E FORÇA DE CORTE COMO SENSORES DE DESGASTE

ABELARDO ALVES DE QUEIROZ

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
AGOSTO - 1976

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO E AVALIAÇÃO DA
TEMPERATURA E FORÇA DE CORTE COMO SENSORES DE DESGASTE

ABELARDO ALVES DE QUEIROZ

TESE SUBMETIDA À APRECIÇÃO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE:

"MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA"
OPÇÃO - FABRICAÇÃO

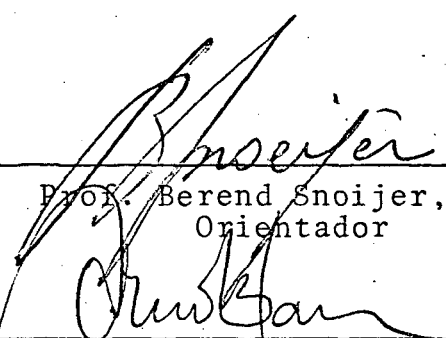
USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO E AVALIAÇÃO DA
TEMPERATURA E FORÇA DE CORTE COMO SENSORES DE DESGASTE

ABELARDO ALVES DE QUEIROZ

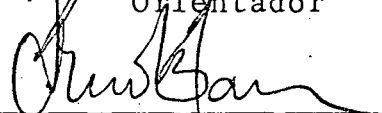
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

"MESTRE EM CIÊNCIAS"

E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO ORI
ENTADOR E PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

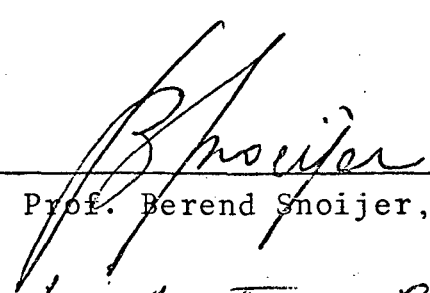


Prof. Berend Snoijer, Ph.D.
Orientador

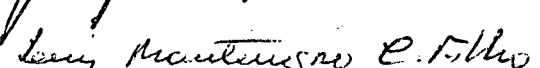


Prof. Arno Blass, Ph.D.
Coordenador da Pós-Graduação em Eng. Mecânica

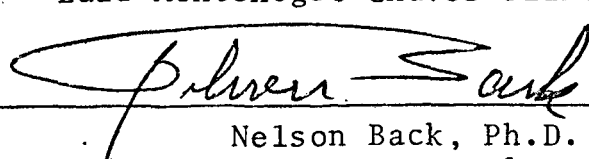
BANCA EXAMINADORA:



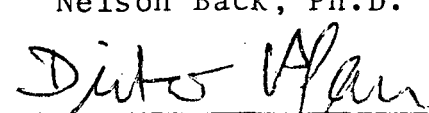
Prof. Berend Snoijer, Ph.D.



Luiz Montenegro Chaves Filho, M.Sc.



Nelson Back, Ph.D.



Dieter Pfau, Ph.D.

À minha esposa

Ao meu filho

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao BNDE, pela ajuda financeira, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

À colaboração do Centro de Pesquisa da Fundação Tu py.

Aos colegas pós-graduandos e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos laboratoristas e desenhistas que participaram a tivamente nos ensaios e na elaboração deste texto.

RESUMO

O fim da vida de uma ferramenta, que é definida como o instante em que a mesma não mais usina com o desempenho desejado, é normalmente correlacionado com um certo grau de desgaste da ferramenta, que é tomado como critério de fim da vida. Com o desenvolvimento das máquinas ferramentas se faz necessário o desenvolvimento de um novo critério que permita informar o estado da ferramenta em operação.

O presente trabalho, consta da análise experimental de dois sensores de desgaste: a temperatura medida por um termopar peça-ferramenta e a força de corte medida por meio de um dinamômetro piezo elétrico. Os dados foram obtidos em ensaios de vida de longa duração com ferro fundido.

Os resultados revelaram que o desgaste não apresentava muito boa correlação com estes sensores, especialmente em baixas velocidades. Isto provavelmente deveu-se à presença de arestas postiças. No entanto observou-se que os mesmos sensores mostraram-se bastantes sensíveis a pequenas variações de velocidade e avanço, levando a concluir que os sensores de desgaste estudados só devem ser usados para materiais e condições de usinagem especiais.

ABSTRACT

The tool life may be defined as the condition in which its performance is no longer suitable. It is usually related to the rate of wear of the tool, and the experiments are based on the wear as a failure criterion. With the development of machine tools, new failure criteria are necessary, that can give information about the performance of the tool in machine operation.

This work presents an analysis of two wear sensors namely temperature measured by means of tool-work thermocouple and the cutting force measured in three axes with the aid of a piezoelectric dynamometer. Long duration turning tests with cast iron were performed. The results revealed that the wear did not correlate too well with these sensors specially in the range of low velocities. This is probably due to a build up edge in the flank and the large sensitivity to small variations in velocity or feed.

It is concluded that such sensors could be used for special materials or especial cutting operations.

NOMENCLATURA

a	-	avanço
C	-	constante da fórmula de Taylor ampliada
c_d	-	distância do centro da cratera à aresta
c_p	-	profundidade da cratera
d	-	diâmetro
E	-	energia de ativação
F_x	-	força de avanço
F_y	-	força de apoio ou passiva
F_z	-	força principal de corte
i	-	relação de transmissão
I_L	-	comprimento do desgaste
K	-	constante da fórmula de Taylor resumida
L	-	comprimento do corpo de prova
n	-	número de rotações por minuto
p	-	profundidade
T	-	vida
t	-	tempo
v	-	velocidade
V	-	volts
W	-	volume
θ	-	temperatura
ϵ	-	erro

ÍNDICE

	Página
1. Introdução	1
2. Resumo teórico	2
2.1 Usinabilidade e Vida	2
2.1.1 Critérios de Fim de Vida	2
2.1.2 Mecanismo de desgaste	6
2.1.3 Comentários acerca da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos	10
2.2 Ensaaios de usinabilidade	12
2.2.1 Ensaaios em condições forçadas	12
2.2.2 Teste de Bradsma	12
2.2.3 Ensaaios com pequeno desgaste	13
2.2.4 Ensaaios de longa duração	13
2.3 Medição da Temperatura de Corte	18
2.3.1 Técnica dos termopares	18
2.3.1.1 Técnica dos termopares peça-ferramenta	19
2.3.1.2 Técnica dos termopares embutidos	22
2.3.2 Técnica de radiação	23
2.4 Sensores de usinabilidade e desgaste para máquinas ferramentas automáticas	23
3. Equipamento para a análise experimental	28
3.1 Equipamento e instrumentos de medição utilizados	28
3.1.2 Instrumentos de medição da rotação do torno	29
3.1.3 Ferramentas e Porta-Ferramenta	30
3.1.4 Instrumento de medição do desgaste	31

	Página
3.1.5 Instrumento de medição das componentes das forças de corte	32
3.1.6 Equipamentos para medição da temperatura de corte	34
3.1.7 Equipamento para o registro da componente da força de corte e da temperatura	35
3.1.8 Equipamento usados na determinação das características mecânicas dos materiais	37
3.1.9 Equipamentos utilizados nas aferições	38
3.2 Aferições	39
3.2.1 Aferição dos avanços do torno	40
3.2.2 Aferição do dinamômetro	40
3.2.3 Aferição do termopar peça-ferramenta	42
3.2.4 Aferição do registrador	46
4. Corpos de prova e ensaios de materiais	47
4.1 Corpos de prova usados	47
4.2 Ensaios de tração dos corpos de prova	48
4.3 Dureza Brinell dos corpos de prova	49
4.4 Análise micrográfica dos corpos de prova	52
5. Ensaios de usinabilidade	58
5.1 Projeto dos ensaios	58
5.2 A realização dos ensaios	60
5.3 Análise dos resultados	64
6. Estudo da temperatura e força de corte como sensores de desgaste e ensaios complementares	71
6.1 A temperatura como sensor de desgaste	72
6.2 A força como sensor de desgaste	92

	Página
6.3 Força e temperatura de corte diante da quebra da aresta da ferramenta	100
7. Conclusão	102
Bibliografia	104
Apêndice I	109
Apêndice II	112
Apêndice III	136
Apêndice IV	141

CAPÍTULO 1

Introdução

O advento das máquinas de Controle Numérico tem exigido redobrados esforços no sentido de se obter maior número de dados e melhores conhecimentos sobre a usinabilidade dos materiais. A produtividade destas máquinas depende da escolha adequada das condições de corte.

Os dados de usinabilidade e vida que orientam a escolha das condições de usinagem são obtidos através de ensaios de laboratório e bancos de dados na indústria.

Geralmente o critério de fim de vida em operações de desbaste, quer em ensaios quer no uso normal, é o desgaste. O uso deste critério tem como grande desvantagem a necessidade de se interromper a operação para se efetuar as medidas. Como as equações de vida tem intervalo de confiança mais largas que 50%, o programador daquelas máquinas tem que escolher condições de corte com uma margem de segurança bastante alta.

Por este motivo tem surgido a necessidade de se desenvolver novos critérios de fim de vida que permitam a observação das condições de vida em operação.

A finalidade deste trabalho é a avaliação de um termopar peça-ferramenta e de um dinamômetro piezo-elétrico como sensores de vida, que possam ser usados para se determinar critérios de fim de vida ou como sensores em máquinas de controle numérico automáticas (A.N.C.). Esta avaliação é feita em paralelo com ensaios de usinabilidade, utilizando-se o ferro fundido cinzento como material e insertos reversíveis de metal duro como ferramentas.

CAPÍTULO 2

Resumo Teórico

2.1 Usinabilidade e vida

A usinabilidade é definida como sendo a facilidade com que um determinado material é usinado. O desenvolvimento do desgaste da ferramenta, a força de corte e o acabamento superficial são os elementos mais importantes para se definir essa propriedade. A usinabilidade de um material foi, por longo tempo, comparada àquela de um material padrão universal, o aço ASTM B 1112 (1) e fornecida em percentagem. Atualmente se tem preferido utilizar a vida da ferramenta para expressar a usinabilidade de um material. Sua unidade é o tempo mas, em usinagem, costuma-se usar, também, outras unidades, como volume ou peso de cavaco ou, ainda, número de peças usinadas

2.1.1 Critérios de fim de vida

Chama-se fim de vida de uma ferramenta, o instante em que a mesma não mais usina com o desempenho desejado (3). O fim de vida coincide, geralmente, com um avançado estado de desgaste nas superfícies que formam as arestas cortantes da ferramenta. Neste estado, ocorre mal acabamento superficial, baixa precisão dimensional e, ainda, acréscimo na força de corte e na amplitude da vibração auto excitada (chatter). Na operação de desbaste, a influência do mal acabamento e da baixa precisão dimensional, devido ao desgaste da ferramenta, tem pouca importância diante do acréscimo da força e vibração sobre a estrutura da máquina (2).

Apesar do fim da vida de uma ferramenta ser definido pelo seu desempenho, o desgaste da ferramenta é o critério de fim de vida mais usado. Mais adiante comentar-se-á outros

critérios que se baseiam no desempenho da usinagem.

O desgaste na ferramenta ocorre tanto na superfície de saída do cavaco como na superfície de incidência e os critérios de fim de vida consideram um ou outro, quando há predominância de um deles, ou ainda os dois quando esta não é sensível.

A dimensão adotada para o desgaste na superfície de incidência é o "comprimento de desgaste" I_L mostrado na figura 2.1. Usa-se também o comprimento de desgaste máximo $I_{m\acute{a}x}$, geralmente na ponta ou em algum sulco mais profundo da ferramenta. Estes comprimentos são os mais usados para determinar o critério de fim de vida, por serem muito fáceis de se medir.

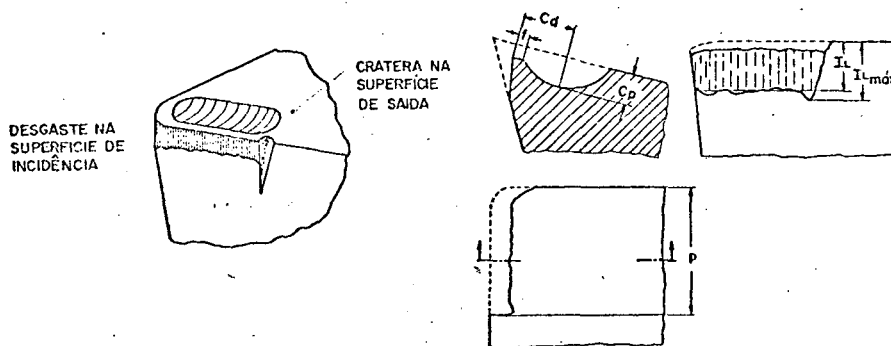


Fig. 2.1 Tipos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de metal duro. Por Opitz (4)

Nas ferramentas de metal duro, o desgaste na superfície de saída tem a forma de cratera. A posição do centro da cratera, bem como seu raio de curvatura e profundidade, dependem de vários fatores, tornando-se difícil sua análise.

Pequenas crateras, na maioria das vezes, reduzem a força de corte, mas grandes crateras podem levar à destruição da aresta, causando assim violento acréscimo da força de corte.

Como critério de fim de vida, considera-se a profun

didade da cratera C_p , a distância do centro à aresta C_d , ou a espessura f , figura 2.1. A dificuldade de obtenção destas medidas limita sua utilização.

A quebra da aresta é quase sempre evitada como critério de vida pois causa efeitos danosos sobre a máquina operatriz.

O critério de fim de vida mais usado para o desgaste na superfície de incidência é $I_L = 0,3$ a $0,4$ (mm) (6) em ensaios de usinabilidade. Ensaios com desgaste até $I_L = 0,2$ (mm) são usados, mas sua confiabilidade é muito baixa. Estes valores não devem ser adotados no uso normal da ferramenta em operação de desbaste, pois nestas condições de desgaste, a usinagem ainda apresenta bom desempenho. Para estes casos adota-se $I_L = 0,7$ a $0,8$ (mm) (2, 7), Em operação de torneamento.

A medição do comprimento de desgaste (I_L) é facilmente obtida com microscópio de ferramentaria, com o uso de lupa ou, até mesmo, com um microscópio preso no carro do torno (para não se retirar a ferramenta).

O desgaste da superfície de incidência se desenvolve em tres fases como mostra a figura 2.2.

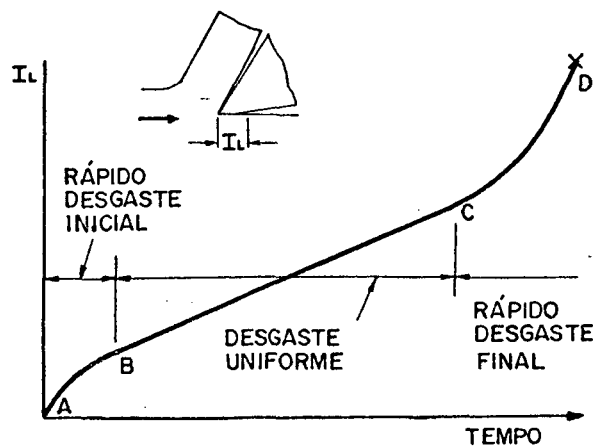


Fig.2.2 Evolução do desgaste na superfície de incidência. Por Boothroyd (7).

- a) Na primeira fase aparece um rápido desgaste motivado pela intensa pressão de contato no gume cortante.
- b) Na segunda fase há uma acomodação em que a taxa de desgaste permanece constante.
- c) Na terceira fase o desgaste toma maiores proporções, aumentam a força e a temperatura de corte, e como consequência, cresce o desgaste e rapidamente a ferramenta chega ao colapso total.

Quando o desgaste na forma de cratera é tomado como critério de fim de vida, Opitz (3) aconselha a relação $C_p/C_d = 0,2$ a $0,4$, dependendo do material. Barrow (6) sugere a equação $C_p \leq 0,1 + 0,3 a$, onde "a" é o avanço em mm/rot.

A medição das dimensões da cratera pode ser realizada de várias maneiras:

- a) por estilete, acoplado a um transdutor de deslocamento de precisão, usado por Shawn, Smith e Cook(8);
- b) óticamente, usando rugosímetros óticos;
- c) óticamente, usando-se lente objetiva de alto poder de resolução axial, usada por Wu (8).

O desgaste por cratera em pequena escala não traz dificuldade para a usinagem, chegando a reduzir as forças de corte (2).

Os critérios de fim de vida, fundamentados no desgaste tipo cratera, devem ser usados sempre que se usina em condições severas de avanço e velocidade de corte ou materiais muito tenazes, como o aço inoxidável.

Alguns pesquisadores preferem a medição do peso ou volume do desgaste. Takeyama (9), mede o peso de material desgastado na superfície de incidência, enquanto Kunio Ueara (10), mede o volume desgastado na mesma superfície. A vantagem destas medidas é que o volume de desgaste cresce exponencialmente e portanto, pode ser extrapolada com mais facilidade; isto é vantajoso, pois, nem sempre se consegue medir o desgaste quan

do está no ponto estipulado previamente como fim de vida. do é atingido o ponto previamente estipulado como fim de vida.

2.1.2 Mecanismo do desgaste

A usinagem é um processo que se desenvolve em condições muito severas de deformação plástica e atrito, sendo por este motivo fonte de intenso calor. As zonas de geração de calor são mostradas na figura 2.3.

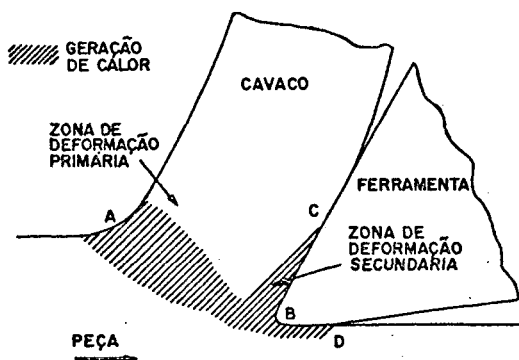


Fig. 2.3 Zonas de geração de calor
Por Barrow(6)

- na região AB ocorre deformação plástica primária;
- na região BC ocorre deformação plástica secundária e atrito na superfície de saída.
- na região BD ocorre significativo atrito entre a superfície de incidência e a superfície usinada da peça.

Conforme Boothroyd (12), 60% do calor gerado no contato peça-ferramenta escoar para a peça, enquanto cerca de 40% é liberado com o cavaco. O efeito da alta temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta é benéfico, pois melhora o acabamento e a resistência mecânica superficial. No entanto, o acréscimo da temperatura na ferramenta é responsável pela mudança

do mecanismo de desgaste, conforme investigações de Opitz e Takeyama.

Opitz(3) analisou, através de cavacos e ferramentas desgastadas, as diferentes reações que ocorrem nos desgastes das ferramentas, concluindo que a baixas e médias velocidades o desgaste é maior na superfície de incidência e que sua origem se deve ao cisalhamento de material soldado na ferramenta pela aresta postiça de corte e por abrasão mecânica. Quando se usa a altas velocidades, o desgaste cresce bastante devido a reações de transferência entre o cavaco e a ferramenta, principalmente na superfície de saída, fazendo com que o desgaste do tipo cratera seja predominante. A figura 2.4 ilustra os vários tipos de desgaste classificados.

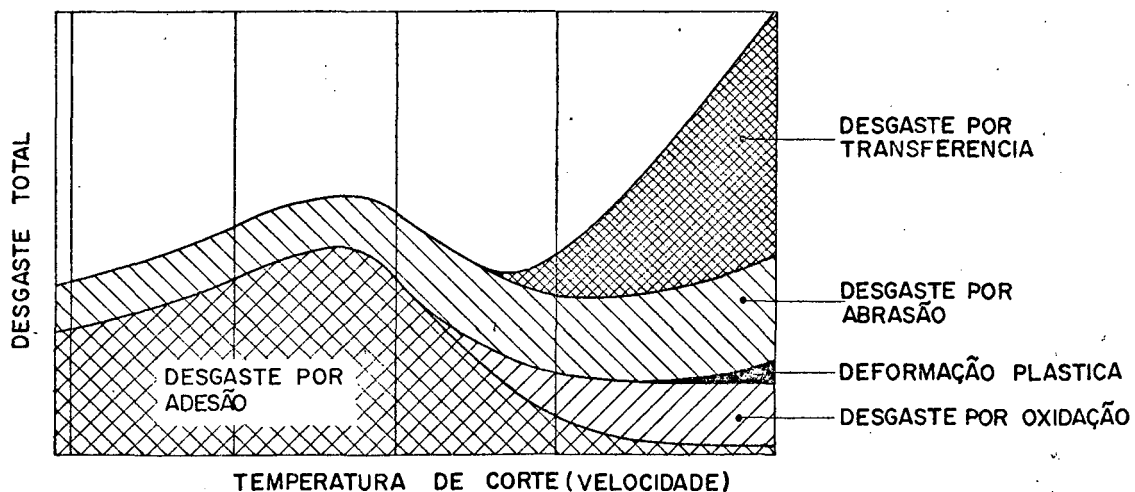


Fig. 2.4 Tipos de desgaste em função da temperatura de corte . Por Vierege (3).

Takeyama(9) analisou o mecanismo do desgaste na superfície de incidência, concluindo, também, que este pode ser classificado em dois tipos: um independente da temperatura de corte em velocidades baixas (temperaturas baixas também) outro para velocidades altas onde o desgaste é sensivelmente afetado pela temperatura como mostra a figura 2.5. Takeyama mediu a temperatura em suas experiências com um termopar peça-ferramenta.

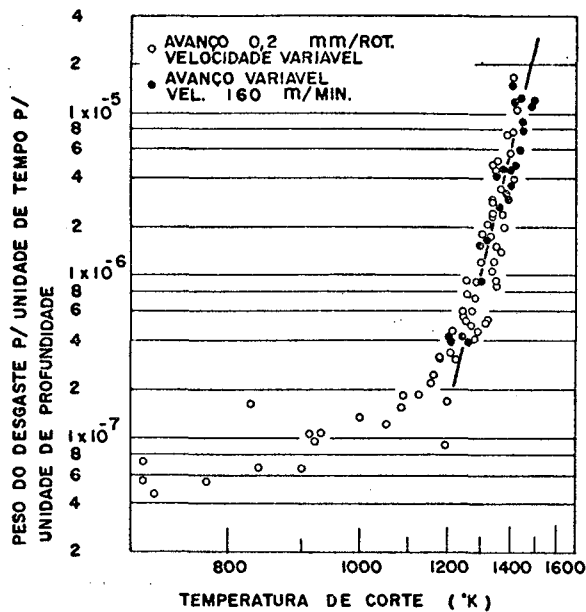


Fig. 2.5 Relação entre a Temperatura e a Taxa de Desgaste na superfície de incidência. Por Takeyama (9).

Os materiais utilizados foram aço liga G18B e ferro fundido FC 30 (Norma Japonesa), usando ferramentas P10 e K20 (ISO). A figura 2.5 mostra o resultado dos ensaios com o aço.

Para temperaturas abaixo de 1200°K o desgaste é praticamente independente da temperatura. Para temperaturas acima de 1200°K , esta tem significativa influência no mecanismo de desgaste. A equação que define a taxa de desgaste função da temperatura (segundo Takeyama) (9) é:

$$\frac{dW}{dt} = B \exp \left[- \frac{E}{C} \theta \right] \quad (1)$$

B = constante que determina a taxa do desgaste para baixas temperaturas;

E = energia de ativação;

C = constante;

θ = temperatura absoluta.

Complementando seu trabalho, Takeyama levantou curvas de vida em função da temperatura tomando como critério de fim de vida $I_L = 0,6$ mm.

A figura 2.6 mostra o resultado obtido para o aço ensaiado.

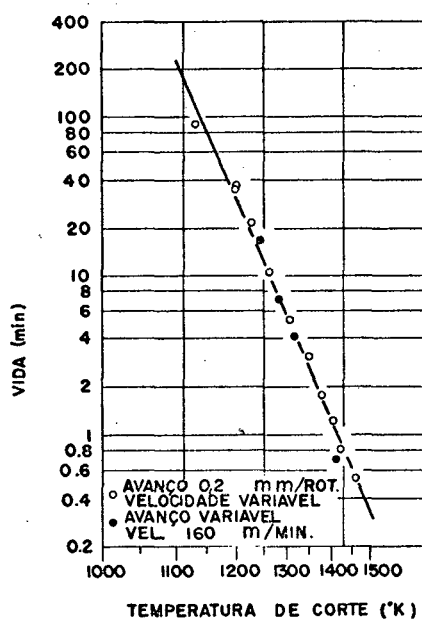


Fig. 2.6 Curva Vida - Temperatura.
Por Takeyama (9).

O modelo matemático obtido foi:

$$\theta T^n = K_1 \quad (2)$$

Comparado com a fórmula de Taylor:

$$v T^x = K \quad (3)$$

mostrou boa concordância. Desta indicação concluiu que a vida poderia ser definida para um dado material e ferramenta simples

mente pela temperatura de corte.

2.1.3 Comentários acerca da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos.

O ferro fundido é um material onde a ocorrência e a distribuição de seus constituintes definem sua usinabilidade. Esta não é explicada simplesmente pela composição química, por ensaios de dureza (13) ou de ruptura à tração (14).

A influência dos constituintes mais comuns sobre a usinabilidade pode ser assim analisada (14).

- a) Grafita: aparecendo sob a forma de lamelas grossas, finas ou mesmo em nódulos e tem duas qualidades benéficas; torna o cavaco quebradiço e lubrifica o corte.
- b) Ferrita: com dureza entre 100 e 150 HB, é o microconstituente de melhor usinabilidade, excetuando-se apenas os casos em que encontra-se fortemente ligada com cromo, silício e alumínio.
- c) Perlita: a matriz perlítica combina muito bem sua boa resistência à ruptura e à abrasão com uma boa usinabilidade. Sua dureza se situa entre 150 e 350 HB. A perlita fina é mais resistente e mais usinável, enquanto a perlita grossa é menos resistente - com melhor usinabilidade. O gráfico da figura 2.7 ilustra este fato.
- d) Eutético fosforoso (esteatita): é um constituinte que fica fora da rede cristalina e com o aumento do teor de fósforo (acima de 0,5%) a usinabilidade começa a cair, tornando-se crítica a partir de 1,4%.
- e) Cementita (carbonetos livres): com dureza chegando a 750 HV sua presença é sempre danosa à usinabilidade, por se tratar de um constituinte extremamente abrasivo. A tabela 2.1 mostra que 5% de carboneto livre reduz extremamente a vida da ferramenta (15).

TABELA 2.1

Efeito da microestrutura na vida da ferramenta de METALS HANDBOOK ASM. (16)		
Matriz	HB	vida (min)
Ferrita	120	20
50% de Ferrita 50% Perlita	150	10
Perlita grossa	195	2
Perlita fina	218	1
Perlita fina com 5% de Cementita	240	0,3

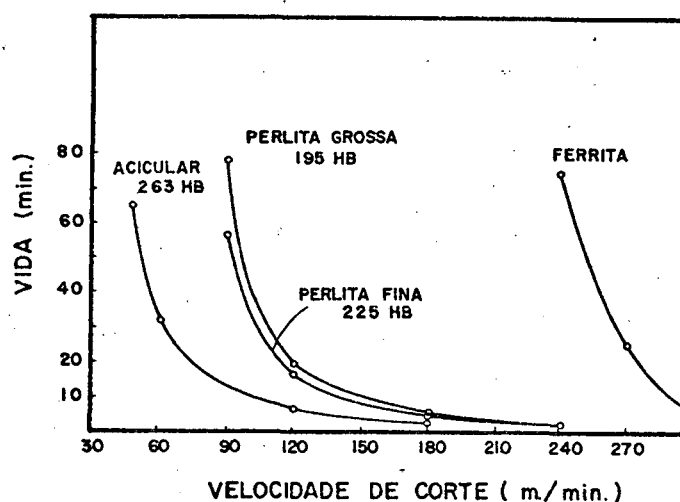


Fig.2.7 Curva de Vida para varios microconstituintes do Ferro Fundido.

A quantidade e tamanho das lamelas de grafita é responsável pela boa usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos no entanto grafitas em lamelas muito grandes podem reduzir a usinabilidade por causarem corte descontínuo.

A ferrita, que permite maior longevidade das ferramentas, causam grande acréscimo na força de corte comparado com estruturas perlíticas devido a presença da aresta postíça de corte.

nica com ótima usinabilidade (13).

2.2 Ensaaios de usinabilidade

Desde que Taylor publicou em 1906 o resultado da primeira grande pesquisa sobre usinabilidade, muitos métodos de ensaio foram propostos, testados e usados. A maioria deles tinha como finalidade simplificar ou reduzir o custo dos ensaios, evitando que se usinassem toneladas de materiais como fizera Taylor.

2.2.1 Ensaaios em condições forçadas

Consiste da usinagem em altas velocidades onde o desgaste é preponderantemente por difusão. Os tempos de vida da ferramenta são muito reduzidos e o volume de material usinado também. Para avaliar a usinabilidade relativa de materiais idênticos, e a mesma ferramenta de corte, este método é muito bom. Para determinar as condições econômicas de corte, no entanto, é necessário extrapolar a curva obtida, procedimento este que leva a erros devido aos fatores aleatórios que ocorrem no corte. Weger (17) analisando estatisticamente ensaios de curta duração, concluiu que o coeficiente de dispersão era 30%.

2.2.2 Teste de Bradsma

Este teste é muito utilizado, principalmente em ferros fundidos, uma vez que o corpo de prova é de fácil execução, por fundição, e não exige equipamento especial de medição. O teste consiste do faceamento do corpo de prova com ferramenta de aço rápido, até a queima do gume da ferramenta. A figura 2.8 mostra o modelo proposto por Mc Caulay (18) para corpo de prova. Este teste não é usado para determinação da velocidade econômica de corte, mas é apenas um indicador comparativo

da usinabilidade.

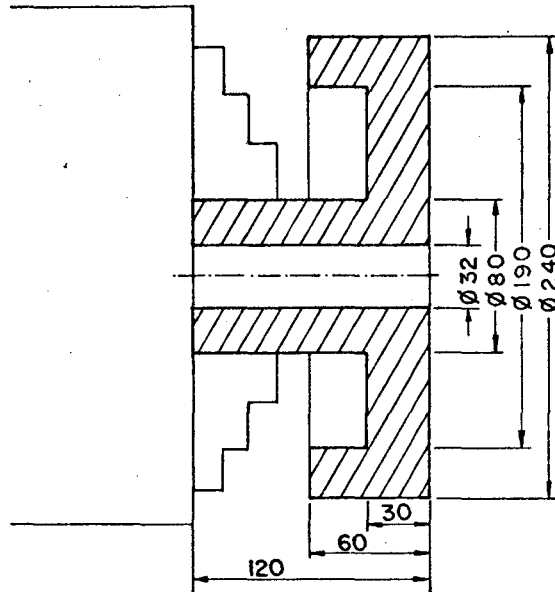


Fig. 2.8 Modelo para a teste de Bradsma.
Por Mc Caulay (18).

2.2.3 Ensaios com pequenos desgastes

O método da radioatividade é o que proporciona melhor precisão com pequenos desgastes. A ferramenta é ativada em um reator e o volume das partículas da ferramenta difundidas no cavaco é calculado num contador geiger. Além de problemas de imprecisão, este método exige equipamento bastante sofisticado e cuidados especiais (1)(19).

2.2.4 Ensaios de longa duração

Os ensaios de longa duração podem ser realizados em qualquer laboratório ou oficina, desde que as peças utilizadas como corpos de prova sejam de mesma estrutura cristalina e quando possível, da mesma corrida. Quando os corpos de prova são peças de uma linha de produção, o teste pode ser feito na mesma máquina da produção, no entanto, quando em laboratório,

o corpo de prova deve ser usinado por inteiro, exigindo da máquina operatriz variação contínua de velocidade (exceção para frezadoras e furadeiras).

Os ensaios de longa duração podem ser realizados para os mais diversos fins:

- a) determinar a classe de ferramenta mais adequada para usinar um dado material (18) de forma mais econômica;
- b) determinar ângulos da ferramenta, lubrificação ou refrigeração do corte para que uma dada operação seja mais econômica;
- c) determinar as condições ótimas de usinagem (velocidade, avanço e profundidade);
- d) estudar outros fenômenos ligados à vida como, mecanismo de desgaste, temperatura, força de corte, etc.

Os ensaios de longa duração constam de vários testes de usinagem. O desgaste é verificado periodicamente até a dimensão previamente definida como fim de vida.

O número de testes e as condições de corte são funções dos objetivos do ensaio.

2.2.4.1 Determinação do número de ensaios

Nos ensaios de usinabilidade, a vida é sempre a variável dependente da função:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

onde, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são as variáveis determinísticas, correspondentes às condições de usinagem estudadas. As demais condições devem ser cuidadosamente controladas.

O número de pontos que devem ser tomados para cada variável $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ depende da precisão que se dese

ja obter. No entanto é bastante comum a escolha de três para cada variável determinística, levando a um número total de testes.

$$z_t = z^3 \quad (4)$$

onde z é o número de variáveis

Quando z é maior que dois o número de testes se torna muito grande, onerando sensivelmente o ensaio e levando o pesquisador a reduzir o número de variáveis a estudar.

G. E. P. Box (20) se deparou com este mesmo problema em química experimental e propôs uma metodologia que consistia em tomar os pontos mais significativos da permutação entre as variáveis.

S. W. Wu (21) adaptou o trabalho de Box ao estudo da usinabilidade, com grande sucesso, em 1964 (22).

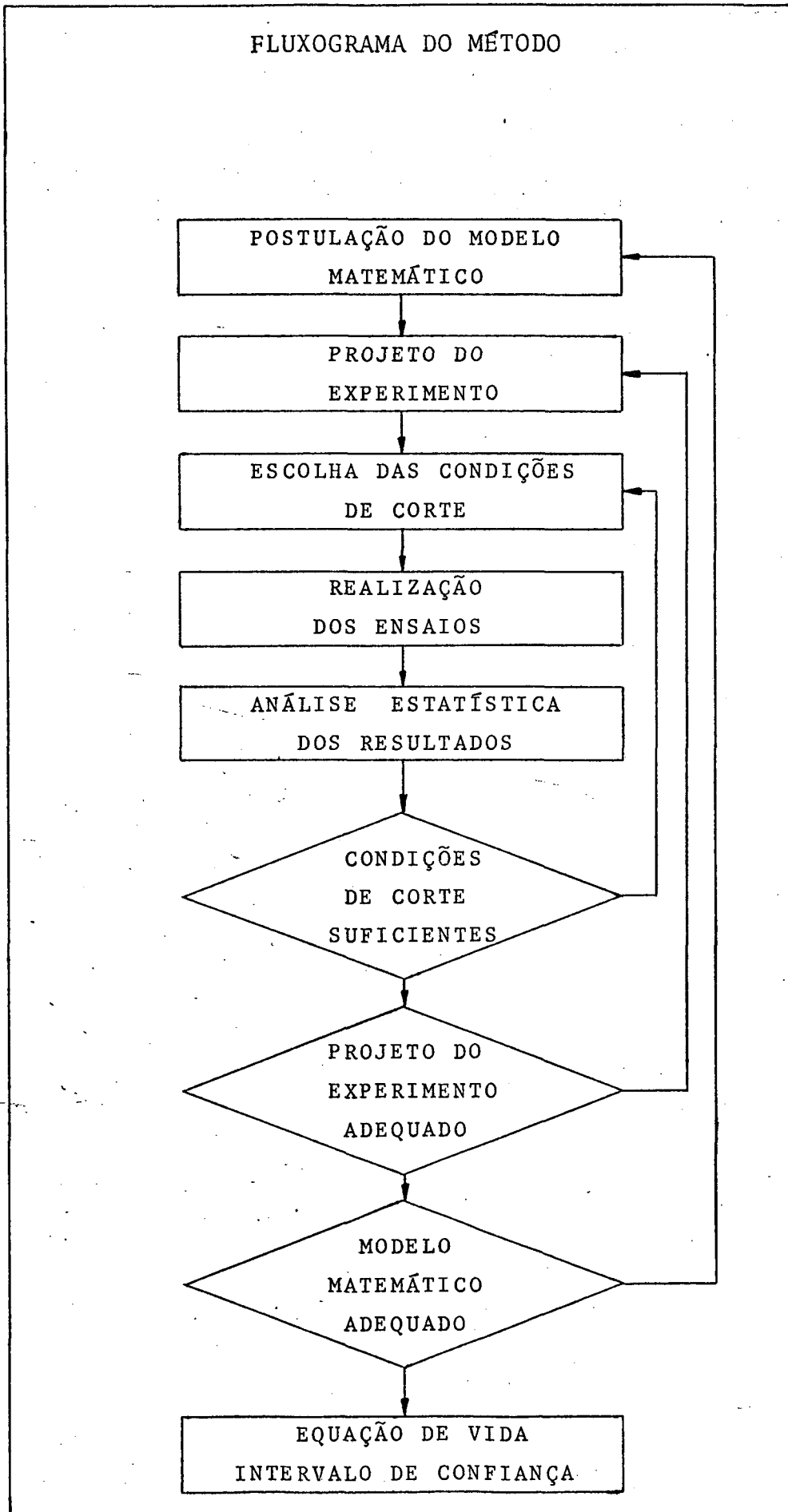
A aplicação da metodologia proposta por Box e adaptada por Wu em ensaios de Vida deve ser acompanhado da seguinte sistemática: (Veja também o fluxograma no quadro 2.1)

- a) postulação do modelo matemático
- b) projeto do experimento
- c) escolha das condições de corte (número de ensaios)
- d) realização dos ensaios
- e) estimação dos coeficientes
- f) análise do modelo matemático, do projeto do experimento e das condições de corte
- g) estimação do intervalo de confiança

O modelo matemático mais adequado para o método é a universalmente aceita fórmula de Taylor:

$$v T^x a^y p^z = c \quad (5)$$

Para se obter os coeficientes pelo método dos mínimos quadrados a equação (5) é simplificada para:



$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \epsilon \quad (6)$$

onde:

$$\begin{aligned} y &= \ln T \\ x_1 &= \ln v \\ x_2 &= \ln a \\ x_3 &= \ln p \\ b_0 &= (1/x) \ln c \\ b_1 &= -1/x \\ b_2 &= -y/x \\ b_3 &= -z/x \end{aligned}$$

Usando o método dos mínimos quadrados os coeficientes b_0, b_1, b_2 e b_3 são obtidos pelo vetor coluna B da equação matricial:

$$B = (X' X)^{-1} X' Y \quad (7)$$

onde:

$$\begin{aligned} B &= \text{é a matriz coluna dos coeficientes} \\ X &= \text{é a matriz formada pelas } m \text{ variáveis determinísticas e } n \text{ observações} \\ Y &= \text{é a matriz coluna da variável dependente} \end{aligned}$$

Para faixa de velocidades mais altas, usa-se a equação (6) não sob a forma linear mas, sob a forma parabólica:

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + \\ & + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

No projeto do experimento se define as variáveis analisadas e o escalonamento dos pontos que devem ser escolhidos para os ensaios em cada variável.

É conveniente que este escalonamento seja feito em progressão geométrica (logarítmica).

O número total de ensaios depende do modelo de combinação das variáveis. Com os estudos levados a cabo por Box, Wu adaptou e testou uma série de modelos com vários números de ensaios mostrados graficamente em cubos na figura 2.9.

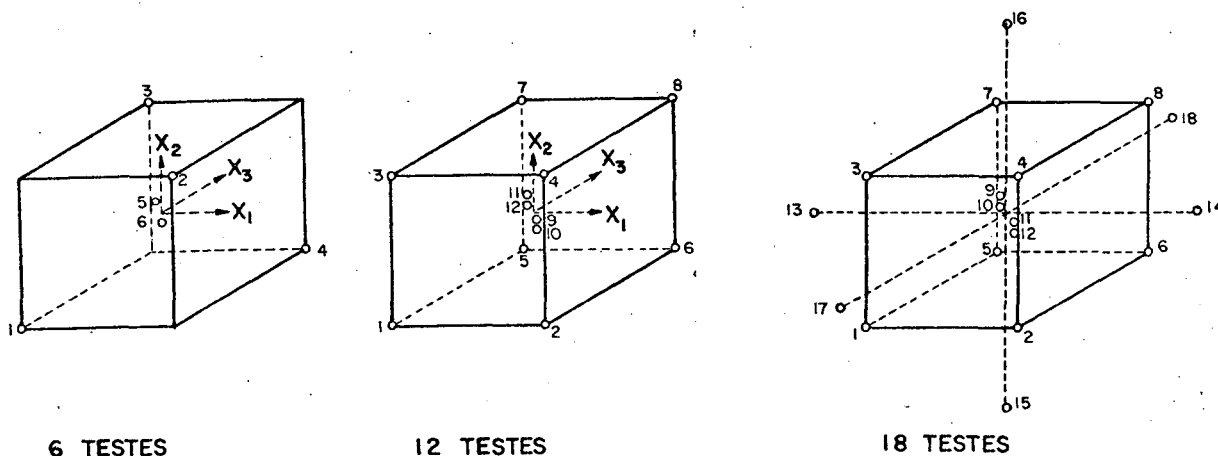


Fig. 2.9 Exemplos de distribuição de testes para ensaios de usinabilidade. Por Wu (21).

A escolha de três pontos escalonados é o número mínimo aconselhado para cada variável e o modelo de menor número de ensaios para três variáveis (velocidade, avanço e profundidade) é seis, se este modelo é insuficiente estatisticamente deve se completar para doze ensaios. O uso de 18 ensaios não vale mais a pena ser feito com três pontos, mas com cinco. Se maior precisão é desejada, usa-se o modelo de vinte e quatro ensaios e assim por diante.

2.3 Medição da temperatura de corte

A medição da temperatura tem particular interesse para a usinabilidade, uma vez que este parâmetro tem estreita correlação com a vida e o mecanismo de desgaste das ferramentas. As várias técnicas para medição da temperatura são:

2.3.1 Técnica dos termopares

Esta técnica permite duas variantes: a dos termopares peça-ferramenta e a dos termopares embutidos.

2.3.1.1 Técnica dos termopares peça-ferramenta

Este é o método mais clássico de medição da temperatura no corte. O desenvolvimento de sua técnica foi feito si multaneamente por Gottwein, Herbert e Shore (11).

Neste original termopar a junta quente é o contato da peça com a ferramenta na própria operação de usinagem. Um esquema típico do método é mostrado na figura 2.10.

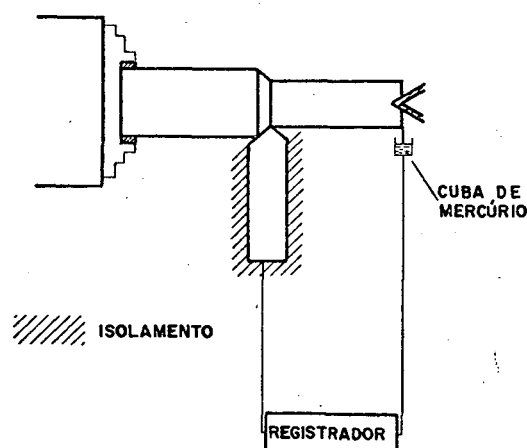


Fig. 2.10 Esquema típico de um termopar peça - ferramenta.

Suas vantagens são:

- a) grande velocidade de resposta nas mudanças bruscas de temperatura (25);
- b) pode ser usado com qualquer ferramenta (exceto cerâmica), inclusive com inserts reversíveis, sendo o único método que tem aplicação industrial (26);

- c) sua instalação é relativamente simples;
- d) Com ele se obtêm as mais altas temperaturas.

Os dois maiores problemas do método são:

- a) a eliminação das f.e.m. parasitas que afetam o sinal de saída do termopar;
- b) a imprecisão da calibração.

O isolamento da peça e da ferramenta é a principal precaução que deve ser tomada para se evitar sinais parasitas.

Quando da utilização de insertos reversíveis, alguns autores isolam o inserto do porta ferramenta e do quebra cavaco (27)(9). Alvelid (28) estudou a influência do isolamento da ferramenta e do quebra cavaco e concluiu que não existe diferença se o isolamento é feito no inserto ou no suporte, mas aconselha o uso de quebra cavaco não condutor.

A ligação da parte estacionária do circuito com a parte girante é outro ponto que exige cuidados especiais, pois a tensão é muito baixa e, nestes casos, os problemas de contato são muito críticos. Os sistemas mais usados são:

1. o da cuba de mercurio - este método não é prático, pois, a altas velocidades, o mercúrio respinga (fig. 2.10);
2. o da gota de mercúrio - desenvolvido por Alvelid (28). Neste método o contacto é localizado na parte estática de um contra-ponta rotativo é, por um bastonete, mergulhado no mercúrio que entra em contacto com a parte estática do circuito;
3. o do contato por rolamento - é usado por Jaeschke (22);
4. o das escovas de contato deslizante - é muito utilizado, mas é necessário que as escovas sejam de boa qualidade. Entre os que o usam, citamos Chandira mani (29).

Quando se usina com pastilhas de metal duro soldadas ou com insertos reversíveis, aparece uma junta quente secundária entre a pastilha e o suporte, que alcança a temperatura de 150 °C ou mais. Várias soluções foram encontradas para corrigir ou eliminar esta junta indesejável.

Veestra usou a montagem peça-ferramenta-peça corrigida por um termopar convencional (11). Takeyama (9) não fazia correção nem eliminava a junta secundária e argumentava que, para medidas instantâneas (no início do corte), a junta secundária ainda não tinha se formado. O método mais cômodo e preciso, no entanto, é a eliminação da junta secundária usando-se um bastonete do mesmo material da ferramenta.

A calibração do termopar peça-ferramenta é o problema mais crítico deste método. A aferição deve simular as condições de temperatura e contato da junta peça-ferramenta. Deve-se considerar que, na operação de corte, a junta se constitui de uma superfície nascendo a cada momento e conseqüentemente, sem oxidação. Para se contornar este problema, a calibração deve ser feita sob uma atmosfera neutra (com gases inertes).

Para a calibração adotam-se os seguintes métodos:

- a) do forno - a junta com material da peça e da ferramenta é colocada em um forno, na presença de um termopar padrão, e feita a aferição. O problema - mais grave deste método é a obtenção das juntas frias de referência. O uso de um longo bastonete - com o mesmo material da peça resolve este problema.
- b) do aquecimento por indução - é um método muito rápido, no aquecimento a curva sofre a influência da tensão induzida, mas no resfriamento sua curva se assemelha bastante àquela obtida pelo forno (30) (figura 2.11).
- c) da gota de prata - um método muito fácil de se verificar um ponto de aferição de um termopar peça-ferramenta, é mergulhar em uma gota de prata em fusão a junta peça-ferramenta, representada por dois estiletos. Como o ponto de fusão da prata é precisamen

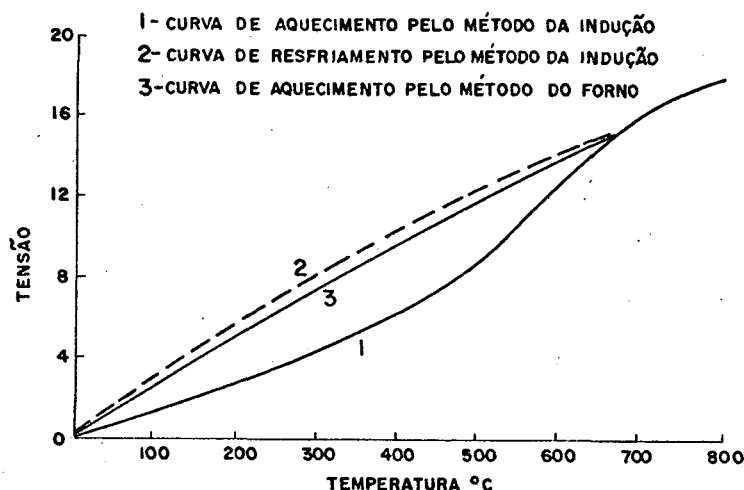


Fig. 2.11 Curvas típicas de aferição de um termopar peça-ferramenta, pelos métodos do forno e da indução. Por Braidon (25).

te determinado, pode-se obter o ponto da aferição.

O problema realmente mais sério do termopar peça-ferramenta é a aferição, pois mesmo que se obtivesse resultados muito bons para um dado par peça-ferramenta, este resultado não seria ótimo para outro par peça-ferramenta de mesmo material mas de fornadas diferentes (30)(28).

Por este motivo o termopar peça-ferramenta tem sua grande aplicação nos casos em que a temperatura absoluta é menos importante.

2.3.1.2 Técnica dos termopares embutidos

Com este método obtêm-se a temperatura em um único ponto da ferramenta pela utilização de um termopar convencional, colocado no interior da ferramenta. Para o estudo da distribuição de temperatura na ferramenta e mesmo na peça, este método é muito usado, não obstante sua utilização ser muito trabalhosa.

Atualmente utilizam-se termopares blindados com diâmetro de até 0,2 mm (1). Quereshi utilizou setenta e duas diferentes ferramentas com termopares embutidos para levantar a distribuição de temperatura em várias condições de corte (11). As limitações deste método são:

- a) o termopar não mede a temperatura da interface, mas na vizinhança desta e, considerando-se o gradiente térmico acentuado, a extrapolação leva a erros grosseiros.
- b) as dificuldades com a aferição e instalação do termopar na ferramenta impede que este método saia do laboratório para o uso industrial. Além disso tem resposta mais lenta.

2.3.2 Técnicas de radiação

Este método foi inicialmente usado por Schwerd (11), que desenvolveu um pirômetro para determinar a distribuição de temperatura na superfície da ferramenta e da peça. O Instituto de Tecnologia de Zurich desenvolveu uma técnica para medir, com um pirômetro, a temperatura na interface cavaco ferramenta (31), através de um furo na peça. Com a variação da posição do furo na peça é possível se fazer o mapeamento da temperatura na interface.

Boothroyd (12) fotografava a superfície da peça e da ferramenta com raios infra-vermelhos e interpretava os resultados a partir da calibração prévia da peça e da ferramenta. A dificuldade de instalação do equipamento de medição da temperatura é a grande limitação deste processo.

2.4 Sensores de usinabilidade e desgaste para máquinas ferramentas automáticas

Com o advento das máquinas de Controle Numérico, tem

surgido um interesse crescente em dotar estas máquinas, de controles que permitam tanto posicionar a máquina em condições de corte como informar o estado de desgaste da ferramenta "em processo".

As pesquisas, ora tem se encaminhado para a determinação das condições ótimas de corte, ora para a determinação do estado de desgaste.

Takeyama (9), como já foi citado, considera que a temperatura é um ótimo sensor de usinabilidade. Partindo do mesmo princípio, Wu (24) analisou a equação que relaciona os parâmetros de corte em função da temperatura,

$$\theta = C v^r a^s p^t, \quad (9)$$

pela "Response Surface Methodology", obtendo boa reprodutibilidade.

Em outro trabalho, Jaeschke (27) desenvolveu um servo-controle com a finalidade de manter a temperatura que dá as condições econômicas de corte. A medição de temperatura era feita por um termopar peça-ferramenta.

F. Giusti (26), além de utilizar um termopar peça-ferramenta, complementava seu controle com um acelerômetro e um wattímetro para medir a potência de corte. Estes sensores regulavam as condições limites de vibrações e potência.

Shillam (33) analisou vários sensores para o controle de um torno e de uma frezadora vertical e optou pelo termopar peça-ferramenta para medição da temperatura. Usou, ainda, um dinamômetro no torno medindo a força de apóio, mas para a frezadora as forças eram medidas por um acelerômetro piezo-elétrico na mesa.

Vladimir Salaja (34) analisou o desempenho de um termopar cobre-constantan colocado sob a ferramenta (um inserto reversível) e concluiu que havia sensibilidade para desgastes $I_L = 0,55$ mm e até $I_L = 0,30$ mm.

L. V. Cohwell (25) utilizou um termopar peça-ferramenta e criticou a resposta muito retardada do termopar embutido. Paralelamente analisou o sensor força por meio de um dinamômetro de Strain-Gage. Como resultado de seu trabalho recomenda o termopar peça-ferramenta como sensor de vida.

Boothroyd (12) analisou o comportamento térmico de ferramentas pré-desgastadas na superfície de incidência, utilizando fotografias com raios infra-vermelhos e concluiu que havia boa uniformidade da temperatura na superfície desgastada, mas que a máxima temperatura ocorria na superfície de saída. Também observou que o desgaste nos flancos não alterava as condições de atrito e deformação plástica na superfície de saída.

Zakaria (35) analisou a confiabilidade do termopar peça-ferramenta como sensor de desgaste, usando aço 4340 e insertos reversíveis. Como resultado dos ensaios, foi observado que no início de cada corte havia sempre um pico de tensão (fenômeno também observado por outros pesquisadores) e o sinal crescia quase sempre parabolicamente. Quanto à confiabilidade, foi observado que os picos que ocorrem no corte tem grande importância diante do acréscimo de temperatura devido ao desgaste. Há inclusive pesquisadores que só computam as tensões dos picos (34). Para o critério de fim de vida adotado, $I_L = 0,25$ a $0,4$ (mm), o acréscimo de temperatura médio era de $3,5\%$, enquanto os picos eram de $\pm 1\%$ do mesmo valor. Observou ainda, Zakaria, que, após certo acréscimo inicial de tensão, o sinal tendia a se estabilizar, perdendo sua linearidade.

Já há vários anos uma equipe da Universidade de Turim tem estudado o comportamento da força de corte como sensor de desgaste (36). Algumas conclusões a que eles chegaram foram:

- a) o desgaste por cratera e na superfície de incidência aumenta a força de corte;
- b) a variação da força de corte com o tempo é função dos parâmetros de corte.

R. Ipolito e G. F. Micheletti, fundamentando-se nos

trabalhos anteriores, levantaram a hipótese de que o acréscimo de força de corte pode ser correlacionada à fórmula de Taylor:

$$T^x = \frac{C}{v^z p^r a^y} \quad (10)$$

Da figura 2.12 e da equação (10) pode-se tirar a relação:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1/x} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{y/x} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{z/x}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dF}{dt} = C_0 v^q p^r a^s \quad (11)$$

onde:

$$q = 1/x ; \quad r = y/x ; \quad s = z/x$$

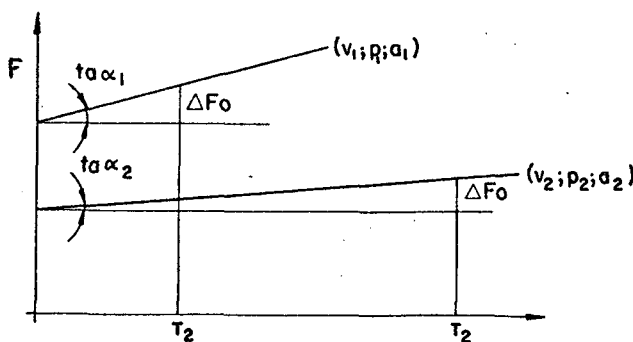


Fig. 2.12 Variação da força com o tempo para duas condições de cortes diferentes. Por Ippolito (36).

Na análise experimental, usando-se aço como material e pastilhas em corte ortogonal, foi confirmado, com boa aproximação, o modelo.

Takeyama (36) fez também um estudo sobre sensores

de desgaste e propôs um método para medir desgaste em processo usando-se um ou dois "pick-ups" na superfície recém usinada do material (Veja figura 2.13).

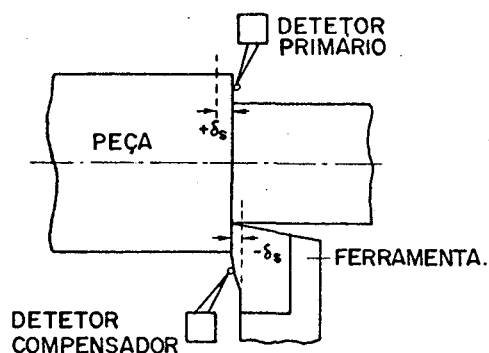


Fig. 2.13 Esquema de medição de desgaste em operação
Por Takeyama (37).

Depois de resolver alguns problemas, como dilatação térmica da ferramenta e ruído no sinal, Takeyama faz boas referências ao seu sistema.

CAPÍTULO 3

Equipamento para a Análise Experimental

A parte experimental do trabalho foi realizada nos laboratórios do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina com corpos de prova gentilmente cedidos pelo Centro de Pesquisa da Fundação Tupy.

3.1 Equipamentos e instrumentos de medição utilizados

3.1.1 A máquina operatriz

A máquina operatriz utilizada para os testes, foi um torno de fabricação nacional adaptado especialmente para dar variação contínua de velocidade (fig. 3.1).

Torno: Imor

Fabricante: Indústrias Romi S/A - Santa Bárbara -
São Paulo.

Modelo: MVN - V (adaptado) (38)

Precisão: normal

Distância entre pontas: 1000 mm

Diâmetro máximo sobre o barramento: 430 mm

Sistema de acionamento: Ward Leonard

Fabricante: Anel S/A - São Paulo

Potência Gerador: 0 a 25 KVA

Potência Motor: 22 KW a 1800 rpm

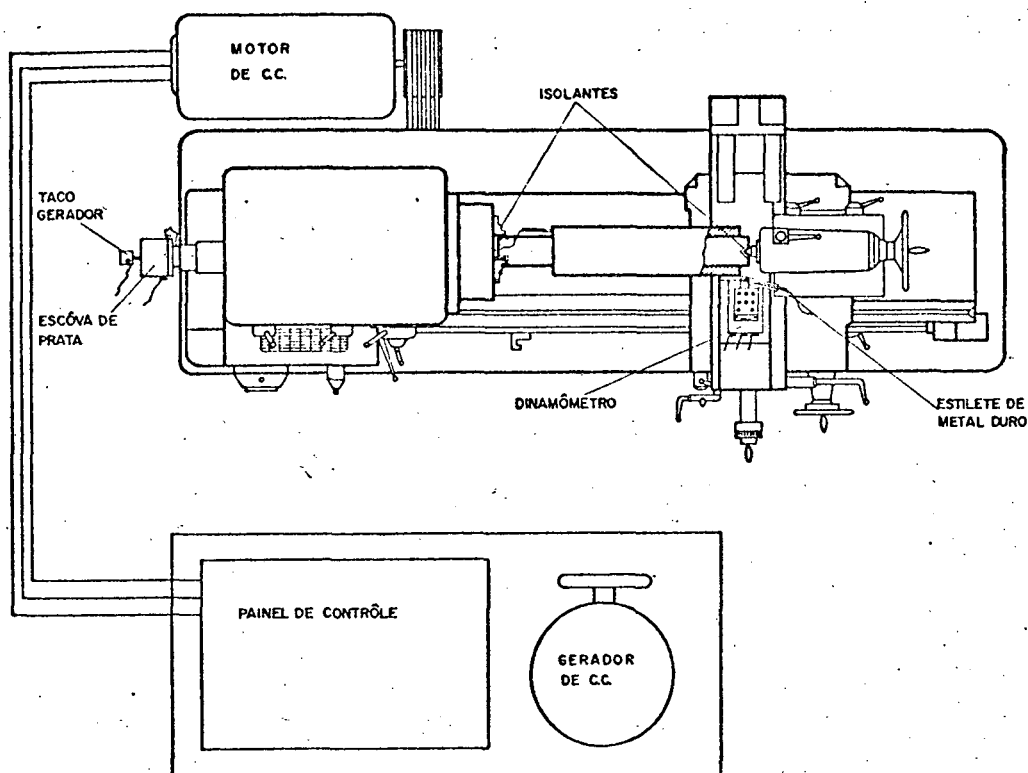


Fig. 3.1 Desenho do torno usado nos ensaios

3.1.2 Instrumento de medição da rotação do torno

A rotação da árvore do torno era medida por um taco gerador fixado na extremidade anterior da árvore (fig. 3.5). A tensão de saída do taco-gerador era medida no voltímetro digital.

Taco-Gerador

Fabricante: Beckman

Modêlo: 9150

Constante de medição: $\text{rpm} = (1000/7)V$

Voltímetro digital

Fabricante: John Fluke M.F.G. Co. Inc. - Japão

Modelo: multímetro 8000, (39)

Usado para medição de tensão em C.C.

Faixa de medição: 100 μ V a 1200V

Precisão: $\pm 0,3\%$ (15 a 35 $^{\circ}$ C) em C.C.

3.1.3 Ferramenta e porta-ferramenta

Para as condições de corte e o material utilizado, as ferramentas indicadas são as da classe ISO K10.

As ferramentas escolhidas eram insertos reversíveis quadradas com oito arestas cortantes.

O porta=ferramenta foi especialmente adaptado para permitir a medição da temperatura pelo sistema termopar peça-ferramenta, utilizando um bastonete de metal duro, e aletas para a dissipação do calor como mostra a figura 3.2.

O ângulo de posição escolhido é $\chi = 75^{\circ}$. Segundo a bibliografia é o ângulo mais usado para ensaios de usinabilidade e para a produção (32, 9).

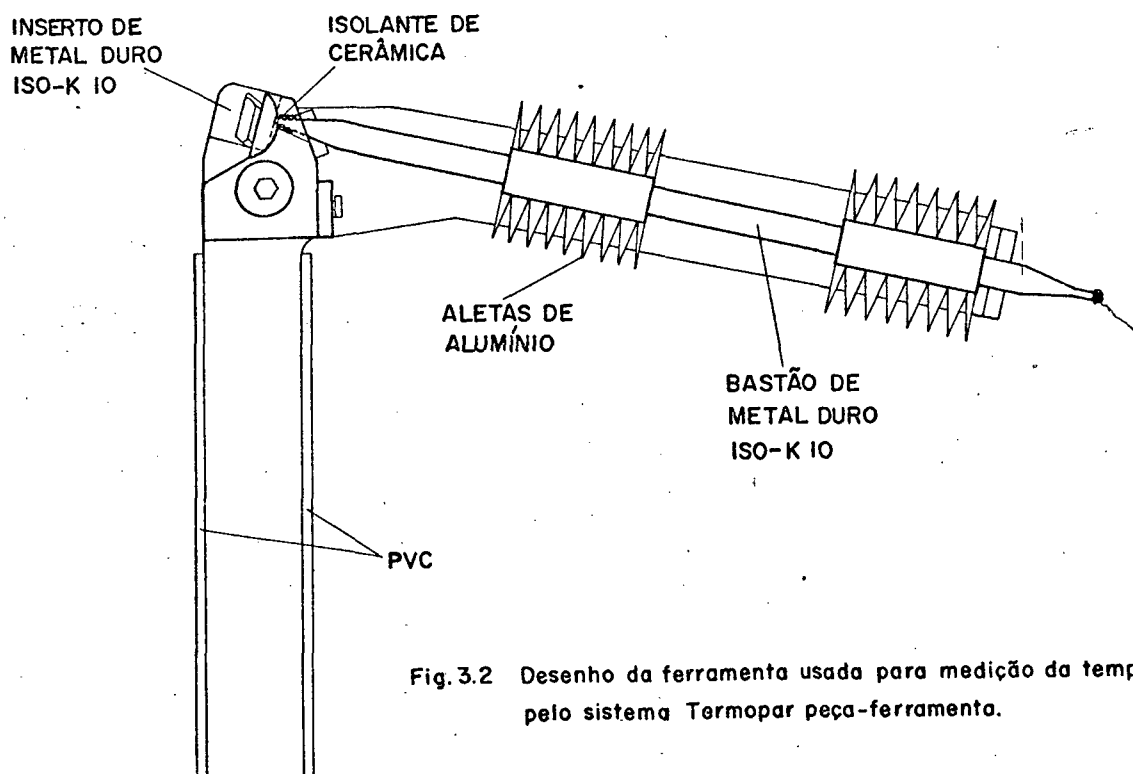


Fig. 3.2 Desenho da ferramenta usada para medição da temperatura, pelo sistema Termopar peça-ferramenta.

O porta-ferramenta era do tipo padronizado.

Fabricante: Sandvik - Coroman - São Paulo

Modelo: 174-1 2525, (40)

Dimensões: 25x25x150

Ângulos: principal de saída: -6°

lateral de saída: -6°

principal de incidência: 6°

lateral de incidência: 6°

de posição: 75°

As ferramentas, conforme o já citado acima eram insertos reversíveis.

Fabricante: Sandvik - Coroman - São Paulo

Referência: SNUN 12 04 08 H1P (ISO K10)

Formato: quadrado 8x8 mm

Espessura: 5 mm

Raio de arredondamento: 0,8mm

Tolerância: normal

Ângulo: negativo

Número de arestas cortantes: 8mm

O bastonete de metal duro utilizado para eliminar a junta quente secundária do termopar peça-ferramenta, era uma peça especialmente construída para ser usada como estilete em pantógrafo.

Fabricante: Sandvik - Coroman - Suíça

Referência: 680.1.060 - 103 H1P (K10)

Comprimento: 106 mm

Diâmetro: 6 mm

3.1.4 Instrumento de medição do desgaste

Os desgastes da ferramenta foram medidos por um microscópio de ferramentaria.

Fabricante: Nikon - Japão

Modelo: Mesuriscopes

Com acessórios e jogo de lentes de pequena profundidade de foco, para medições verticais.

Mesa Micrométrica com campo de medição de 50x100 mm

Resolução da Mesa Micrométrica: 0,001 mm.

Para o registro dos desgastes foi utilizada uma câmara fotográfica com acessório de adaptação ao microscópio.

Fabricante: Nippon Kogaku - Japão

Modelo: F

Lente: Nikkor - S Auto

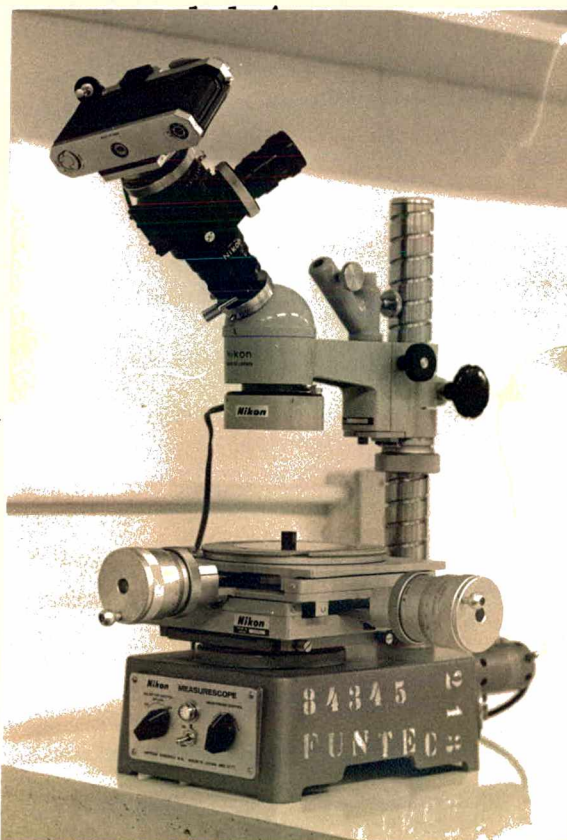


Fig. 3.3 - Equipamento para o registro do desgaste.

3.1.5 Instrumentos de medição das componentes da Força de Corte

A força de corte foi medida através de um dinamômetro piezo-elétrico e registrados por um registrador UV (fig. 3.4) e esquema (fig. 3.6).

O dinamômetro constava de três elementos:

- a) o transdutor, uma plataforma para medidas tridimensionais de força em usinagem;
- b) amplificadores de carga, três elementos modulares (um para cada componente);
- c) indicadores analógicos, também um para cada componente de força.

Características do transdutor, (41)

Fabricante: Kistler - Suíça

Modelo: plataforma para medição de três componentes de força

Referência: 9257 - A

Força máxima: F_x ; $F_y = 500 \text{ kgf}$
 $F_z = 1000 \text{ kgf}$

Resolução: 0,001 kgf

Capacidade de sobre carga: 50%

Rigidez na direção: $z = 200 \text{ kgf}/\mu\text{m}$
 $x, y = 100 \text{ kgf}/\mu\text{m}$

Frequência de ressonância: 4,0 kHz

Linearidade: $\pm 1\%$

Características do amplificador de carga

Fabricante: Kistler - Suíça

Referência: 5001

Campo de medição: ± 10 a 500000 pC em 12 graus

Capacitor variável: 10 a 50000 pF

Tensão máxima de saída: $\pm 10 \text{ V}$

Características do indicador analógico

Fabricante: Kistler - Suíça

Referência: 5501

Campo de medição: 0 a 110 V
Resolução: 0,1 V

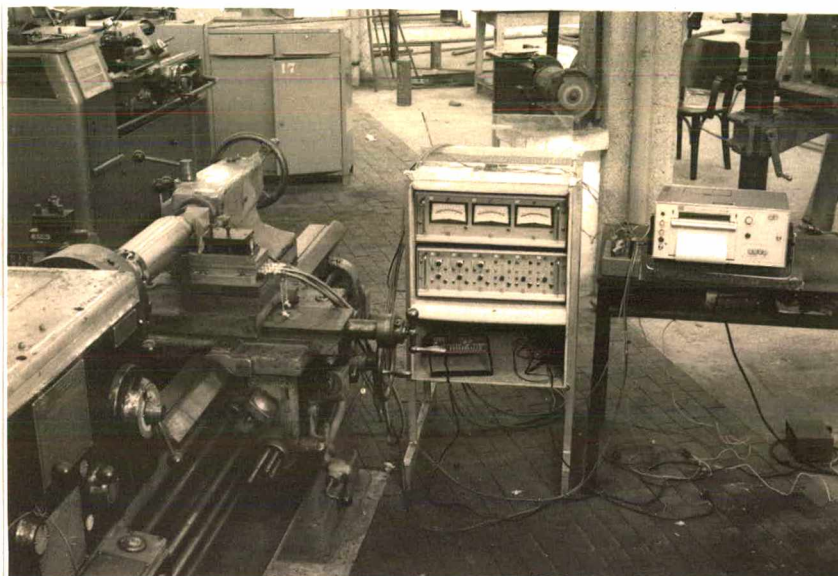


Fig. 3.4 - Dinamômetro e registrador

3.1.6 Equipamento para medição da temperatura de corte

Como já foi citado anteriormente a ferramenta foi especialmente adaptada para medir a temperatura simultaneamente com a força de corte durante todo tempo de corte até o fim da vida de cada aresta do inserto.

O sistema construído tem as seguintes características:

- a) a junta quente secundária foi eliminada pelo uso do bastonete de metal duro que servia de condutor elétrico até a junta fria.
- b) as tensões parasitas foram eliminadas pelo isolamento do porta ferramenta com o torno e a peça contra a placa e o contra ponta (fig. 3.1).
- c) o contato entre a parte girante do circuito e a par

te estática foi feita por meio de contato deslizante. O equipamento usado foi:

Anéis e escovas de prata

Fabricante: Hottinger Baldwin

Modelo: Sk - 6 canais

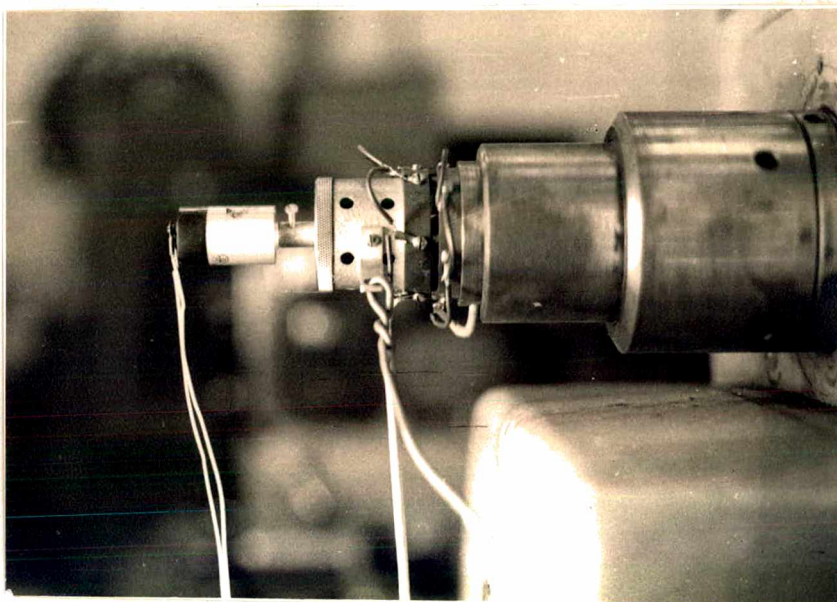


Fig. 3.5 - Anéis com escovas de prata e tacho-ge-
rador montados na extremidade ante-
rior da árvore do torno.

A medição da temperatura de corte não exigiu nenhum amplificador nem equipamento especial de leitura, já que o equipamento de registro também se prestava para a leitura.

3.1.7 Equipamento para registro das componentes da força de corte e da temperatura

Características do registrador, (43)

Fabricante: S.E. Laboratories Engineering Ltd - In-
glaterra

Modelo: S.E. 3006

Velocidade de registro: $1,5 \times 10^6$ mm/seg

Nº de canais: 12

Linearidade: $\pm 1\%$

Velocidade do papel: 10, 25, 100, 200 mm/min ou
mm/seg

Papel de registro: Direct Print Kodak

Largura do papel: 152 mm

Os galvanômetros usados foram:

S.E. /A 3300

Tensão máxima: 2,1 V (para medição das componentes
de força)

S.E. /A 100

Tensão máxima: 1,95 mV (para medição da temperatura)

Para adaptar a faixa de sinal de saída, do amplificador de carga, e do termopar peça-ferramenta ao sinal de entrada dos galvanômetros, bem como eliminar a componente dinâmica - da força de corte e o ruído devido à escova dos termopares, construiu-se filtros passivos RC.

Para o registro da temperatura:

Galvanômetro: S.E. /A100

Resistência equivalente: 302Ω

Capacitor: $1000 \mu\text{F}$

Para o registro de Fz

Galvanômetro: S.E. /A 3300

Resistências: $R_1 = 102 \Omega$ $R_2 = 47,4 \Omega$

Capacitor: $400 \mu\text{F}$

Para o registro de Fy

Galvanômetro: S.E. /A 3300

Resistências: $R_1 = 101,7 \Omega$ $R_2 = 47,8 \Omega$

Capacitor: $400 \mu\text{F}$

Para o registro de F_x

Galvanômetro: S.E. /A 3300

Resistências: $R_1 = 102,01 \Omega$ $R_2 = 47,5 \Omega$

Capacitor: $400 \mu F$

O esquema geral de medição da temperatura e força de corte é ilustrado na figura 3.6.

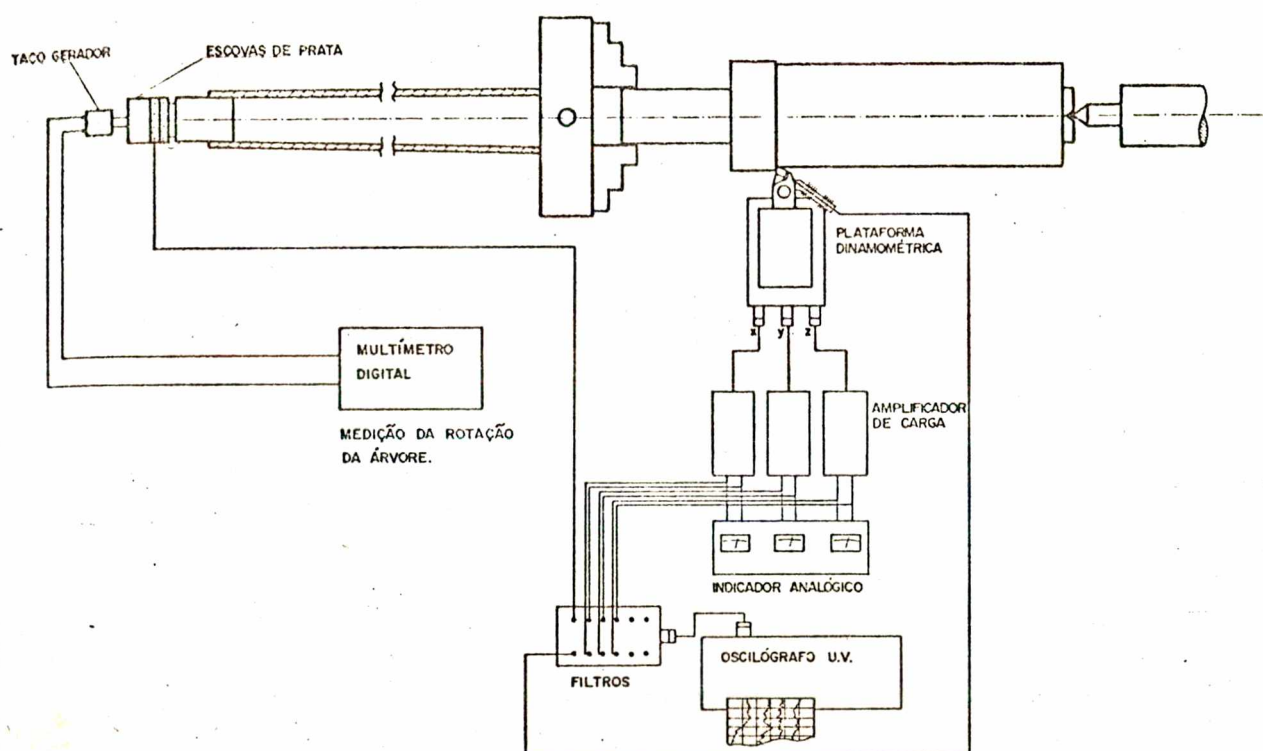


Fig. 3.6 Esquema geral da medição e registro da temperatura e força de corte.

3.1.8 Equipamentos usados na determinação das características mecânicas dos materiais

a) Para os ensaios de tração

Máquina Universal de Ensaio

Fabricante: WPM Veb Thuringer Industrie - Verk

Alemanha Oriental
Modelo: ZDM 10
Capacidade: 10000 kgf
Acionamento: mecânico
Com acessório standard

- b) Para impressão na medição de dureza

Máquina Universal de Ensaios

Fabricante: WPM
Capacidade: 10000kgf
Acionamento: hidráulico
Com base adaptada para peças cilíndricas com esfera de 10 mm (carga: 3000 kgf).

- c) Lupa para medição das impressões

Fabricante: Carl Zeiss Jena - Alemanha Oriental

- d) Microscópio para micrografias

Fabricante: VEB Carl Zeiss Jena - Alemanha Oriental
Modelo: Epityp 2
Com acessório standard, inclusive câmara fotográfica

3.1.9 Equipamentos utilizados nas aferições

- a) Fonte padrão para calibração de equipamentos: Me
tter Calibrator 750 - A

Fabricante: John Fluke M.F.G. C. Inc. - Japão
Precisão: 0,1% (na tensão)
Resolução: 100 μ V (para tensão)

- b) Potenciômetros para medição da F.E.M. na aferição dos termopares

Potenciômetro Cambridge

Modelo: Slide Wire Potenciometer

Fabricante: Cambridge Instrument Co Ltd - Inglaterra

Equipamentos auxiliares

Célula de Weston

Galvanômetro - Cambridge

Com resolução: 0,1 mV

Potenciômetro Leed

Fabricante: Leed e Nortrup - USA

Resolução: 0,1 mV

Faixa de medição: 0,01 mV a 2 V

c) Equipamentos diversos

Relógio comparador

Peacock

Resolução: 0,01 mm

Micrômetro

Fabricante: Tesa - Suíça

Faixa de medição: 50 a 200 mm

Resolução: 0,001 mm

Paquímetro

Fabricante: CSE - Tchecoslováquia

Faixa de medição: 0 a 250

Resolução: 0,02

3.2 Aferições

3.2.1 Aferição dos avanços do torno

Como o avanço tem grande importância tanto na usabilidade como nas medições de temperatura e força, utilizou-se o fuso em vez da vara para o acionamento do carro longitudinal

Para tanto foi escolhida uma montagem no avental que permitisse baixos avanços. Esta foi aferida e o resultado está resumido na tabela 3.1.

TABELA 3.1

Avanços aferidos no torno de ensaios com a montagem no avental									
26:127x38:120 $i_t=15,46$ (redução)									
Caixa de blocos deslocáveis	Caixa Norton								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	0,052	0,056	0,061	0,066	0,071	0,077	0,083	0,090	0,097
A	0,104	0,112	0,121	0,131	0,142	0,153	0,166	0,179	0,194
D	0,208	0,225	0,243	0,263	0,284	0,307	0,332	0,359	0,388
C	0,416	0,450	0,486	0,525	0,568	0,614	0,664	0,718	0,776

3.2.2 Aferição do dinamômetro

Os equipamentos Kistler permitem que sua saída em tensão elétrica seja regulada de modo que as unidades mecânicas medidas estejam em relação 1/1 como por exemplo: 1 kgf e quivale a 1 Volt. Para isto é necessário ajustar o capacitor variável (Trans Sens Range) do amplificador de carga.

Deste modo, não é necessário se determinar curvas de aferição, mas somente se regular o amplificador de carga, em função do transdutor em utilização.

O manual do amplificador de carga apresenta a maneira de regular o equipamento em função das características do transdutor pela equação:

$$U_F = \frac{Q}{C_q u}$$

onde:

- U_F = a mediçãõ em unidades de força
 Q = a sensibilidade do transdutor em pC/kgf
 C_q = a capacitância do transdutor em pF
 u = o fator de ajustagem do amplificador de carga em pF

Para a plataforma 9257 - A

- $Q = 35$ pC/kgf para F_z
 75 pC/kgf para F_x e F_y

$C_q = 140$ pF para F_x, F_y e F_z

O fator de ajustagem calculado é:

$$u = \frac{Q}{1 C_q} \text{ (pF)} \quad (12)$$

$$u_z = \frac{35}{140} = 0,25$$

$$u_{x, y} = \frac{75}{140} = 0,54$$

A partir da aferiçãõ realizada obtêve-se os seguintes resultados:

$$u_z = 0,363$$

$$u_x = 0,75$$

$$u_y = 0,75$$

Estes valores de aferição foram confirmados mais tarde por Cunha (50). A figura 3.7 mostra a fotografia da aferição da componente Fz.

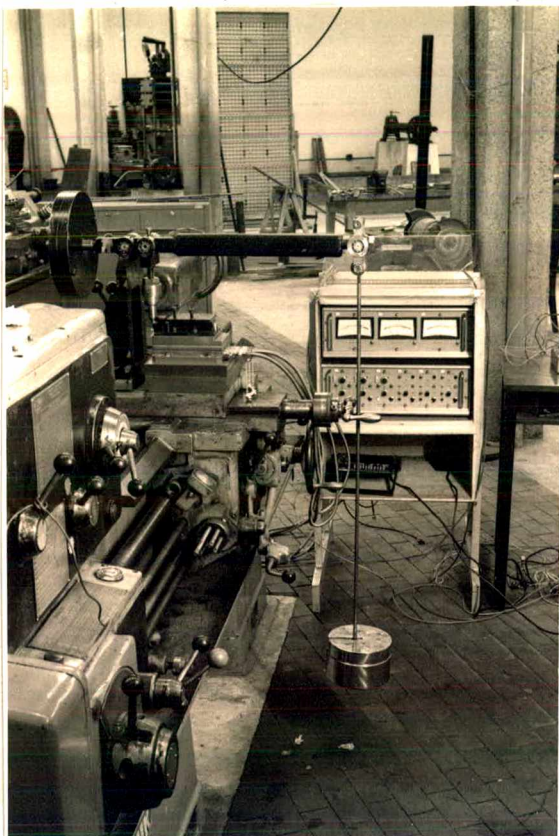


Fig. 3.7 - Aferição da componente Fz

3.2.3 Aferição do termopar peça-ferramenta

As características termo-elétricas do termopar peça-ferramenta foram levantadas pela aferição em um forno especialmente projetado e construído com esta finalidade.

O forno tinha como fonte térmica uma resistência elétrica, onde o calor era regulado por um transformador de tensão continuamente variável (varivolt) (figura 3.8).

A temperatura máxima obtida era 1200°C com atmosfera neutra pela injeção de argônio. As peças representativas da ferramenta e do corpo de prova, eram bastonetes com extensões do mesmo material mergulhados em gelo, de onde se fazia a junta de referência com fios de cobre até o equipamento de registro.

Tanto a temperatura da junta no interior do forno, como a temperatura das juntas de referência eram verificadas - por termopares convencionais. O termopar padrão colocado no interior do forno era cromel alumel, e para ser usado foi feito um ensaio de recepção descrito no apêndice I. A aferição usada para os termopares foi obtida através das tabelas: "Conversions tables for thermopars" (51).

O esquema do forno e termopares é mostrado na figura 3.9.

Os instrumentos utilizados na aferição foram:

Varivolt 0 a 240 V

Potenciômetro Leed

Potenciômetro Cambridge e acessório, todas já descritas no item 3.1

Para simular o contato peça-ferramenta na operação de corte, manteve-se os seguintes cuidados:

- a) os cilindros representativos da peça foram tirados de um corpo de prova e usinados para as condições especificadas no projeto do forno;
- b) o cilindro representativo da ferramenta era de mesmo material ISO K10;
- c) os contatos eram mantidos desoxidados;
- d) a vazão de argônio era mantida de modo que não permitisse entrada de ar atmosférico no forno;
- e) as juntas frias de referência foram mantidas em gelo fundente.

Antes da aferição se esperava um espaço de tempo inicial suficiente para que se atingisse a temperatura de 0 °C.

Os dados foram tomados através dos dois potenciômetros, o aquecimento era feito lentamente e as medidas tomadas em espaços de tempo iguais e simultaneamente.

Foram realizadas três aferições onde a repetibilidade

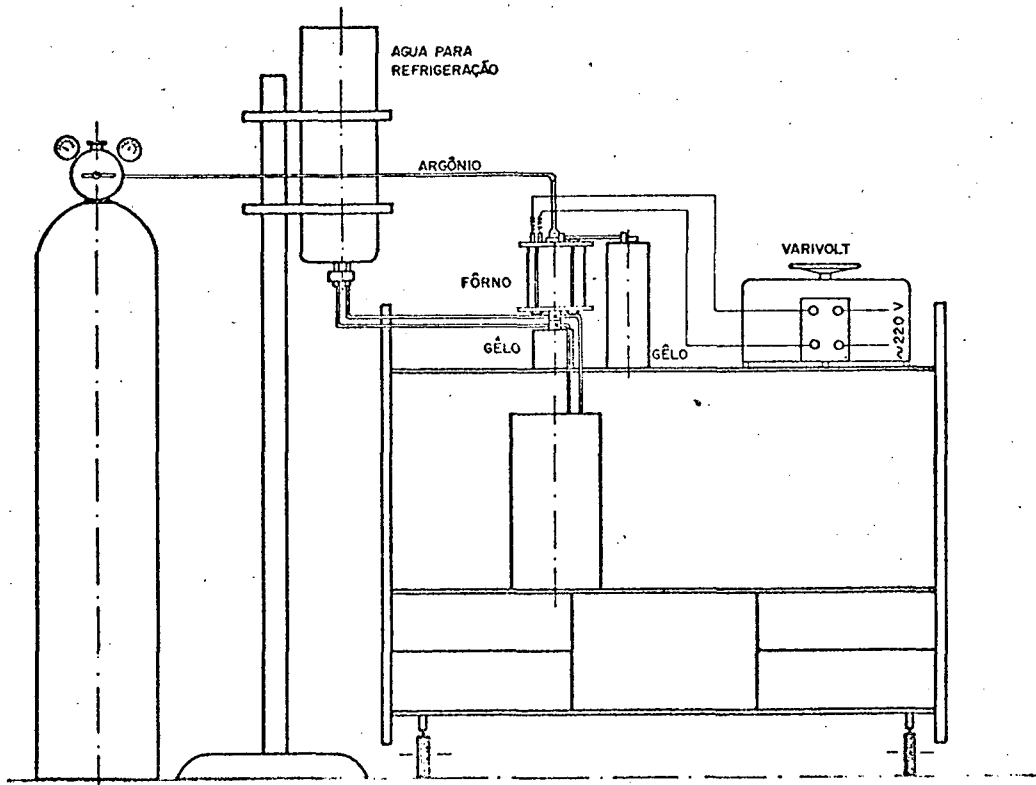


Fig. 3.8 Desenho do forno e acessórios para a aferição do termopar peça-ferramenta.

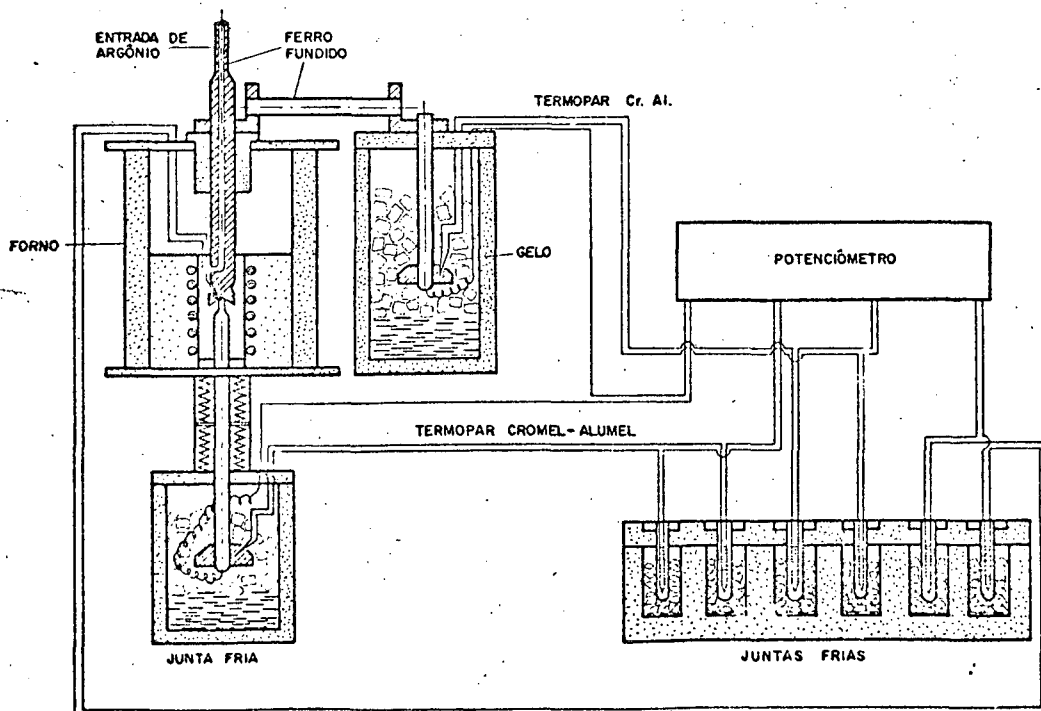


Fig. 3.9 Desenho do forno de aferição do termopar peça-ferramenta e o sistema de medição.

de foi muito boa.

A curva de aferição foi obtida a partir dos pontos da terceira aferição e estão resumidos na tabela 3.2, e seu a justamento pelo método dos mínimos quadrados é:

TABELA 3.2

Aferição do termopar peça-ferramenta (ferro fundido - ISO K10)			
Leitura	Termopar padrão Cr - Al (mV)	Temperatura medida (°C)	Termopar peça- ferramenta(mV)
01	1,22	42	0,062
02	3,76	103	0,440
03	5,0	133	0,73
04	6,42	173	1,00
05	6,96	182	1,12
06	7,46	194	1,24
07	8,82	228	1,45
08	9,14	236	1,50
09	9,66	249	1,59
10	11,74	300	2,02
11	13,34	338	2,25
12	14,48	366	2,50
13	15,24	383	2,54
14	15,60	392	2,70
15	17,20	430	3,05
16	18,74	466	3,39
17	19,98	496	3,69
18	23,81	585	4,56
19	25,00	613	4,88
20	25,62	628	5,08
21	28,18	688	5,94
22	29,25	714	6,32

TABELA 3.2 (cont.)

Aferição do termopar peça-ferramenta (ferro fundido - ISO K10)			
Leitura	Termopar padrão Cr - Al (mV)	Temperatura medida (°C)	Termopar peça- ferramenta(mV)
23	31,48	761	7,06
24	31,96	778	7,18
25	32,87	800	7,40
26	33,38	813	7,52
27	33,88	825	7,68
28	35,62	868	8,31
29	39,18	957	9,33
30	40,12	980	9,60
31	41,10	1005	9,86
32	42,22	1034	10,24
33	32,46	791	6,68
34	30,32	749	6,89
35	28,82	703	5,525
36	25,59	627	4,45
37	23,16	570	3,86
38	21,07	521	3,47
39	17,10	428	2,64
40	16,15	405	2,49
41	15,17	383	2,34
42	14,10	356	2,18
43	12,76	227	1,95
44	12,70	223	1,90

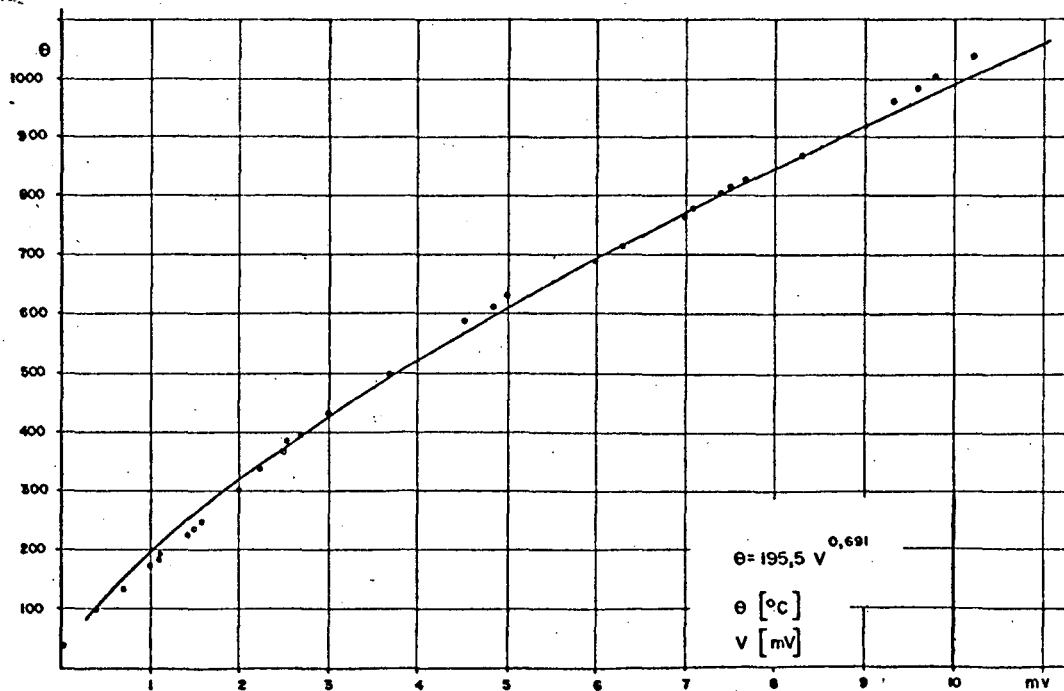


Fig 3.10 Curva de aferição do termopar peça-ferramenta.

$$\theta = 195,51 v^{0,691} \quad (13)$$

com coeficiente de correlação

$$R^2 = 0,98$$

3.2.4 Aferição do registrador

Para se obter a reta de aferição do registrador, era gerado uma tensão e anotada sua deflexão em papel fotográfico.

A fonte de calibração utilizada foi o "Metter Calibrador" descrito no ítem 3.1.

A tabela 3.3 mostra o resumo das medidas.

TABELA 3.3

Aferição no registrador				
Leitura	Leitura na fonte padrão			
Registrador (mm)	Temperatura (A100) (mV)	F _z (A3300) (V)	F _x (A3300) (V)	F _y (A3300) (V)
00	0,0000	0,000	0,000	0,000
10	1,5312			
20	2,2634			
30	3,5996	4,554	4,6425	4,590
40	5,1615			
50	6,6257			
60	7,8605	9,360	9,180	8,991
70	9,2786			
80	10,7032			
90	12,1097			
100	13,3053			

Pelo método dos mínimos quadrados, obteve-se as retas de aferição:

$$V_{\theta} = - 0,1245 + 0,1345x \quad (\text{mV}) \quad (14)$$

$$F_z = 0,012 + 1,506x \quad (\text{V}) \quad (15)$$

$$F_x = 0,02 + 1,53x \quad (\text{V}) \quad (16)$$

$$F_y = 0,032 + 1,449x \quad (\text{V}) \quad (17)$$

x é o deslocamento sobre o papel do registrador em mm.

CAPÍTULO 4

Corpo de Prova e Ensaio de Materiais

4.1 Corpos de prova usados

O trabalho experimental, como se sabe, foi totalmente realizado com ferro fundido cinzento. As dimensões dos corpos de prova para os ensaios de usinabilidade foram escolhidas de modo que permitissem o máximo de aproveitamento do material usinável nas condições dos ensaios.

De acordo com as estimativas seria necessário 5 corpos de prova de 50Kg cada, para se obter este peso foram tomadas as dimensões mostradas na figura 4.1.

Os corpos de prova eram montados sobre um eixo de aço por motivo de segurança e sua preparação contava de um desbaste inicial para se remover a casca de fundição como recomenda a bibliografia (32)

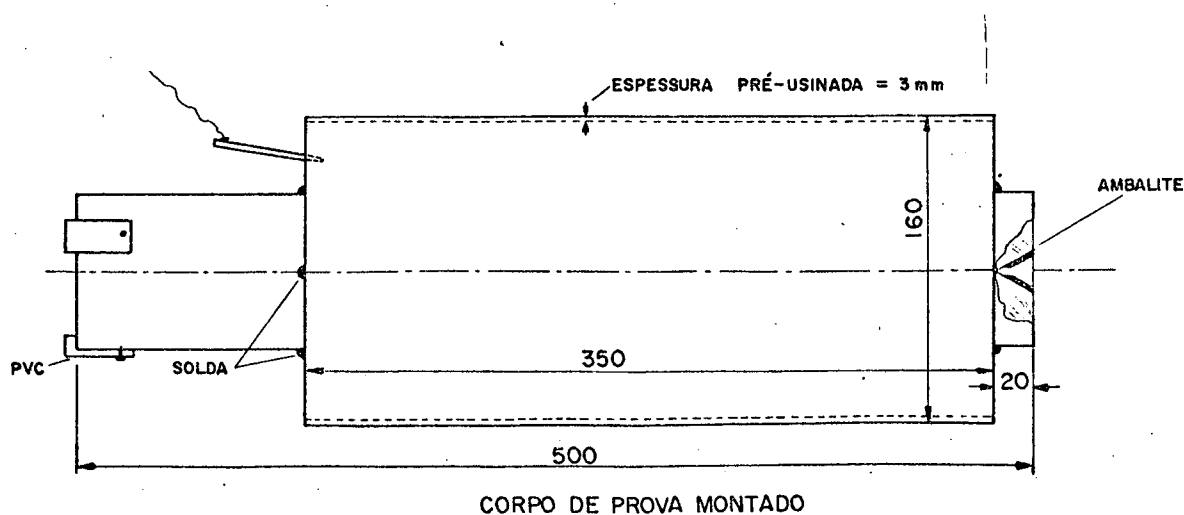


Fig. 4.1 Corpo de prova para os ensaios de usinabilidade.

Para se complementar o estudo sobre a variação da força e da temperatura de corte, como sensores de desgaste da ferramenta, projetou-se uma série de corpos de prova em forma de anel. Os mesmos eram também de ferro fundido de cinco fornadas diferentes. Os cinco anéis foram montados também sobre um eixo como mostra a figura 4.2.

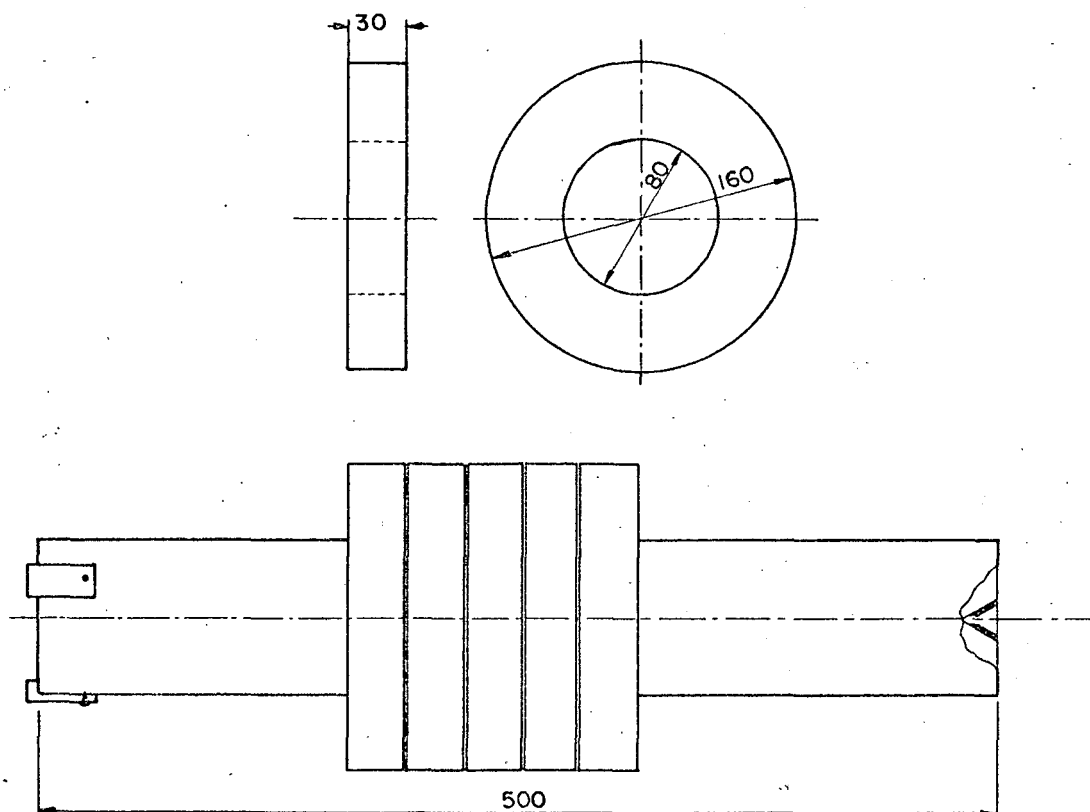


Fig. 4.2 Corpo de prova para os ensaios complementares.

4.2 Ensaio de tração dos corpos de prova

Para cada corpo de prova dos ensaios de usinabilidade foi fundido paralelamente uma amostra de 30 mm para ensaios de tração, sua confecção seguiu as especificações das Normas Brasileiras, mais especificamente a PEB 126.

As amostras dos corpos de prova 1, 2 e 3 foram confeccionadas com diâmetro $d = 20$ mm enquanto as amostras que foram obtidas do corpo de prova número quatro devi

do a uma imperfeição na fundição ficaram com diâmetro abaixo do especificado para corpos de prova de tração com $d = 20$ mm, obrigando-se a adoção da dimensão $d = 12,5$ mm, tabela 4.1.

TABELA 4.1

Resistência à tração dos corpos de prova					
	C.P. amostra	Diâmetro	Carga de rutura (kgf)	Tensão de rutura (kgf/mm ²)	Dureza das amostras (HB)
\bar{x} S	1/A	20	8260	26,3	177
	1/B	20	9560	30,4	184
	1/C	20	9550	30,4	181
				29,0	181
				2,4	4
\bar{x} S	2/A	20	9060	28,8	179
	2/B	20	9200	29,3	185
	2/C	20	8910	28,4	184
				28,8	183
				0,6	3
\bar{x} S	3/A	20	8570	27,3	187
	3/B	20	8060	25,7	177
	3/C	20	8440	26,9	174
				26,6	182
				0,8	7
\bar{x} S	4/A	12,5	3550	28,9	195
	4/B	12,5	(1950)	Defeituoso	191
	4/C	12,5	3040	24,8	192
				26,9	193
				2,9	3
Média geral				27,9	184
S				1,15	7
x				0,04	0,04

Quanto à resistência à tração, os corpos de prova 1, 2 são levementes mais resistentes que os 3 e 4, este fato no entanto não pareceu muito significativo. Quanto à classificação os corpos de prova estão todos enquadrados como FC 25.

4.3 Dureza Brinell dos corpos de prova

Todos os ensaios de usinabilidade foram precedidos de testes de dureza, eram feitas impressões quando o corpo de

prova estava pronto para o primeiro ensaio de usinabilidade e quando seu diâmetro atingia a marca dos 120 mm.

As impressões foram feitas com esferas de 10 mm e carga de 3000 kgf por se constituir a combinação mais adequada para ferros fundidos cinzentos (44).

O resultado dos ensaios de dureza estão resumidos na tabela 4.2.

TABELA 4.2

Dureza dos corpos de prova de usinabilidade (HB)						
	Diâmetro	L=10 a 80	L=115 a 200	L=250 a 330	\bar{x}	S
C.P.1	(mm)					
	156	161	163	157		
	156	157	158	161	160	3
	116	169	157	161		
	116	158	154	164	161	5
\bar{x}		161	158	161		
S		5	4	3		
C.P.2	158	154	145	149		
	158	152	150	150	150	3
	136	154	157	157		
	136	158	157	152	156	3
	\bar{x}		155	152	152	
S		3	6	4		
C.P.3	157	160	145	146		
	157	155	145	150	150	6
	132	149	154	160		
	132	150	161	152	154	5
	\bar{x}		154	151	152	
S		5	8	6		
C.P.4	154	157	150	161		
	154	156	154	162	157	4
	105	162	157	158		
	105	158	152	160	158	3
	\bar{x}		158	152	160	
S		3	3	2		
C.P.5	158	163	156	163		
	158	158	-	-	158	4
	117	144	146	149		
	117	151	151	147	150	3
	\bar{x}		154	151	153	
S		8	5	9		
TOTAL						
\bar{x}		156	153	156		
S		6	6	6		
X		0,04	0,04	0,04		

Como se observa na tabela 4.2 existe variação da dureza entre o centro e a superfície exterior do cilindro mas essa variação é muito baixa e não bem definida. Quanto a variação ao longo do cilindro, apesar de não ser grande, tem nas extremidades regiões de maiores dureza. Com esta verificação concluiu-se que se deveria eliminar 20 mm de cada extremidade do corpo de prova para ensaios de usinabilidade.

Os corpos de prova dos ensaios complementares sofreram igualmente controle de dureza em ambas as faces laterais para vários diâmetros.

A tabela 4.3 mostra o resultado das impressões.

TABELA 4.3

Dureza corpos de prova dos ensaios complementares (HB)															
Diâmetro (mm)	Anel 1			Anel 2			Anel 3			Anel 4			Anel 5		
	Face 1	Face 2	\bar{x}	Face 1	Face 2	\bar{x}	Face 1	Face 2	\bar{x}	Face 1	Face 2	\bar{x}	Face 1	Face 2	\bar{x}
95	165	167	166	166	162	164	153	143	150	149	157	153	178	156	167
105	167	165	166	169	160	164	166	142	151	155	153	154	174	163	168
115	167	164	165	167	162	164	164	147	155	152	153	155	174	163	168
125	166	165	165	163	166	164	165	144	154	156	156	156	170	168	169
135	162	166	164	168	164	166	165	146	156	163	160	161	172	166	169
145	163	166	164	161	164	163	161	143	152	159	152	155	169	169	169
\bar{x}	165	166	165	166	163	164	161	144	153	156	155	156	173	164	168
S			0,9			0,9			2			3			0,8
X			0,01			0,01			0,01			0,02			0,01

Pela tabela 4.3 observa-se que não existe grande diferença entre os anéis 1, 2 e 5 quanto à dureza. O anel 4 é um pouco menos duro e o anel 3 é sensivelmente menos duro na face 2.

Os anéis 1, 2, 4 e 5 foram cortados de corpos de prova dos ensaios prévios, enquanto o anel 3 foi cortado do corpo de prova nº 4 dos ensaios de usinabilidade (esta fundição foi feita em outro lote).

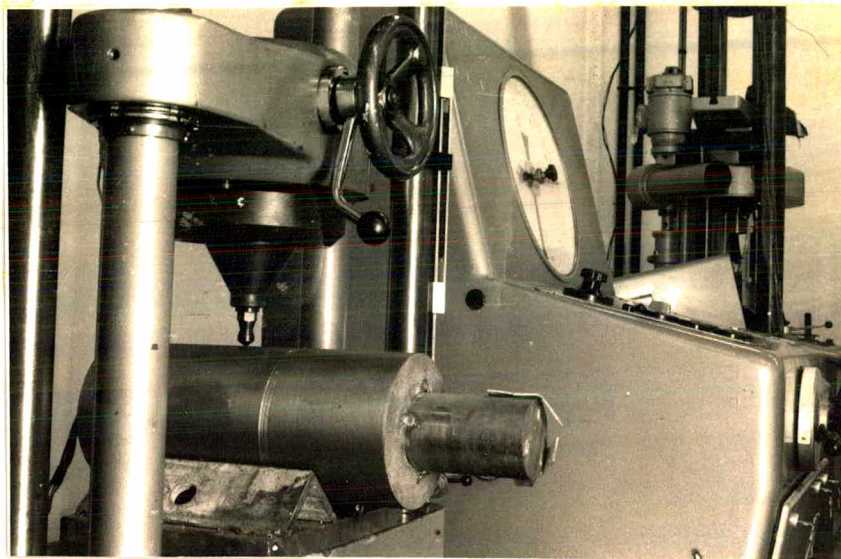


Fig. 4.3 - Fotografia da medição da dureza Brinell de um corpo de prova de usinabilidade

4.4 Análise micrográfica dos corpos de prova

A estrutura cristalina do ferro fundido, como já foi visto, está muito intimamente ligada a sua usinabilidade. Por este motivo é exigido que os ensaios de usinabilidade sejam feitos com corpos de prova de mesma estrutura cristalina, e como os corpos de prova foram fabricados de corridas diferentes, foi feita análise metalográfica para verificar:

- a) se os corpos de prova eram homogêneos ao longo da espessura de suas paredes;
- b) se havia homogeneidade entre os diferentes corpos de prova;
- c) avaliar a diferença de microestrutura entre os vários anéis.

Para se observar homogeneidade através da espessura da parede do corpo de prova tomou-se cinco amostras de um deles,

A localização das cinco amostras no corpo de prova é mostrada na figura 4.4, e as micrografias obtidas no apêndice IV. A análise das micrografias indica que há grande semelhança tanto na forma como no tamanho da grafita, também a perlita se apresenta de mesmo tamanho em todas as amostras.

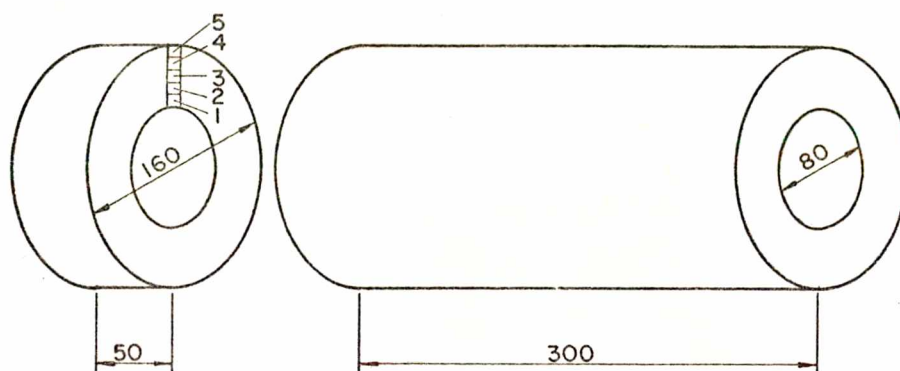


Fig. 4.4 Posição das amostras através da parede do corpo de prova.

De cada corpo de prova dos ensaios de usinabilidade foi tirado amostras para análise micrográfica, nas figuras 4.5 e 4.6 são mostrados dois exemplos. A observação das micrografias indica que não há grandes diferenças quanto ao tamanho ou forma ou ainda percentagem de cada micro-constituente da estrutura de cada amostra. De modo que se considerou o material dos corpos de prova como uma variável constante em todos os ensaios.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram duas micrografias obtidas.



Fig. 4.5 - Amostra do corpo de prova 3
X250 - Atacado com Nital.



Fig. 4.6 - Amostra do corpo de prova 5
X250 - Atacado com Nital

A estrutura de cada um dos cinco anéis dos ensaios complementares foi analisada. Nas figuras 4.7 a 4.11 estão as micrografias das cinco amostras obtidas.



Fig. 4.7 - Amostra do anel nº 1
X250 - atacado com Nital



Fig. 4.8 - Amostra do anel nº 2
X250 - Atacado com Nital



Fig. 4.9 - Amostra do anel 3
X250 - Atacado com Nital



Fig. 4.10 - Amostra do anel 4
X250 - Atacado com Nital



Fig. 4.11 - Amostra do anel 5
X250 - Atacado com Nital

A observação das micrografias dos cinco anéis indica que não há grande diferença entre os anéis 1, 2, 4 e 5, mas que o anel 3 apresenta-se com a perlita mais refinada e a grafita com lamelas menores.

CAPÍTULO 5

Ensaaios de Usinabilidade

Para se obter bons resultados em ensaio de usinabilidade é indispensável o controle cuidadoso de cada variável.

Nos ensaios, como geralmente acontece, foi mantido constante algumas variáveis e outras variaram sob controle.

Em cada ensaio eram mantidas constantes as variáveis:

- a) máquina ferramenta (torno);
- b) equipamento de medida;
- c) micro-estrutura do material da peça;
- d) material da ferramenta;
- e) ângulos da ferramenta.

As variáveis controladas eram:

- a) velocidade de corte;
- b) avanço da ferramenta;
- c) profundidade de corte.

Foram feitas medidas de:

- a) desgaste na superfície de incidência da ferramenta;
- b) temperatura de corte;
- c) força principal de corte;
- d) força de avanço;
- e) força de apoio

5.1 Projeto dos ensaios

Como os ensaios de longa duração tem o inconveniente do alto custo, devido ao grande volume de material usinado, foi estudada a possibilidade de se fazer ensaios de curta duração. Como a confiabilidade destes ensaios é muito baixa, foi abandonada a idéia.

Um artigo publicado em 1964, assinado por Wu, propunha o método já descrito no capítulo 2 que reunia a boa confiabilidade com menor custo.

Para os ensaios foi planejado o modelo de dezoito testes, mas o volume de material disponível não permitiu mais que doze ensaios.

As condições de usinagem: velocidade, avanço e profundidade assumiram os seguintes valores:

- a) velocidade de corte: 100; 150; 250 (m/min).
- b) avanço: 0,13; 0,18; 0,26 (mm/rot)
- c) profundidade: 1,3; 1,8; 2,6 (mm)

A distribuição dos ensaios ilustrada num cubo é mostrada na figura 5.1, onde x_1 é a velocidade, x_2 o avanço e x_3 é a profundidade. A tabela 5.1 mostra as condições de usinagem de cada ensaio.

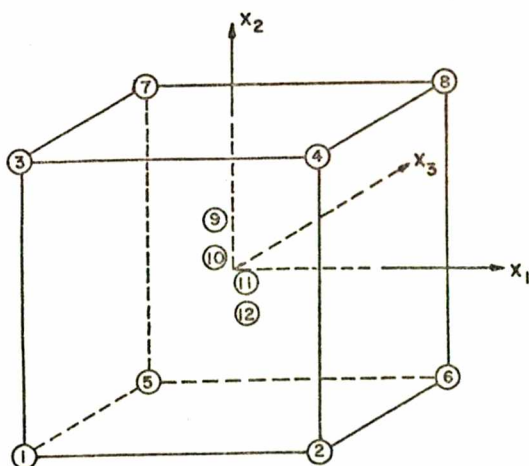


Fig. 5.1 Distribuição dos ensaios de Usinabilidade.

TABELA 5.1

Condições de Usinagem dos 12 ensaios			
Ensaio	v(m/min)	a(mm/rot)	p(mm)
01	100	0,13	1,3
02	250	0,13	1,3
03	100	0,26	1,3
04	250	0,26	1,3
05	100	0,13	2,5
06	250	0,13	2,5
07	100	0,26	2,5
08	250	0,26	2,5
09	150	0,18	1,8
10	150	0,18	1,8
11	150	0,18	1,8
12	150	0,18	1,8

5.2 A realização dos ensaios

Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Máquinas Operatrizes do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Durante cada ensaio foi cuidado para que as condições de usinagem permanecessem constantes. Na fixação da peça e da ferramenta mantinha-se boa rigidez. A leitura e controle da rotação era feita com precisão com o auxílio de um taco-gerador. A profundidade de corte era medida em cada corte com precisão. Ainda eram dispensados cuidados especiais à manutenção do isolamento elétrico para a medição da temperatura de corte (figura 5.2).

O critério de fim de vida adotado era o comprimento de desgaste $I_L = 0,38$ mm.

Foram desconsiderados os ensaios que atingiram este desgaste por quebra da aresta cortante ou pelo desgaste acentuado devido à falhas da ferramenta ou do material. Foram ainda eliminados da análise final os ensaios que tiveram resultados muito dispersos na análise de regressão.

As medições de desgaste eram feitas com um microscópio no fim de cada corte onde eram também fotografados.

Durante cada ensaio eram anotados os dados da usinagem em uma planilha e o registrador traçava as medidas de tempe

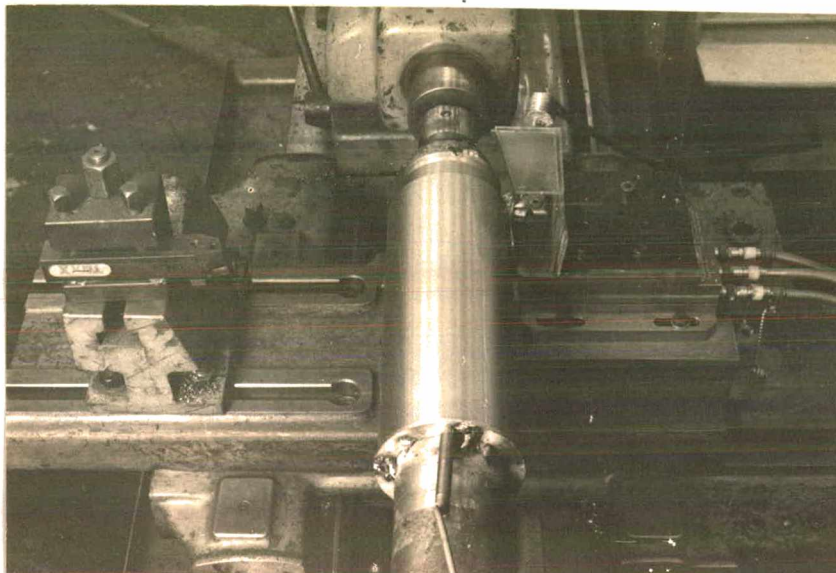


Fig. 5.2 - Corpo de prova e ferramenta prontos para um ensaio.

ratura e força de corte.

O preenchimento da planilha obedecia a seguinte ordem: (Veja um exemplar no quadro 5.1)

Elementos comuns a todos os cortes:

- a) data e operadores e nº do ensaio
- b) calibração do dinamômetro
- c) temperatura ambiente
- d) corpo de prova (número)
- e) ferramenta (número)
- f) condições de corte (v, a, p)

Elementos particulares de cada corte:

- a) diâmetro
- b) rotação (já multiplicada pela constante do instrumento)
- c) comprimento usinado

QUADRO 5.1

PLANILHA PARA ENSAIOS DE USINABILIDADE							
ENSAIO N° 05 DATA: 02.09.75				OPERADORES: Abelardo - Roberto TEMP. AMBIENTE: 20°C			
C.P.: 03 INSERTOS: 34-D				TRANS SENS 0,363; 0,75; 0,75 RANGE 0100			
PARÂMETROS v = 100 p = 2,5 a = 0,13 C. NORTON = A4							
CORTE N° 12-A		Dm = 140		RPM (V) = 1,59		L = 331	
Pz (Kgf)	Py (Kgf)	Px (Kgf)	θ (mV)	DESGASTE		I _L = 0,24	
75	31	52	7,2			I _{Lmáx} = -	
71	28	39	6,9	FOTO = 09 e 10		TEMPO = 11,2 min.	
54	20		6,2	OBS.: Presença de aresta postiça.			
CORTE N° 12-B		Dm = 129,7		RPM (V) = 1,72		L = 331	
Pz	Py	Px	θ	DESGASTE		I _L = 0,27	
69	25	39	7,0			I _{Lmáx} = -	
58	22	24	6,2	FOTO = 11-12		TEMPO = 10,37 min.	
48	20	18	5,7	OBS.: Presença de aresta postiça.			
CORTE N° 12-C		Dm = 124,7		RPM (V) = 1,80		L = 331	
Pz	Py	Px	θ	DESGASTE		I _L = 0,352	
65	24	38	7,0			I _{Lmáx} = -	
60	21	23	5,9	FOTO = 13-14		TEMPO = 9,97 min	
50	20	19	6,0	OBS.: Presença de aresta postiça.			
CORTE N° 12-D		Dm = 119,6		RPM (V) = 1,875		L = 317	
Pz	Py	Px	θ	DESGASTE		I _L = 0,360	
65	26	37	6,8			I _{Lmáx} = -	
56	22	23	6,2	FOTO = 15-16		TEMPO = 9,16 min	
47	22	18	5,7	OBS.: Presença de aresta postiça.			
CORTE N° 12-E		Dm = 115		RPM (V) = 1,96		L = 310	
Pz	Py	Px	θ	DESGASTE		I _L = 0,30	
70	26	41	7,1			I _{Lmáx} = 0,446	
63	23	24	6,6	FOTO = 17-18		TEMPO = 8,62 min.	
55	23	20	6,3	OBS.: Presença de aresta postiça.			

Medições:

- a) desgaste
- b) cada componente da força de corte
- c) temperatura de corte em (mV)

Apesar das medições de força e temperatura serem obtidas a partir do gráfico do registrador, eram também anotados na planilha para orientação na análise dos gráficos.

Eram ainda anotados os números das fotografias de cada desgaste e reservado um espaço para as observações. No quadro 5.1 é mostrado um modelo da planilha preenchida.

O tempo de cada ensaio era calculado tanto pela componente de tempo do registrador como pela divisão do percurso de corte pela velocidade. Este último método é o preferido.

$$t = \frac{2\pi D \frac{L}{a}}{v} \quad (14)$$

5.3 Análise dos resultados dos ensaios de usinabilidade

Os ensaios de usinabilidade seguiram o modelo dos ensaios de vida e como tal foram analisados, no entanto foi observado ainda a força e temperatura de corte, elementos também importantes do ponto de vista de usinabilidade.

A tabela 5.2 é um resumo dos ensaios sob o ponto de vista de vida. Esta além de ser expressa em tempo é também em volume de cavaco.

Tomando-se como base o critério $I_L = 0,38$ mm foi feita a ajustagem da curva de vida tomando-se como modelo a equação(5)

$$v T^x a^y p^z = C \quad (15)$$

TABELA 5.2

Resultado dos ensaios de Usinabilidade								
Ensaio	C.P.	v(m/min)	a(mm/rot)	p(mm)	I _L (mm)	Tempo(min)	Tempo p/I _L =0,38 (min)	Volume de cavaco (dm ³)
01	1	100	0,13	1,3	0,432	106,8	98	1,8
02	1	250	0,13	1,3	0,450	3,0	2,6	0,12
03	2	100	0,26	1,3	0,365	72,6	81	2,76
04	5	250	0,26	1,3	0,377	4,8	4,9	0,41
05	3	100	0,13	2,5	0,380	49,3	49	1,6
06	3	250	0,13	2,5	0,342	4,5	5,0	0,16
07	4	100	0,26	2,5	0,35	35,8	38	2,5
08	5	250	0,26	2,5	0,385	2,9	2,9	0,47
09	2	150	0,18	1,8	0,396	35,3	34	1,5
10	5	150	0,18	1,8	0,398	20,4	19,5	0,89
11	3	150	0,18	1,8	0,390	26,7	26	1,2
12	1	150	0,18	1,8	0,410	17,67	16,4	0,75

Para o ajustamento a equação de Taylor foi transferida em:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (6)$$

onde:

$$\begin{aligned} y &= \ln T \\ x_1 &= \ln v \\ x_2 &= \ln a \\ x_3 &= \ln p \\ b_0 &= (1/x) \ln C \\ b_1 &= -1/x \\ b_2 &= -y/x \\ b_3 &= -z/x \end{aligned}$$

O ajustamento e a análise estatística foi feita pelo método dos mínimos quadrados utilizando-se o programa Tradutor de Linguagem Estatística (48). No apêndice II são mostrados

os fundamentos matemáticos do programa, os dados de entrada e os resultados.

Os resultados obtidos foram:

a) os coeficientes de regressão:

$$b_0 = 18,5$$

$$b_1 = - 3,1$$

$$b_2 = - 0,15$$

$$b_3 = - 0,5$$

b) o coeficiente de correlação múltipla:

$$R^2 = 0,934$$

c) o desvio padrão estimado:

$$s = 0,38$$

d) a matriz de correlação

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0,00	1		
x_3	0,00	0,00	1	
y	0,96	0,04	0,11	1

O coeficiente de correlação múltipla tem sua significância analisada por Lipson (45) tabela onde para oito graus de liberdade e doze observações (que é o caso estudado) o valor de $R^2 > 0,777$ para a confiabilidade de 95%, portanto o valor de $R^2 = 0,934$ demonstra que o modelo é adequado.

O desvio padrão estimado $s = 0,38$ (ln(min)) ou $s = 1,46$ (min) também é um valor razoável.

A matriz de correlação indica que a velocidade ex

plica 96% da vida, enquanto a profundidade e principalmente o avanço explicam muito pouco da vida. Este último resultado discorda do consenso geral em ensaios de usinabilidade, pois sabe-se que o avanço tem influência bem mais significativa na vida que estes resultados obtidos. Esta anomalia pode ser explicada por um erro grosseiro no avanço ou fatores aleatórios. Acredita-se que a primeira hipótese é menos provável que a segunda já que durante os ensaios o controle destas variáveis foi bastante cuidadoso, por outro lado o pequeno número de ensaios e a significância mais baixa do avanço e profundidade fez com que estas variáveis ficassem muito sensíveis a qualquer erro aleatório.

O teste t de significância dos parâmetros confirma que o coeficiente b_2 (correspondente ao avanço) não está confiável da seguinte forma:

$$t_j = \frac{b_j}{Sb_j}$$

onde b_j é o coeficiente da variável e S é o desvio padrão da variável, ambos obtidos do programa.

$$t_1 = \frac{b_1}{Sb_1} = 10,5$$

$$t_2 = \frac{b_2}{Sb_2} = 0,4$$

$$t_3 = \frac{b_3}{Sb_3} = 1,2$$

O valor de t é comparado com o $t_{\alpha/2}$ da distribuição de Student, da bibliografia (46) t para oito graus de liberdade e doze observações a 95% de confiabilidade é:

$$t_{0,95} = 2,306$$

$$t_{0,5} = 0,706 \quad (\text{Para } 50\%)$$

A análise de significância dos parâmetros mostra que o coeficiente da velocidade é bem confiável, no entanto os coeficientes da profundidade e sobretudo do avanço carecem de confiabilidade melhor que 50%.

A fórmula de Taylor resultante dos ensaios é:

$$v T^{0,32} a^{0,06} p^{0,16} = 390 \quad (15)$$

Onde o valor de $x = 0,32$ concorda com a bibliografia (1)(48).

A usinabilidade foi analisada ainda através da temperatura e força de corte.

A força de corte foi medida por um dinamômetro piezo-elétrico já descrito no capítulo 3, através das componentes:

P_z = Força Principal de Corte

P_x = Força de Avanço

P_y = Força de Apoio (passiva)

Nesta análise foi avaliada a variação da força de corte com a mudança das condições de usinagem.

A tabela 5.3 resume os resultados obtidos de força nos ensaios de usinabilidade e nos ensaios complementares para o caso em que a ferramenta era considerada afiada.

A análise estatística resumida dos resultados é dada a seguir, usando-se os mesmos instrumentos dos ensaios de vida para determinação da equação de Taylor.

Pela múltipla regressão o modelo mais adequado é:

$$F = b_0 + b_1 v + b_2 a + b_3 p \quad (16)$$

TABELA 5.3

Medidas de força e temperatura nos ensaios de usinabilidade e nos ensaios complementares com ferramenta afiada														
v	a	p	Temperatura						Força de corte					
			Ensaio Usinab.	Anel 1	Anel 2	Anel 3	Anel 4	Anel 5	Ens. Usinab.			Anel 5		
									Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy
100	0,13	1,3	8,8	8,63	8,58	9,58	8,91	9,14	36	23	16	36	23	19
250	0,13	1,3	11,18	11,20	11,16	12,67	11,79	11,74	30	17	13	38	21	16
100	0,26	1,3	8,8	11,32	11,33	10,8	10,37	10,74	56	29	27	56	29	28
250	0,26	1,3	12,1	13,27	13,34	13,24	12,91	13,11	38	17	14	56	24	28
100	0,13	2,5	8,2	8,72	8,66	9,72	9,13	9,40	66	49	24	59	38	27
250	0,13	2,5	10,62	11,44	11,50	12,99	11,74	11,91	50	30	19	44	21	15
100	0,26	2,5	10,4	10,37	10,41	11,36	10,90	10,98	114	68	39	102	61	42
250	0,26	2,5	12,7	12,68	12,64	13,75	12,45	13,16	76	41	22	78	46	34
150	0,18	1,8	10,1	10,35	9,81	11,69	9,40	9,54	51	31	24	48	26	19

As equações obtidas para as três componentes de força são:

$$F_z = -13,1 - 0,13v + 197a + 28,2p \quad (17)$$

$$F_x = 0,50 - 0,106v + 70a + 19,7p \quad (18)$$

$$F_y = 9,7 - 0,06v + 56a + 6,4p \quad (19)$$

Os coeficientes de correlação múltipla são:

$$R_z^2 = 0,90$$

$$R_x^2 = 0,91$$

$$R_y^2 = 0,85$$

As matrizes de correlação são:

a) para F_z

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0,00	1		
x_3	0,00	0,00	1	
y	-0,37	0,50	0,71	1

b) para F_x

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0,00	1		
x_3	0,00	0,00	1	
y	-0,47	0,28	0,78	1

c) para F_y

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0,00	1		
x_3	0,00	0,00	1	
y	-0,60	0,46	0,52	1

Para nove observações e quatro graus de liberdade o valor mínimo de R^2 é 0,875.

A matriz de correlação indica que a velocidades mais altas, há redução na força de corte, este fato deve-se especialmente a presença de arestas postigas na superfície de saída e de incidência. Quanto aos elementos que definem a secção de cavaco: estes tem influência marcante na força de corte de modo positivo.

A temperatura de corte foi medida pelo termopar peça-ferramenta descrito no capítulo 3. Sua representação em unidades elétricas de F.e.m. deve-se ao fato de que a aferição destes termopares não é suficientemente confiável, como já foi comentado no capítulo 2.

O modelo que pareceu mais adequado pela múltipla regressão foi:

$$\theta = v^{x'} a^{y'} p^{z'} c_0 \quad (20)$$

Logaritmando-se,

$$y = \ln \theta$$

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \ln v \\
 x_2 &= \ln a \\
 x_3 &= \ln p \\
 b_0 &= \ln C_0 \\
 b_1 &= x' \\
 b_2 &= y' \\
 b_3 &= z'
 \end{aligned}$$

A equação obtida é:

$$\theta = v^{0,28} a^{0,18} p^{-0,09} 3,67$$

O coeficiente de regressão múltipla é:

$$R^2 = 0,94$$

A matriz de correlação é:

	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0,00	1		
x_3	0,00	0,00	1	
y	0,85	0,42	0,19	1

O resultado de R^2 mostra que o modelo é adequado, e a matriz de correlação indica que há decisiva influência da velocidade na temperatura, mas que a influência do avanço é também relevante. No entanto a influência da profundidade é insignificante.

CAPÍTULO 6

A Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste

A avaliação da temperatura e força de corte como sensores de desgaste foi feita tomando-se dados dos ensaios de usinabilidade e dos ensaios complementares.

Os dados de desgaste, função da temperatura e força de nos ensaios de usinabilidade, foram obtidos da mesma forma que no capítulo 5. Os dados de medição da temperatura foram tomados ao longo de todos os cortes, mas os dados de força foram tomados apenas no início de cada corte, uma vez que o sinal do dinamômetro não era estável por limitação do equipamento.

Os ensaios complementares foram realizados com corpos de prova de anéis já descrito no capítulo 4 e mostrado na figura 6.15.

As ferramentas usadas nos ensaios eram insertos reversíveis desgastados previamente nos ensaios de usinabilidade com os seguintes desgastes medidos após os ensaios:

$$I_L = 0$$

$$I_L = 0,32 \text{ mm}$$

$$I_L = 0,46 \text{ mm}$$

$$I_L = 0,74 \text{ mm}$$

$$I_L = 1,8 \text{ mm}$$

As condições de usinagem adotadas foram:

$$v = 150 \text{ m/min}$$

$$a = 0,18 \text{ mm/rot}$$

$$p = 1,8 \text{ mm}$$

A medição da força de corte e temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta foi feita do mesmo modo que nos ensaios de usinabilidade.

6.1. A temperatura como sensor de desgaste

Os resultados dos ensaios de usinabilidade foram interpretados pela curva de aferição do galvanômetro, A apresentação da temperatura foi feita em unidades de tensão elétrica, (mV) e o desgaste em unidades de comprimento (mm).

Os pontos das figuras 6.1 a 6.12 são os valores médios tomados nos intervalos de tempo e obtidos através da reta de aferição do galvanômetro no gráfico traçado pelo registrador.

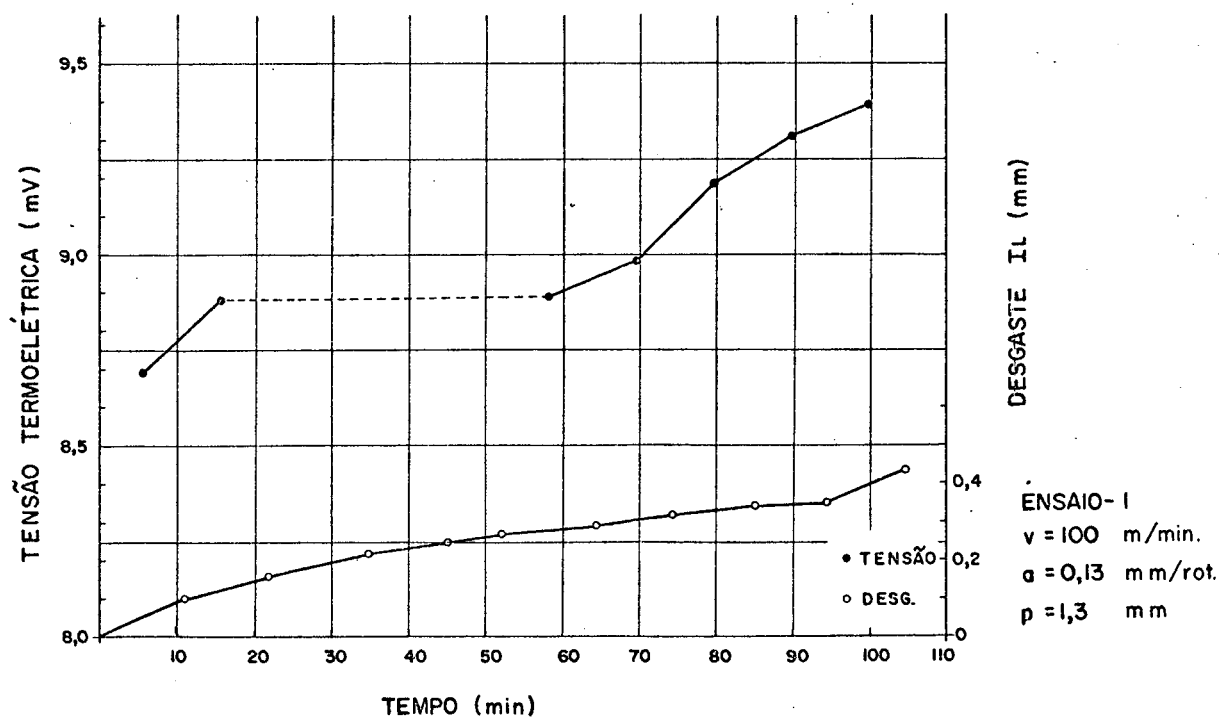


Fig. 6.1

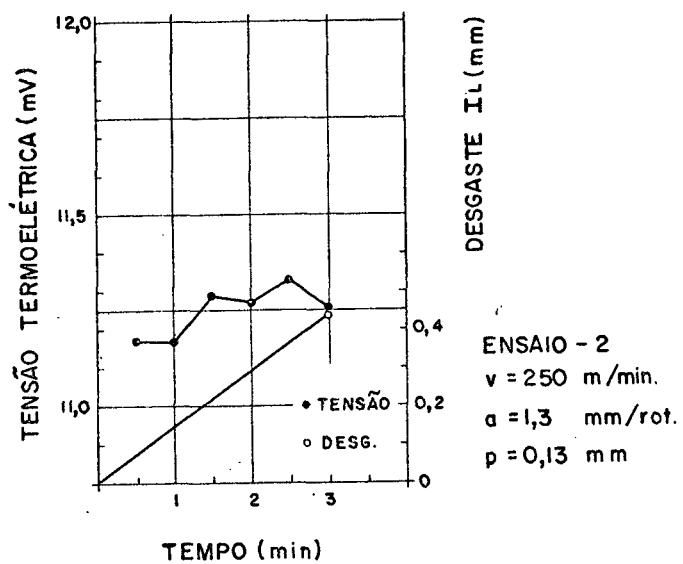


Fig. 6.2

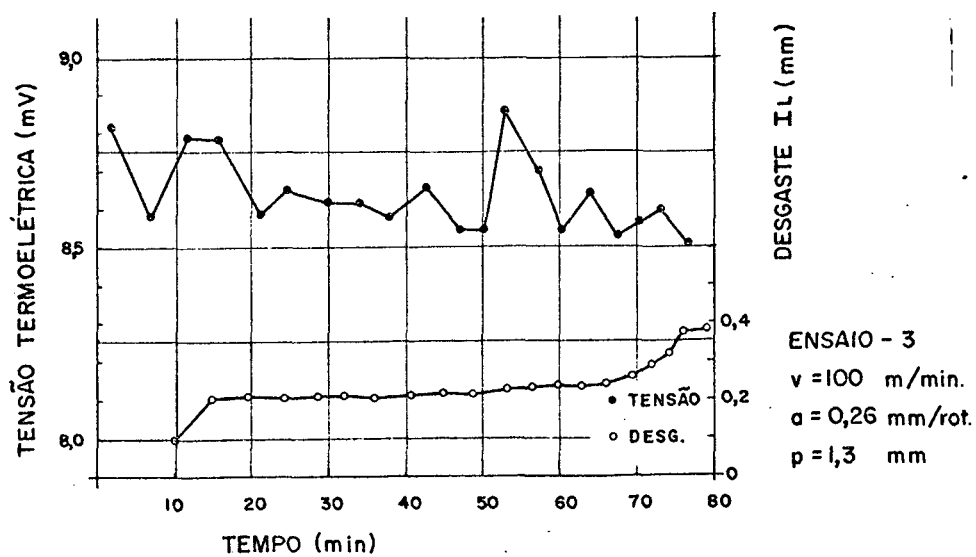


Fig. 6.3

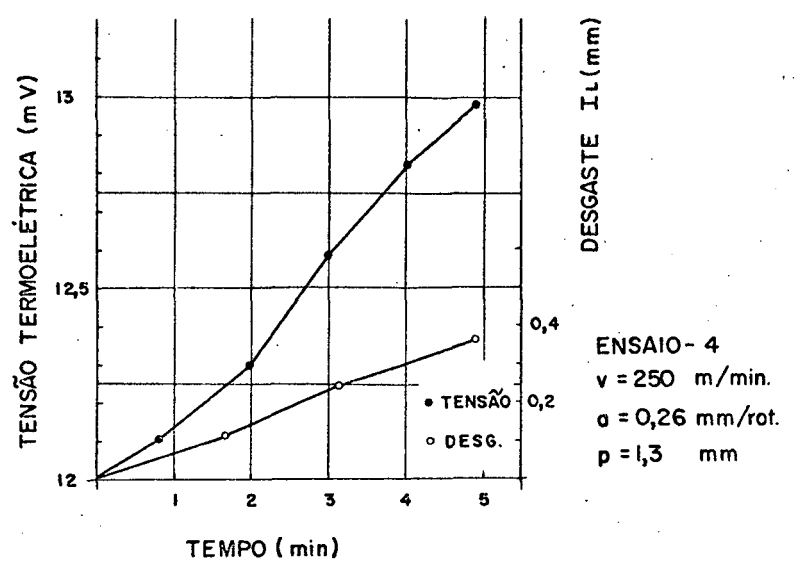


Fig. 6.4

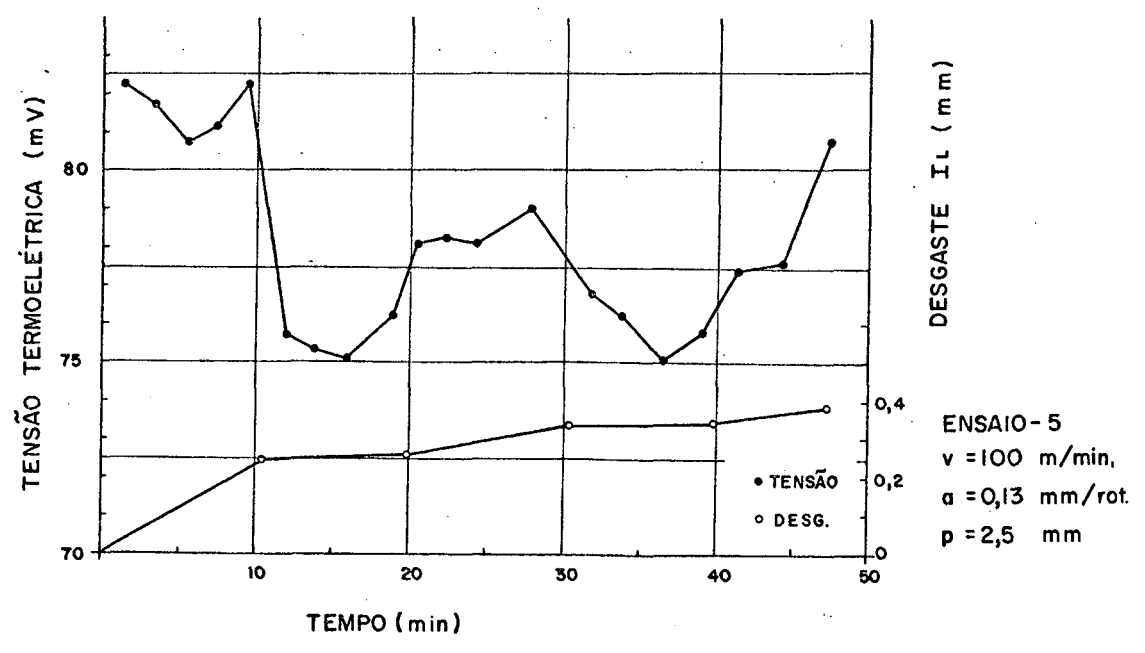


Fig. 6.5

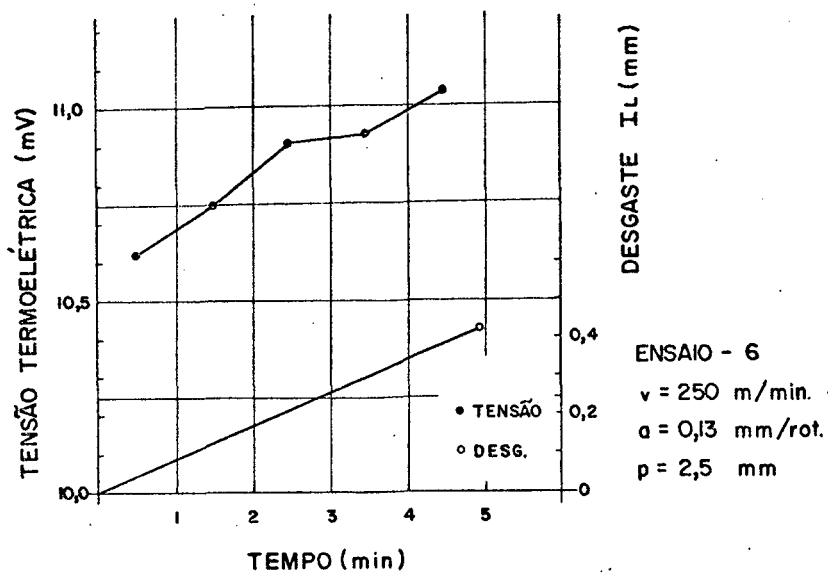


Fig. 6.6

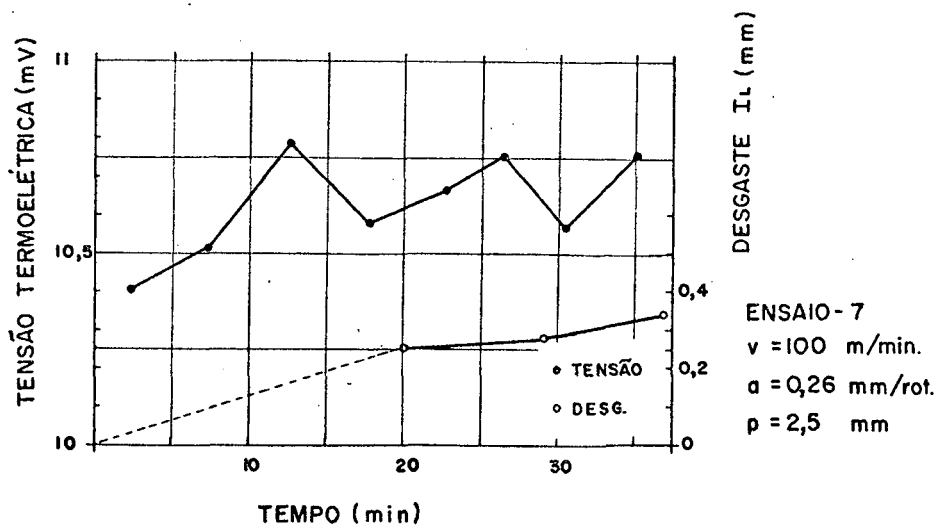


Fig. 6.7

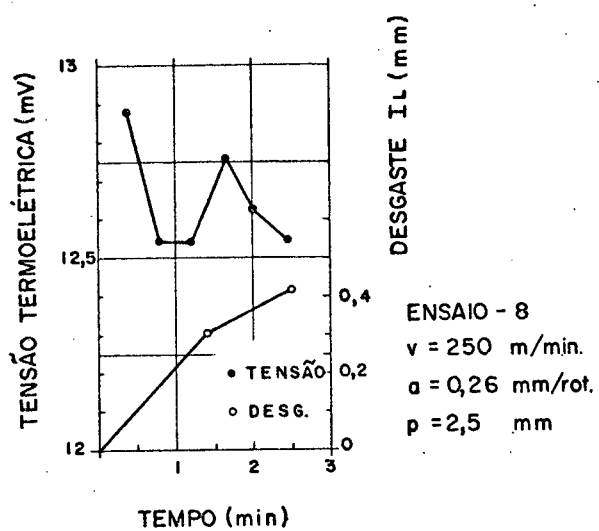


Fig. 6.8

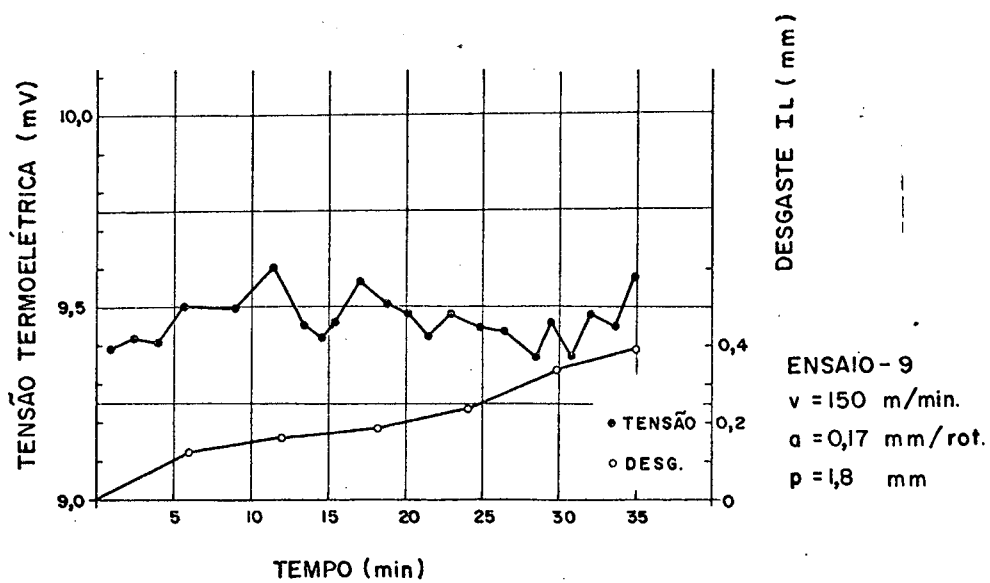


Fig. 6.9

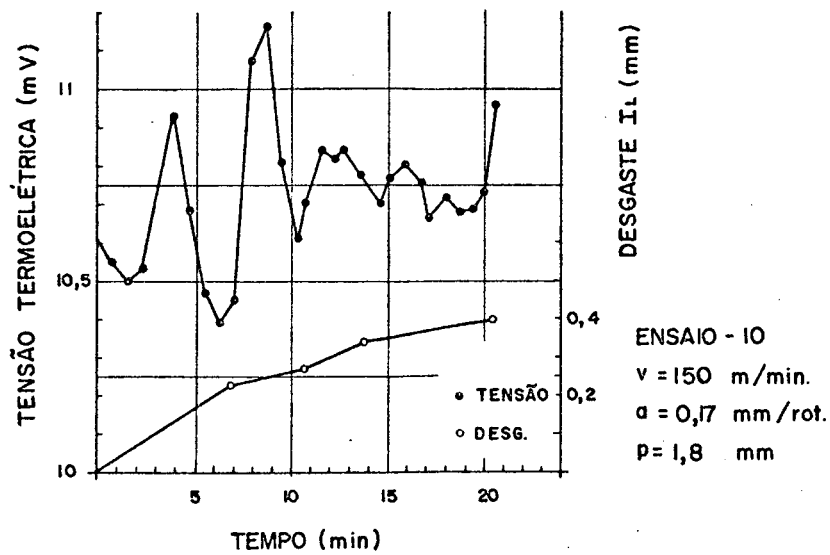


Fig. 6.10

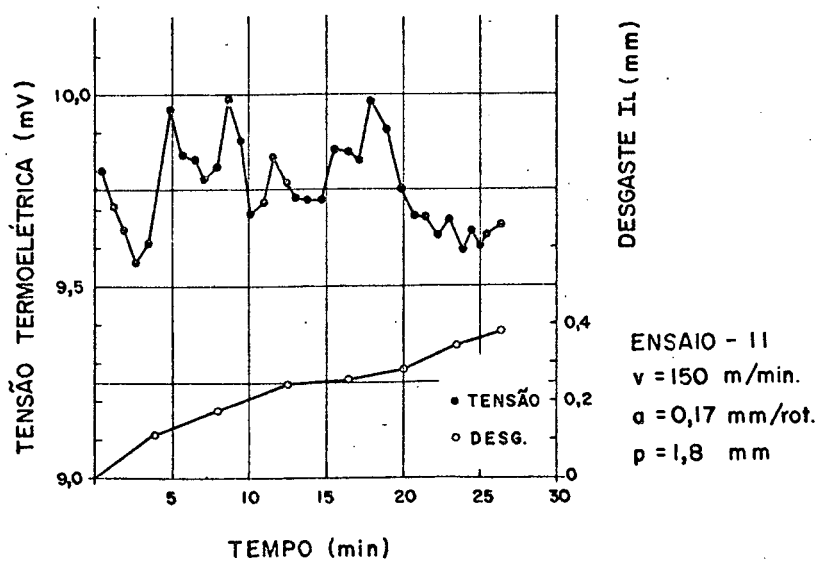


Fig. 6.11

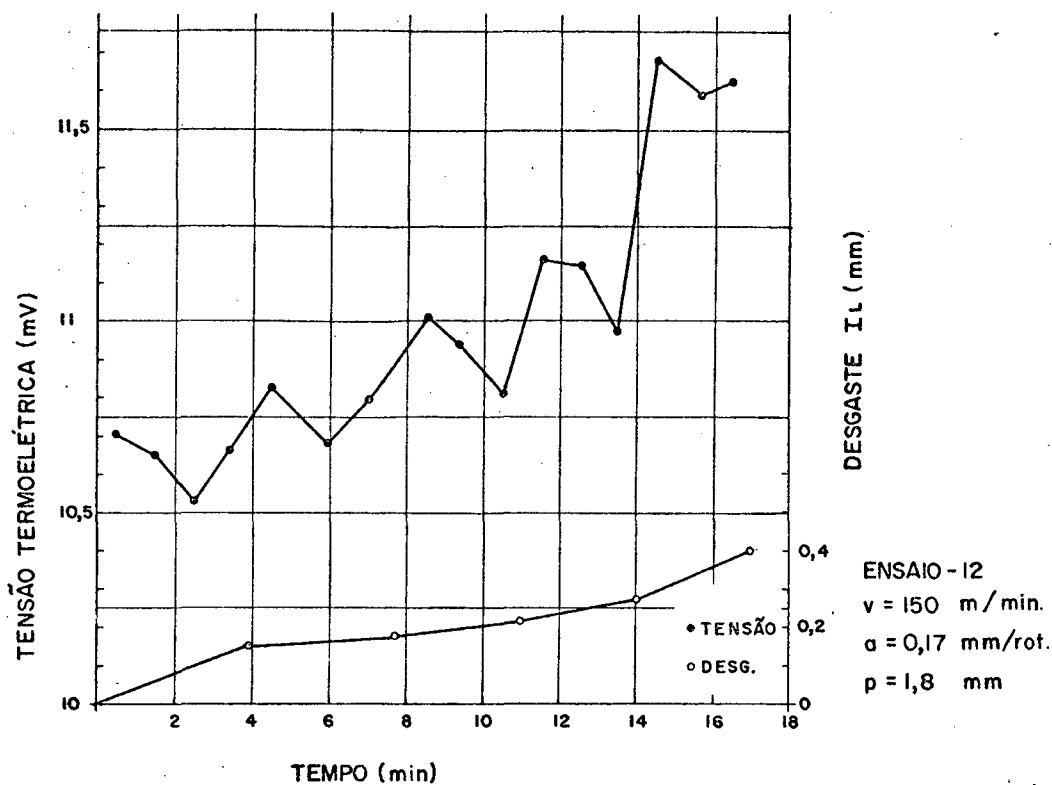


Fig. 6.12

Os resultados obtidos nos ensaios de usinabilidade, não foram conclusivos devido a sua baixa confiabilidade.

A temperatura, função do desgaste, apresentou muitos pontos dispersos e, às vezes, desconexos dando a entender que outras variáveis além das citadas influenciam significativamente no seu comportamento.

A análise das condições de usinagem indicou que os principais motivos da baixa qualidade dos resultados foi devido a:

- influência da dureza. Para alguns ensaios a temperatura a temperatura apresentou picos de tensão no início e no fim do corte. Observando a tabela de dureza dos corpos de prova (tabela 4.2) nota-se que nas extremidades os corpos de prova são também mais duros.

- flutuação da velocidade de corte. Como foi visto no capítulo 5 a velocidade é uma variável que tem grande influência na temperatura de corte, portanto durante o corte qualquer flutuação da velocidade poderá perturbar o sinal mascarando o des-

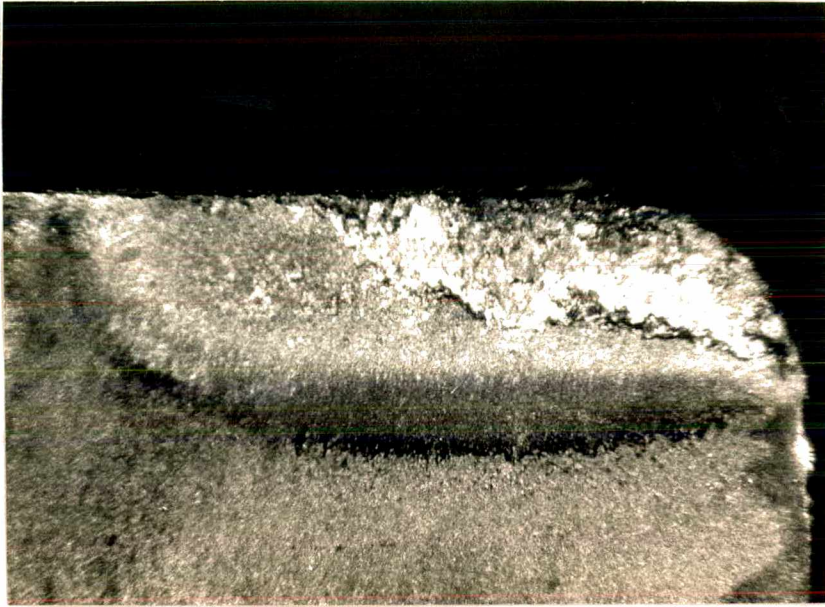


Fig. 6.13 - Ferramenta apresentado adesão na superfície de saída.

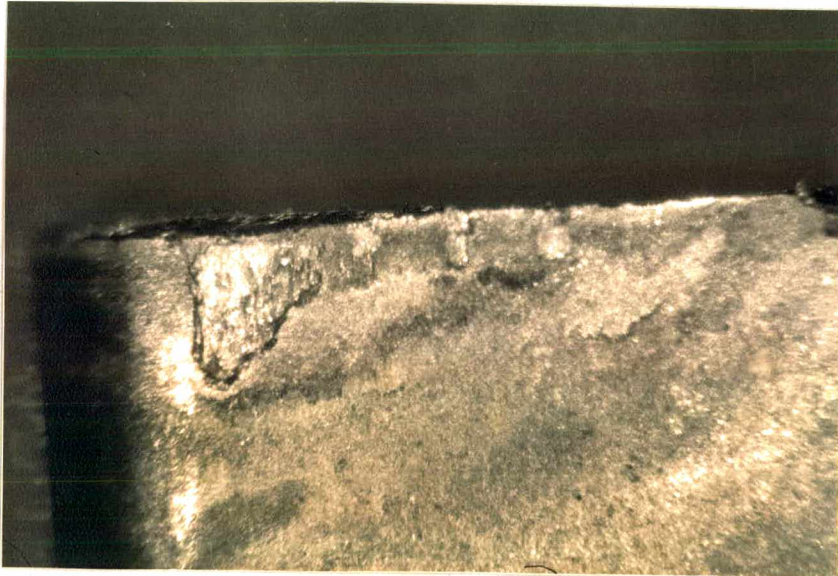


Fig. 6.14 - Na mesma ferramenta, vista da adesão no flanco.

gaste.

-influência da aresta postiça de corte. Durante as medições do desgaste com o microscópio observou-se que nos cortes a 100 e 150 m/min aparecia aresta postiça de corte tanto na superfície de saída como na superfície de incidência. A aresta postiça de corte deslocando a usinagem da superfície da ferramenta, modifica as condições de temperatura nesta mesma superfície, mas o que é mais danoso para o sensor é justamente que esta aresta não é estável durante o corte. Veja a figura 3.14 e 3.15.

Com a finalidade de melhor explicar os problemas surgidos na avaliação da temperatura de corte como sensores de desgastes foram realizados os ensaios complementares. Nestes ensaios se desejava investigar a variação da temperatura e força de corte com desgastes maiores do que aqueles usados nos ensaios de usinabilidade. A figura 6.1 mostra uma montagem dos ensaios.

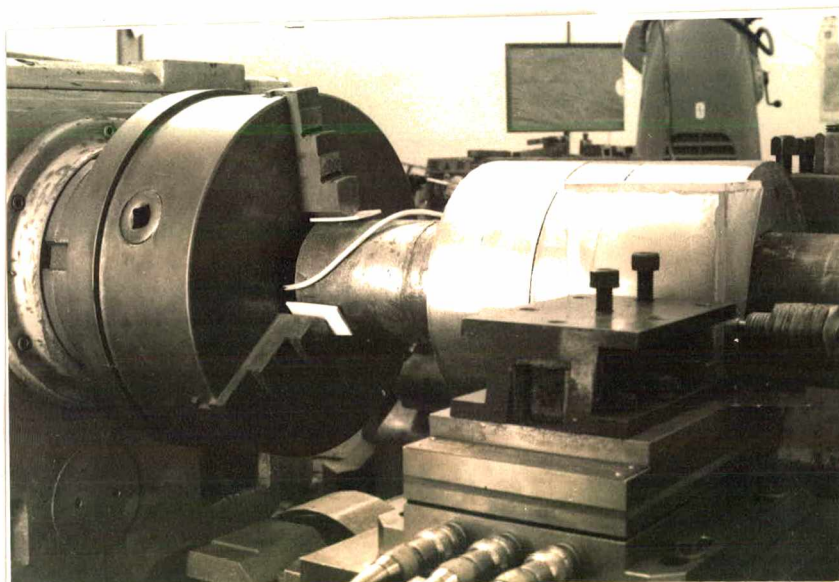


Fig. 6.1 Fotografia da montagem dos corpos de prova.

As condições de usinagem e os resultados estão resumidos na tabela 6.1.

TABELA 6.1

Temperatura e Força de Corte nos ensaios complementares com ferramentas desgastadas					
Anel	Desgaste I_L (mm)	Temperatura (mV)	Força (kgf)		
			Fz	Fx	Fy
01	Afiada	9,17	44	14	13
	0,32	8,90	50	21	21
	0,46	10,33	53	23	19
	0,74	10,70	53	32	22
	1,2	11,95	-	-	-
	1,8	13,22	196	138	102
02	Afiada	9,81	42	14	13
	0,32	9,40	47	20	19
	0,46	11,02	54	21	18
	0,74	11,69	51	28	22
	1,70	13,30	130	125	93
	03	Afiada	11,46	54	26
0,32		10,39	57	27	22
0,46		11,29	59	28	24
0,74		11,44	59	32	28
1,1		12,63	-	-	-
1,6		13,65	181	177	111
04	Afiada	9,40	45	19	16
	0,32	8,73	54	26	21
	0,46	9,81	57	28	25
	0,74	10,35	61	43	34
	1,5	12,90	142	135	96
	05	Afiada	9,94	48	26
0,32		9,27	53	28	20
0,46		10,99	59	35	26
0,74		11,73	69	60	41
1,0		12,13	-	-	-
1,4		12,92	139	110	87

Feita a regressão múltipla dos dados da tabela 6.1 o modelo que mais se ajustou foi o linear e exponencial este último omitindo-se o ponto $I_L=0$.

As figuras 6.21 a 6.25 mostra os pontos da tabela 6.1 plotados assim como a curva obtida pela regressão com modelo exponencial.

Modelo linear: $\theta = b_0 + b_1 I_L$

Anel 1	$\theta = 8,80 + 2,61 I_L$	$R^2 = 0,94$
Anel 2	$\theta = 9,54 + 2,41 I_L$	$R^2 = 0,81$
Anel 3	$\theta = 10,57 + 1,79 I_L$	$R^2 = 0,74$
Anel 4	$\theta = 8,62 + 2,72 I_L$	$R^2 = 0,86$
Anel 5	$\theta = 9,53 + 2,51 I_L$	$R^2 = 0,84$

Modelo exponencial: $\theta = b_0 I_L^{b_1}$ (nesta regressão não foi utilizada a observação com $I_L = 0$).

Anel 1	$\theta = 11,61 I_L^{0,21}$	$R^2 = 0,96$
Anel 2	$\theta = 12,22 I_L^{0,19}$	$R^2 = 0,93$
Anel 3	$\theta = 12,47 I_L^{0,16}$	$R^2 = 0,95$
Anel 4	$\theta = 11,54 I_L^{0,24}$	$R^2 = 0,97$
Anel 5	$\theta = 12,25 I_L^{0,21}$	$R^2 = 0,92$

O desgaste final de cada ferramenta é mostrado nas figuras 6.16 a 6.20

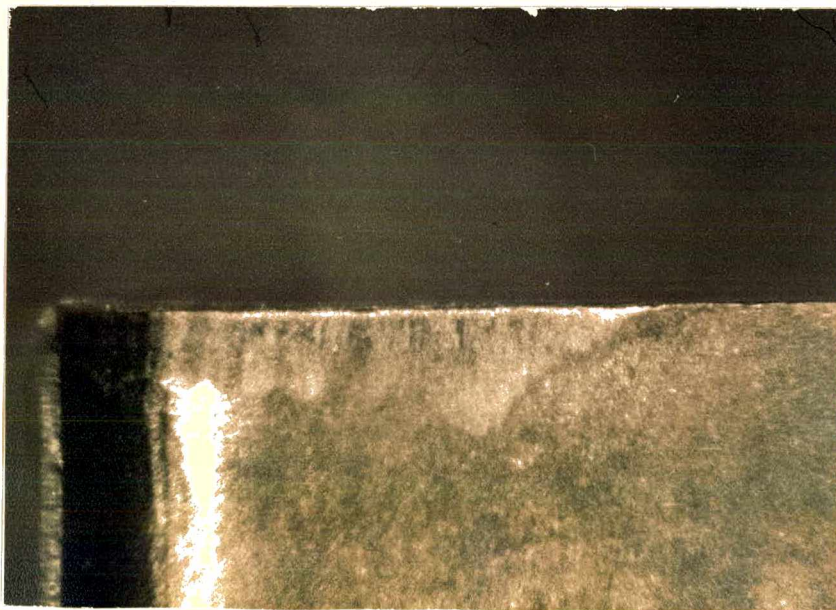


Fig. 6.16 - Ferramenta com desgaste $I_L = 0,32$ mm

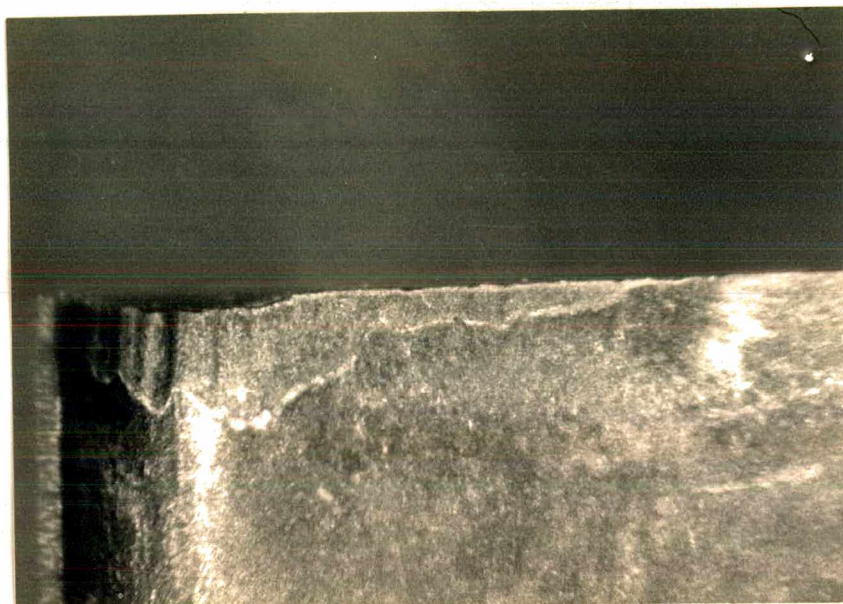


Fig. 6.17 - Ferramenta com desgaste $I_L = 0,46$ mm

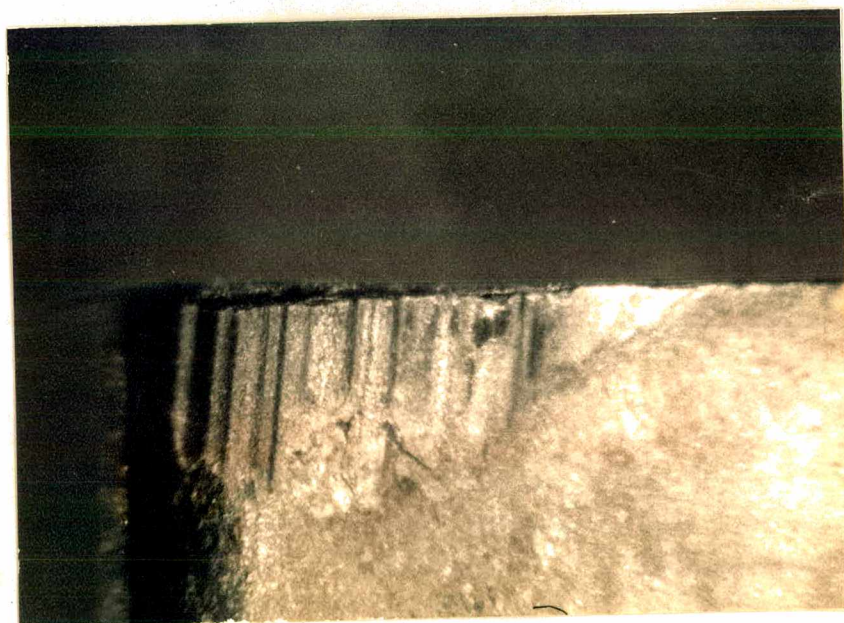


Fig. 6.18 - Ferramenta com desgaste $I_L = 0,74$ mm

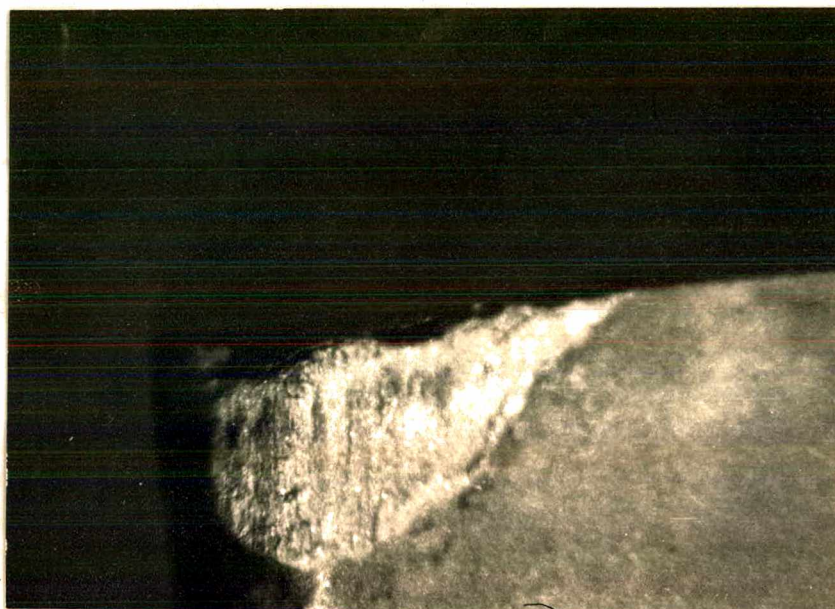


Fig. 6.19 - Ferramenta com desgaste $I_L = 1,0$ mm

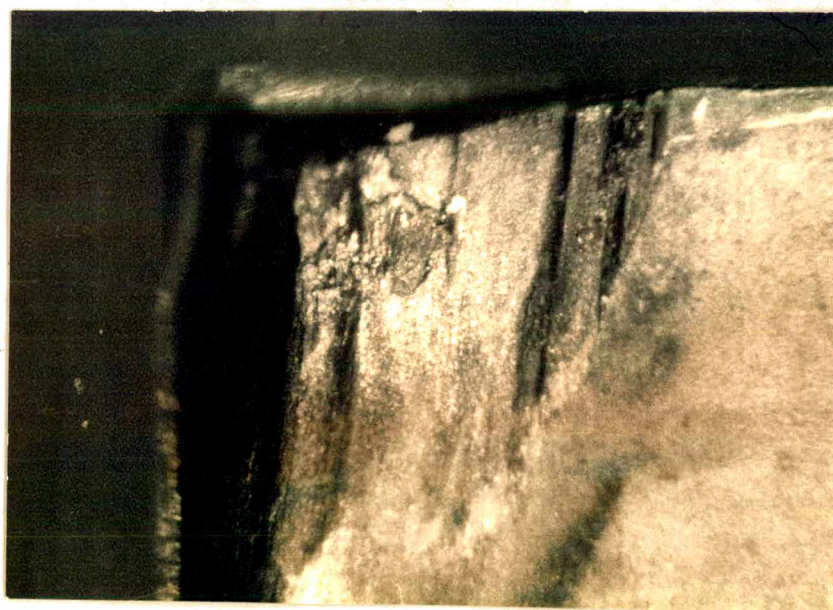


Fig. 6.20 - Ferramenta com desgaste $I_L = 1,8$ mm

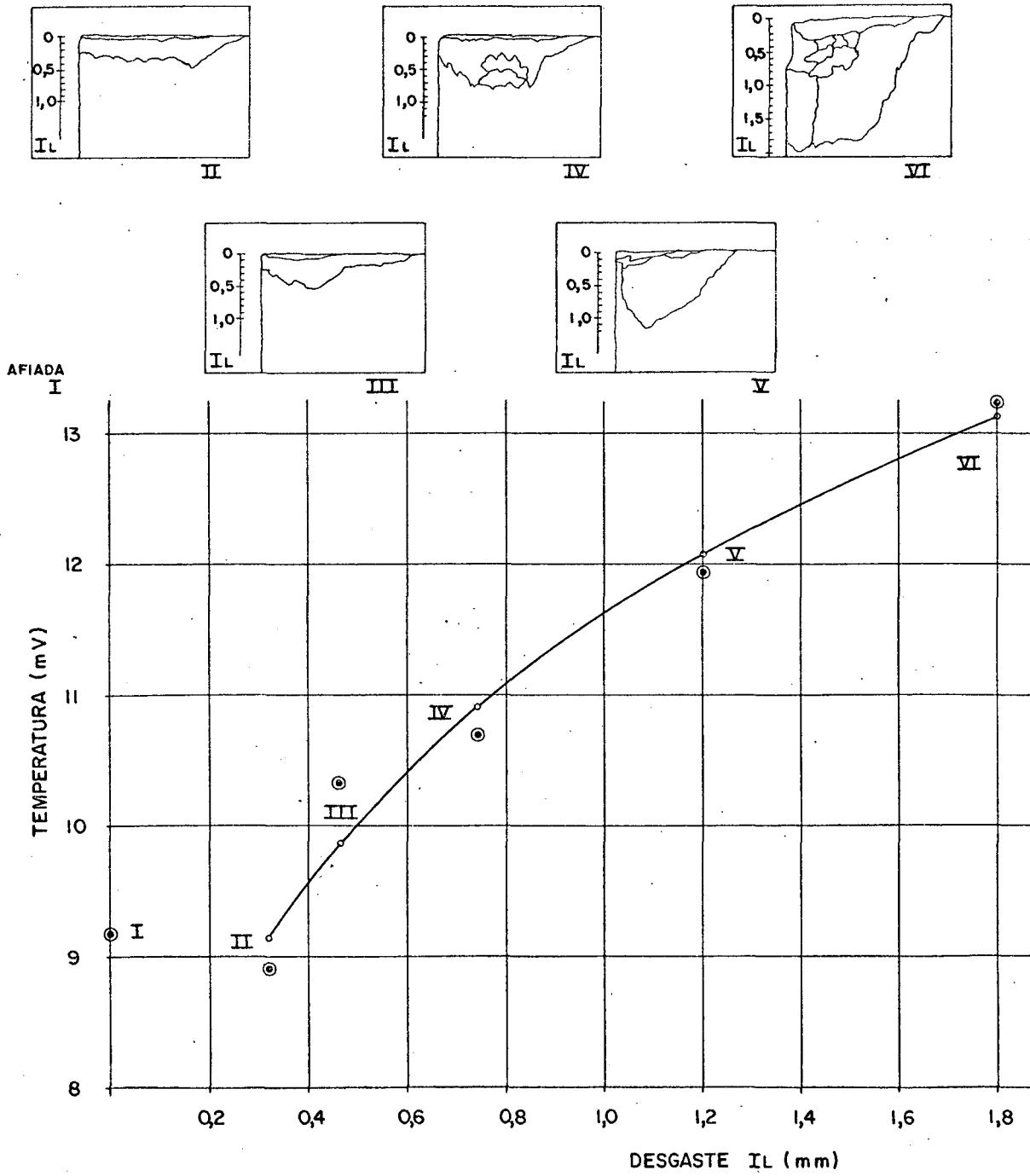


Fig. 6.21 Anel n°1

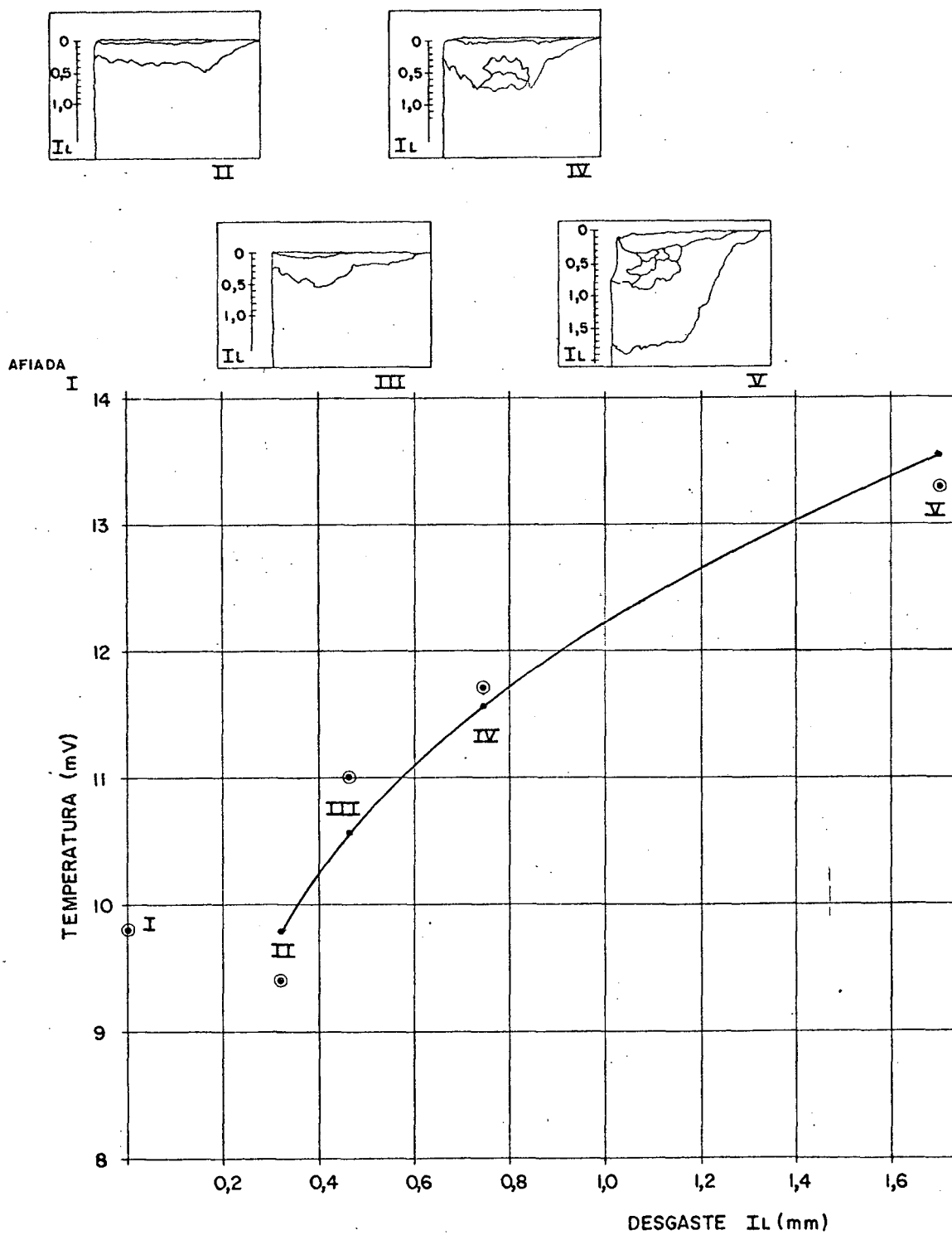


Fig. 6.22 Anel n°2

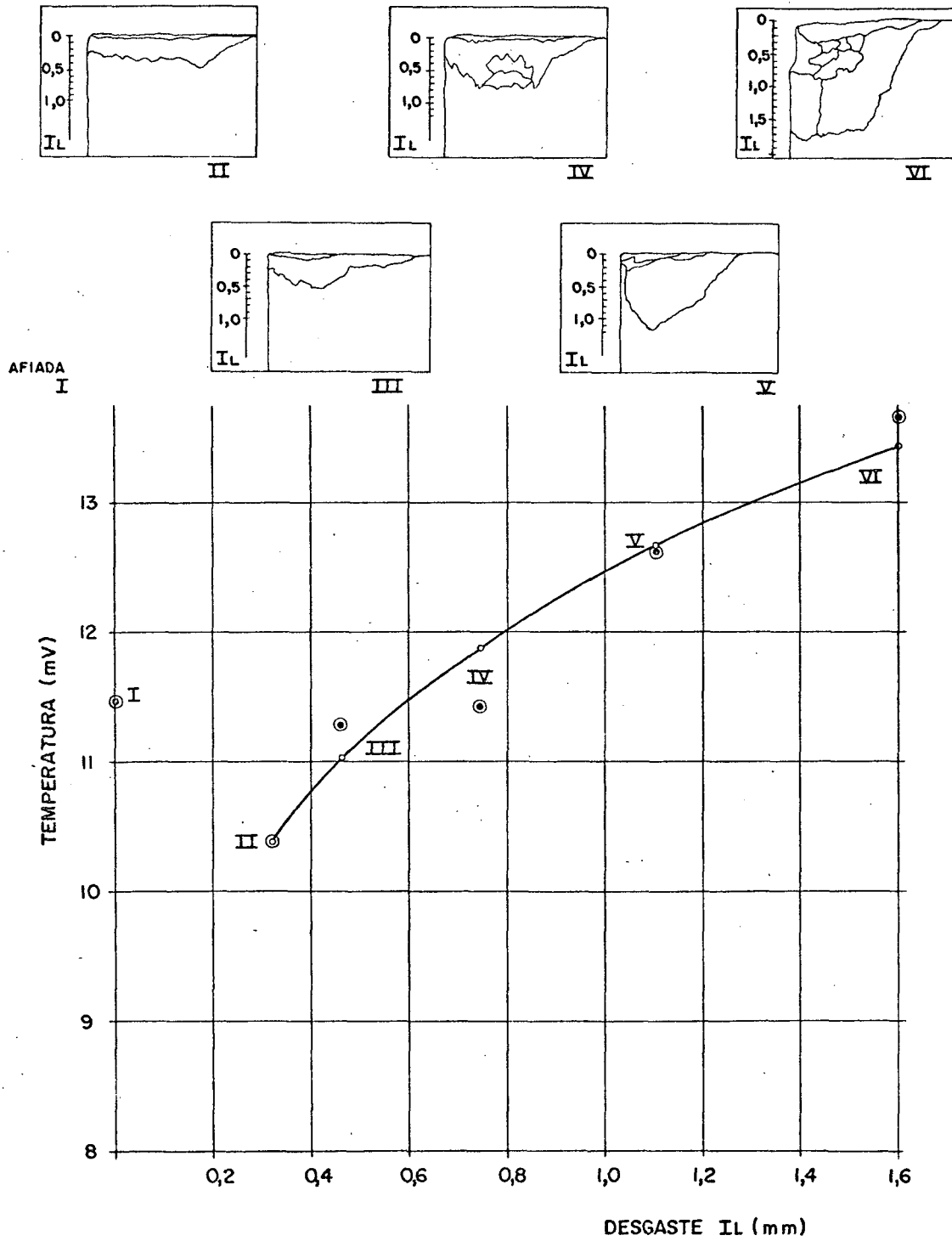


Fig. 6.23 Anel n°3

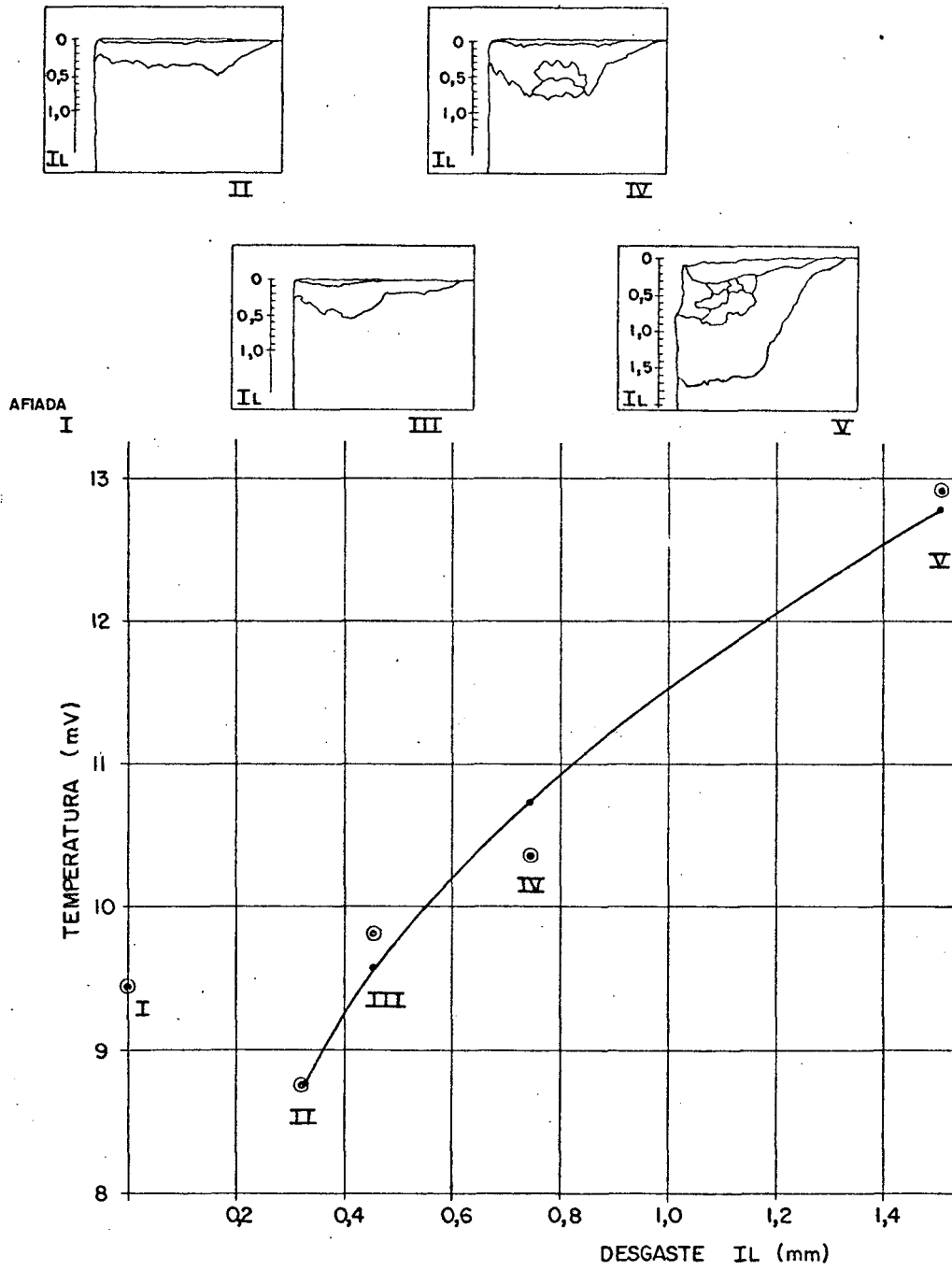


Fig. 6.24 Anel nº 4

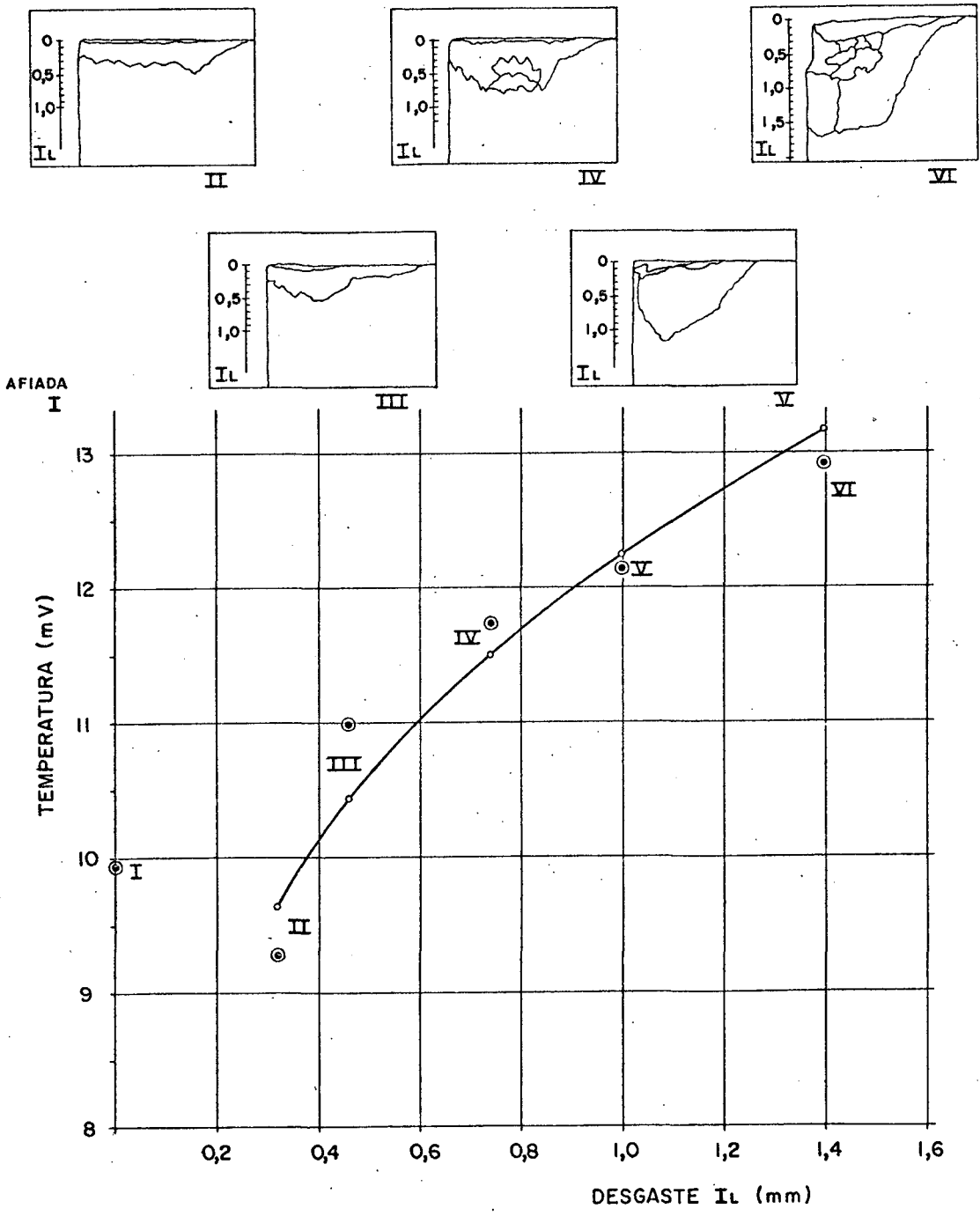


Fig. 6.25 Anel nº5

Nos ensaios complementares foi notada a baixa confiabilidade entre os pontos de desgaste $I_L = 0$, $I_L = 0,32$ e $I_L = 0,46$ confirmando os doze ensaios anteriores e as experiências de Zakaria (35). Para os desgastes maiores o acréscimo de temperatura era bastante grande, indicando boa sensibilidade.

A avaliação do sensor deve ser complementada com um estudo de sua confiabilidade e para isto deve ser analisada cada uma das variáveis importantes detetadas pelo sensor e qual o lugar da temperatura.

As variáveis que mais modificam as condições de temperatura numa mesma operação de usinagem são:

- a) micro-estrutura
- b) adesão nas faces da ferramenta
- c) velocidade
- d) avanço
- e) profundidade
- f) desgaste

A microestrutura é o parâmetro de material mais importante na usinabilidade, e como a temperatura é um elemento - muito sensível aos parâmetros que determinam a usinabilidade, como foi comentado no capítulo 2, ela também o é. A determinação quantitativa da micro-estrutura não é facilmente obtida mas tomando-se como exemplo os anéis 1, 2, 3, 4 e 5, com estruturas levemente diferentes, é notória a diferença de tensão termo-elétrica entre eles. O anel 3 para as mesmas condições de desgaste e de corte está a uma temperatura 15% maior que o anel 4 (tabela 6.1).

A velocidade e o avanço como mostra a matriz de correlação do ítem 5.2 tem grande influência na temperatura de corte, o mesmo não ocorre para a profundidade.

Com os dados da tabela 5.2 e 6.1 foi calculada a matriz de correlação entre a velocidade, o avanço, o desgaste e a

temperatura.

Matriz de correlação

	v	a	I_L	θ
v	1			
a	0,03	1		
I_L	0,14	-0,09	1	
θ	0,69	0,42	0,31	1

A matriz de correlação indica que a influência da velocidade e do avanço são maiores para a temperatura do que para o desgaste, no entanto uma análise mais completa do potencial do sensor temperatura deve incluir a dispersão da velocidade, do avanço, da micro-estrutura e da adesão nos flancos nas várias operações e materiais usinados.

6.2 A força de corte como sensor de desgaste

A força de corte é algumas vezes tomada como critério de fim de vida substituindo o desgaste como cita Armarrago (21), portanto é de se esperar que se constitua em um bom sensor de desgaste.

Nos ensaios foram medidas as componentes:

- a) força principal de corte
- b) força de avanço
- c) força de apoio

O resultado das medições feitas durante os ensaios de usinabilidade está resumido nas figuras 6.26 a 6.35.

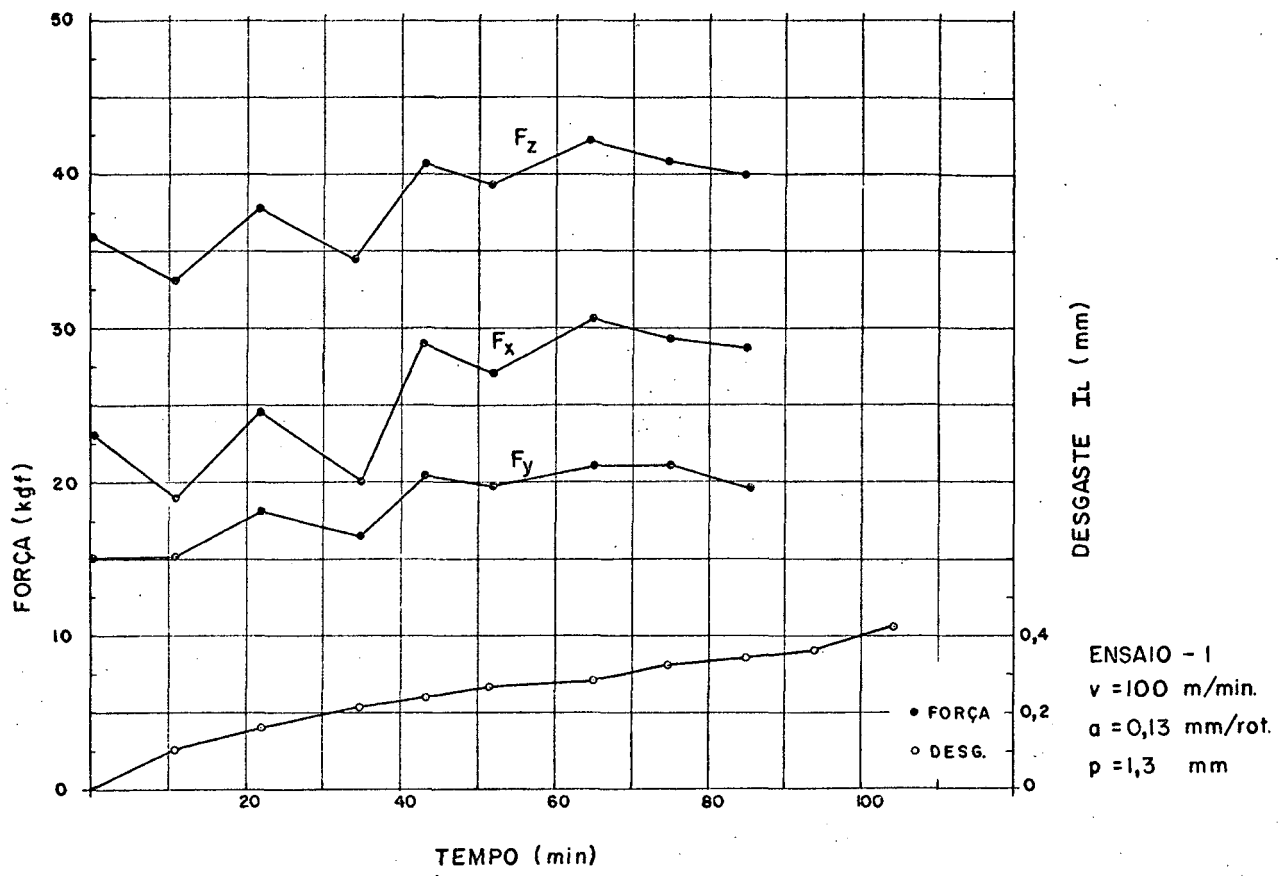


Fig. 6.26

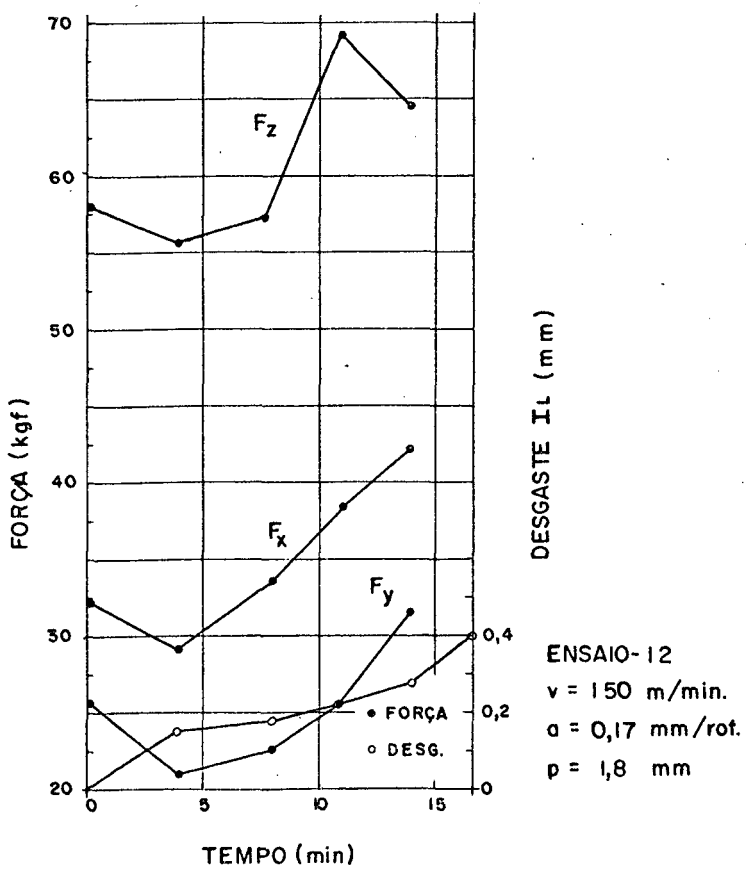


Fig. 6.27

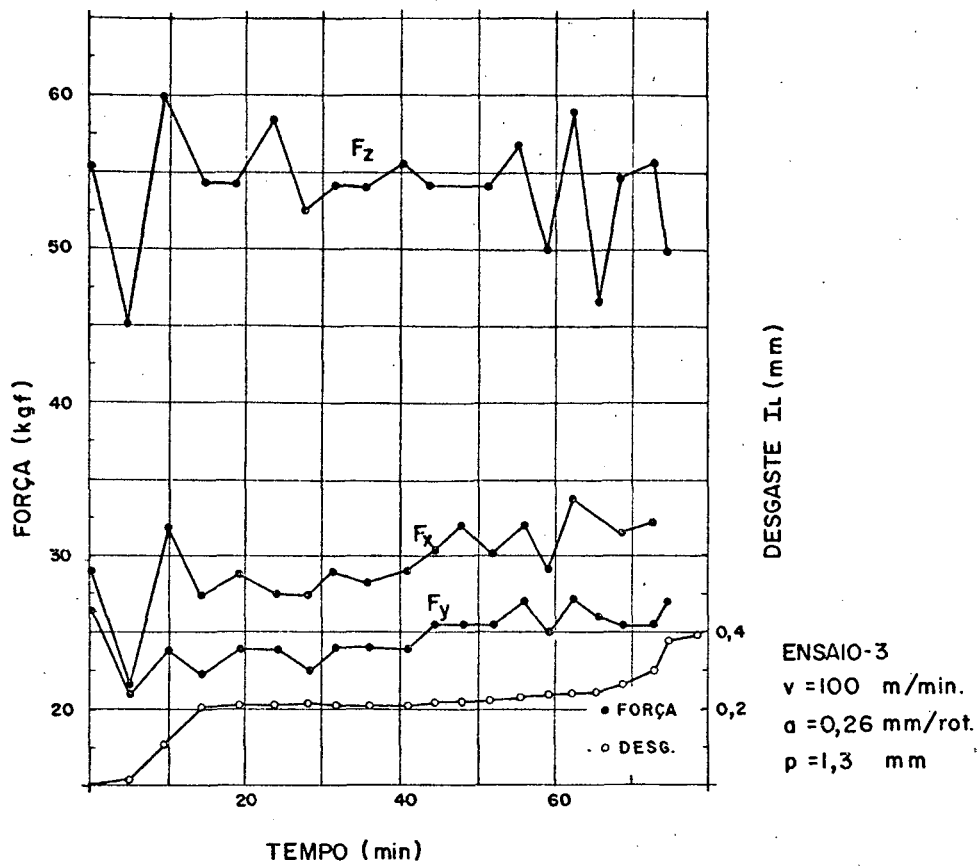


Fig. 6.28

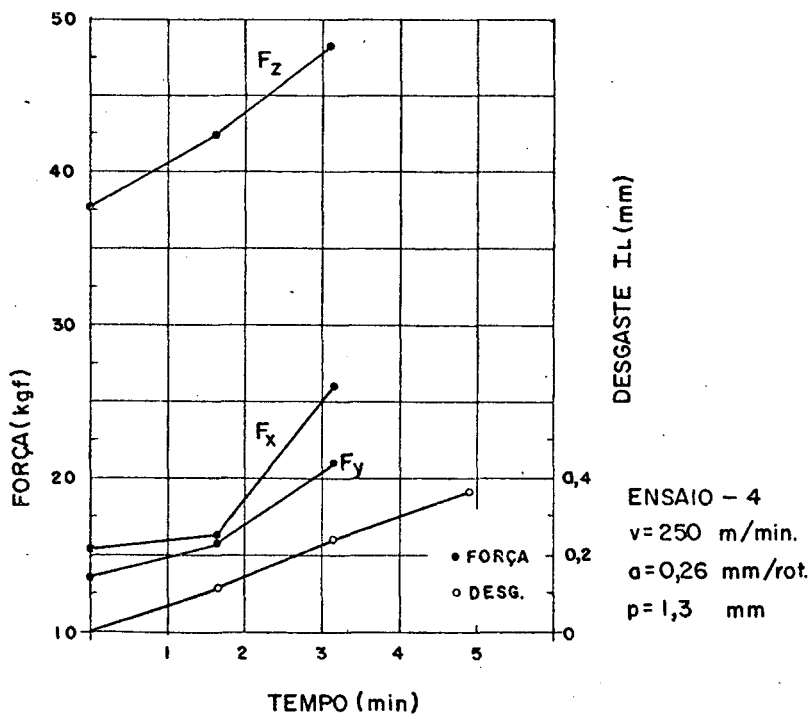


Fig. 6.29

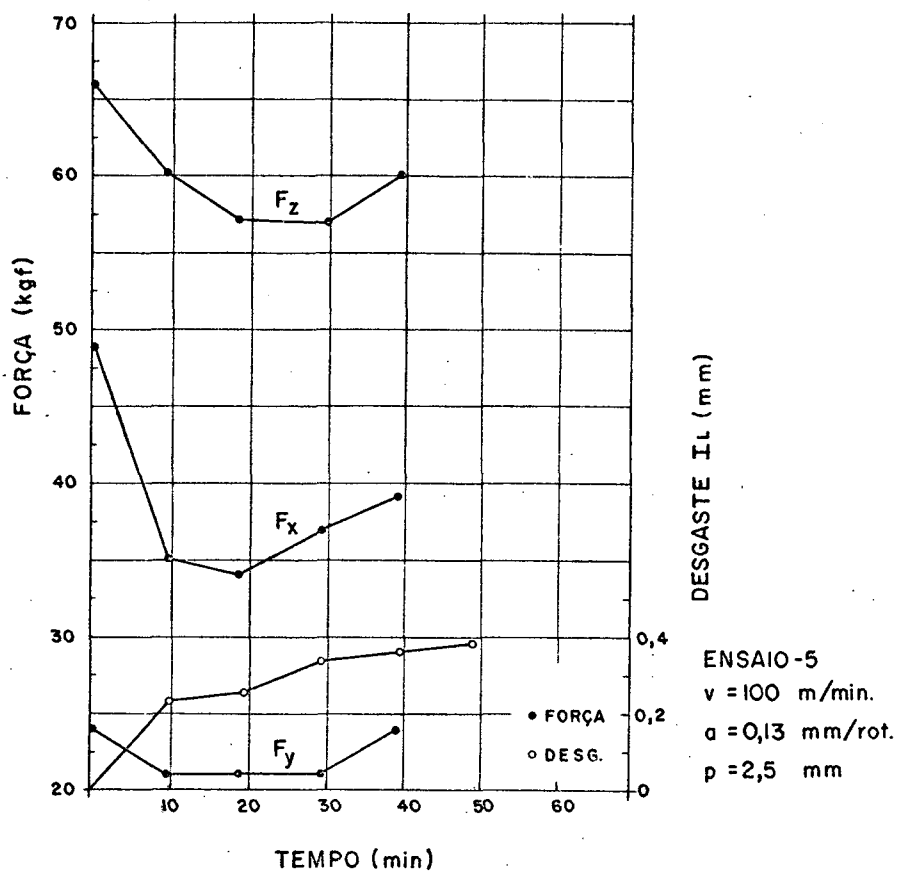


Fig. 6.30

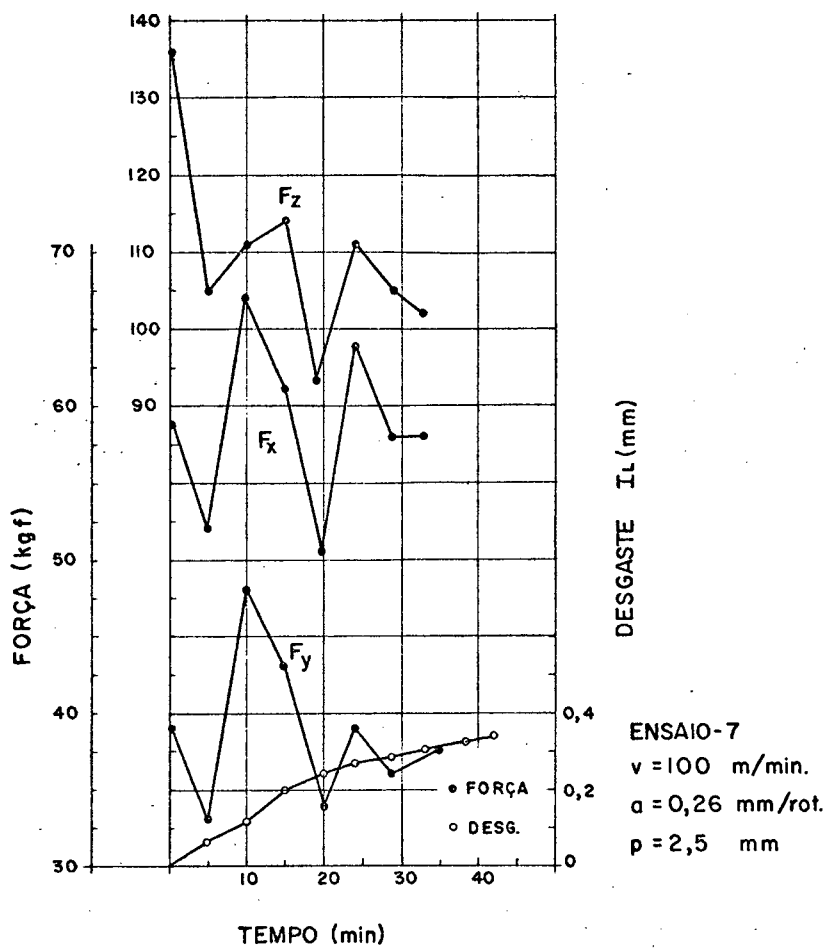


Fig. 6.31

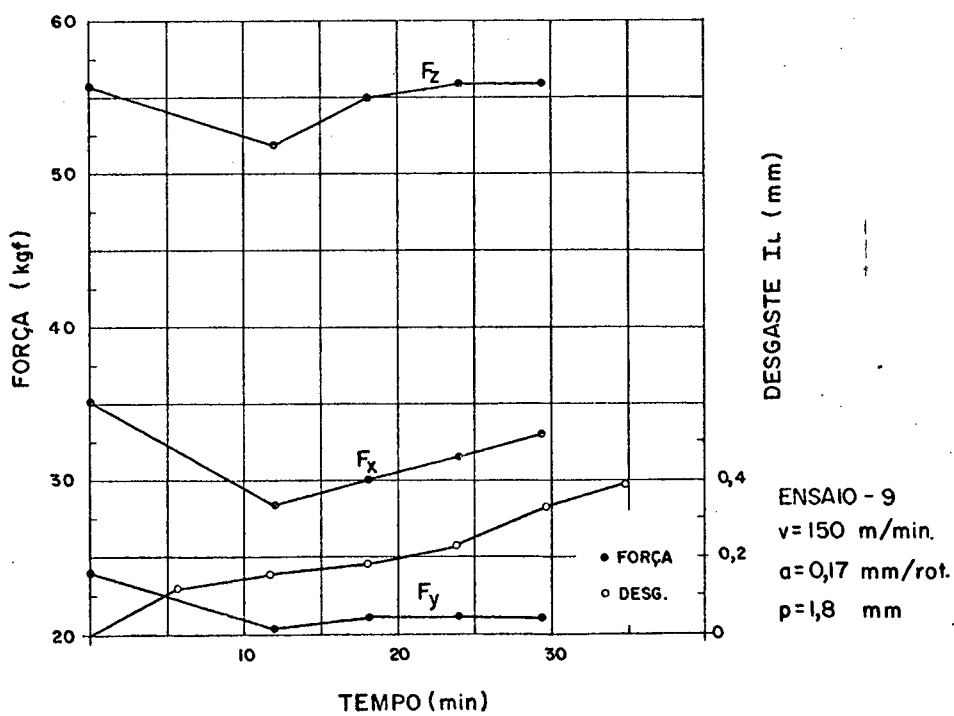


Fig. 6.32

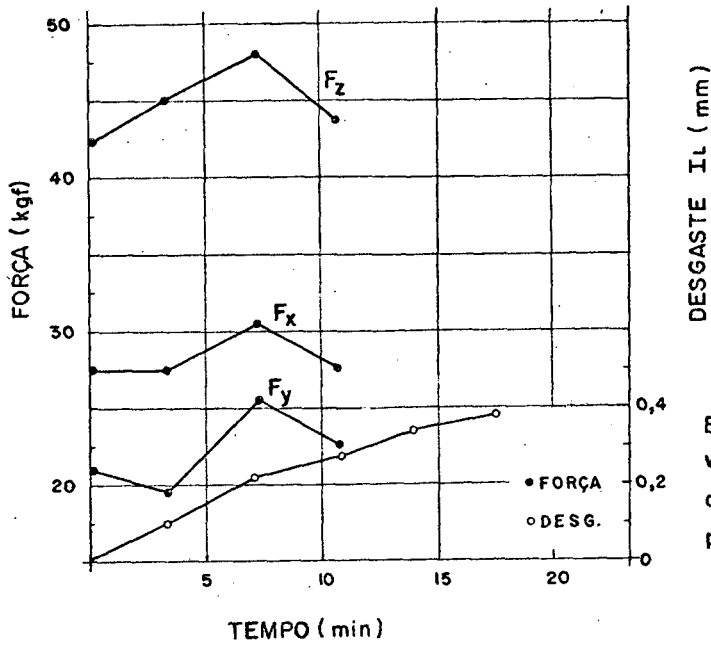


Fig. 6.33

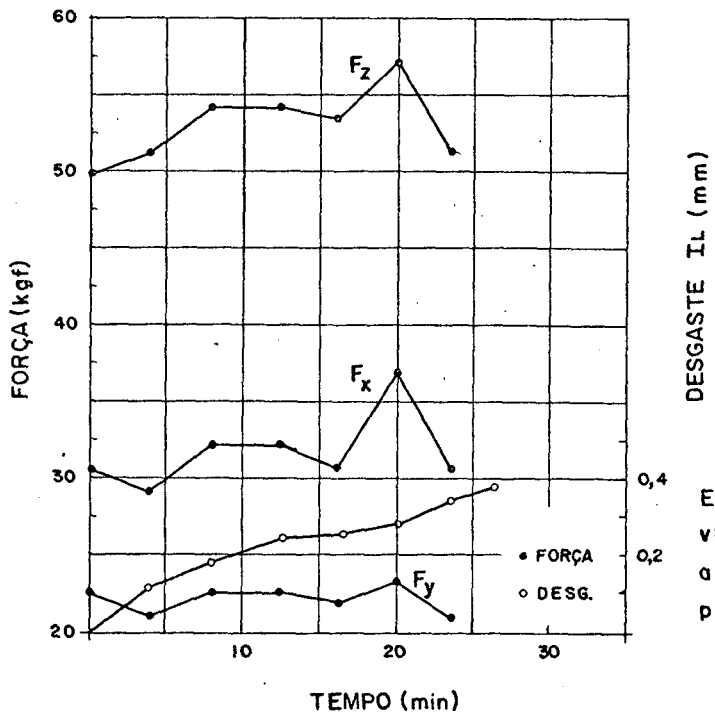


Fig. 6.34

Os resultados mostrados nas figuras anteriores se mostraram muito dispersos, principalmente nas velocidades de 100 m/min e 150 m/min. As explicações possíveis para tal dispersão se fundamentam:

- a) na presença de adesões nos flancos e aresta postiza
- b) na variação da estrutura cristalina do material
- c) nos problemas do dinamômetro

A adesão nos flancos é um dos fenômenos mais nocivos para o dinamômetro como sensor de desgaste, não só pelo fato de causar grande acréscimo na força de corte mas, sobretudo, por apresentar um caráter inconstante, o volume de material soldado ora cresce ora é arrancado, voltando a crescer. A incidência da adesão é governada pela maior ou menor presença de ferrita no ferro fundido. As experiências de Ham com nodulares mostrou que a maior incidência de adesão ocorria entre 100 e 150 m/min (50, 51). E neste trabalho foi confirmada a mesma faixa de velocidades para o ferro fundido cinzento.

A complementação com a usinagem dos anéis foi muito valiosa para a avaliação da variação de força com o desgaste, a tabela 6.1 mostra o resultado para as três componentes onde aparece muito boa sensibilidade no anel 5 (o primeiro usinado na pilha), mostrado na figura 6.35.

Observe principalmente as componentes F_x e F_y forças de avanço e de apoio respectivamente que se mostraram muito sensíveis ao desgaste.

Foi feita a análise de regressão dos pontos do anel 5 para F_z , F_x e F_y , tomando-se um modelo linear:

$$F = b_0 + b_1 I_L$$

$$F_z = 34,44 + 67,05 I_L$$

$$R^2 = 0,90$$

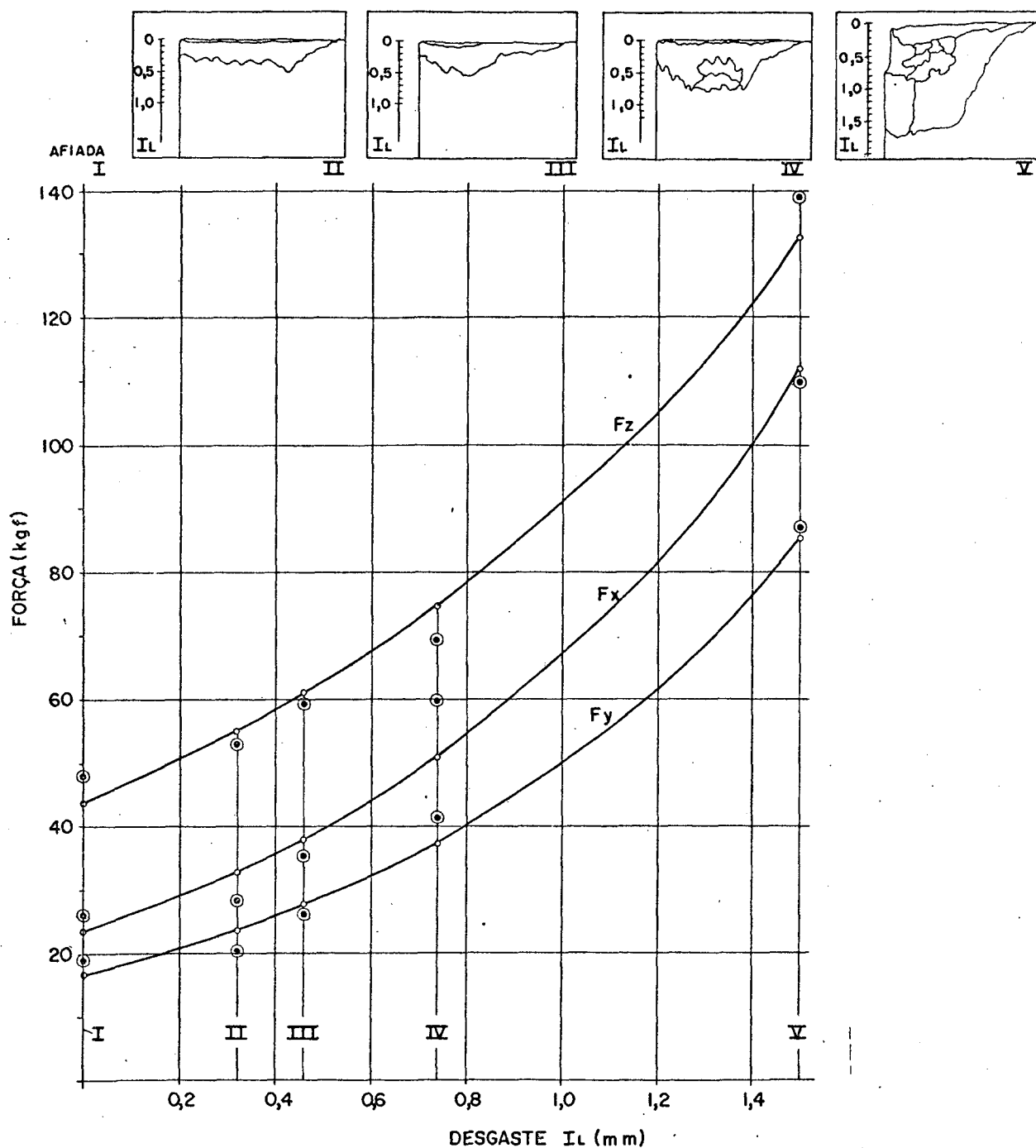


Fig. 6.35 Força versus Desgaste para o Anel nº 5

$$F_x = 14,03 + 64,68 I_L$$

$$R^2 = 0,94$$

$$F_y = 8,37 + 51,77 I_L$$

$$R^2 = 0,92$$

para um modelo logarítmico:

$$F = b_0 \times \exp(b_1 I_L)$$

$$F_z = 43,58 \exp(0,73 I_L)$$

$$R^2 = 0,97$$

$$F_x = 23,53 \exp(1,04 I_L)$$

$$R^2 = 0,95$$

$$F_y = 16,69 \exp(1,09 I_L)$$

$$R^2 = 0,96$$

A avaliação da força como sensor de desgaste foi ainda analisada se confrontando as variáveis: velocidade, avanço e desgaste em uma matriz de correlação construída a partir de dados das tabelas 5.3 e 6.1

Matriz de correlação

	v	a	I_L	Fz	Fx	Fy
v	1					
a	0,03	1				
I_L	-0,14	-0,09	1			
Fz	-0,18	0,37	0,71	1		
Fx	-0,23	0,18	0,83	0,96	1	
Fy	-0,19	0,25	0,83	0,95	0,98	1

A variável desgaste se mostrou mais significativa que o avanço e a velocidade de corte para todas as componentes da força de corte.

6.3 A força e temperatura de corte diante da quebra da aresta de uma ferramenta

Nos ensaios prévios, os corpos de prova eram de estrutura totalmente perlítica semelhante aos dos anéis 1, 2, 4 e 5. Como a sua estrutura era muito craterizante a aresta da ferramenta rompia mesmo antes que a ferramenta atingisse $I_L = 0,3$ mm.

A quebra da aresta ocorreu em vários ensaios e em todos eles os sensores, temperatura e força de corte apresentaram boa sensibilidade, indicando seu bom desempenho como elemento de segurança na usinagem.

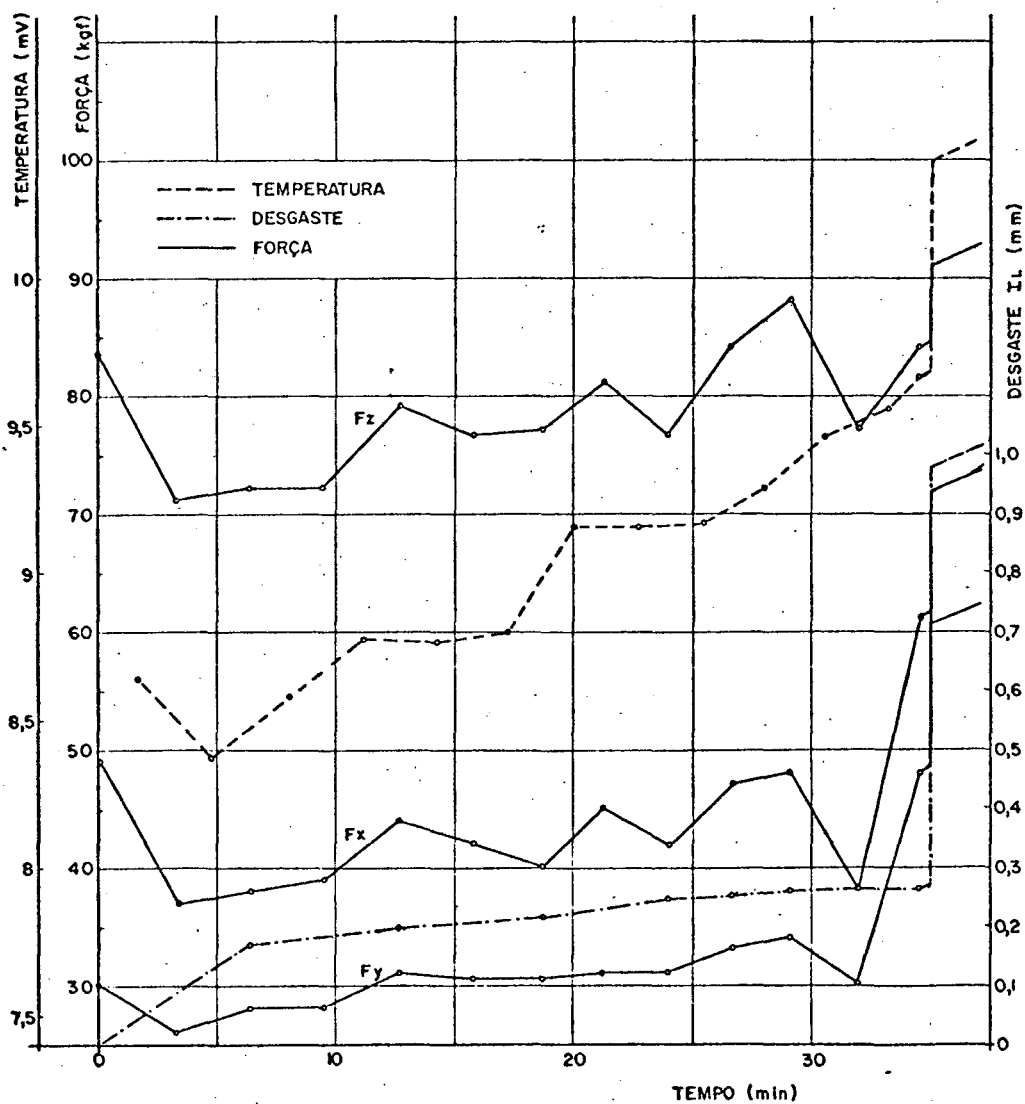


Fig. 6.36 Comportamento comparativo da Força e Temperatura quando da quebra da aresta da Ferramenta.

CAPITULO 7

Conclusões

Os ensaios de longa duração podem ser realizados com grande economia de material e de tempo, utilizando-se métodos mais racionais para o projeto do experimento.

Apesar da boa homogeneidade observada nos corpos de prova, foi notado que o modelo de doze ensaios proposto por Wu era insuficiente para se determinar com precisão os coeficientes das variáveis: avanço e profundidade de corte da equação de vida.

Analisando-se a usinabilidade sob o ponto de vista da temperatura observou-se que esta era muito sensível à velocidade e também tinha certa sensibilidade ao avanço mas que a variável profundidade tinha influência desprezível.

Analisando-se a usinabilidade sob o ponto de vista da força de corte se observou que esta era muito sensível ao avanço e à profundidade. A sensibilidade à velocidade apesar de ser razoável é no sentido inverso, isto se deve ao fato que a menores velocidades se tem maiores arestas postiças de corte e consequentemente maiores forças de corte.

Analisando-se a temperatura, medida por um termopar peça-ferramenta como sensor de desgaste observou-se que a temperatura não variava com uma tendência bem definida com o acréscimo de desgaste quando se tinha uma faixa de desgaste pequena como é o caso de ensaios de usinabilidade. No entanto quando a faixa de desgaste é superior a $I_L = 0,6$ mm a temperatura cresce quase linearmente. A análise conjunta da sensibilidade da temperatura ao desgaste à velocidade e ao avanço indicou que ela é menos sensível ao desgaste que à velocidade e ao avanço.

Analisando-se a força de corte como sensor de desgaste observou-se também que para pequenos desgastes havia pouca variação da força de corte com o acréscimo de desgaste e ainda com baixa confiabilidade. No entanto para desgastes acima de $I_L = 0,6$ mm a força crescia com o desgaste, exponencialmente. A análise

conjunta da sensibilidade da força de corte ao desgaste à velocidade e ao avanço mostrou que a força é bem mais sensível ao desgaste que à velocidade ou ao avanço.

Como trabalhos posteriores que dariam continuidade a esta linha de pesquisa é sugerido:

- O estudo da influência da aresta postiça no desempenho do termopar peça-ferramenta.

- A avaliação da vibração medida por acelerômetro como sensor de desgaste.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- (01) Ferraresi, Dino - Fundamentos da Usinagem dos Metais
Editora Edgard Blücher - 1970
- (02) Armarrago, E.J.A., e Brawn - The Machining of Metals
Printice Hall - 1969
- (03) Opitz, H. e König, W. - On the Wear of Cutting Tools
7º I.M.T.D.R. - 1966
- (04) Cook, N.H. - Tool Wear and Tool Life
Trans ASME - J. of Eng. for Ind. - novembro 1973
- (05) Pearson, Noel R. - N/C Machinability data Systems
SME - 1971
- (06) Barrow, G. - Tool Life Equation and Machining Economies
12º I.M.T.D.R. - 1971
- (07) Boothroyd, G. - Fundamentals of Metals Machining
Ed. Edward Arnold - Londres - 1965
- (08) Meyer, R.N. e Wu, S.M. - Optical Contourn Mapping of
Cutting Tool Crater Wear
I.J.M.T.D.R. - nº 6 - 1966
- (09) Takeyama, H. e Murata - Basic Investigation of Tool
Wear
Trans. ASME - J. of Eng. for Ind. - fev/1963
- (10) Uera, Kunio - Characteristics of Tool Wear Based of
the Volume of Flank Wear and Crater Wear - A Proposal
on the Mesurament of Tool Life
Annals of the C.I.R.P. - vol. 24 - 1975
- (11) Barrow, G. - A reviw of Experimental and Theoretical
Tecniqye for Assessing Cutting Temperature
Annals of the C.I.R.P. - vol. 22/2 - 1973
- (12) Boothroyd, G. e Earle J.M. e Chuhodm, A.M. - Effect of
Tool Flank Wear on the Temperature Generated During Me
tal Cutting

- 7º I.M.T.D.R. - 1966
- (13) Brachet, Yves; Charbonier, Michel - Caracteristique
Mechanique et the Usinabilit  des Fontes Grises
Fonderie 334 - maio de 1974
- (14) Card, R.L. ; Lamb, A.D. - Problems Ansing During the
Machining of Cust Iron
7º I.M.T.D.R. - 1966
- (15) Metals Handbook - ^{ASM} ASM
Machining of Cast Iron - pg. 642 - publicado pela
ASTM
- (16) Margerie, Jean Claude - Facteurs Metalurgiques de
l'Usinabilit  des Fontes Grises
Fonderie - nº 303 - julho de 1971
- (17) Weger, J.G. - A Repetitive Test for Assessing Tool-Li
fe Distributions.
Annals of the C.I.R.P. - 14.01.1975
- (18) Mc Caulay, J.L. - Assessing Relative Machinability of
Cast Irons
Foundry Trade Journal - agosto de 1971
- (19) Cook, N.H. ; Lang, A.B. - Criticism of Radioative Tool
Life Testing
Trans. ASME J.E.I. - novembro de 1963 - pg.(381-
387).
- (20) Box, G.E.P. - The Explotation and Exploitation of Res
ponses Surfaces
→ Biometrics - vol. 10, pg. 16 - 1954
- (21) Wu, S.M. - Tool Life Testing by Response Surface Metho
dology
Trans. ASME J.E.I. - maio de 1964
- (22) Vilenchich, R.; Strobele, K.; Venter, K. - Tool-Life
Testing by Reponse Surface Methodology Compled with a
Randon Strategy Approach
11º I.M.T.D.R. - 1970
- (23) Han, Inyong; Hermer, Donald S. - Cutting Performance

- Comparison of Titanium and Tungstem Carbide Tools in
Machining of Gray Iron
I.M.T.D.R. - 19
- (24) Wu, S.M.; Meyer, R.N. - Cutting-Tool Temperature-Predicting
Equation by Response Surface Methodology
Trans. ASME J.E.I. - maio de 1964
- (25) Colwell, L.V. - Cutting Temperature Versus Tool Wear
Annals of the C.I.R.P. - vol. 24 - 1975
- (26) Giusti, F. - Regulation "en Process", des Parametres de
Coupe, en Function de la Temperature de Coupe
Annals of the C.I.R.P. - Vol. 18, pg. 601, 607-1970
- (27) Jaeschke, J.R.; Zimmerly, R.D.; Wu, S.M. - Automatic
Cutting - Tool Temperature Control
I.J.M.T.D.R. - vol. 7, pg. 465 a 475 - 1967
- (28) Alvelid, B. - Cutting Temperature Thermo-Eletrical Measur
ament
Annals of the C.I.R.P. - vol. 8 - 1970
- (29) Chandiramani, K.G. - Temperature Distribution on the
Face of the Cutting-Tool
Int. J. Prod. Research - vol. 3. n° 3 - 1964
- (30) Braidem, P.M. - The Calibration of Tool-Wark Thermocompl
es
8° I.M.T.D.R. - 1967
- (31) Pesante, N. - Cutting Temperature - Semenair Sur la
Coupe des Métaux
Paris - 1966
- (32) Hitomi, K.; Thuering, G.L. - Machinability of Nodular
Cast Iron
Trans. ASME - J. Eng. for Ind. - pg. 141 - maio
de 1964
- (33) Shillam, N.F. - The on Line Control of Cutting Conditi
tions Using Direct Feedback
12° I.M.T.D.R. - 1971
- (34) Solajh, Vladimir; Vukelja, D. - Identification of Tool

- Wear Rate by Temperature Variation of Carbide Tip
Annals of the C.I.R.P. - vol. 22/I, pg. 5-6 - 1973
- (35) Zakaria, A.A.; Gomayel, J.I. El - On the Reliability of
the Cutting Temperature for Monitoring Tool Wear
I.J.M.T.D.R. - vol. 15, pg. 195-208 - 1975
- (36) Ippolito, R.; Micheletti, G.F.; Velenchich, R. - Expe
rimental Analysis of the Correlation Between Cutting
Forces Variation with Time and Cutting Data
14° I.M.T.D.R. - 1973
- (37) Takeyama, H.; Doi, Y.; Mitsuoka, T.; Sequiguchi, H. -
Sensors of Tool Life for Optimization of Machining
8° I.J.M.T.D.R. - 1967
- (38) Industria ROMI S/A - Santa Barbara S. Paulo
Torno Imor P400 - Manual de Instrução
- (39) John Fluke Co. Inc.
Test and Mesurement Instrument - Catalog 1973
- (40) Sandvik-Coromant - Metal Duro, Pastilhas e Ferramentas
Catálogo Geral
- (41) Kistler Instrumente AG - Operate Instructions three --
Component Measuring Platform
N° B6.9257e - Ed 5.71
- (42) Kistler Instrumente AG - Operate Instructions Charge
Amplifier
N° B11.5001e - Ed. 8.72
- (43) S.E. Laboratories Engineering Ltd - Inglaterra
Oscilagraph - S.E. 3006 - Operate Instructions
- (44) Piske, Adolar; Montenegro, Luiz Chaves
Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade -
Fundação Educacional Tupy - 1975
- (45) Lipson, Charles and Narencha J. Sheet - Statistical
Analysis of Engineering Experiment
Mc Graw Hill - N. York

- (46) Mood, Alexander M. - Introduction to the Theory of Statistics
Mc Graw Hill - Toquio
- (47) Leme, Rui Aguiar da Silva - Curso de Estatística - Elementos.
Ao Livro Técnico - Rio de Janeiro - 1963
- (48) Filho, F. e Ysmar, V. - Tradutor de Análise Estatística.
COPPE - UFSC - Publicação 48 - 1968.
- (49) Pilafiois, E.J. - Observations on Taylor "n" Values Used in Metal Cutting.
Annals of the C.I.R.P. - vol. XVIV, pg. 571-577
- (50) Cunha, Lamartine Bezerra - Influência da Variação da Microestrutura dos Aços nos Parâmetros de Corte.
Tese de Mestrado - UFSC - 1976
- (51) Leeds and Northrup Company - Conversion Tables for Thermocomplex
Catálogo 077989 - publicação 4
- (52) Han, I.; Hitomi, K.; Thuring, G.L. - Machinability of Nodular Cast Irons
Part I Tool Forces and Flank Adhesion
Trans ASME J. Eng. for Ind. - pg. 142-154 - 1961
- (53) Hitomi, K.; Thuring, G.L. - Machinability of Nodular Cast Irons
Part II Effect of Cutting Conditions on Flank Adhesions
Trans. ASME J. Eng. Ind. - pg. 282-288 - 1962

APÊNDICE I

APÊNDICE I

Testes de recepção do termopar padrão

Para a aferição do termopar peça-ferramenta, foi escolhido um termopar cromel-alumel revestido. Para verificarseu estado de funcionamento foi realizado um teste que constam⁶¹ da verificação das medições no ponto de g^oelo fundente e da ebulição da água.

A água utilizada era destilada, as medições foram obtidas com um potenciômetro Leed (especial para medições com termopares) e a pressão atmosférica era medida por um barômetro de mercúrio.

Resultados:

Pressão atmosférica: 760,5 mm de Hg

Estado físico	Tensão (mV)
gelo fundente	0,00
pré-ebulição	3,980
	4,090
	4,045
	4,090
	4,105
ebulição	4,103
	4,103
	4,103

Segundo a tabela do catálogo da,

Leeds and Nostrup Company

Conversion Tables for Thermocumples

Catálogo 077989, publicação 4

a tensão 4,103 mV equivale a temperatura $\theta = 100,07^{\circ}\text{C}$.

A temperatura de ebulição da água é função da preci

são atmosférica e definida pela equação:

$$\theta_p = 100 + 28,012 \left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 11,64 \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3$$

do Precision Measurement and Calibration Handbook do National - Bureau of Standard V.II.

Onde,

$$p_0 = 760 \text{ mm Hg}$$

$$p = 760,5 \text{ mm Hg}$$

$$t_p = 100,0187$$

$$e = \frac{\theta_p - \theta}{\theta_p} = 5,13 \times 10^{-4}$$

Este erro mostrou que o termopar está em perfeito estado.

APÉNDICE II

APÊNDICE II

Programa utilizado na análise estatística dos resultados.

Para a análise estatística dos resultados utilizamos um programa desenvolvido por Fernando Filho e V. Ismar nas suas Teses de Mestrado apresentadas em 1968

A estrutura do programa, Tradutor de Linguagem Estatística permite a aquisição e tratamento dos dados de entrada, estuda a correlação entre as variáveis, faz a regressão e testa o modelo por vários métodos.

No presente trabalho o "TRALE" foi usado para:

- a) a determinação dos coeficientes da equação de Taylor;
- b) a determinação da equação de cada componente de Força função condições de corte;
- c) a determinação da equação da temperatura função condições de corte;
- d) a correlação entre velocidade, avanço, desgaste, temperatura e as três componentes da força de corte.

Os dados de entrada e resultados estão listados nas folhas seguintes obedecendo a seguinte ordem:

- a) coeficientes da equação de Taylor (v, a, p, T)
 - matriz de dados
 - matriz de dados logaritmados
 - matriz de correlação
 - regressão
- b) equação das condições de corte versus Fz (v, a, p, Fz)
 - matriz de dados
 - matriz de correlação

regressão

- c) equação das condições de corte versus F_x (v , a , p , F_x)

matriz de dados

matriz de correlação

regressão

- d) equação das condições de corte versus F_y (v , a , p , F_y)

matriz de dados

matriz de correlação

regressão

- e) equação das condições de corte versus temperatura (v , a , p , θ)

matriz de dados

matriz de dados logaritmados

matriz de correlação

regressão

- f) Correlação entre v , a , I_L , θ , F_z , F_x , F_y

matriz de dados

matriz de correlação

MÀTRIX DADOS		12 OBSERVACIONS		4 VARIABLS		EIS	
VARIABLE		1	2	3	4		
OBS.	1	0.100000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.983000E 02		
OBS.	2	0.250000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.260000E 01		
OBS.	3	0.100000E 03	0.260000E 00	0.130000E 01	0.810000E 02		
OBS.	4	0.250000E 03	0.260000E 00	0.130000E 01	0.490000E 01		
OBS.	5	0.100000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.493000E 02		
OBS.	6	0.250000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.500000E 01		
OBS.	7	0.100000E 03	0.260000E 00	0.250000E 01	0.380000E 02		
OBS.	8	0.250000E 03	0.260000E 00	0.250000E 01	0.290000E 01		
OBS.	9	0.150000E 03	0.180000E 00	0.180000E 01	0.164000E 02		
OBS.	10	0.150000E 03	0.180000E 00	0.180000E 01	0.260000E 02		
OBS.	11	0.150000E 03	0.180000E 00	0.180000E 01	0.195000E 02		
OBS.	12	0.150000E 03	0.180000E 00	0.180000E 01	0.340000E 02		

NO. DE VAR.	4	NO. DE OBS.	12			
VARIAVEL	MEDIA	DESV. PADRAO	COEF. DE VAR.			
1	0.5045751E 01	0.3748972E 00	0.0742995			
2	-0.1700697E 01	0.2831516E 00	-0.1634915			
3	0.5888134E 00	0.2669653E 00	0.4533954			
4	0.2857417E 01	0.1213464E 01	0.4246718			

MATRIZ DE CORRELACAO

	1	2	3	4
1	1.0000			
2	0.0023	1.0000		
3	0.0001	0.0000	1.0000	
4	-0.9590	-0.0364	-0.1112	1.0000

REGRESSAO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES- 1, 2, 3,
 VAR. DEPENDENTE- 4

RQUADRADO= 0.9333571E 00 ERRO PADRAO EST.= 0.3836635E 00 VALOR DE F= 0.3734743E 02

COEFICIENTES DA REGRESSAO	ERRO PADRAO	VALORDE T
B(4, 4)= 0.1856779E 02	0.2954261E 00	-0.1050700E 02
B(4, 1)= -0.3104042E 01	0.3911488E 00	-0.3745311E 00
B(4, 2)= -0.1464974E 00	0.4148634E 00	-0.1217097E 01
B(4, 3)= -0.5049294E 00		

OBS.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIO
1	0.4588023E 01	0.4439570E 01	0.1484527E 00
2	0.9555113E 00	0.1595371E 01	-0.6398601E 00
3	0.4394449E 01	0.4338027E 01	0.5642224E-01
4	0.1589235E 01	0.1493828E 01	0.9540702E-01
5	0.3897923E 01	0.4109383E 01	-0.2114596E 00
6	0.1609437E 01	0.1265182E 01	0.3442552E 00
7	0.3637585E 01	0.4007840E 01	-0.3702541E 00
8	0.1064710E 01	0.1163639E 01	-0.9892870E-01
9	0.2797280E 01	0.2969002E 01	-0.1717214E 00
10	0.3258096E 01	0.2969002E 01	0.2890940E 00
11	0.2970414E 01	0.2969002E 01	0.1411915E-02
12	0.3526360E 01	0.2969002E 01	0.5573579E 00

ESTE DE VON NEUMAN
 ALOR DE Q- 0.2296595E 01

MATRIZ DADOS		9OBSERVACOES		4VARIAB		EIS	
VARIABLE		1	2	3	4		
OBS.	1	0.1000000E 03	0.1300000E 00	0.1300000E 01	0.3600000E 02		
OBS.	2	0.25000000E 03	0.1300000E 00	0.1300000E 01	0.3000000E 02		
OBS.	3	0.10000000E 03	0.2600000E 00	0.1300000E 01	0.5600000E 02		
OBS.	4	0.25000000E 03	0.2000000E 00	0.1300000E 01	0.3800000E 02		
OBS.	5	0.10000000E 03	0.1300000E 00	0.2600000E 01	0.6600001E 02		
OBS.	6	0.25000000E 03	0.1300000E 00	0.2600000E 01	0.5000000E 02		
OBS.	7	0.10000000E 03	0.2600000E 00	0.2600000E 01	0.1140000E 03		
OBS.	8	0.15000000E 03	0.1800000E 00	0.1800000E 01	0.5100000E 02		
OBS.	9	0.25000000E 03	0.2600000E 00	0.2600000E 01	0.7600001E 02		

NO. DE VAR.	4	NO. DE OBS.	9		COEF. DE VAR.
ARIÁVEL	MEDIA	DESV. PADRAO			
1	0.1722222E 03	0.7114579E 02			0.4131046
2	0.1933333E 00	0.6146360E-01			0.3179152
3	0.1933333E 01	0.6146360E 00			0.3179153
4	0.5744444E 02	0.2428126E 02			0.4226912

MATRIZ DE CORRELACAO

	1	2	3	4
1	1.0000			
2	0.0084	1.0000		
3	0.0084	0.0058	1.0000	
4	-0.3659	0.5008	0.7137	1.0000

REGRESSAO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES= 1, 2, 3,
 VAR. DEPENDENTE= 4

RQUADRADO= 0.8975322E 00 ERRO PADRAO EST.= 0.1042801E 02 VALOR DE F= 0.1459856E 02

COEFICIENTES DA REGRESSAO	ERRO PADPAO	VALORDE T
b(4, 4)= -0.1314796E 02	0.4856098E-01	-0.2627589E 01
B(4, 1)= -0.1283866E 00	0.5655686E 02	0.3491046E 01
B(4, 2)= 0.1974426E 03	0.5655688E 01	0.4987158E 01
B(4, 3)= 0.2820581E 02		

ORR.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIO
1	0.3600000E 02	0.3634847E -2	-0.3484650E 00
2	0.3000000E 02	0.1709048E -2	0.1290952E 02
3	0.5600000E 02	0.6201599E 02	-0.6015992E 01
4	0.3800000E 02	0.4275802E -2	-0.4758019E 01
5	0.6600001E 02	0.7301602E -2	-0.7016007E 01
6	0.5000000E -2	0.5375803E -2	-0.3758026E 01
7	0.1140000E 03	0.9868356E -2	0.1531645E 02
8	0.5100000E 02	0.5390416E -2	-0.2904160E 01
9	0.7600001E 02	0.7942558E -2	-0.3425568E 01

ESTE DE VON NEUMANN
 ALOR DE G= 0.2294100E 01

MATRIZ DADOS	9OBSERVACOES	4VARIAV	EIS	3	4
VARIABEL	1	2			
OBS. 1	0.1000000E 03	0.1300000E 00	0.3300000E 01	0.2300000E 02	
OBS. 2	0.2500000E 03	0.1300000E 00	0.3300000E 01	0.1700000E 02	
OBS. 3	0.1000000E 03	0.2600000E 00	0.1300000E 01	0.2900000E 02	
OBS. 4	0.2500000E 03	0.2600000E 00	0.1300000E 01	0.1700000E 02	
OBS. 5	0.1000000E 03	0.1300000E 00	0.4600000E 01	0.4900000E 02	
OBS. 6	0.2500000E 03	0.1300000E 00	0.4600000E 01	0.3000000E 02	
OBS. 7	0.1000000E 03	0.2600000E 00	0.2600000E 01	0.6800001E 02	
OBS. 8	0.1500000E 03	0.1800000E 00	0.1800000E 01	0.3100000E 02	
OBS. 9	0.2500000E 03	0.2600000E 00	0.4600000E 01	0.4100000E 02	

NO. DE VAR.	4	NO. DE OBS.	9				
ARIAVEL	MEDIA	DESV. PADRAO	COEF. DE VAR.				
1	0.1722222E 03	0.7114579E 02	0.4131046				
2	0.1933333E 00	0.6146360E -01	0.3179152				
3	0.1933333E 01	0.6146360E 00	0.3179153				
4	0.3388889E 02	0.1555952E 02	0.4571334				

MATRIZ DE CORRELACAO

	1	2	3	4
1	1.0000			
2	0.0084	1.0000		
3	0.0084	0.0058	1.0000	
4	-0.4745	0.2769	0.7753	1.0000

REGRESSAO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES- 1. 2. 3.
 VAR. DEPENDENTE- 4

RQUADRADO= 0.9090121E 00 ERRO PADRAO EST.= 0.6296863E 01 VALOR DE F= 0.1665078E 02

COEFICIENTES DA REGRESSAO VALOR DE T
 B(4, 4)= 0.5025178E 00
 B(4, 1)= -0.1057332E 00 -0.3583660E 01
 B(4, 2)= 0.6997641E 02 0.2049008E 01
 B(4, 3)= 0.1968895E 02 0.5765497E 01

ORS.	VERDADEIRO	ESTIMADO	ERRO PADRAO	VALOR DE T	DESVIO
1	0.230000E 02	0.2462305E -2	0.2950426E-01	-0.3583660E 01	-0.1623054E 01
2	0.170000E 02	0.8763074E 01	0.34-5135E 02	0.2049008E 01	0.8236928E 01
3	0.290000E 02	0.3371999E -2	0.3415135E 01	0.5765497E 01	-0.4719986E 01
4	0.170000E 02	0.1786000E -2			-0.8600045E 00
5	0.490000E 02	0.5021999E -2			-0.1219986E 01
6	0.300000E 02	0.3436000E -2			-0.4360001E 01
7	0.680000E 02	0.5931692E -2			0.8683084E 01
8	0.310000E 02	0.3268019E -2			-0.1680183E 01
9	0.410000E 02	0.4345693E -2			-0.2456932E 01

ESTE DE VON NEUMAN
 ALOR DE 0= 0.2865598E 01

MATRIZ DADOS		9OBSERVACOES			
VARIABLE	1	2	3	4	
OBS.	1	0.100000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.160000E 02
OBS.	2	0.250000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.130000E 02
OBS.	3	0.100000E 03	0.260000E 00	0.130000E 01	0.270000E 02
OBS.	4	0.250000E 03	0.260000E 00	0.130000E 01	0.140000E 02
OBS.	5	0.100000E 03	0.130000E 00	0.260000E 01	0.240000E 02
OBS.	6	0.250000E 03	0.130000E 00	0.460000E 01	0.190000E 02
OBS.	7	0.100000E 03	0.260000E 00	0.460000E 01	0.390000E 02
OBS.	8	0.150000E 03	0.180000E 00	0.180000E 01	0.240000E 02
OBS.	9	0.250000E 03	0.200000E 00	0.200000E 01	0.220000E 02

NO. DE VAR. 4 NO. DE OBS. 9

VARIAVEL	MEDIA	DESV. PADRAO	COEF. DE VAR.
1	0.172222E 03	0.7114579E 02	0.4121046
2	0.193333E 00	0.6146360E 01	0.3179152
3	0.193333E 01	0.6146360E 00	0.3179153
4	0.220000E 02	0.7542471E 01	0.3428395

MATRIZ DE CORRELACAO

	1	2	3	4
1	1.0000			
2	0.0084	1.0000		
3	0.0084	0.0058	1.0000	
4	-0.0004	0.4601	0.5224	1.0000

REGRESSAO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES- 1, 2, 3,

VAR. DEPENDENTE- 4

RQUADRADO= 0.8525775E 00 ERRO PADRAO EST.= 0.3885366E 01 VALOR DE F= 0.9638700E 01

COEFICIENTES DA REGRESSAO	ERRO PADRAO	VALOR DE T
B(4, 4)= 0.9695440E 01		
B(4, 1)= -0.6454493E -01	0.18-0507E-01	-0.3545436E 01
B(4, 2)= 0.5672445E 02	0.21-7247E 02	0.2691874E 01
B(4, 3)= 0.6441678E 01	0.21-7248E 01	0.3056914E 01

OBS.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIO
1	0.1600000E 02	0.1898930E -2	-0.2989304E 01
2	0.1300000E 02	0.9307573E -1	0.3692429E 01
3	0.2700000E 02	0.2636348E -2	0.6365205E 00
4	0.1400000E 02	0.1668175E -2	-0.2681747E 01
5	0.2400000E 02	-0.2736348E -2	-0.3363483E 01
6	0.1900000E 02	-0.1768175E -2	0.1318248E 01
7	0.3900000E 02	0.3473766E -2	0.4262345E 01
8	0.2400000E 02	-0.2181912E -2	0.2180881E 01
9	0.2200000E 02	-0.2505593E -2	-0.3055927E 01

ESTE DE VON NEUMAN
ALOR DE G- 0.1693195E 01

MATRIZ DADOS		903SERVACOES		4VARIAV		EIS	
VARIABLE		1	2	3	4		
OBS.	1	0.100000E 03	0.130000E 00	0.130000E 01	0.870000E 01		
OBS.	2	0.25000000E 03	0.130000E 00	0.13000000E 01	0.1118000E 02		
OBS.	3	0.1000000E 03	0.2600000E 00	0.4500000E 01	0.8800001E 01		
OBS.	4	0.25000000E 03	0.26000000E 00	0.300000E 01	0.1210000E 02		
OBS.	5	0.1000000E 03	0.1300000E 00	0.2500000E 01	0.8200000E 01		
OBS.	6	0.25000000E 03	0.1300000E 00	0.25000000E 01	0.1062000E 02		
OBS.	7	0.1000000E 03	0.2600000E 00	0.1300000E 01	0.1040000E 02		
OBS.	8	0.2500000E 03	0.2600000E 00	0.25000000E 01	0.1270000E 02		
OBS.	9	0.1500000E 03	0.18000000E 00	0.18000000E 01	0.1010000E 02		

NO. DE VAR.	4	NO. DE OBS.	9		
ARIÁVEL	MEDIA	DESV. PADRAO	COEF. DE VAR.		
1	0.5057458E 01	0.4322604E 00	0.0844699		
2	-0.1695996E 01	0.3268201E 00	-0.1947009		
3	0.5891560E 00	0.3082641E 00	0.5242301		
4	0.2323134E 01	0.1423919E 00	0.0642930		

MATRIZ DE CO. RELACAO

	1	2	3	4
1	1.0000			
2	0.0007	1.0000		
3	0.0000	0.0000	1.0000	
4	0.8509	0.4201	-0.1896	1.0000

MATRIZ DADOS		9OBSERVACOES		4VARIAV		EIS	
VARIABLE	1	2	3	4	5	6	7
OBS. 1	0.4605170E 01	-0.2040220E 01	0.623642E 00	0.2163322E 01			
OBS. 2	0.5521460E 01	-0.2040220E 01	0.2623642E 00	0.2414126E 01			
OBS. 3	0.4605170E 01	-0.1347073E 01	0.9162907E 00	0.2174751E 01			
OBS. 4	0.5521460E 01	-0.1347073E 01	0.2623642E 00	0.2493205E 01			
OBS. 5	0.4605170E 01	-0.2040220E 01	0.9162907E 00	0.2104134E 01			
OBS. 6	0.5521460E 01	-0.2040220E 01	0.9162907E 00	0.2362739E 01			
OBS. 7	0.4605170E 01	-0.1347073E 01	0.2623642E 00	0.2341805E 01			
OBS. 8	0.5521460E 01	-0.1347073E 01	0.9162907E 00	0.2541601E 01			
OBS. 9	0.5010635E 01	-0.1714798E 01	0.877865E 00	0.2312535E 01			

REGRESSAO MULTIPLA

VAR. INDEPENDENTES- 1, 2, 3,

VAR. DEPENDENTE- 4

ROUADRADO= 0.9360131E 00 ERRO PADRAO EST.= 0.4832455E-01 VALOR DE F= 0.2438024E 02

COEFICIENTES DA REGRESSAO

	ERRO PADRAO	VALOR DE T
B(4, 4)=	0.1267601E 01	0.7519180E 01
B(4, 1)=	0.2802023E 00	0.3707788E 01
B(4, 2)=	0.1827481E 00	0.1677325E 01
B(4, 3)=	-0.8764776E-01	

OBS.	VERDADEIRO	ESTIMADO	DESVIC
1	0.2163322E 01	0.2162138E 01	0.1183986E-02
2	0.2414126E 01	0.2418885E 01	-0.4759312E-02
3	0.2174751E 01	0.2231494E 01	-0.5674315E-01
4	0.2493205E 01	0.2545557E 01	-0.5235195E-01
5	0.2104134E 01	0.2104824E 01	-0.6899834E-03
6	0.2362739E 01	0.2361570E 01	0.1168251E-02
7	0.2341805E 01	0.2288810E 01	0.5299521E-01
8	0.2541601E 01	0.2488241E 01	0.5335999E-01
9	0.2312535E 01	0.2306698E 01	0.5836487E-02

ESTE DE VON NEUMAN
ALOR DE 0- 0.8884680E 00

MATRIZ DADOS 13 OBSERVACOLS 7VARIAV EIS
 VARIABEL 1 2 3 4 5 6

OBS. 1	0.100000E 03	0.130000E 00	0.000000E 00	0.914000E 01	0.360000E 02	0.230000E 02
OBS. 2	0.250000E 03	0.130000E 00	0.000000E 00	0.117400E 02	0.380000E 02	0.210000E 02
OBS. 3	0.100000E 03	0.260000E 00	0.000000E 00	0.107400E 02	0.560000E 02	0.290000E 02
OBS. 4	0.250000E 03	0.260000E 00	0.000000E 00	0.131100E 02	0.560000E 02	0.240000E 02
OBS. 5	0.100000E 03	0.130000E 00	0.000000E 00	0.940000E 01	0.590000E 02	0.380000E 02
OBS. 6	0.250000E 03	0.130000E 00	0.000000E 00	0.119100E 02	0.440000E 02	0.210000E 02
OBS. 7	0.100000E 03	0.260000E 00	0.000000E 00	0.109600E 02	0.102000E 03	0.610000E 02
OBS. 8	0.250000E 03	0.260000E 00	0.000000E 00	0.131600E 02	0.780000E 02	0.460000E 02
OBS. 9	0.150000E 03	0.180000E 00	0.000000E 00	0.954000E 01	0.480000E 02	0.260000E 02
OBS. 10	0.150000E 03	0.180000E 00	0.320000E 00	0.927000E 01	0.530000E 02	0.280000E 02
OBS. 11	0.150000E 03	0.180000E 00	0.460000E 00	0.109900E 02	0.590000E 02	0.350000E 02
OBS. 12	0.150000E 03	0.180000E 00	0.140000E 01	0.129200E 02	0.139000E 03	0.110000E 03
OBS. 13	0.150000E 03	0.180000E 00	0.740000E 00	0.117300E 02	0.690000E 02	0.600000E 02

MATRIZ DADOS 13OBSERVACUES 7VARIAB EIS
VARIABLE 7

OBS. 1	0.190000E 02
OBS. 2	0.160000E 02
OBS. 3	0.280000E 02
OBS. 4	0.280000E 02
OBS. 5	0.270000E 02
OBS. 6	0.150000E 02
OBS. 7	0.420000E 02
OBS. 8	0.340000E 02
OBS. 9	0.190000E 02
OBS. 10	0.200000E 02
OBS. 11	0.260000E 02
OBS. 12	0.870000E 02
OBS. 13	0.410000E 02

NO. DE VAR. 7 NG. DE OBS. 13

ARIVEL	MEDIA	DESV. PADRAO	COEF. DE VAR.
1	0.1653846E 03	0.6007881E -2	0.3652672
2	0.1892307E 00	0.5150974E -1	0.2752060
3	0.2246153E 00	0.4081593E 00	1.8171479
4	0.1112537E 02	0.1406591E -1	0.1254309
5	0.6438462E 02	0.2732014E -2	0.4243271
6	0.4015384E 02	0.2407310E -2	0.595218
7	0.3092308E 02	0.1821658E -2	0.5851582

MATRIZ DE CORRELACAO

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.0000						
2	0.0286	1.0000					
3	-0.1409	-0.0986	1.0000				
4	0.6862	0.4190	0.3086	1.0000			
5	-0.1840	0.3708	0.7019	0.4539	1.0000		
6	-0.2329	0.1756	0.8315	0.3978	0.9577	1.0000	
7	-0.1886	0.2458	0.8296	0.4662	0.9523	0.9780	1.0000

APÊNDICE III

APÊNDICE III

Exemplo de Aplicação da equação de Vida

O estudo da usinagem tem como uma aplicação a determinação da velocidade econômica de corte.

Os dados de custo foram obtidos de uma indústria do Estado de Santa Catarina a partir de um relatório de estágio de um de nossos alunos (*) realizado nos meses de janeiro e fevereiro de 1975.

Dados de custo:

Inserto reversível Sandvik H1P SNUN 120408 com oito arestas.

Preço unitário: Cr\$5,20

Preço p/aresta: Cr\$1,30

Tempo para se trocar um inserto: 2 min.

Custo homem-máquina: Cr\$0,25

O cálculo das condições econômicas de corte é feito, considerando-se os custos de mão de obra, máquina, ferramenta e o custo fixo que independe das condições de usinagem.

Cálculo do custo:

$$K_p = K_i + K_{us} + K_m + K_{uf} \quad (1)$$

onde:

K_i = custo fixo
 K_{us} = custo de mão de obra
 K_m = custo da máquina
 K_{uf} = custo da ferramenta

Para o caso de um torneamento cilíndrico tem-se:

$$K_p = c_1 + \frac{\pi d L}{1000 av} c_2 + \frac{\pi d L}{1000 av T} c_3 \quad (2)$$

onde:

c_1 = custo fixo unitário (Cr\$/peça)

c_2 = custo de mão de obra + custo máquina
(Cr\$/min)

c_3 = custo relativo a ferramenta = $K_{ft} + t_t \cdot c_2$

K_{ft} = custo da ferramenta por aresta (Cr\$)

t_t = tempo de troca (min)

Pela fórmula de Taylor:

$$v T^x a^y p^z = C \quad (3)$$

Simplificando-se a equação (4) tem-se:

$$v T^x = K \quad (5)$$

onde:

$$K = C a^{-y} p^{-z}$$

O valor de K é função do avanço e profundidade, - substituindo-se (5) em (2):

$$K_p = c_1 + \frac{\pi d L}{1000 av} c_2 + \frac{\pi d L v^{x-1}}{1000 a K} c_3 \quad (6)$$

A velocidade para o custo mínimo se obtém pela derivação da equação (6) em função da velocidade:

$$\frac{dK_p}{dv} = - \frac{\pi d L}{1000 av^2} c_2 + \frac{(x-1)\pi d L v^{x-2}}{1000 a K} c_3 = 0$$

$$v_o = \left| \frac{c_2 K}{(x - 1) c_3} \right|^{1/x}$$

que é a expressão da velocidade para o mínimo custo.

Para os dados obtidos nos ensaios de usinabilidade, temos:

$$\begin{aligned} x &= 0,32 \\ y &= 0,06 \\ z &= 0,16 \\ c_1 &= 390 \\ c_2 &= 0,25 \text{ (Cr$/min)} \\ c_3 &= 1,30 + 0,25 \cdot 2 = 1,8 \text{ (Cr\$)} \end{aligned}$$

Na tabela abaixo é mostrada a velocidade econômica para várias combinações de avanço e velocidade.

a	p	v_o
mm/rot	mm	m/min
0,13	1,3	174,9
0,13	1,8	165,9
0,13	2,5	157,3
0,18	1,3	172,2
0,18	1,8	163,1
0,18	2,5	154,8
0,26	1,3	167,9
0,26	1,8	159,3
0,26	2,5	150,9

A grande importância do avanço na determinação do custo da usinagem mostra mais uma vez que o modelo:

$$v T^x a^y p^z = C$$

é mais adequado.

localidade econômica de corte.

(*) Silva, Emílio

Relatório de Estágio na Eletromotores Jaraguá do Sul S/A
em janeiro e fevereiro de 1975.

UFSC - Departamento de Mecânica.