

Este exemplar corresponde à redação
final da tese defendida por
Anselmo Eduardo Ruiz e aprovada
pela comissão julgadora em 25/08/89



PROF. NIVALDO LEMOS CUPINI
DEM - FEE UNICAMP

A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA EM PROCESSOS DE
TORNEAMENTO: CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA
E FATORES DE INFLUÊNCIA

37/89

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

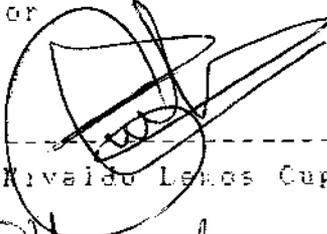
Tese de Doutorado

Título da Tese: A Rugosidade Superficial da Peça
em Processos de Torneamento: Critério de Fim de
Vida e Fatores de Influência.

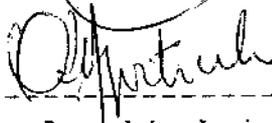
Autor: Anselmo Eduardo Diniz

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini

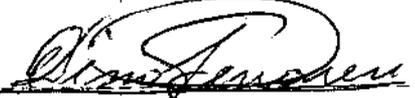
Aprovado por



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini



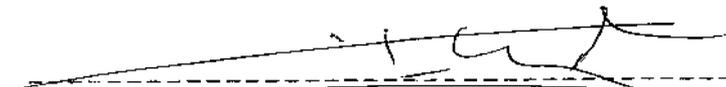
Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho



Prof. Dr. Dino Ferraresi



Prof. Dr. Louvival Boeks



Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

Campinas, 25 de agosto de 1989

À minha querida esposa Célia, companheira para o que der e vier.

À minha mãe Maria Helena e ao meu pai Júlio que são os principais responsáveis por eu ter chegado até aqui.

À Deus Autor e Consumador de todas as coisas

Eu dedico este trabalho

"O temor do Senhor é o princípio da sabedoria"
Prov. 1.7

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, um orientador que sabe instruir tecnicamente, mas que muito mais que isto, instrui sobre diversos outros aspectos da vida.

À FINEP pelo apoio em termos de equipamentos.

À SANDVIK pela doação das ferramentas e à Braslab pela cessão do Microscópio Eletrônico

Aos amigos do DEF e da Engenharia Mecânica Ronaldo, Sérgio, Batocchio, Waldo, Felipe, Aristides, Miro, Rubens, Rodnei, Roseana, Maria Helena, Luciene, Maria, Lúcia que além de me ajudarem em muitos aspectos da tese, tornaram a convivência do dia a dia muito agradável.

À minha irmã Cheti, minha "assessora para assuntos matemáticos".

Ao CENTRO DE TECNOLOGIA/UNICAMP pelo empréstimo dos equipamentos, especialmente ao seu funcionário Vilson que foi muito atencioso comigo.

À Rita e ao Fernando, funcionários da Engenharia Mecânica, que também foram importunados por mim durante o transcorrer da tese e se mostraram bastante atenciosos.

A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO: CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA E FATORES DE INFLUÊNCIA

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo da formação da rugosidade superficial de peças usinadas por torneamento e tem como objetivos específicos o estudo da viabilidade de utilização da rugosidade superficial da peça como critério de fim de vida da ferramenta de torneamento e a verificação da influência de diversos fatores na formação da rugosidade em torneamento, tais como, velocidade de corte, avanço e desgastes da ferramenta.

Assim diversos ensaios de torneamento foram realizados cortando-se o aço 1045 em diferentes velocidades de corte e avanços. Muitos destes ensaios foram repetidos cinco ou dez vezes e a rugosidade superficial de todas as peças foram medidas, tanto nos seus valores de R_a , quanto de R_{max} . Além disto, diversas ferramentas tiveram seus desgastes medidos e fotografados a fim de se cumprir os objetivos propostos.

Dentre as diversas conclusões do trabalho, uma das mais significativas aponta para o fato de que a estimativa da vida da ferramenta baseada em valores limites de R_a e/ou R_{max} é um procedimento razoavelmente confiável e com bastante possibilidade de ser utilizado no meio produtivo.

THE SURFACE ROUGHNESS OF THE PART IN TURNING PROCESS:
CRITERION OF TOOL LIFE AND FACTORS WHICH HAVE INFLUENCE

ABSTRACT

The purpose of this research is the study of the surface roughness of turned workpieces. One of the specific purpose is the possibility of using the workpiece surface roughness as a tool life criterion of single point carbide tools. The study of influence of cutting speed, feed and tool wear is another specific purpose.

Several turning tests were performed with ABNT 1045 steel using several cutting speeds and feeds. Some of these tests were performed five or ten times and the surface roughness of the workpieces were measured using Ra and Rmax as parameters. Besides, the wear of several tools were measured too.

One of the most important conclusions of this research is that the tool life prediction using limit values of Ra and Rmax is a reliable procedure and can be used under industrial conditions.

LISTA DE SIMBOLOS UTILIZADOS

- f = avanço [mm/volta]
 h = espessura de corte [mm]
 a_p = profundidade de corte [mm]
 r = raio de ponta da ferramenta [mm]
 v_c = velocidade de corte [m/min]
 $l = \pi . d . l_a$ [mm²] ou [m²]
 l_a = comprimento de avanço [mm] ou [m]
 t_c = tempo de corte [min]
 T = vida da ferramenta [min]
 F_c = força de corte [Kgf]
 HB = dureza Brinell
 V_b = desgaste frontal [mm] ou [μ m]
 q = cavaco equivalente
 x, K, y, C = constantes da equação de Taylor
 C, E, F, G, H = constantes da equação expandida de Taylor
 c_1, c_w, C_w = constantes da equação de Woxen
 C_k, T^*, γ = constantes da equação de Kronenberg
 K, a, b, c, d, e = constantes da equação de Colding
 K_v, m, n, i_s, C = constantes da equação de König-
-Depiereux
 χ = ângulo de posição [°]
 χ_l = ângulo lateral de posição [°]
 R_{ath} = rugosidade média teórica [μ m]
 R_{maxth} = rugosidade máxima teórica [μ m]
 t_{ft} = tempo de troca da ferramenta [min]
 v_{mxp} = velocidade de corte de máxima produção [m/min]
 \bar{X} = valor médio de uma variável
 σ = desvio-padrão
 ϕ = ângulo de cisalhamento do cavaco [°]
 l_c = comprimento de corte [m]

INDICE

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE SIMBOLOS

CAPITULO I

INTRODUÇÃO.....1

CAPITULO II

ACABAMENTO SUPERFICIAL DE PEÇAS USINADAS.....3

II.1 - Rugosidade Superficial.....3

II.2 - Parâmetros para Medição da Rugosidade Superficial...5

II.3 - Os Processos de Usinagem e o Acabamento
Superficial.....6

II.4 - Obtenção de Acabamentos Superficiais em Operações
de Torneamento.....8

II.5 - Resumo do Capítulo.....35

CAPITULO III

VIDA DA FERRAMENTA: CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA, MODELOS

MATEMÁTICOS, RUGOSIDADE SUPERFICIAL COMO CRITÉRIO DE FIM

DE VIDA.....37

III.1 - Dispersão da Rugosidade Superficial Obtida em
Operações de Torneamento.....39

III.2 - Modelos Matemáticos para a Vida da Ferramenta.....40

III.3 - Resumo do Capítulo.....47

CAPITULO IV

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....49

IV.1 - Material.....49

IV.2 - Ensaio de Torneamento.....51

IV.3 - Resumo do Capítulo.....60

CAPITULO V

RESULTADOS E DISCUSSOES.....65

V.1 - Resultados e Discussões Relativos aos Ensaio

Realizados com a Ferramenta KNUX.....65

V.2 - Resultados e Discussões Relativos aos Ensaio

Realizados com a Ferramenta TPGR ($f=0.2$ mm/volta
 $a_p=0.6$ mm).....85

V.3 - Ensaio de Forma do Cavaco.....95

V.4 - Resultados Relativos aos Ensaio Realizados com a

Ferramenta TPGR ($f=0.25$ mm/volta $a_p=0.7$ mm).....95

CAPITULO VI

CONCLUSOES.....134

CAPITULO VII

SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....136

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....138

APENDICE A

CALCULO DOS VALORES DA TABELA DE ANÁLISE DE VARIANCIA....147

APENDICE B

CALCULO DO TAMANHO MINIMO DE AMOSTRA.....150

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

A determinação do momento exato da troca da ferramenta de usinagem em um processo produtivo é uma tarefa que, geralmente, vem sendo executada em nossas fábricas de uma maneira bastante aleatória. Muitas das vezes a decisão de trocar a ferramenta cabe ao operador da máquina que não possui critérios objetivos para levar a cabo esta tarefa. Assim, o faz levando em conta fatores subjetivos como aspecto da peça e da ferramenta.

Por outro lado, em laboratório pode-se determinar com bastante objetividade o fim da vida da ferramenta utilizando-se de microscópios, dinamômetros, rugosímetros, e outros equipamentos típicos de laboratório. Acontece que a utilização destes equipamentos no processo produtivo é inviável devido ao seu custo e também devido ao tempo que se leva para a medição dos desgastes da ferramenta ou da rugosidade da peça.

Assim, este trabalho pretende levar a objetividade do laboratório para dentro da fábrica, verificando a confiabilidade de se estimar a vida da ferramenta utilizando-se de recursos de laboratório e fazendo com que esta vida estimada sirva para decidir o momento de troca da ferramenta no processo produtivo.

Dentro do corpo do trabalho relatam-se os diversos critérios utilizados para a troca da ferramenta. As aplicações deste trabalho restringem-se às operações de torneamento em acabamento. Nestas operações para se trocar a ferramenta leva-se em conta, basicamente, as tolerâncias e a rugosidade superficial da peça usinada. Escolheu-se estudar a dispersão dos valores de rugosidade superficial para se poder calcular a confiabilidade de se fazer uma estimativa da vida da ferramenta baseada nestes parâmetros. Assim, estudou-se a geração da rugosidade superficial da peça no processo de torneamento como um todo: fatores de influência, fenômenos que a causam, modelos matemáticos e a rugosidade superficial como critério de fim de vida da ferramenta.

Este trabalho é dividido em sete capítulos, quais sejam:

Capítulo I - Introdução

Capítulo II - Acabamento Superficial de peças usinadas

Capítulo III - Vida da ferramenta: Critérios de fim de vida, Modelos Matemáticos, Rugosidade Superficial como Critério de fim de vida

Capítulo IV - Métodos Experimentais

Capítulo V - Resultados e Discussões

Capítulo VI - Conclusões

Capítulo VII - Sugestões para Trabalhos Futuros

CAPITULO II

ACABAMENTO SUPERFICIAL DE PEÇAS USINADAS

11.1 - Rugosidade Superficial

As superfícies reais distinguem-se das superfícies geométricas através de suas diferenças de forma, sejam elas macro ou micro geométricas. Estas diferenças ou defeitos de forma são classificados como segue[1],[2]:

1)diferenças de forma de 1a. ordem: são aquelas diferenças que, ao se examinar toda a superfície ou uma de suas superfícies parciais, só podem ser verificadas em toda a sua extensão. São exemplos deste tipo de diferença a ovalização e a cilindricidade.

2)diferenças de forma de 2a.ordem: São chamadas de ondulações. São diferenças que se repetem regular ou irregularmente, e cujas distâncias são um múltiplo considerável de sua profundidade.

3)diferenças de forma de 3a. ordem: são as ranhuras ou sulcos provenientes de marcas de avanço que ocorrem devido à forma da ferramenta deixada na peça durante o processo de usinagem.

4)diferenças de forma de 4a. ordem: são chamadas de estrias ou escamas. Ocorrem durante a formação do cavaco no processo de usinagem, formação de crateras em processos galvânicos ou na deformação do material com jato de areia.

5)diferenças de forma de 5a. ordem: são estruturais. Correspondem a diferenças causadas por processos de cristalização, modificações da estrutura por ação química e por processos de corrosão.

As diferenças de 1a. a 2a. ordem são consideradas macrogeométricas, enquanto as de 3a. a 5a. ordem são consideradas microgeométricas. A rugosidade superficial corresponde às diferenças microgeométricas.

A figura 2.1 apresenta um esquema das diferenças de forma de 1a. a 4a. ordem.

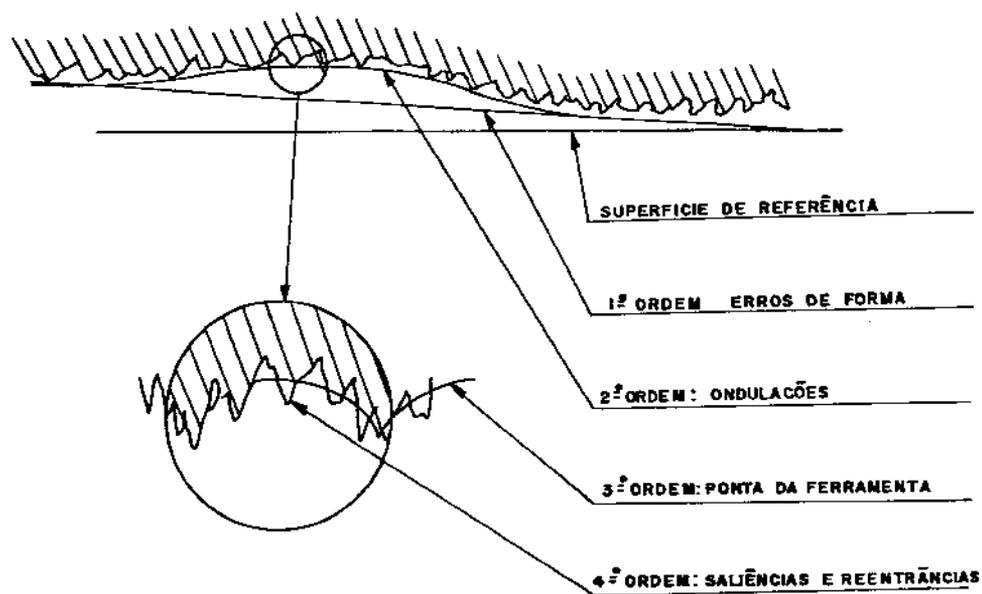


Figura 2.1 - Diferenças de forma de 1a. a 4a. ordem [2]

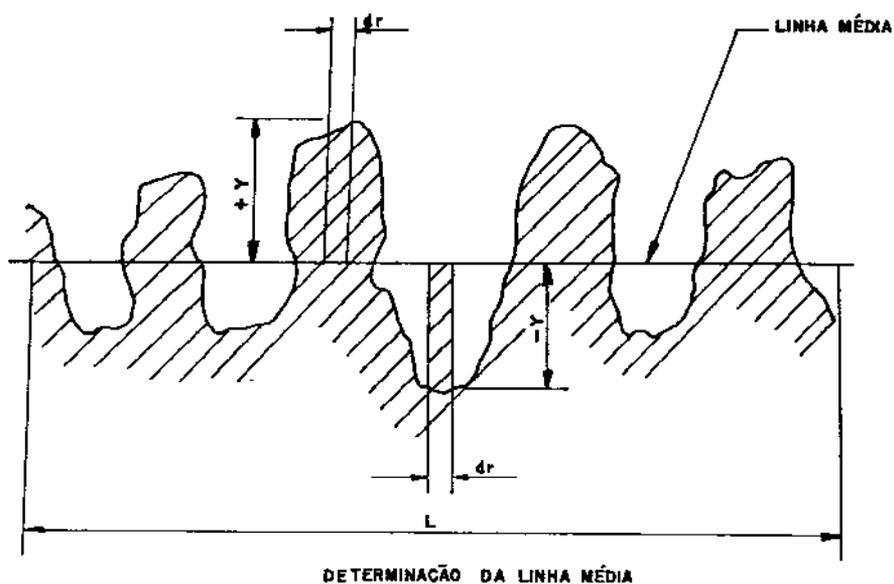


Figura 2.2 - Representação da linha média de um perfil [1]

11.2 - Parâmetros para medição da rugosidade superficial

As grandezas normalizadas pela ABNT para medição da rugosidade são relativas ao sistema H, que tem por base a linha média do perfil da secção[3]. Podemos definir linha média como: linha paralela à direção geral do perfil, em um comprimento de amostragem, colocada de tal modo que a soma das áreas superiores compreendidas entre ela e o perfil efetivo seja igual à soma das áreas inferiores (figura 2.2).

As principais grandezas para medição da rugosidade são:

1) desvio médio aritmético - R_a - (CLA - Center line Average) - média dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média, num comprimento de amostragem.

$$R_a = 1/L \int_0^L |y| dx \quad (1)$$

ou aproximadamente

$$R_a = 1/n \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

onde n = número de ordenadas consideradas.

2) desvio médio quadrático - R_q - (RMS - Root Mean Square Average) - raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem.

$$R_q = \sqrt{1/L \int_0^L y^2 dx} \quad (3)$$

ou aproximadamente

$$R_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (4)$$

3) altura máxima das irregularidades - R_{max} - distância entre duas linhas paralelas à linha média e que tangenciam a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda, num comprimento de amostragem. (figura 2.3) [3]

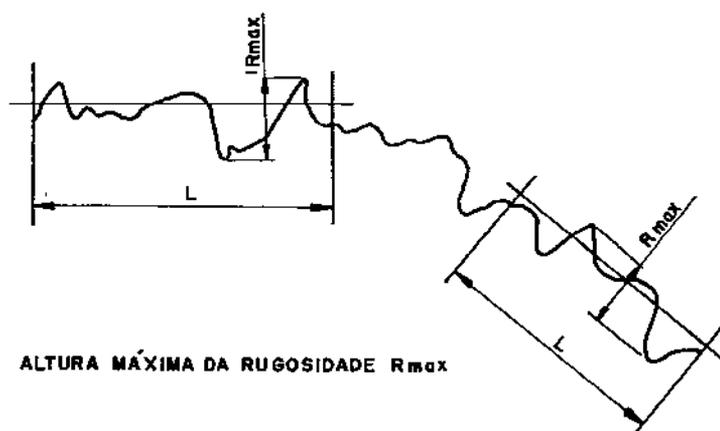


Figura 2.3 - Representação da altura máxima das irregularidades (R_{max}) [3]

11.3 - Os Processos de Usinagem e o Acabamento Superficial

Os valores de rugosidade superficial referentes a diversos processos de fabricação apresentados na tabela 2.1 [1],[4] são informativos, visto o grande número de variáveis que devem ser consideradas quando da especificação do acabamento superficial. Assim, para um mesmo processo de usinagem o acabamento superficial pode variar de acordo com várias características do processo, tais como rigidez da máquina, condições de usinagem, material da peça, etc, que serão objeto de estudo em outro item deste trabalho.

Na tabela 2.1 existem duas faixas de aplicação para cada processo de fabricação:

Re (A inch)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2		0,5
Re (A m)	51	25,4	12,7	6	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,006	0,013
Rq (A inch)	2112	1055	528	265	134	66,2	35,5	16,8	8,4	4,1	2,06	1,0	0,52
Rq (A m)	53,5	36,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,88	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
Rmax (A inch)	-	-	-	5,90	4,08	2,09	1,03	50	24	12	5,9	2,9	1,5
Rmax (A m)	-	-	-	15	10,3	5,60	2,70	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04
CORTE POR CHAMA	[Hatched bar]												
MOLDAGEM EM AREIA	[Hatched bar]												
LAMINAÇÃO A QUENTE	[Hatched bar]												
FORJAMENTO	[Hatched bar]												
PLAINAMENTO	[Hatched bar]												
RASQUETE	[Hatched bar]												
CORTE DE SERRA	[Hatched bar]												
FURACÃO	[Hatched bar]												
USINAGEM QUÍMICA	[Hatched bar]												
CORROSÃO ELETROLÍTICA	[Hatched bar]												
FRESAMENTO	[Hatched bar]												
TORNEAMENTO/MANDRILAMENTO	[Hatched bar]												
BROCHAMENTO	[Hatched bar]												
ALARGAMENTO	[Hatched bar]												
MOLDAGEM EM COQUILHA	[Hatched bar]												
MOLDAGEM DE PRECISÃO EXTRUSÃO	[Hatched bar]												
LAMINAÇÃO A FRIO-ESTIR.	[Hatched bar]												
MOLDAGEM SOB PRESSÃO	[Hatched bar]												
RETIFICA	[Hatched bar]												
ESPELHAMENTO	[Hatched bar]												
POLIMENTO ALÉTRÓLITICO	[Hatched bar]												
ROLAGEM	[Hatched bar]												
POLIMENTO	[Hatched bar]												
LAPIDAÇÃO	[Hatched bar]												
SUPER ACABAMENTO	[Hatched bar]												

Tabela 2.1 - Rugosidades Superficiais Obtidas com os diversos Processos de Fabricação [1]

1) a faixa escura, na qual a rugosidade indicada é conseguida sem maiores cuidados na operação;

2) a faixa hachurada de utilização menos comum - a faixa da esquerda representa a região de rugosidade de obtenção mais difícil, onde serão necessários cuidados adicionais na operação; a parte da direita, representa a faixa mais aberta, onde a operação estaria sendo feita com bastante descuido.

Geralmente para se conseguir uma rugosidade apertada em uma determinada peça, utiliza-se de mais de um processo de usinagem consecutivos [5]. Assim, por exemplo, para obter-se uma rugosidade de $Ra=0.4 \mu m$ em um determinado eixo, utiliza-se em primeiro lugar de uma operação de torneamento, que tem a função principal de retirar um grande volume de cavaco na unidade de tempo, deixando um sobremetal pequeno para a operação subsequente de retificação, que tem a função específica de conseguir boa precisão e bom acabamento superficial na peça (no caso, $Ra=0.4 \mu m$).

11.4 - Obtenção de Acabamentos Superficiais em Operações de Torneamento

Há dois tipos distintos de acabamento superficial encontrados em uma operação de torneamento:

- 1 - produzido pela aresta principal de corte;
- 2 - produzido pela aresta secundária (ou lateral) de corte.[6]

O acabamento superficial obtido pela aresta principal de corte normalmente diz respeito àquele conseguido em operações de brochamento ou em torneamento de forma, com ferramentas sem raio de ponta (figura 2.4), enquanto aquele obtido pela aresta secundária é característico dos torneamentos utilizando-se uma ferramenta com raio de ponta, (figura 2.5) que neste trabalho é chamado de torneamento convencional.

11.4.1 - Acabamento Superficial Obtido com Ferramentas com Curvatura na Ponta de Corte

Material da Peça: Aço Normalizado ABNT 1045
Material da Ferramenta: Metal Duro classe P
 $\chi = 6^\circ$ $\alpha = 6^\circ$ $a_p = 2.5$ mm $f = 0.2$ mm/volta

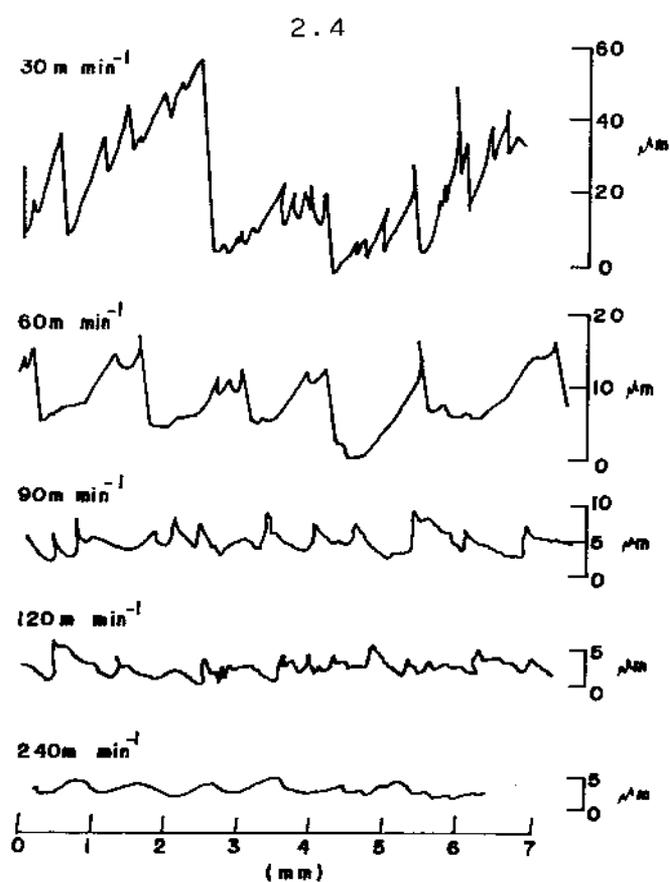


Figura 2.4 - Rugosidade Superficial produzida pela Aresta Principal de Corte [63]

Condições de Usinagem idênticas às da figura 2.4
 Acrescenta-se $\chi = 15^\circ$ $r = 0.8 \text{ mm}$

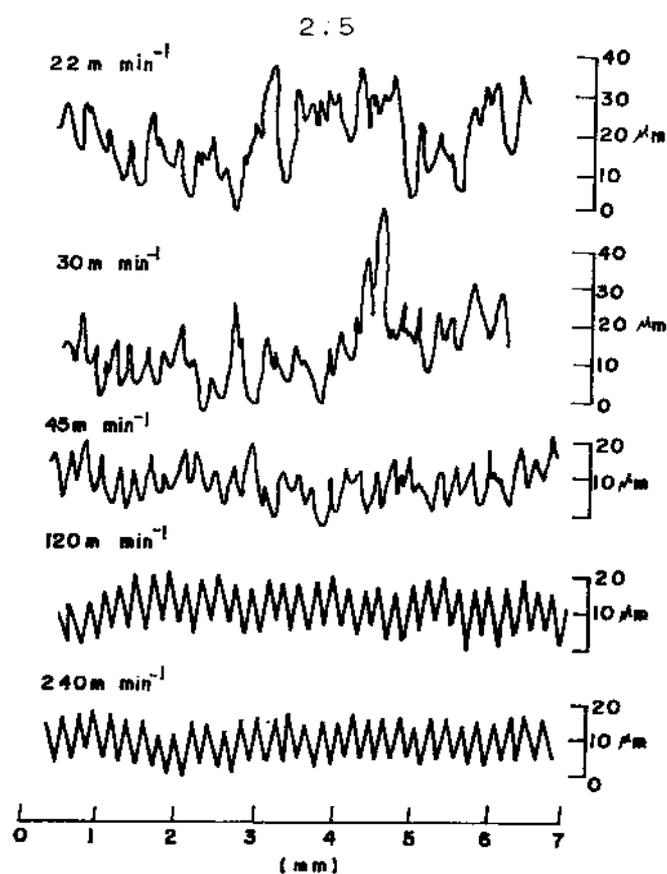


Figura 2.5 - Rugosidade Superficial produzida pela Aresta Secundária de Corte [6]

Em um torneamento convencional o acabamento superficial da peça é produzido pela aresta secundária de corte que é separada da aresta principal pela ponta de corte. A utilização da aresta secundária introduz fenômenos que influem no acabamento superficial, tais como:

1 - saliências correspondentes à geometria da ponta da ferramenta que tem um passo igual ao avanço por volta, são deixadas na superfície acabada;

2 - a espessura de corte (h) varia de dimensão a medida que se percorre a porção da aresta de corte em contacto com a peça, partindo-se da aresta principal em direção à aresta secundária, começando em seu valor máximo e indo gradualmente a zero, causando incerteza na geometria de corte, porque para uma dada afiação da aresta há uma espessura de corte mínima abaixo da qual não existe remoção de cavaco;

3 - Ocorre uma concentração do desgaste nas regiões onde termina o contacto aresta de corte-peça, tanto na aresta principal, quanto na aresta secundária (desgaste em sulcos), o que faz com que a ferramenta passe a agir como ferramenta de forma e deixe atrás de si a superfície da peça fortemente encruada, o que prejudica o acabamento. Além disto, os desgastes em sulco modificam a forma da ponta da ferramenta, o que tem consequências imediatas no acabamento superficial da peça;

4 - O material da peça na ponta da ferramenta está sujeito a uma alta tensão normal e fluirá para os lados para aliviar esta tensão (fluxo lateral de cavaco). Este fenômeno prejudica o acabamento superficial particularmente no caso da usinagem de metais dúcteis.[6]

Os itens 2, 3 e 4 serão discutidos mais para a frente neste trabalho. Passaremos agora a discorrer sobre a contribuição da geometria da ponta da ferramenta e do avanço por volta na rugosidade superficial da peça, a qual é chamada de rugosidade teórica (R_{th}).

11.4.2 - Cálculo da Rugosidade Teórica

A componente da rugosidade superficial devida à geometria da ponta da ferramenta pode ser facilmente calculada. A figura 2.6 mostra uma vista ampliada desta ponta. Nela definimos três grandezas:

- 1 - Raio de ponta ($r=OT$ na figura)
- 2 - Ângulo de posição da aresta secundária (χ)
- 3 - Complemento do ângulo de posição ($90 - \chi$)

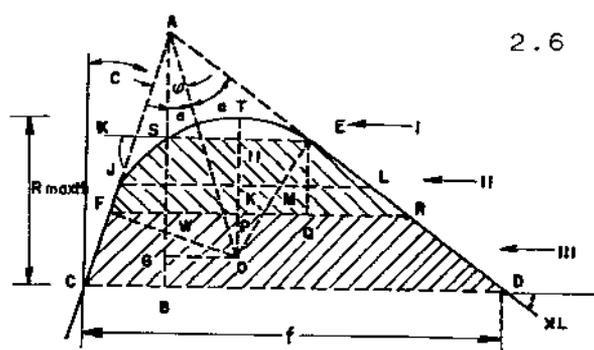


Figura 2.6 - Vista Ampliada da Ponta de Corte de uma Ferramenta [6]

Quando o raio de ponta é grande e o avanço é pequeno a rugosidade máxima teórica pode ser dada por (figura 2.7): [6], [7]

$$R_{maxth} = r - \left(r^2 - \frac{f^2}{4} \right)^{1/2} \approx \frac{f^2}{8r} \quad (5)$$

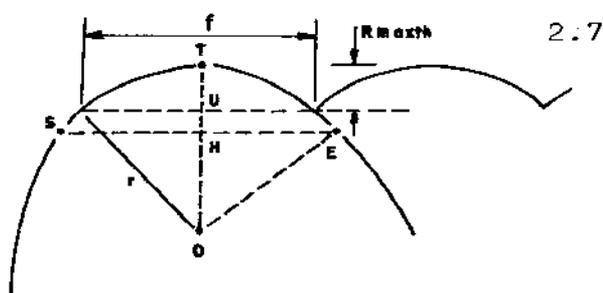


Figura 2.7 - Vista Ampliada da Ponta de Corte [6]

Da figura 2.7 é evidente que a equação 5 é válida dentro do intervalo onde $f/2 < EH$ ou

$$0 < \frac{f}{r} < 2 \text{ sen } \chi$$

Este intervalo de f/r engloba a maior parte das operações de acabamento em torneamento.

Do mesmo modo pode-se calcular a rugosidade média aritmética teórica (Rath) [8]:

$$R_{ath} = \frac{f^2}{31.3r} \quad (6)$$

Vajpayee [7] desenvolveu uma técnica para reduzir a amplitude da rugosidade teórica, a qual denominou de corte por "overlap". Na figura 2.8, acb corresponde à rugosidade teórica deixada na peça por uma passada anterior da ferramenta. Se repassarmos a ferramenta sem nenhuma mudança no avanço e com profundidade de corte igual a zero, mas com um ponto inicial controlado de tal maneira que o corte se dê entre as posições da ferramenta no corte anterior, como mostrado na figura 2.8, a rugosidade máxima teórica reduzir-se-á de h para h_0 .

A relação $q=bb'/(f/2)$ pode ser chamada de fator de "overlap"; o valor de q está sempre entre 0 e 2.

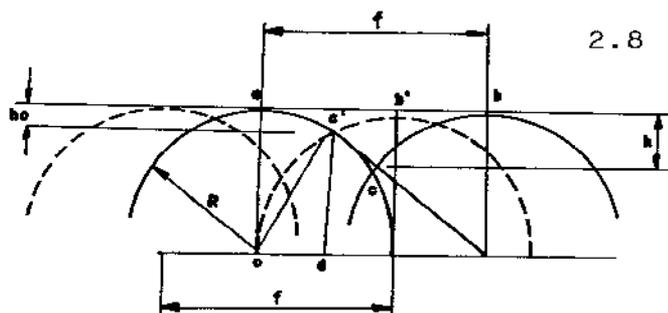


Figura 2.8 - Perfil da peça usando-se a técnica do "overlap" [7]

Do triângulo $oc'd$ (figura 2.8):

$$(c'd)^2 = r^2 - \left(\frac{f-q \cdot f/2}{2}\right)^2 = r^2 - \frac{f^2}{4} \left(1 - \frac{q}{2}\right)^2 \quad (7)$$

portanto

$$h_o = r - \left[r^2 - \frac{f^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{q}{2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Para $q=0$ (sem overlap), a equação 8 reduz-se à equação 5.
Para $q=1$ (máximo overlap):

$$h_o = r - \left[r^2 - \frac{f^2}{16} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Utilizando-se este método, poder-se-ia substituir uma operação de acabamento com um avanço, por exemplo, de 0.2 mm/volta, por duas passadas com avanço de 0.4 mm/volta mantendo-se a mesma rugosidade superficial, pois:

$$\text{para } f = 0,2 \text{ mm/volta} - R_{\text{maxth}} = \frac{f^2}{8r} = 5\mu\text{m (para } r=1\text{mm)}$$

para $f = 0.4$ mm/volta com "overlap" $q = 1$

$$R_{\text{maxth}} = 1 - \left(1 - \frac{0,4^2}{16}\right)^{1/2} = 5\mu\text{m (para } r=1\text{mm)}$$

Assim, poder-se-ia executar a passada da ferramenta em desbaste, anterior ao acabamento, já no diâmetro final da peça, repassando-a no mesmo diâmetro e com o mesmo avanço daquele usado no desbaste, podendo utilizar-se, nesta passada, uma velocidade de corte maior, pois a quantidade de material a ser removida é mínima ($a_p = 0$). Com isso, teoricamente, manter-se-ia a rugosidade superficial com uma diminuição do tempo da operação com relação à operação de acabamento comum.

Este método carece de uma verificação experimental, pois parte do princípio que a profundidade de corte da primeira passada do "overlap", que seria maior que a profundidade do acabamento convencional, não influi na rugosidade da peça. Além disso, não é fácil conseguir-se garantir a repassada da ferramenta no mesmo diâmetro, defasada de metade do avanço, com maior velocidade de corte.

A figura 2.9 [6] mostra uma comparação entre a rugosidade máxima real e a rugosidade máxima teórica na usinagem de um aço em diferentes avanços. Desta comparação pode-se tirar um parâmetro que serviria como base para o cálculo do índice de usinabilidade do metal baseado na sua rugosidade superficial. Tal parâmetro seria [4]:

$$C = \frac{R_{maxth}}{R_{max}} \quad (10)$$

Este parâmetro pode ser considerado como uma medida do quão próxima a usinagem em questão está do acabamento ideal onde $C=1$.

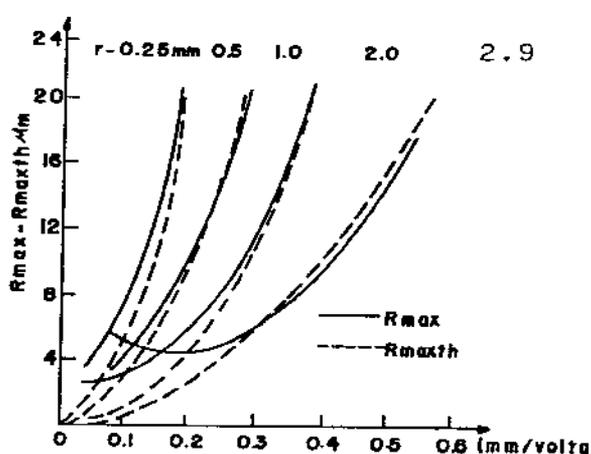


Figura 2.9 - Comparação entre os valores de rugosidade máxima real e rugosidade máxima teórica [6]

11.4.3 - Considerações sobre alguns fenômenos que causam a Rugosidade Superficial

Dentre os diversos fatores que afetam a rugosidade superficial de peças torneadas, os fatores dominantes são: geometria da ferramenta, condições de usinagem, erros na fixação da peça e a vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça. Basicamente, o perfil da rugosidade superficial ao longo da direção axial da peça é determinado pelo avanço e pela geometria da ferramenta. Como vimos no item anterior, sob condições ideais, o perfil da rugosidade superficial é formado pela repetição do perfil da ponta da ferramenta em intervalos iguais ao avanço por volta. Contudo, quando diversos tipos de materiais são torneados, a altura máxima da rugosidade se apresenta maior que a rugosidade teórica. Este efeito depende, em boa parte, das propriedades do material da peça, que determinam como se dá a deformação plástica do material, o atrito cavaco-ferramenta, a dilatação térmica da peça e a formação da aresta postiça de corte, fenômenos estes que influenciam diretamente a rugosidade superficial. Além disso, o fato da ferramenta possuir raio de ponta, gera fenômenos como o fluxo lateral de cavaco e o chamado "Spanzipfel", sobre os quais discorrer-se-á posteriormente.

A discussão acima é baseada na pressuposição que tanto a peça quanto a ferramenta são idealmente posicionadas. Mas isso nem sempre é verdadeiro. Na realidade existem erros de fixação da peça e da ferramenta, bem como vibrações do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça, que causam um deslocamento relativo entre peça e ferramenta, o que conduz a uma modificação do perfil de rugosidade superficial[9],[10].

Além de tudo isto, temos o desgaste da ferramenta que além de modificar o perfil da ponta da ferramenta, influencia o atrito cavaco-ferramenta e peça-ferramenta e a deformação plástica do material, sendo um fenômeno importante a ser considerado no estudo da rugosidade superficial de peças torneadas.

Passar-se-á a seguir a discorrer sobre alguns desses fenômenos que fazem com que a rugosidade superficial real se distancie da rugosidade superficial teórica.

II.4.3.1 - Aresta Postiça de Corte

A aresta postiça de corte é constituída de partículas do material usinado que se acumulam na superfície de saída da ferramenta devido ao forte encruamento a que estas partículas são submetidas durante o processo de usinagem.[4]

Pekelharing [11] realizou um extenso estudo sobre a formação da aresta postiça de corte e concluiu que o fenômeno pode ser dividido em três partes: primeiramente o metal é retardado e comprimido sobre a ferramenta, mas continua seu fluxo através da peça ou do cavaco. Em segundo lugar o metal se junta ao movimento da ferramenta por um espaço de tempo muito curto e então se junta à peça ou ao cavaco como uma escama. Em terceiro lugar o metal depositado na ferramenta, boa parte dele há muito tempo atrás (talvez desde o início do corte), permanece em grande parte preso à ferramenta até o fim do processo de corte. Se o corte termina abruptamente, a maior parte da aresta postiça junta-se às costas do cavaco; se isto acontece gradualmente a maior parte da aresta postiça permanece na ferramenta.

A aresta postiça de corte altera as relações geométricas da formação do cavaco, desempenhando o papel de aresta cortante.

Este fenômeno é bastante dependente da temperatura de corte. Em temperaturas moderadas (baixas velocidades de corte), o metal ao sofrer a deformação inerente ao processo de usinagem, encrua e se deposita sobre a superfície de saída da ferramenta. Em temperaturas maiores (altas velocidades de corte) atinge-se e ultrapassa-se a temperatura de recristalização na região de corte e assim o encruamento de partículas do metal não mais acontece.[4],[12] Uma outra explicação para o desaparecimento da aresta postiça em altas velocidades de corte foi dada por Turley e Doyle [13], que disseram que isto acontece devido à diminuição da força de adesão cavaco-ferramenta produzida pelo aumento do calor gerado por atrito à medida que a velocidade de corte cresce.

Como vimos, parte da aresta postiça de corte ciclicamente se quebra e é levada pelo cavaco ou pela peça já usinada, fazendo com que a superfície da peça ao longo da direção de corte tenha um perfil semelhante à dentes de serra. Além disso, outro efeito prejudicial da aresta postiça no acabamento superficial é o fato dela influenciar também o desgaste frontal, o desgaste em sulcos da ferramenta e o fluxo lateral de cavaco, fenômenos que também

prejudicam a rugosidade superficial da peça e que serão estudados nos próximos itens. [13], [14].

11.4.3.2 - Espessura Mínima de Corte (h_{min}) [6]

Sokolowsky (1955) sugeriu que existe uma espessura de corte mínima (h_{min}) abaixo da qual o cavaco não se formará, ocorrendo ao invés do corte um maior atrito. Esta espessura mínima depende do raio da aresta de corte (ρ), da velocidade de corte e da rigidez do sistema. Medições feitas por Sokolowsky indicam que para $\rho = 12 \mu m$, $v_c = 210 \text{ m/min}$, h_{min} é da ordem de $4 \mu m$. Aplicando esta idéia à aresta de corte secundária de uma ferramenta de torneamento, vê-se que uma pequena porção do material que seria removido é deixado para trás (figura 2.10a). Esta porção deixada para trás foi analisada por Bramertz (1960, 1961) e chamada "Spanzipfel". A figura 2.10b mostra uma vista ampliada do "Spanzipfel" usada por Bramertz para derivar a seguinte expressão para a rugosidade teórica:

$$R_{maxth} = \frac{f^2}{8r} + \frac{h_{min}}{2} \left(1 + \frac{r \cdot h_{min}}{2} \right) \quad (11)$$

O segundo termo desta equação representa a contribuição de "Spanzipfel".

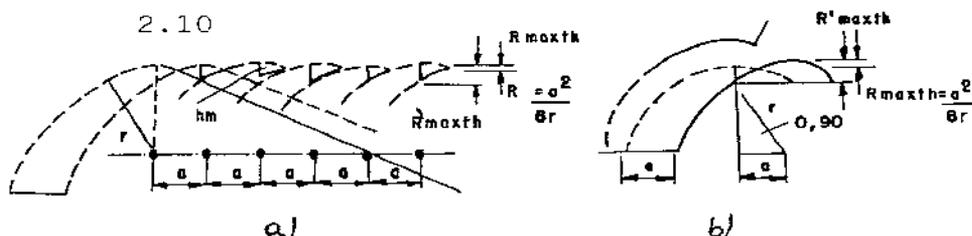


Figura 2.10 - Material deixado na superfície acabada devido à existência de uma espessura mínima de corte (h_m) [6]

11.4.3.3 - Fluxo Lateral do Cavaco

O metal deixado para trás pela aresta secundária de corte é sujeito a uma pressão suficientemente alta para causar o fluxo lateral do metal como mostrado na figura 2.11. A figura 2.11a mostra o perfil da rugosidade na ausência do fluxo lateral, enquanto a figura 2.11b mostra este perfil com fluxo lateral. A rugosidade máxima é maior na presença do fluxo lateral.

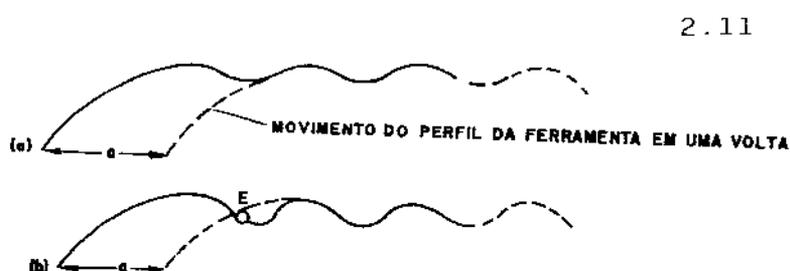


Figura 2.11 - Fluxo Lateral de Cavaco [6]

Sata (1964) estudou a influência do fluxo lateral no acabamento superficial e concluiu que este componente da rugosidade superficial é zero para material frágil, como o latão de corte livre, mas contribui com cerca de $6 \mu\text{m}$ para a rugosidade máxima quando se usina ligas de aço [6].

Pekelharin e Gieszen explicaram o mecanismo da formação do fluxo lateral de cavaco: o metal em frente da superfície de saída da ferramenta é comprimido pela ferramenta que se aproxima e escoia para os lados. Isto faz com que o cavaco formado na zona de cisalhamento do cavaco seja forçado na direção da superfície acabada da peça. A porção do material da peça abaixo da superfície de folga é então empurrada para o lado o que faz com que o fluxo lateral ocorra, piorando o acabamento superficial da peça.

A quantidade de fluxo lateral de cavaco diminui com o aumento da velocidade de corte similarmente ao que acontece com a aresta postiça de corte. Selvam e Radhakrishnan afirmam que a variação na quantidade de fluxo lateral de cavaco em diferentes velocidades de corte é devida à variação do tamanho da aresta postiça de corte [15].

II.4.3.4 - Fenômenos Dinâmicos

A formação do cavaco em um processo de usinagem é um fenômeno periódico [4], o que faz com que as forças de usinagem também sejam cíclicas, causando vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça. Estas vibrações e as deformações plásticas se excitam reciprocamente, assim como a aparição periódica da aresta postiça de corte. A vibração significa uma variação periódica da posição relativa entre ferramenta e peça. Assim, este fenômeno é registrado pela peça que, com uma rugosidade maior, reproduz tais vibrações.[16]

II.4.3.5 - Atrito Cavaco-Ferramenta

Um aumento do coeficiente de atrito (ρ) entre cavaco e ferramenta contribui para a formação da APC, que como já vimos, influi bastante sobre a rugosidade superficial. O atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada provoca aumento da deformação elasto-plástica da peça e desgaste da ferramenta, o que também prejudica o acabamento superficial da peça.

Uma melhora das características de atrito do material da peça pode ser conseguida através da adição de S, Pb e Te. Pode-se também elevar os valores da relação avanço/profundidade de corte e/ou aumentar a velocidade de corte e assim diminuir-se o coeficiente de atrito [17].

II.4.3.6 - Dilatações Térmicas

O aquecimento superficial e sub-superficial da peça, com posterior resfriamento, típicos da usinagem, causam dilatações térmicas diferenciadas entre a superfície e o interior da peça, causando tensões térmicas que prejudicam o acabamento superficial [16]. Além disso, quando a peça está sujeita a muita dilatação térmica, fica difícil a obtenção de tolerâncias apertadas e conseqüentemente, de um bom acabamento superficial.

II.4.3.7 - Deformações Plásticas do Material

A figura 2.12 indica que o grau de recalque (R_c) e R_{max} em função da velocidade de corte tem a mesma forma de crescimento; em particular, R_{max} é máximo onde R_c é máximo, isto é, onde as deformações plásticas são máximas. Este resultado demonstra que a rugosidade superficial é também dependente das deformações plásticas do cavaco [16].

II.4.4 - O Acabamento Superficial e os Desgastes da Ferramenta

A Figura 2.13 mostra esquematicamente as zonas de desgaste de uma ferramenta típica de torneamento e suas respectivas nomenclaturas. Nem todas as zonas de desgaste sempre aparecerão e frequentemente um tipo de desgaste predominará. Existem quatro tipos genéricos de zonas de desgaste [18]:

a) Desgaste frontal - é uma zona de desgaste mais ou menos uniforme na superfície de folga da ferramenta. Quando da usinagem na presença de aresta postiça de corte, é o tipo de desgaste predominante. Mede-se o desgaste frontal através da dimensão V_b mostrada na figura.

b) Desgaste de Cratera - é o desgaste da superfície de saída da ferramenta. Ele aparece principalmente devido às altas tensões de contacto e altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta. Na presença da aresta postiça de corte o desgaste de cratera é

Material da peça: Aço ABNT 1045

$\gamma = 15^\circ$ $\alpha = 8^\circ$ $\chi = 45^\circ$

$f = 0.285$ mm/volta

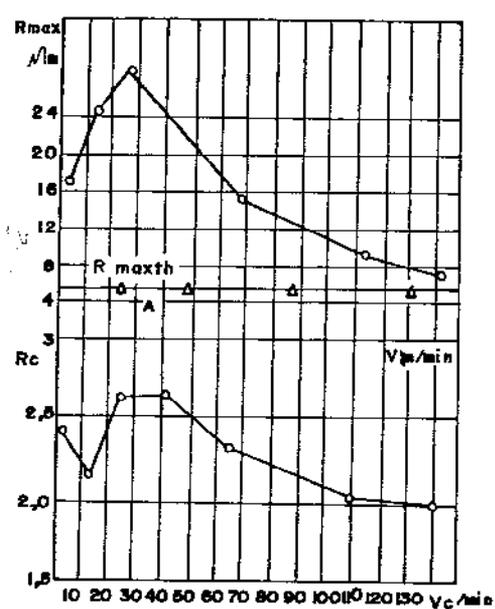


Figura 2.12 - Gráfico do grau de recalque (R_c) e da rugosidade máxima (R_{max}) versus velocidade de corte [16]

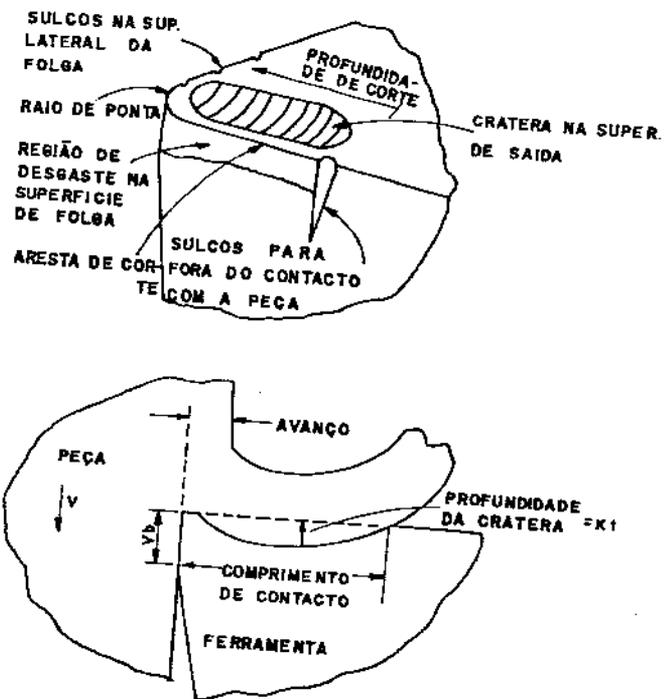


Figura 2.13 - Zonas de desgaste de uma ferramenta [18]

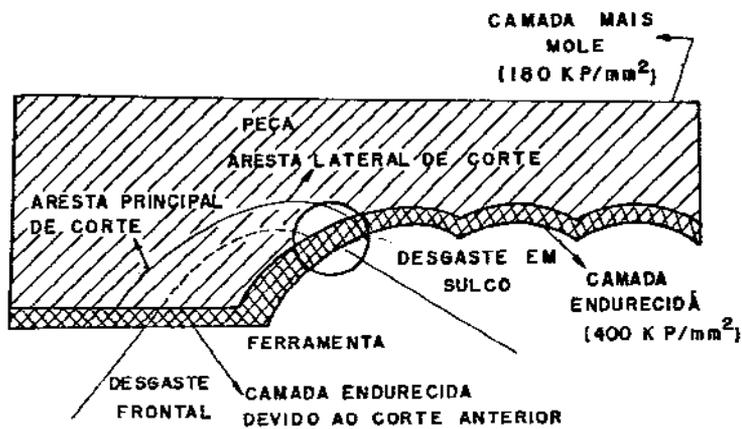


Figura 2.14 - Desgaste em Sulcos [19]

insignificante comparado ao desgaste frontal. A profundidade de cratera (K_t) é geralmente máxima à uma distância substancial da aresta de corte e a curvatura da cratera corresponde ao raio de curvatura do cavaco. Em geral, quando a cratera cresce, ela interceptará o desgaste frontal, causando a quebra do gume cortante.

c) Desgaste da curvatura da ponta e da superfície lateral de folga (desgaste em sulco) - este desgaste é, parcialmente, uma continuação do desgaste frontal em torno do raio de ponta da ferramenta, onde uma série de sulcos normalmente se desenvolvem. Os sulcos são espaçados de uma distância igual ao avanço e tem uma contribuição fundamental para a rugosidade superficial da peça usinada, pois alteram a geometria da ponta da ferramenta.

d) Sulco para fora do diâmetro da peça - é grande comparado com os outros tipos de desgaste mas, por não influenciar a superfície acabada da peça, este sulco não é de fundamental importância para o presente estudo.

Os desgastes da ferramenta são os causadores do aumento da rugosidade superficial a medida que se utiliza uma ferramenta. Os desgastes mais importantes neste aspecto são o desgaste frontal e principalmente o desgaste do raio de ponta e da superfície lateral de folga (desgaste em sulco). Passaremos a discorrer sobre a relação entre estes dois tipos de desgaste e a rugosidade superficial da peça.

a) Desgaste em Sulco - modifica a curvatura da ponta e a afiação da ferramenta e também aumenta o fluxo lateral de cavaco, todos estes, fatores que influenciam o acabamento superficial da peça. Diversos autores estudaram o mecanismo de formação dos sulcos e sugeriram que, estando as arestas do cavaco em um estado plano de tensão, a energia específica de deformação deve ser maior, o que possibilita a formação dos sulcos. Foi observado que este tipo de desgaste acontece rapidamente quando se usina ligas resistentes a altas temperaturas [19]. (figura 2.14)

A formação dos sulcos foi estudada por Pikelharing (1960) e Lambert (1961) que concluíram que eles ocorrem a uma taxa decrescente em velocidades abaixo de 200 m/min. Em velocidades e temperaturas maiores, esta taxa permanece constante. Isto sugere que, para uma rápida formação dos sulcos, o cavaco deve estar

acima da temperatura de recristalização, o que demonstra que a formação dos sulcos não tem nenhuma relação com a aresta postiça de corte[6].

Luk e Scrutton[19] concluíram que a espessura do sulco aumenta quando a relação avanço/profundidade de corte aumenta.

a) Desgaste Frontal - diversos autores propuseram-se a estudar a relação entre a rugosidade superficial e o desgaste frontal (V_b). Sundaram e Lambert[20] depois de diversos experimentos em aço AISI 4140 lançaram o gráfico mostrado na figura 2.15. Este gráfico mostra que existe uma tendência crescente da rugosidade superficial inicialmente, uma tendência decrescente na região intermediária e novamente uma tendência crescente a medida que o desgaste frontal cresce.

Petropoulos[8] ensaiando o aço AISI 1060 lançou o gráfico mostrado na figura 2.16 que relaciona R_{max} , R_a e V_b com o comprimento de corte (l_c). Esta figura mostra que os valores de R_a e R_{max} aumentam progressivamente até um nível de V_b da ordem de 0.2 mm, a partir do que uma flutuação nos valores de rugosidade superficial começa a ser observada, enquanto o desgaste frontal da ferramenta continua crescendo até o momento de sua substituição. Isto demonstra que o desgaste frontal, por si só, não explica o crescimento da rugosidade superficial.

Existe uma hipótese, apontada pelo prof. Nakayama da Universidade de Yokohama (Japão) que afirma que a flutuação da rugosidade com o tempo de corte é devido ao fato que, depois da formação do sulco na aresta secundária, a ponta da ferramenta também se desgasta voltando à sua forma inicial, havendo nova formação do sulco posteriormente para que a rugosidade continue aumentando. [80]

II.4.5 - Influência Das Condições de Usinagem e da Geometria da Ferramenta no Acabamento Superficial

A velocidade de corte e o avanço influenciam fenômenos como a aresta postiça de corte, o fluxo lateral de cavaco, os desgastes da ferramenta e as vibrações do sistema máquina-

Material da peça: Aço ABNT 4140

$r = 0,8 \text{ mm}$ $\gamma = 6^\circ$ $\chi = 75^\circ$

$v_c = 174 \text{ m/min}$ $a_p = 0,53 \text{ mm}$

$f = 0,24 \text{ mm/volta}$

sem fluido de corte

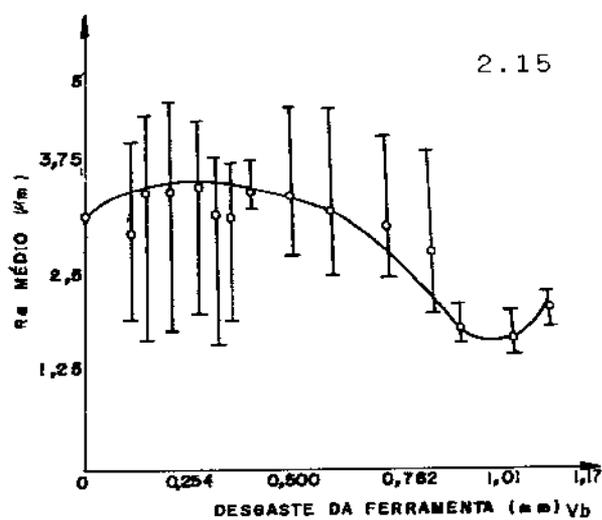


Figura 2.15 - Gráfico da desgaste frontal versus R_a [20]

Material da peça: Aço ABNT 1060

Material da ferramenta: Metal Duro P10

$\gamma = -6^\circ$ $\alpha = 6^\circ$ $\chi = 45^\circ$ $\chi_l = 45^\circ$

$r = 0,8$ mm $f = 0,12$ mm/volta

$a_p = 0,30$ mm $v_c = 190$ m/min

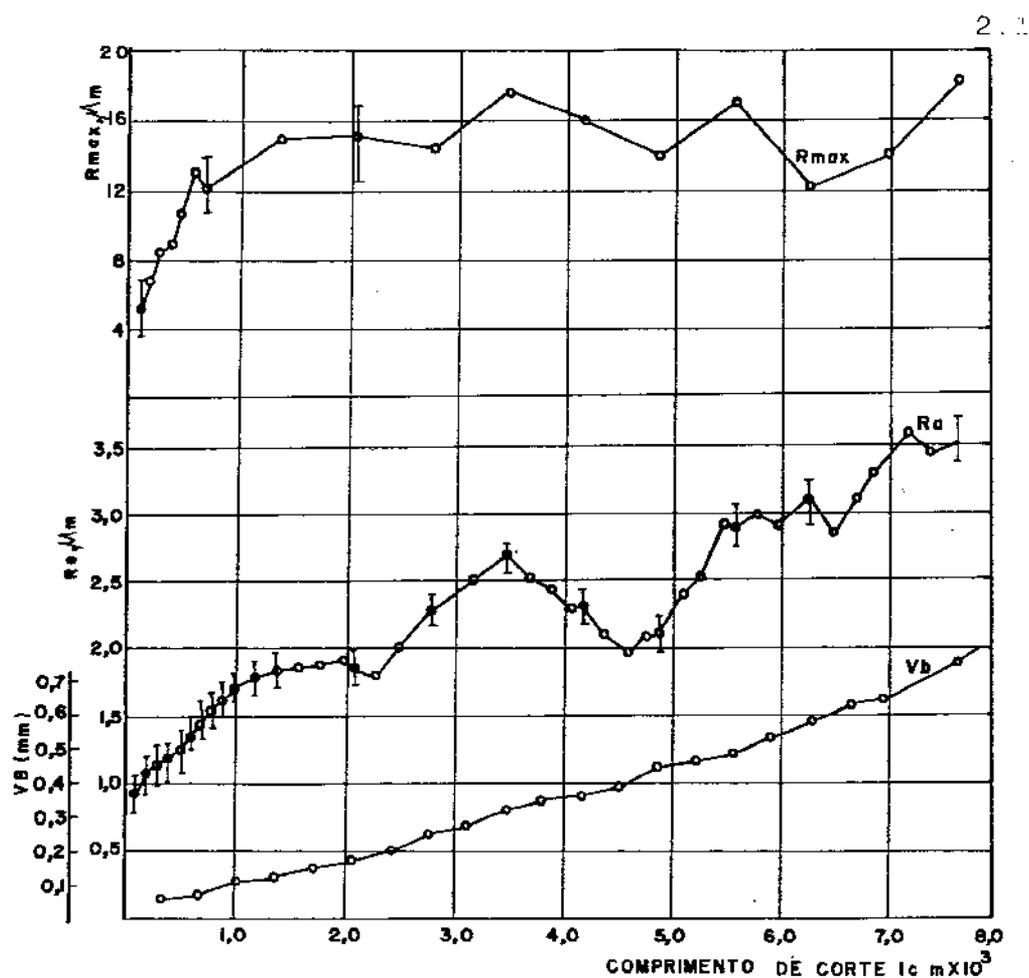


Figura 2.16 - Gráfico do desgaste frontal (V_b), da rugosidade média (R_a) e da rugosidade máxima (R_{max}) X comprimento de corte (l_c) [8]

ferramenta-dispositivo-peça, fenômenos estes causadores da rugosidade superficial da peça[12].

O avanço contribui geometricamente para a formação da rugosidade superficial, como vimos no item 11.4.2.

A figura 2.17[6] mostra valores de R_{max} contra velocidade de corte para diferentes valores de avanço. O acabamento melhora rapidamente com o aumento da velocidade de corte até um ponto em que se estabiliza. A velocidade na qual o acabamento se estabiliza aumenta quando o avanço diminui o que indica que a melhoria do acabamento em baixas velocidades de corte é devido principalmente à perda da APC, que é um fenômeno dependente da temperatura. Quando se diminui o avanço, precisa-se aumentar a velocidade de corte para atingir-se uma mesma temperatura.

Pode ser notado que o melhor acabamento não corresponde ao menor avanço (0.05 mm/volta), mas ao avanço de 0.1 mm/volta. Isto é devido ao fato de que a energia de corte por unidade de volume ou a pressão específica de corte e portanto a tensão média na superfície de saída da ferramenta aumenta rapidamente quando o avanço cai abaixo de 0.1 mm/volta. Isto causará um maior fluxo lateral de cavaco fazendo aumentar a discrepância entre a rugosidade teórica e a rugosidade medida. A diferença percentual entre os valores observados e teóricos aumenta significativamente com a diminuição do avanço. Isto também se deve ao aumento da pressão específica de corte com a diminuição do avanço.[21],[22],[23]

A figura 2.18 mostra valores de R_a correspondentes aos valores de R_{max} da figura 2.17, demonstrando que o comportamento de R_a foi semelhante ao de R_{max} .

Acima da velocidade de corte onde não existe mais a formação da APC a variação de v_c pode causar variação na rugosidade devido às vibrações auto-excitadas do sistema máquina-dispositivo-ferramenta-peça.[24] Além disso, a medida que se aumenta a velocidade de corte cai o coeficiente de atrito entre peça-ferramenta e cavaco-ferramenta, causando uma tendência à diminuição da rugosidade superficial da peça.

A influência da profundidade de corte na rugosidade superficial é desprezível[6], pelo menos dentro do intervalo $0.25 < a_p < 3.5$ mm [21].

A figura 2.19 mostra que o acabamento superficial não é fortemente modificado quando o ângulo de saída varia de -6 a $+6$

Material da peça: Aço ABNT 1045

Material da ferramenta: Metal Duro class P10

$\gamma = 6^\circ$ $r = 0,4 \text{ mm}$ $\chi = 90^\circ$ $\chi_2 = 60^\circ$

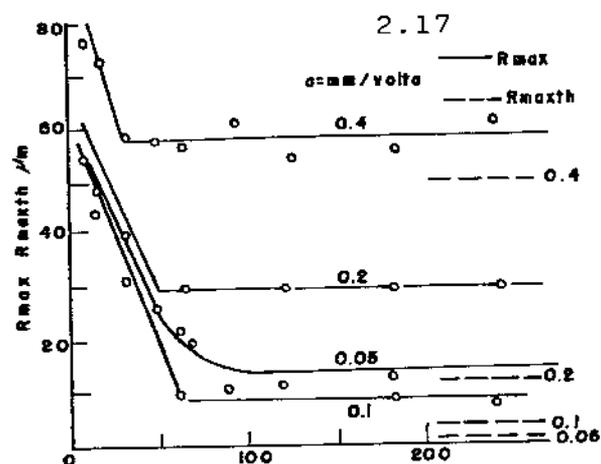


Figura 2.17 - Rugosidade máxima real (Rmax) e teórica (Rmaxth) X velocidade de corte (v_c) [6]

Condições idênticas às da figura 2.17

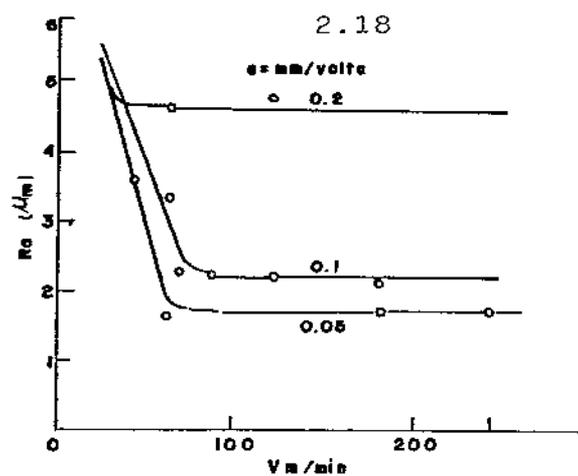


Figura 2.18 - Rugosidade média (Ra) X velocidade de corte (v_c) [6]

graus. O pequeno aumento em R_{max} com a diminuição do ângulo de saída é provavelmente devido a um aumento da tensão na superfície de saída e conseqüentemente um aumento no fluxo lateral ao longo da aresta lateral de corte [6].

A figura 2.20 apresenta a influência dos ângulos de posição (χ) e lateral de posição (χ_l) sobre R_{max} . Esta influência se torna somente apreciável para avanços maiores que 0.25 mm/volta. O ângulo lateral de posição deve ser sempre maior que 2° para evitar que a aresta lateral de corte atrite a peça, prejudicando o acabamento [4]. Como vê-se no item II.4.2, quando o avanço é alto e/ou o ângulo lateral de posição é pequeno, pode-se ter o caso em que a relação a/r sai do intervalo 0 e $2\text{sen } \chi_l$, o que faz com que a equação 5 não seja mais válida.

O fluido de corte tem uma influência indireta sobre o acabamento superficial, pois influencia o atrito cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, a formação da aresta postiça de corte e o desgaste da ferramenta, trazendo como consequência uma melhoria do acabamento superficial da peça. [4]

II.4.6 - Modelos Matemáticos para Previsão da Rugosidade Superficial

Diversos autores desenvolveram [24], [32-40] modelos matemáticos que procuram, baseados nas condições do processo de usinagem, prever os valores da rugosidade superficial da peça.

Alguns dos principais modelos, com seus respectivos autores e condições experimentais em que foram levantados seguem abaixo:

- modelo de Taraman e Lambert [38], [40]

$$R_a = 872,467 v_c^{-0,366} f^{1,258} a_p^{0,185}$$

Material ensaiado: aço SAE 1018 $r = 0.8$ mm

Ferramenta de metal duro sem cobertura

- modelo de Bhattacharyya, Gonzáles e Ham [34]

$$R_a = 3,14 \cdot 10^8 f^{1,004} v_c^{-1,52} HE^{0,323} (90-\chi)^{0,35} r^{0,714}$$

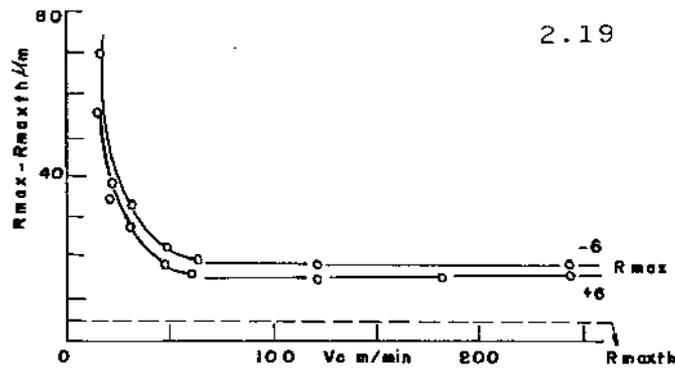


Figura 2.19 - Influência do ângulo de sada na rugosidade superficial [4]

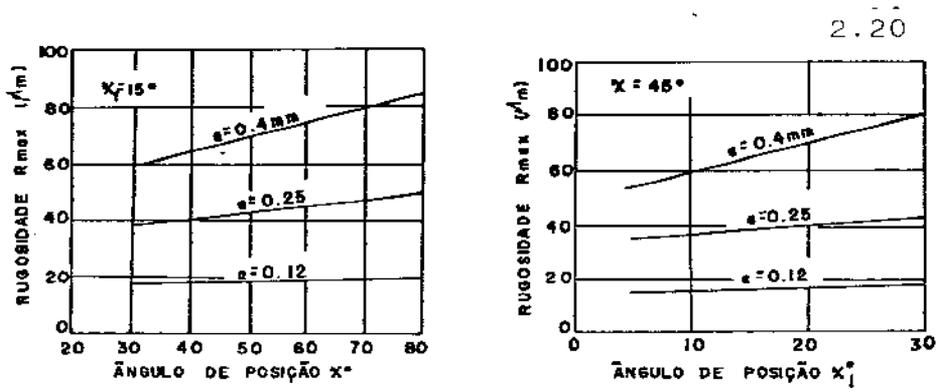


Figura 2.20 - Influência do ângulo de posição (χ) e do ângulo lateral de posição (χ_l) na rugosidade superficial [4]

Chegarão a este modelo juntando contribuições de outras publicações

- modelo de Nassirpour e Wu [33]

$$Ra = 55,98 f^{0,84} \bar{r}^{0,85} v_c^{0,32}$$

material ensaiado: aço SAE 1020 a = 0.508 mm
ferramenta de metal duro sem cobertura

- modelo de Sundaram e Lambert [24],[32]

$$Rq = 2,3528 \cdot 10^{13} v_c^{-1,4887} f^{3,4015} a_p^{0,1293} t_c^{0,0274} \quad \text{para } r = 0.4 \text{ mm}$$

$$Rq = 9,256 \cdot 10^6 v_c^{-0,307} f^{2,3435} a_p^{0,1813} t_c^{0,659} \quad \text{para } r = 0.8 \text{ mm}$$

material ensaiado: aço SAE 4140
ferramenta: pastilhas recobertas com TiC

- modelo de Hasegawa, Seireg e Lindberg [39]

$$R_{max} = 624,2432 v_c^{-0,4949} f^{0,8129} a_p^{0,0335} \bar{r}^{0,4680}$$

material ensaiado: aço SAE 1020

- modelos de Banerjee [65]

$$Ra = m \log v_c + C1$$

$$Ra = m \log F_c + C4$$

$$Ra = m \log \left[\frac{f \cdot \cos(C - 2\phi)}{1 - \cos 2\phi} \right] + C5$$

onde m, C1, C4 e C são constantes do material

materiais ensaiados: aço AISI 1116 e 1020

- modelos de Mukherjee e Basu [71]

$$\text{material EN 8} - Ra = 18.92f^{0.53} tc^{0.23} v_c^{0.23} a_p^{-0.19}$$

$$\text{material EN 24} - Ra = 26.92f^{0.72} tc^{0.12} v_c^{0.29} a_p^{-0.15}$$

$$\text{material EN 58B} - Ra = 34.67f^{0.87} tc^{0.09} v_c^{0.29} a_p^{-0.15}$$

$$\text{material latão} - Ra = 23.66f^{0.79} tc^{0.01} v_c^{0.05} a_p^{-0.04}$$

$$\text{material alumínio} - Ra = 33.11f^{0.82} tc^{0.07} v_c^{0.35} a_p^{-0.34}$$

- modelos de Niktal e Mehta [73]

material ferro fundido dúctil

$$Ra = -3.18 + 0.012v_c + 3.12r + 32.3f - 0.013rv_c - 16.92fr$$

material aço 10L45

$$Ra = -0.058 + 13.97a_p - 0.013frv_c$$

material liga de alumínio 390

$$Ra = -1.59 + 1.67r + 30.05f - 10.57fr - 0.028frv_c$$

material aço 4130

$$Ra = -114.70 - 118.48f + 0.01fv_c - 0.003rv_c + 0.52\exp(r) + 116.13\exp(f) - 0.053/f$$

material Inconel 718

$$Ra = -15.11 - 5.06r + 1.57fv_c + 19.62fr - 0.95frv_c - 7.61\log(f) + 1.49\exp(r) - 0.36/f$$

modelo que representa a influência dos parâmetros na rugosidade dos materiais ferro fundido dúctil, aço 10L45 e aço 4130

$$Ra = -69.16 - 2.59r - 57.92f - 14.04fr - 0.013Mfv_c + \\ 0.007Mfrv_c - 0.374\log(v_c) + 0.91\exp(r) + 72.08\exp(f)$$

onde: M = 1 para o ferro fundido dúctil
 M = 2 para o aço 10L45
 M = 3 para o aço 4130

- modelo de Santa [76]

material Aço AISI 1045 com ferramenta ISO P10

$$Ra = 205.53f^{1.19} \cdot v_c^{-0.44} \cdot a_p^{-0.185}$$

Analisando estes modelos, pode-se verificar que:

- a) a comparação de um modelo com outros é prejudicada, pois todos foram levantados em condições experimentais diferentes;
- b) comparados com os modelos teóricos de rugosidade superficial, quais sejam,

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r} \qquad Ra = \frac{f^2}{31.3r}$$

vê-se que, em todos os modelos, à exceção dos modelos de Sundaram e Lambert, a influência do avanço é menor que no modelo teórico, pois o expoente a que ele é elevado é menor que 2. O mesmo acontece com o raio de ponta da ferramenta, onde os expoentes dos modelos experimentais estão sempre entre 0 e -1, fazendo com que o raio de ponta tenha uma influência menor do que aquela sugerida pelo modelo teórico. Isto concorda com o que foi dito no item II.4.5, onde se disse que a medida que o avanço cresce, a rugosidade superficial real se aproxima da teórica. Nos modelos de Mital e Mehta este tipo de análise fica prejudicada devido ao tipo de modelo.

c) de um modo geral, exceto para os modelos de Santa e de Mukherjee e Basu para o caso da profundidade de corte, tem-se que o avanço e a profundidade de corte têm uma influência positiva sobre a rugosidade superficial, isto é, quando eles crescem a rugosidade aumenta, enquanto a velocidade de corte, o ângulo de

posição, o raio de ponta e a dureza Brinell do material tem uma influência negativa sobre a rugosidade superficial. Além disso, vê-se que dentre os fatores colocados nos modelos, o avanço é o que mais influencia na rugosidade, vindo depois na sequência o raio de ponta, a velocidade de corte e, por último, a profundidade de corte. Vê-se, olhando-se para os expoentes da profundidade de corte, que sua influência na rugosidade superficial é pequena, concordando também com o item 11.4.5. A exceção a isto são os modelos de Mukherjee e Basu, além da profundidade de corte ter uma influência negativa na rugosidade, esta influência não é desprezível, pois o expoente de a_p chega a ser até 0.42, o que diminui a rugosidade em 34% quando se dobra a profundidade de corte.

Nos trabalhos de Taraman e Lambert [38], [40] e de Sundaram e Lambert [24], [32] foram também desenvolvidos modelos de segunda ordem, mais precisos quando comparados com os modelos de primeira ordem citados acima. Estes mesmos autores utilizaram em seus projetos experimentais uma metodologia estatística chamada Superfícies de Resposta. Esta metodologia reduz bastante o número de experimentos necessários, diminuindo assim os custos experimentais e permitindo a confecção de tais modelos até em ambientes industriais. Ela foi desenvolvida por Box e Wilson [44], [45] na obtenção de condições ótimas em pesquisas na área química e foi utilizada por Wu [41], [42] em experiências sobre vida de ferramentas de usinagem e por Wu e Meyer [43] em pesquisas sobre temperatura de ferramentas de corte.

11.5 - Resumo do Capítulo

Muito já se comentou sobre a formação da rugosidade no processo de torneamento em baixas velocidades de corte, onde se tem a formação da aresta postiça de corte ou em velocidades pouco acima destas. Fenômenos como aresta postiça de corte e fluxo lateral de cavaco, típicos desta faixa de velocidade de corte, são amplamente comentados na literatura.

Já em velocidades de corte mais altas, onde os fenômenos dinâmicos e os desgastes da ferramenta passam a ter um papel

preponderante na formação da rugosidade, ainda existe uma lacuna no conhecimento da questão e um estudo mais profundo sobre a influência da velocidade de corte na rugosidade superficial nestas faixas de velocidade se faz necessário. Este trabalho tenta iniciar um estudo nesta direção.

Outro tópico passível de maior análise, já que a literatura consultada ainda não esgotou o assunto, é a formação dos desgastes em sulco da ferramenta que, como já foi visto, é fator fundamental na formação da rugosidade.

Quanto aos modelos matemáticos para previsão da rugosidade superficial, necessita-se ainda de um estudo probabilístico sobre este tema, para se comprovar a viabilidade de sua utilização. Este trabalho também contribui em alguma coisa para se trilhar este caminho.

CAPITULO III

VIDA DA FERRAMENTA: CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA, MODELOS MATEMATICOS, RUGOSIDADE SUPERFICIAL COMO CRITÉRIO DE FIM DE VIDA

Vida de uma ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Logo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas afiações sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente.[4] Em alguns processos de usinagem, como a furação, é mais prático definir-se vida da ferramenta, não utilizando o tempo de trabalho efetivo da ferramenta, mas o comprimento de avanço total usinado entre duas afiações ou substituições sucessivas da ferramenta[47]

O fim da vida da ferramenta ocorre quando a mesma não desempenha mais as funções a que ela se destina, enquanto a falha total da ferramenta acontece quando há uma completa destruição da aresta de corte devido ao crescimento dos desgastes ou à uma avaria da ferramenta (quebra, trinca, etc.).[25]

Assim a ferramenta deve ser retirada da máquina quando:

a) os desgastes atingem proporções tão elevadas que se receia uma quebra da aresta cortante;

b) os desgastes chegam a valores em que a temperatura do gume cortante (proveniente em grande parte do atrito da ferramenta com o cavaco e com a peça) se aproxima da temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte;

c) devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça;

d) o acabamento superficial da peça usinada não é mais satisfatório;

e) o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.[4],[26]

Henriquez, M.H.C. e Ferraresi, D. [27] estudaram a relação entre o desgaste frontal e os esforços de usinagem na furação com brocas helicoidais e concluíram que quando o desgaste frontal chega a valores da ordem de 0,6 mm a força de avanço é cerca de 22% maior que seu valor inicial (no início da vida da ferramenta) e o momento torsor cerca de 30% maior. Deste modo, pode-se, segundo estes autores, determinar um certo percentual de elevação dos valores de esforços de corte permitido antes de se atingir o valor estabelecido para o fim da vida da ferramenta.

Vilella, R.C. e Cupini, N.L. [28] quando do estudo para elaboração de uma metodologia para otimização das condições de usinagem em operações de torneamento determinaram que o fim da vida da ferramenta em operações de desbaste dar-se-ia quando da quebra ou lascamento da ferramenta e em operações de acabamento quando o processo não conseguisse mais segurar a dimensão desejada ou quando a rugosidade superficial ultrapassasse um valor estabelecido ou ainda quando houvesse quebra ou lascamento da ferramenta. Os mesmos autores experimentaram um procedimento para obtenção da velocidade de máxima produção em condições de fábrica, procedimento este que será, posteriormente utilizado neste trabalho

Normalmente em operações de torneamento em acabamento, os desgastes da ferramenta não chegam a níveis em que se receia a quebra do gume cortante e nem causa a elevação acentuada das forças de usinagem. Por isso, nestas operações, somente os itens c e d citados acima devem ser levados em consideração, sendo que quando o desgaste da ferramenta começa a fazer com que as dimensões da peça saiam da faixa de tolerância exigida, existe ainda a possibilidade da correção da posição da ferramenta para que a usinagem retorne às dimensões desejadas. Assim, o acabamento superficial da peça usinada pode ser um critério adequado para a substituição da ferramenta em operações de torneamento em acabamento. A dificuldade de utilização deste critério reside no fato de se estabelecer, ao lado da máquina na fábrica, o momento em que a peça chegou ao nível de rugosidade permitido (rugosidade limite).

Isto pode ser feito dos seguintes modos:

- a) através do sensoreamento da rugosidade;
- b) através da comparação da rugosidade da peça com um padrão que possua a rugosidade limite, feita pelo operador;

c) através da determinação prévia do número de peças usinadas até se atingir a rugosidade limite.

O item a, apesar de mais preciso, é de pouca viabilidade, pelo menos no estágio atual da indústria brasileira, devido ao seu custo.

O item b foi testado por Yamamoto K.[29] utilizando 50 engenheiros mecânicos sem experiência nenhuma neste tipo de trabalho. A comparação foi feita através do tato dos engenheiros que passaram seus dedos na peça a ser testada e no padrão. Yamamoto concluiu ser este método de razoável precisão, a medida em que as pessoas que façam a comparação adquiram experiência neste tipo de trabalho.

Para a utilização da metodologia citada no item c necessita-se fazer uma verificação da dispersão da rugosidade a medida que a ferramenta se desgasta, isto é, necessita-se saber se o número de peças usinadas pela ferramenta de acabamento até se atingir a rugosidade limite apresenta uma dispersão pequena a medida que se substitui a ferramenta. Este trabalho testa este procedimento em detalhes.

III.1 - Dispersão da Rugosidade Superficial Obtida em Operações de Torneamento

Como vimos no item II.4.4 a rugosidade superficial de peças usinadas cresce a medida que a ferramenta vai sendo utilizada devido ao crescimento dos desgastes em sulco e frontal. (figura 2.16)

Mesmo mantendo-se constante o desgaste da ferramenta os valores de rugosidade superficial obtidos na usinagem com condições de corte, ferramenta, peça, dispositivo de fixação e fluido de corte determinados, variam com uma considerável dispersão, devido a fatores tais como: a) acaso; b) rigidez e estabilidade do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça; c) fatores associados à aresta postiça de corte e fluxo lateral de cavaco; d) variação das propriedades da ferramenta e do material da peça.[8]

Petropoulos [8] pesquisou a distribuição da rugosidade superficial (R_a e R_{max}) para diversos níveis de desgaste frontal e concluiu que sua variação se aproxima da distribuição normal.

Olsen (1965) citado por Sundaram e Lambert [20] foi o primeiro pesquisador a concluir que os valores da rugosidade superficial em torneamento de acabamento seguem uma distribuição normal. A essa conclusão também chegaram os pesquisadores Rakhit, Sankar e Osman [30].

Selvam e Balakrishnan [31] estudaram a influência da velocidade de corte, avanço e ângulo de saída na aleatoriedade do acabamento superficial e concluíram:

- Em baixas velocidades de corte a rugosidade superficial é mais aleatória que em velocidades mais altas, por causa da presença da aresta postiça de corte e do fluxo lateral de cavaco;

- Em avanços da ordem de 0.2 - 0.4 mm/volta o perfil da rugosidade é mais aleatório que em outras faixas de avanço por causa também da presença da APC e do fluxo lateral de cavaco. Em avanços maiores, as marcas do avanço na peça são predominantes havendo uma maior periodicidade no perfil de rugosidade.

- O perfil da rugosidade é mais aleatório quando se usina com ângulos de saída negativos do que com ângulos de saída positivos.

Uma hipótese aventada por especialistas na reunião do "Machining Committee of the Japan Society of Precision Engineering" - Tokyo - Japão - 1988, afirma que quando se trabalha em velocidades de corte muito altas a aleatoriedade do valor da rugosidade cresce devido aos altos níveis de temperatura da região de corte que incentivam fenômenos aleatórios com influência no desgaste da ferramenta.

III.2 - Modelos Matemáticos para Vida de Ferramenta

Existem premiados na literatura dois tipos de modelos para a estimativa da vida da ferramenta em função dos parâmetros de usinagem. Do primeiro tipo constam os modelos deterministas, que levam em conta a vida média da ferramenta, podendo ou não estarem acompanhados do intervalo de validade do modelo dentro de uma determinada porcentagem de confiança. De um segundo tipo constam

os chamados modelos probabilistas, onde o que é calculado é a função densidade de probabilidade ou a função cumulativa da distribuição da vida da ferramenta.

O primeiro pesquisador a apresentar um modelo determinista de estimativa da vida da ferramenta foi F.W. Taylor [47] no início da século, estabelecendo a conhecida equação de Taylor:

$$K = T \cdot v_c^x$$

que pode também ter a seguinte forma:

$$v_c \cdot T^y = C$$

Existe também a equação expandida de Taylor, que tem a seguinte forma [48]:

$$v_c = C \cdot f^E \cdot a^F \cdot T^G \cdot v_b^H$$

Wu [41] desenvolveu um modelo semelhante à equação expandida de Taylor, qual seja:

$$v_c \cdot T^{0,44} \cdot f^{0,19} \cdot a_p^{0,11} = e^{6,96}$$

O mesmo Wu [42] desenvolveu um modelo de segunda ordem para a vida da ferramenta, qual seja:

$$\hat{y} = 4.295 - 0.744x_1 - 0.180x_2 - 0.1x_3 - 0.065x_2^2 - 0.02x_2^2 + 0.025x_3^2 - 0.081x_1 \cdot x_2 - 0.026x_1 \cdot x_3 - 0.094x_2 \cdot x_3$$

onde: $y = \ln T$

$$x_1 = \frac{2(\ln v_c - \ln 700)}{\ln 770 - \ln 330} + 1$$

$$x_2 = \frac{2(\ln f - \ln 0.022)}{\ln 0.022 - \ln 0.01} + 1$$

$$x_3 = \frac{2(\ln a_p - \ln 0.100)}{\ln 0.100 - \ln 0.049} + 1$$

Woxen [49] em 1932, apresentou uma expressão que melhor representava seus resultados experimentais, os quais apresentavam uma relação entre T e v não exponencial. A equação de Woxen segue abaixo:

$$v_c = \left(\frac{T^*}{T}\right) + C1 \cdot T \cdot Cw \cdot \frac{q + q_0 \cdot T}{1 + cw \cdot q}$$

Kronenberg [49] em 1954, desenvolveu uma nova equação utilizando a relação a_p/f :

$$v_c = \left(\frac{T^*}{T}\right) \cdot Ck \cdot \frac{(a_p/f)^Y \cdot (90 - \chi)}{(f \cdot a_p) \cdot (90 - \chi)}$$

Colding, em 1960 e Konig-Depiereux [49] em 1969 publicaram, como Woxen, relações não exponenciais entre v e T que são mostradas nas equações abaixo:

$$k + a \cdot x + b \cdot x^2 + c \cdot y + d \cdot y^2 - z + e \cdot z^2 = 0$$

onde $x = \ln q$

$y = \ln v$

$z = \ln T$

$$T = \exp \left[\frac{-Kv \cdot v_c^m}{m} \cdot \frac{is \cdot f^n}{m} \right] + C$$

Dependendo do critério de fim de vida utilizado tem-se uma forma diferente da curva vida (T) x velocidade de corte (v_c), como mostra a figura 3.1.

Percebe-se nos procedimentos experimentais que as curvas de vida não são exponenciais, o que mostra que as relações de Colding e Konig-Depiereux representam mais fielmente os resultados experimentais. Isto leva à conclusão que a Equação de Taylor ou sua versão expandida, embora sejam importantes, devem ser utilizadas com cuidado na prática industrial. [49]

O fato da curva de vida da ferramenta não ser realmente exponencial levou à utilização do Intervalo de Validade da

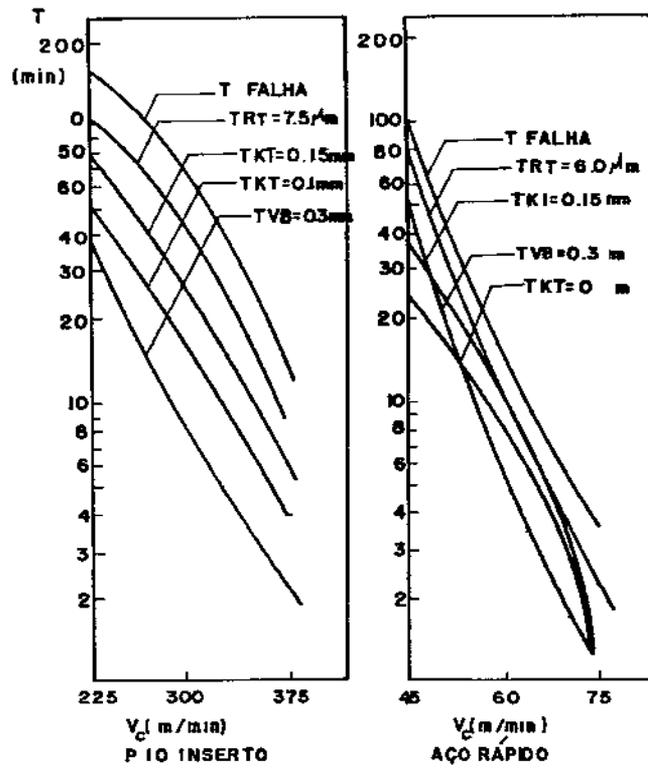


Figura 3.1 - Curvas de Vida de ferramentas segundo diversos critérios de fim de vida [28]

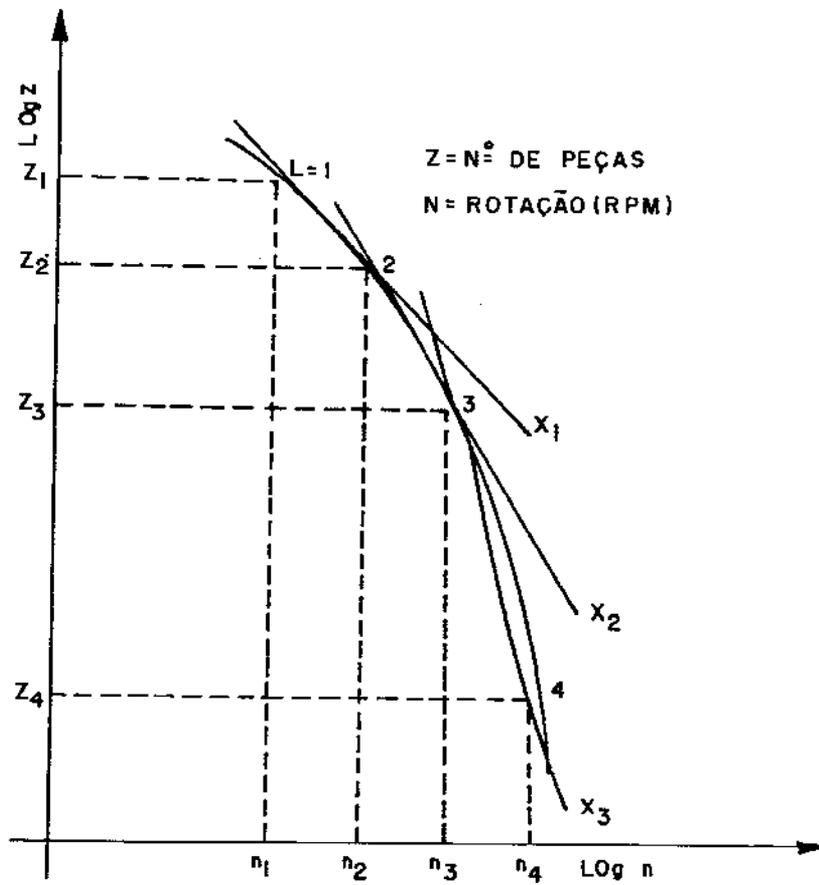


Figura 3.2 - Representação dos Intervalos de Validade da Equação de Taylor [50]

Equação de Taylor, ou seja, a aproximação da curva de vida por uma série de retas. (figura 3.2)[50]

Um outro problema na utilização destes modelos deterministas é a variabilidade da vida da ferramenta. Diversos autores estudaram esta variação. Ramalingam e Watson concluíram que, quando o fim da vida da ferramenta é causado pela quebra da aresta de corte, a vida da ferramenta tem uma distribuição do tipo Weibull [51] e quando é causada por um desgaste progressivo da aresta de corte tem-se uma distribuição do tipo log-normal. [51],[52] Wager e Barash [54] estudaram a distribuição da vida de ferramentas de torneamento de aço rápido e concluíram que sua distribuição é normal com um coeficiente de variação (desvio padrão/média) da ordem de 0.3. Zompi [54] sugere que a distribuição da vida da ferramenta deva ser do tipo normal ou log-normal.

Diversos fatores são responsáveis pela variabilidade da vida das ferramentas, tais como dureza, estrutura e heterogeneidades do material da peça, heterogeneidades da ferramenta e efeito termoelétrico no par ferramenta-peça [53],[55],[56],[57]. Nenhum destes fatores citados pode ser considerado isoladamente como responsável pela variação da vida em uma dada operação de usinagem, e sim, a dispersão total é a soma das pequenas contribuições de cada um destes fatores.[53]

Dada esta natureza estocástica, diversos autores procuraram desenvolver algum tipo de análise estatística das equações até então utilizadas. A figura 3.3 mostra a interpretação gráfica de uma abordagem estatística da equação de Taylor.

Levi e Rosseto [58] determinaram a confiabilidade da Equação de Taylor dentro de um certo intervalo e concluíram que, para se ter uma resposta confiável é necessário um número de experiências muito alto, o que muitas vezes inviabiliza este procedimento.

Devido a esta dispersão na vida da ferramenta de usinagem, vários pesquisadores desenvolveram modelos probabilistas para a vida da ferramenta, dentre eles: Rosseto e Levi [59], Ramalingam e Watson [51],[52], Pandit [60], Sheikh et alli [61], Zdeblick [62], Sekulic [63], Billatos et alli [64]. A obtenção da frequência de distribuição da vida da ferramenta, fator necessário para a determinação dos modelos probabilistas, é um procedimento que demanda uma quantidade elevada de experimentos em condições controladas de laboratório, o que o encarece muito.

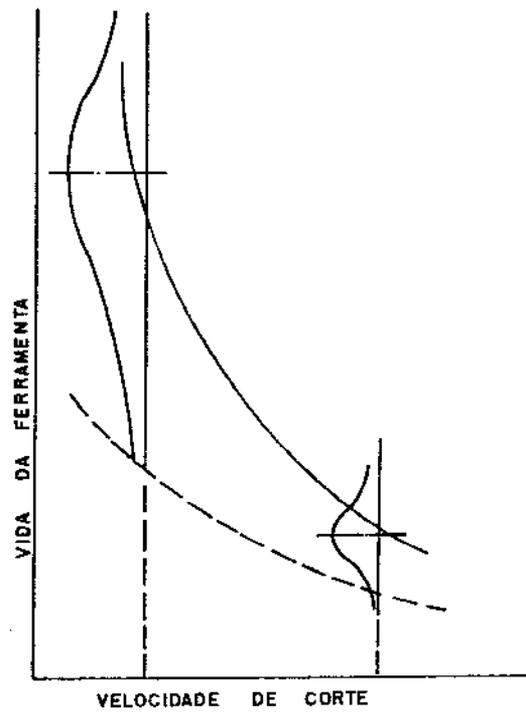


Figura 3.3 - Representação de uma abordagem estatística da Equação de Taylor [28]

Levi e Rosseto em um trabalho já citado [58], concluem que, uma razoável linha de ação para o estabelecimento de condições de usinagem baseado em uma estimativa da vida da ferramenta dada por algum modelo matemático, seria a utilização das equações existentes para se chegar a condições de usinagem iniciais, mesmo que elas não sejam muito confiáveis e então deixar a operação falar por si própria, ajustando-se as condições de usinagem a medida que se for tomando conhecimento sobre a operação em questão.

Em todos estes modelos já elaborados, o critério de fim de vida da ferramenta foi o desgaste, faltando ainda um estudo mais sistemático da distribuição da vida da ferramenta utilizando-se a rugosidade superficial da peça como um critério para o estabelecimento do momento de substituição da ferramenta.

III.3 - Resumo do Capítulo

Da literatura consultada pode-se concluir que a vida da ferramenta baseada no critério de desgaste da ferramenta é um fenômeno aleatório. A formação da rugosidade superficial no processo de torneamento também apresenta alguma dispersão e, conseqüentemente a vida da ferramenta baseada na rugosidade superficial da peça usinada como critério de fim de vida também é um fenômeno aleatório.

A maneira ideal de se contornar estes problemas e fixar precisamente o momento de troca da ferramenta é pela via do sensoriamento na máquina-ferramenta, que poderia vir acompanhado de um sistema inteligente de controle adaptativo, o qual não somente decidiria pelo momento de troca da ferramenta, mas também otimizaria o processo em tempo real, isto é, poderia alterar as condições de usinagem a medida que as condições de contorno do processo (material da peça, fixação, ferramenta, etc.) trouxessem alguma alteração na resposta esperada do processo (rugosidade da peça, desgaste da ferramenta, esforços de corte, etc.). Este procedimento no entanto ainda não é viável nem econômica, nem tecnicamente pelo menos em termos de Brasil.

Quando se utiliza a rugosidade superficial da peça como critério de fim de vida da ferramenta, as opções a este

procedimento que já foram citadas no capítulo, tais como a comparação da rugosidade da peça com um padrão que possua a rugosidade limite realizada pelo operador e a determinação prévia do número de peças usinadas até se atingir a rugosidade limite são procedimentos cuja viabilidade deve ser testada e este trabalho caminha nesta direção.

CAPITULO IV

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

IV.1 - Material

O material ensaiado foi o aço laminado ABNT 1045, com a composição química citada a seguir:

C = 0.47%
Si = 0.26%
Mn = 0.73% (porcentagem em peso)
P = 0.022%
S = 0.007%

Todos os corpos de prova foram obtidos a partir de uma mesma corrida de fabricação.

A tabela 4.1 mostra os valores de diversas medidas de dureza realizadas em 17 amostras retiradas aleatoriamente do lote de aço. Verifica-se nesta tabela bastante homogeneidade nos valores de dureza. A medição da dureza foi realizada em diversos pontos do raio da peça. P1 representa o ponto mais central nesta tabela e P6 o ponto mais periférico de medição.

Realizaram-se ensaios micrográficos e de tração para caracterização do material. O ensaio de tração seguiu a norma ABNT NBR 6152/80 [66]. Os resultados dos ensaios de tração estão mostrados abaixo:

Limite de Escoamento a 0.2%	= 406 N/mm
Limite de Resistência	= 715 N/mm
Alongamento	= 24%
Estricção	= 47%

As figuras 4.1 a 4.4 mostram os resultados das micrografias realizadas, tanto em um corte transversal, quanto em um corte

Tabela 4.1 - Medidas de Dureza Brinell

esfera = 2.5 mm carga = 187.5 Kp

Amostra	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	198	202	202	207	207	215
2	207	211	215	224	224	219
3	211	215	215	224	224	229
4	202	202	207	215	211	207
5	219	219	224	224	219	219
6	202	215	219	219	215	224
7	211	207	211	207	215	219
8	215	215	211	211	215	215
9	211	215	215	219	219	224
10	207	202	211	211	211	211
11	207	211	211	215	219	219
12	202	207	211	211	215	215
13	207	211	211	207	207	207
14	198	202	202	207	211	211
15	202	198	211	215	215	219
16	224	224	219	217	217	213
17	207	211	215	219	219	219
\bar{x}	207.6	209.8	212.4	214.8	215.5	216.8
σ	7.07	7.06	5.63	6.16	5.01	5.94
σ/\bar{x}	0.034	0.034	0.026	0.028	0.023	0.027

longitudinal da barra sem ataque químico e com ataque eletrolítico. O tamanho dos grãos foram:

Corte Transversal = 5 a 6 (ASTM)

Corte Longitudinal = 5 a 6 (ASTM)

IV.2 - Ensaaios de Torneamento

Os ensaios de torneamento foram divididos em quatro partes:

a) Ensaaios Iniciais realizados com a ferramenta KNUX;

b) Ensaaios realizados com a ferramenta TPGR, com $f = 0.2$ mm/volta e $a_p = 0.6$ mm;

c) Ensaaios para a localização da faixa de avanço e profundidade de corte onde se tem uma boa quebra de cavaco para a ferramenta TPGR;

d) Ensaaios realizados com a ferramenta TPGR, com $f = 0.25$ mm/volta e $a_p = 0.7$ mm.

As medições da rugosidade superficial das peças torneadas foram realizadas em um rugosímetro PERTH-O-METER utilizando-se um comprimento de amostragem de 5 mm (figura 4.5). As operações de torneamento foram realizadas em um torno CNC de 30 HP de potência (figuras 4.6 e 4.7). Os desgastes das ferramentas foram medidos em um microscópio Carl Zeiss 100/50 (figura 4.8).

As fotos das ferramentas encontradas no capítulo V foram tiradas em um microscópio eletrônico de varredura, com ampliação de 60 a 65 vezes.

a) Ensaaios com a Ferramenta KNUX

A figura 4.9 mostra um esquema dos corpos de prova utilizados nestes ensaios. A rugosidade superficial (R_a e R_{max}) foram medidas aproximadamente na metade do comprimento das peças e em três posições a 120° , uma da outra (figura 4.9).

A ferramenta utilizada foi uma pastilha de metal duro que segundo a norma ABNT tem a seguinte classificação [77], [78]:

KNUX 160410R11 classe P10

Porta-ferramenta CKJNR 2525 H16

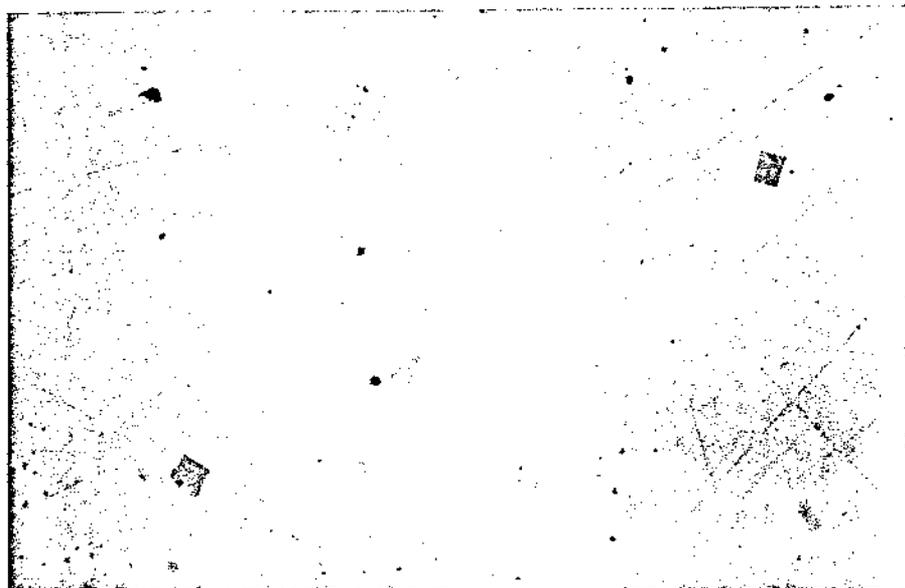


Figura 4.1 - Corte transversal da amostra sem ataque químico
Ampliação - 300 vezes

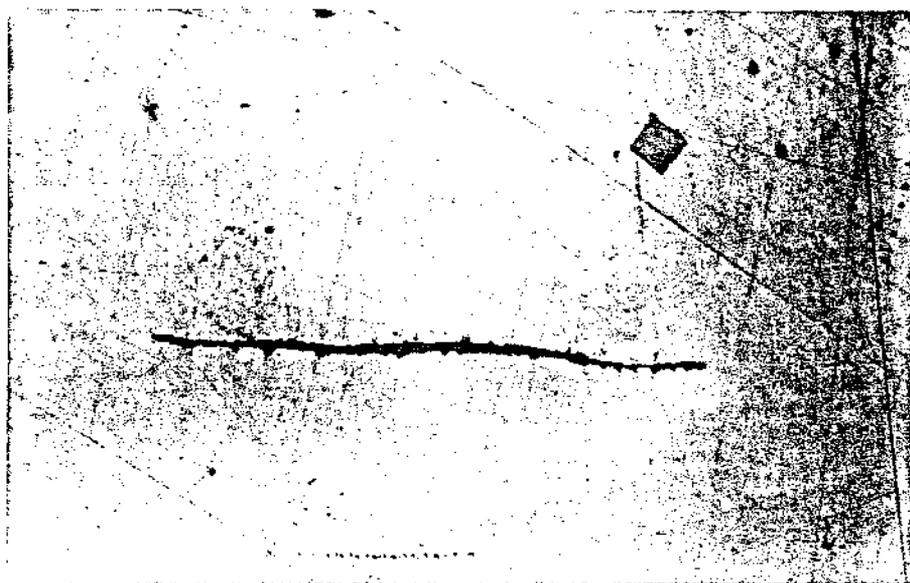


Figura 4.2 - Corte longitudinal da amostra sem ataque químico - Ampliação - 300 vezes

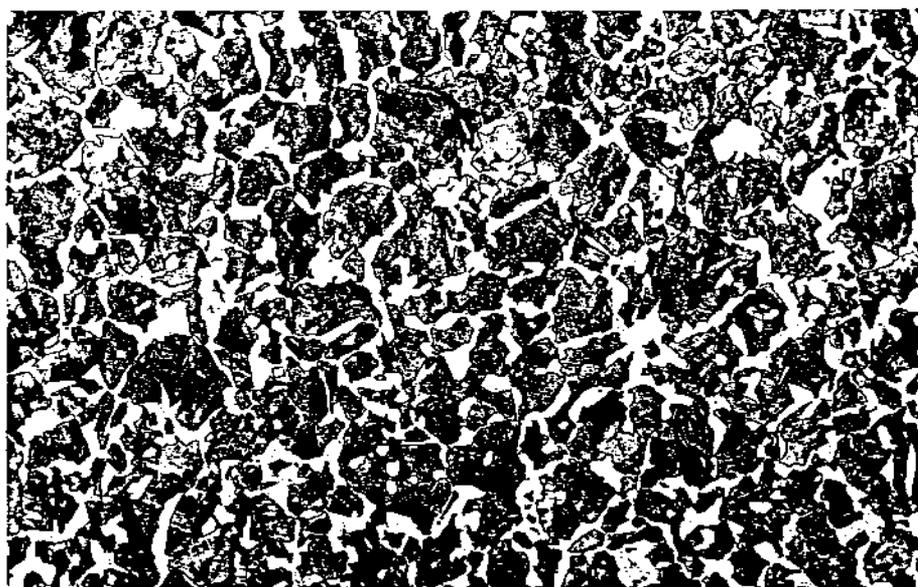


Figura 4.3 - Corte transversal da amostra com ataque eletrolítico - Ampliação - 100 vezes

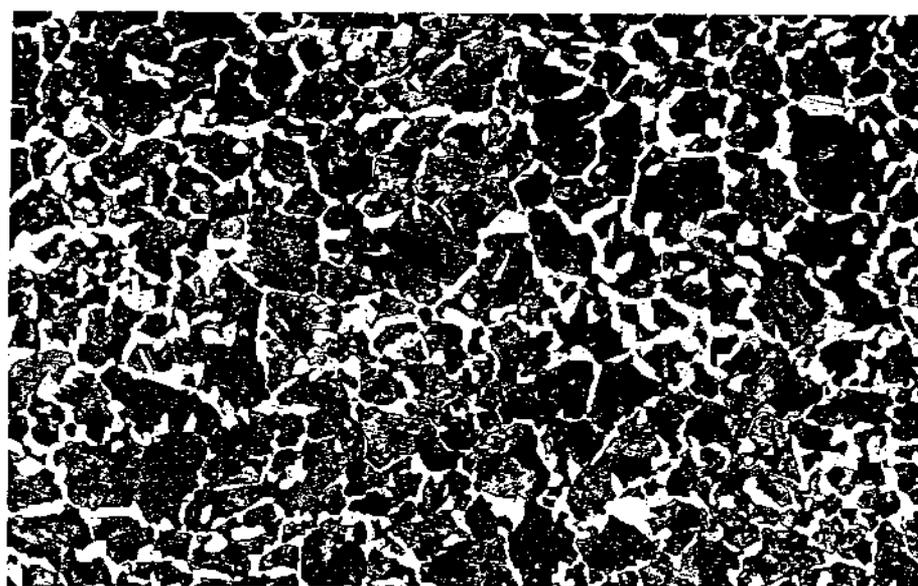


Figura 4.4 - Corte longitudinal da amostra com ataque eletrolítico - Ampliação - 100 vezes

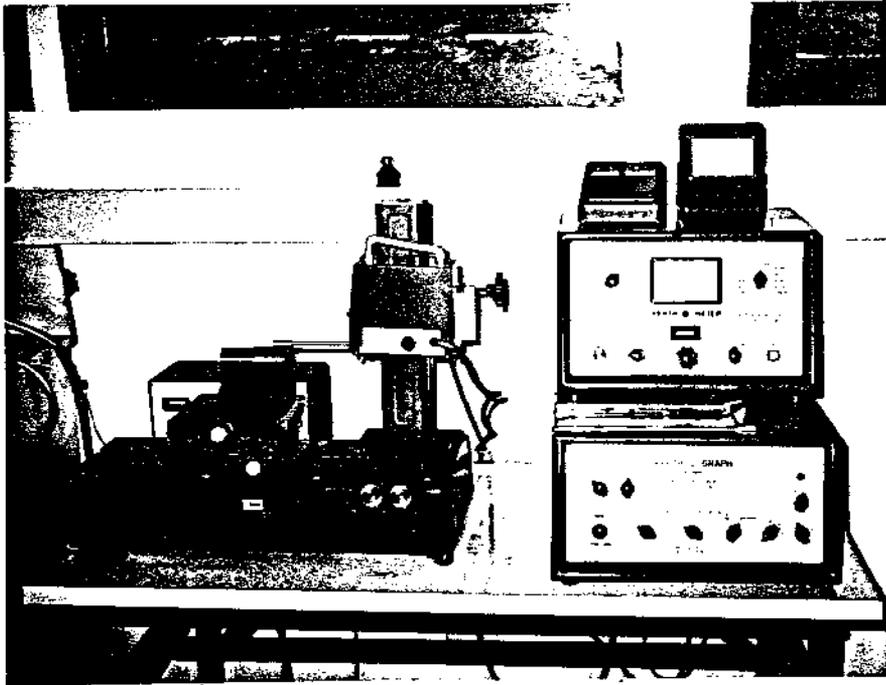


Figura 4.5 - Rugosímetro utilizado nos ensaios

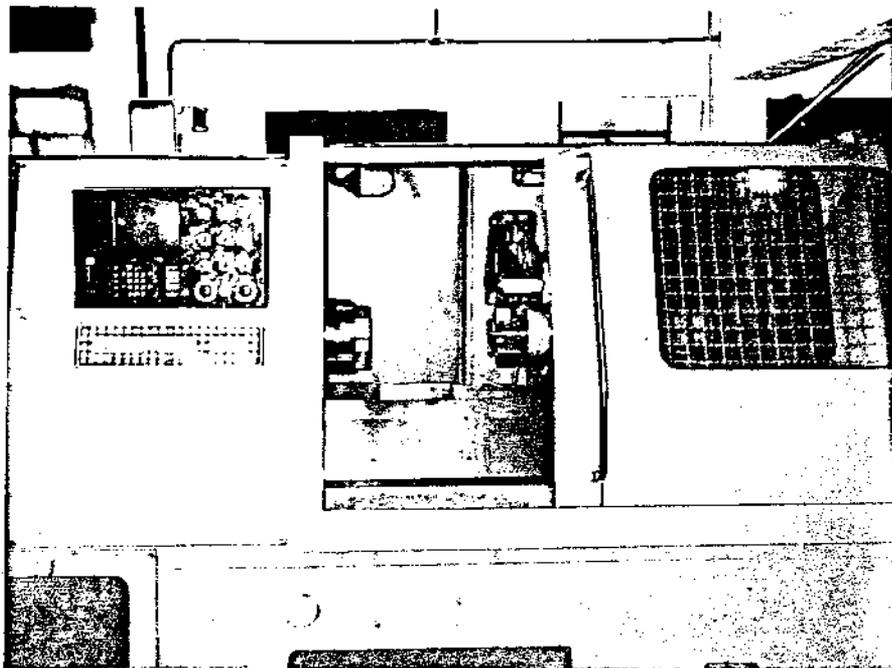


Figura 4.6 - Vista geral do torno CNC

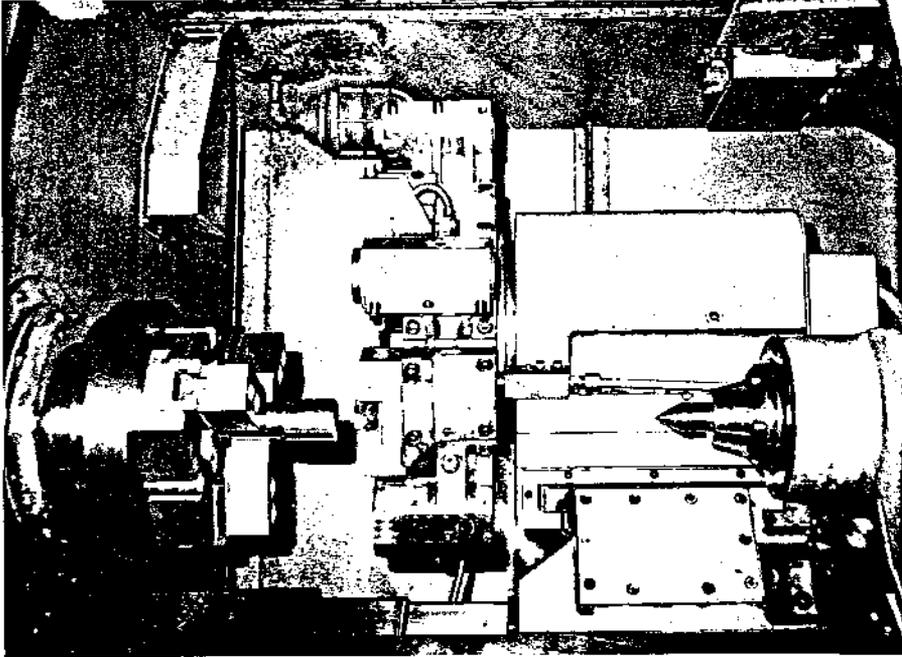


Figura 4.7 - Vista parcial do torno CNC

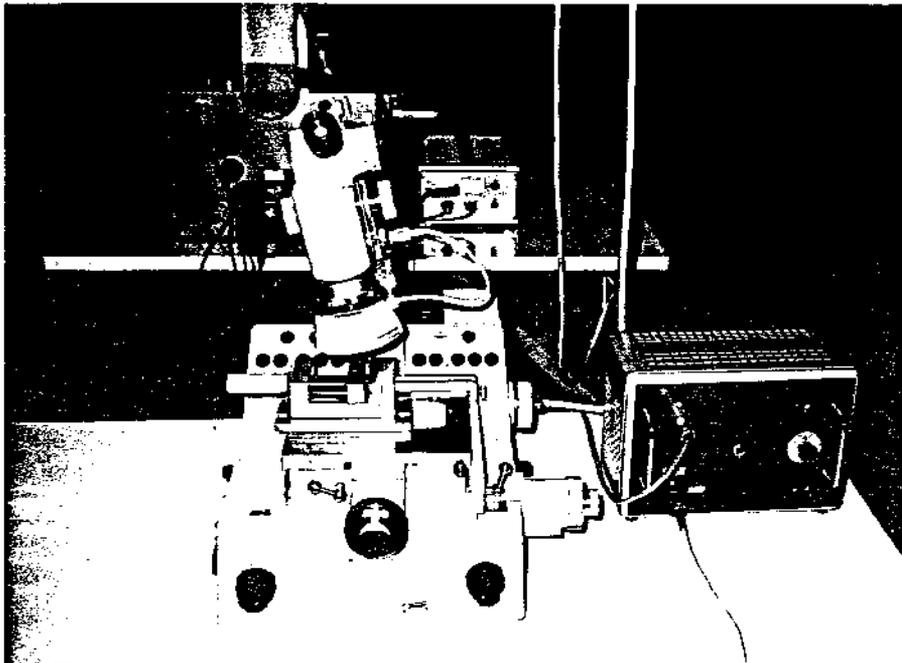


Figura 4.8 - Microscópio utilizado nos ensaios

A primeira parte destes ensaios (ensaios de no. de 1 a 4) teve como objetivo testar a variabilidade do processo e por isso cada ensaio foi repetido quatro vezes. Foi considerado como um ensaio a usinagem de cinquenta peças com $f = 0.15$ mm/volta e $v_c = 350$ m/min. De um ensaio para outro mudava-se somente a aresta da pastilha em usinagem.

A segunda parte destes ensaios (ensaios de no. 5 a 12) teve como objetivo verificar a influência do avanço e da velocidade de corte na rugosidade superficial. A tabela 4.2 contém os valores de f e v utilizados nestes ensaios, bem como o número de peças usinadas por ensaio. Com $v_c = 350$ m/min realizou-se ensaios com $f = 0.1, 0.15$ e 0.2 mm/volta e com $f = 0.15$ mm/volta fez-se ensaios com $v_c = 200, 275, 350, 385$ e 425 m/min. Assim pode-se estudar a variação da rugosidade superficial com a velocidade de corte com $f = 0.15$ mm/volta e a variação da rugosidade com o avanço, com $v_c = 350$ m/min.

Considera-se uma peça, a metade de um corpo de prova mostrado na figura 4.9, pois a outra metade era utilizada para fixação da peça.

b) Ensaios com a ferramenta TPGR
($f = 0.2$ mm/volta $a_p = 0.6$ mm)

Os corpos de prova utilizados nestes ensaios tem o formato idêntico ao corpo de prova mostrado na figura 4.9, sendo que os diâmetros torneados variaram de 49 a 45 mm (diâmetro antes da usinagem) e o diâmetro na região de fixação variou de 45.4 a 46 mm.

Utilizou-se o porta-pastilhas classe ABNT CTGPR 2020 K16, com a pastilha intercambiável de metal duro tipo TPGR 16 03 12 P10 (sem cobertura), do fabricante Sandvik Coromant. Esta pastilha é recomendada pelo fabricante [68] para acabamento e desbaste leve de materiais com cavaco longo, como o aço.

Cada peça era torneada em 5 passadas consecutivas com 0.6 mm de profundidade de corte. Assim, ao final das cinco passadas a peça apresentava um diâmetro 6 mm menor em relação ao seu diâmetro inicial.

Para completar-se um ensaio, usinava-se um determinado número de peças com a mesma aresta da pastilha, até que a

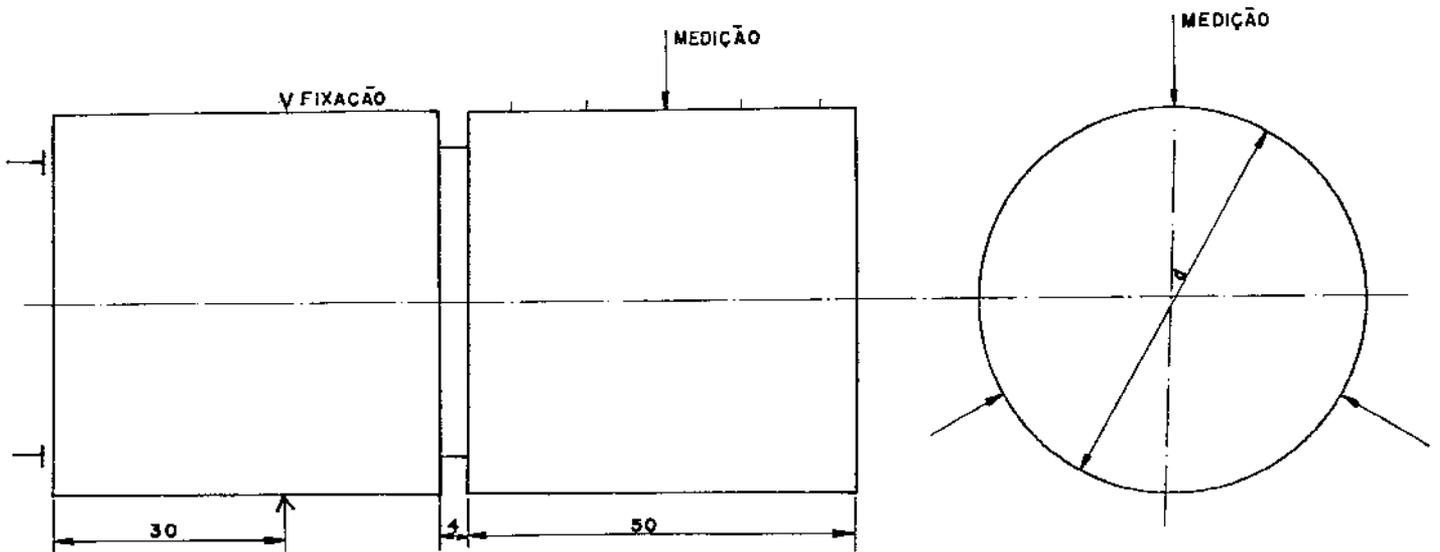


Figura 4.9 - Corpo de Prova utilizado nos ensaios com ferramenta KNUX

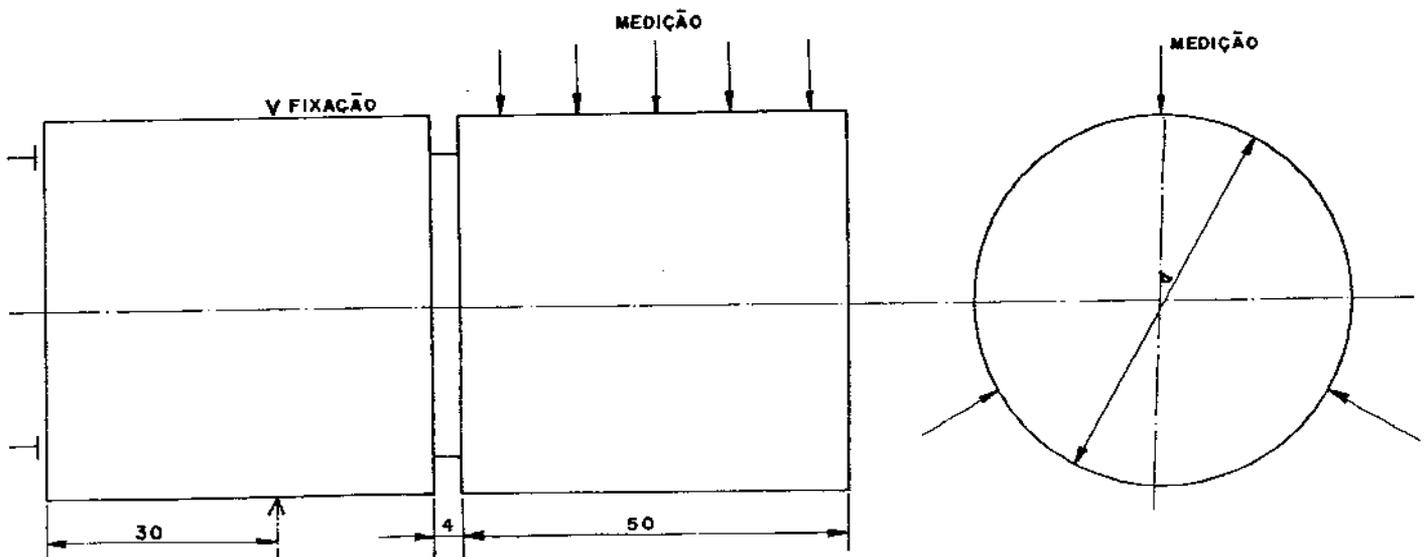


Figura 4.10 - Corpo de prova utilizado nos ensaios com ferramenta TPGR ($f=0.2$ mm/volta $a_p=0.6$ mm)

rugosidade superficial da peça atingisse $Ra = 2.5 \mu m$. O operador da máquina era responsável por estabelecer o momento em que a peça atingia tal rugosidade, de uma maneira comparativa (visual ou por tato), utilizando-se de uma peça padrão que lhe foi fornecida. Quando o operador julgava que a rugosidade da última peça usinada havia atingido a rugosidade da peça padrão ($Ra = 2.5 \mu m$), realizava o torneamento de mais uma peça e então interrompia o ensaio. Um dos objetivos do presente trabalho é testar a confiabilidade deste método para estabelecimento do fim da vida da ferramenta.

Foi medida a rugosidade em 15 pontos diferentes da peça, conforme mostra a figura 4.10. Os valores de Ra e R_{max} das peças, tomados para análise dos resultados são uma média desses 15 pontos.

Os desgastes das ferramentas utilizadas foram medidos em um microscópio digital Carl Zeiss 100/50, com ampliação de 10 vezes.

Todos os ensaios foram realizados com avanço $f = 0.2 \text{ mm/volta}$ e profundidade de corte $a_p = 0.6 \text{ mm/volta}$. Foram utilizadas 3 velocidades de corte diferentes, cada uma delas em 10 ensaios, totalizando 30 ensaios. As velocidades foram: $v_{c1} = 220 \text{ m/min}$; $v_{c2} = 280 \text{ m/min}$; $v_{c3} = 340 \text{ m/min}$.

Os valores do par avanço/profundidade de corte são típicos de operações de torneamento em acabamento, onde se deseja baixos valores de rugosidade superficial e a velocidade de corte intermediária (v_{c2}) foi escolhida baseados em manuais de usinagem. [68],[69] As velocidades v_{c1} e v_{c3} são aproximadamente 20% menor e 20% maior que v_{c2} . Isto foi feito para que se tivesse um intervalo razoável de velocidade de corte.

A sequência de realização dos ensaios foi aleatória a fim de que algum erro momentâneo do experimento pudesse ser distribuído pelos ensaios em diversas velocidades de corte, evitando assim algum tipo de tendência somente numa velocidade de corte [70]. Os ensaios utilizando-se v_{c2} foram numerados de 13 a 22, utilizando-se v_{c1} , 23 a 32 e utilizando-se v_{c3} , 33 a 42. A sequência dos ensaios foi:

13o. ensaio - ensaio 13	28o. ensaio - ensaio 16
14o. ensaio - 14	29o. - 26
15o. - 15	30o. - 18
16o. - 23	31o. - 19

17o.	-	24	32o.	-	40
18o.	-	28	33o.	-	27
19o.	-	20	34o.	-	31
20o.	-	42	35o.	-	34
21o.	-	21	36o.	-	39
22o.	-	17	37o.	-	33
23o.	-	36	38o.	-	30
24o.	-	35	39o.	-	29
25o.	-	41	40o.	-	22
26o.	-	25	41o.	-	32
27o.	-	37	42o.	-	38

c) Ensaaios para obtenção da melhor forma de cavaco

Estes ensaios tiveram como objetivo detectar a faixa de profundidade de corte e avanço ideal quanto à quebra do cavaco para a ferramenta TPGR.

Foram recolhidos cavacos em dezesseis pares $f-a_p$ diferentes. Utilizaram-se quatro valores de profundidade de corte e quatro valores de avanço, numa matriz 4x4 para os ensaios, resultando nos dezesseis pares $f-a_p$ citados.

Os valores de profundidade de corte foram: 0.3, 0.6, 0.9, 1.2. Os valores de avanço foram: 0.1, 0.15, 0.2, 0.25. Todos estes valores foram escolhidos baseados nas recomendações de catálogos e manuais de usinagem para a operação de acabamento [68].

Estes ensaios de coleta de cavacos foram realizados nas três velocidades de corte utilizadas no item b, isto é, $v_c = 220, 280$ e 340 m/min.

d) Ensaaios realizados com a ferramenta TPGR

($f = 0.25$ mm/volta $a_p = 0.7$ mm)

Depois de realizados os ensaios descritos no item c, concluiu-se que o melhor par $f-a_p$ para a quebra do cavaco utilizando-se a ferramenta TPGR, ainda em condições de acabamento é $f = 0.25$ mm/volta e $a_p = 0.7$ mm.

Os corpos de prova permanecem com a mesma forma, sendo que os diâmetros antes da usinagem variaram de 45 a 45.5 mm e os diâmetros de fixação variaram de 40.5 a 42 mm.

A ferramenta e o porta-ferramenta foram idênticos aos utilizados nos ensaios descritos no item b e cada peça também era torneada em cinco passadas consecutivas com $a_p = 0.7$ mm.

Foram utilizadas as mesmas velocidades de corte do item b, isto é, $v_c = 220, 280$ e 340 m/min e repetiu-se cinco vezes cada ensaio, totalizando-se quinze ensaios. Com $v_c = 220$ m/min usinava-se quatorze peças por ensaio, com $v_c = 280$ m/min, doze peças e com $v_c = 340$ m/min usinava-se sete peças por ensaio.

Também aqui o operador comparava a rugosidade da peça usinada com a rugosidade superficial de uma peça padrão, no caso a peça 7 do ensaio 54 ($R_a=3.80$ μm $R_{\text{max}}=21.2$ μm), mas esta comparação não era o ponto que determinava o fim do ensaio.

A rugosidade superficial foi medida em seis pontos diferentes de cada peça, conforme mostra a figura 4.11 e os desgastes das ferramentas eram medidos ao fim de cada ensaio. Testava-se, utilizando-se de procedimento descrito no Apêndice B, se a quantidade de pontos de rugosidade medidos eram estatisticamente suficientes. No caso disto não ser verdade, mediram-se mais nove pontos em cada peça, totalizando 15 pontos de medição de rugosidade nestes casos.

A sequência dos ensaios também foi aleatória. Os ensaios com $v_c = 280$ m/min foram numerados de 43 a 47, com $v_c = 220$ m/min de 48 a 52 e com $v_c = 340$ m/min de 53 a 57. A sequência de realização dos ensaios foi a seguinte:

43o. ensaio - ensaio 54	51o. ensaio - ensaio 48
44o. ensaio - ensaio 57	52o. ensaio - ensaio 49
45o. ensaio - ensaio 47	53o. ensaio - ensaio 55
46o. ensaio - ensaio 46	54o. ensaio - ensaio 45
47o. ensaio - ensaio 43	55o. ensaio - ensaio 51
48o. ensaio - ensaio 52	56o. ensaio - ensaio 56
49o. ensaio - ensaio 50	57o. ensaio - ensaio 53
50o. ensaio - ensaio 44	

IV.3 - Resumo do Capítulo

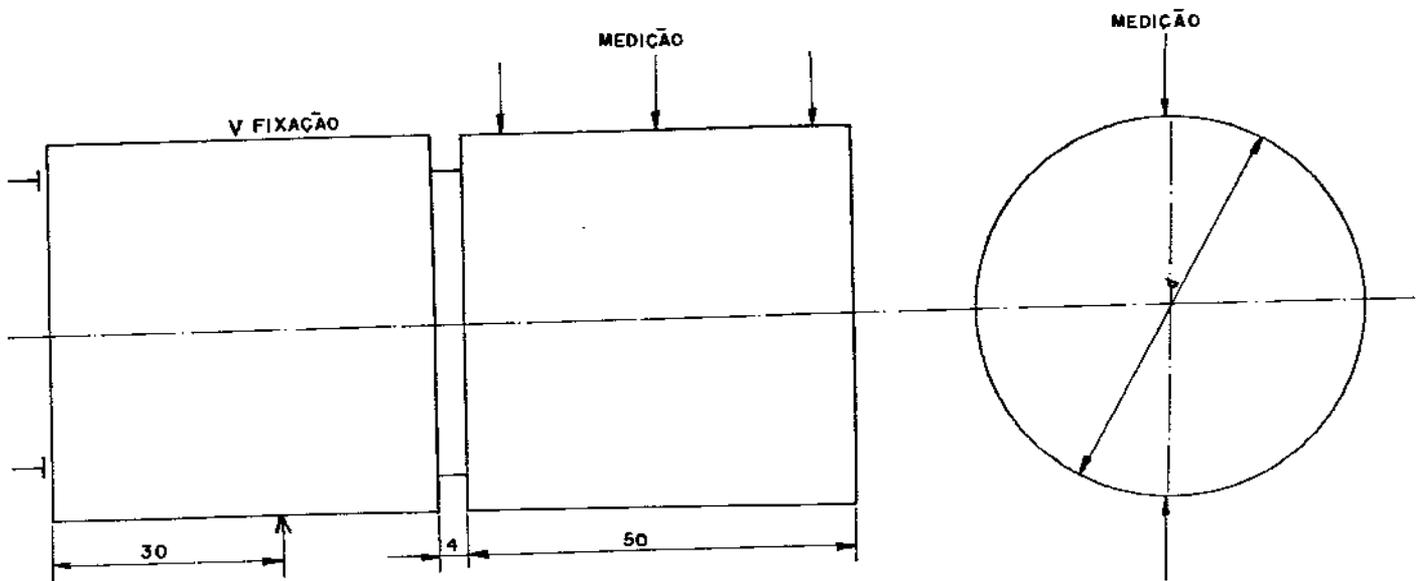


Figura 4.11 - Corpo de prova utilizado nos ensaios com ferramenta TPGR ($f=0.25$ mm/volta $a_p=0.7$ mm)

A tabela 4.2 apresenta um resumo das condições utilizadas em todos os ensaios realizados.

O procedimento experimental utilizado foi dimensionado para cumprir os objetivos propostos no trabalho. Assim, os ensaios realizados com a ferramenta KNUX proporcionaram um estudo sobre a influência do avanço e da velocidade de corte nos valores de rugosidade, um estudo da dispersão dos valores da rugosidade superficial com $v_c=350$ m/min, uma comparação entre o que acontece com R_a e com R_{max} nas diversas condições de ensaio e pôde-se detectar a influência do desgaste em sulco da ferramenta no crescimento dos valores de rugosidade com o tempo de corte.

Verificada a dispersão da rugosidade, decidiu-se estudar este assunto mais a fundo e dimensionou-se os ensaios com a ferramenta TPGR, nos quais encontrou-se alguma dificuldade pelo fato de não se conseguir, nos primeiros ensaios, uma perfeita quebra do cavaco. Esta dificuldade foi contornada com ensaios específicos objetivando encontrar os valores de avanço e profundidade de corte que ainda fossem compatíveis com uma operação de torneamento em acabamento e proporcionassem uma boa quebra do cavaco utilizando-se esta mesma ferramenta.

Os últimos ensaios realizados com a ferramenta TPGR (ensaios 43 a 57) proporcionaram o seguinte: a) o estudo da dispersão dos valores de rugosidade superficial da peça em três velocidades de corte diferentes; b) uma comparação entre a dispersão dos valores de R_a e R_{max} ; c) uma comparação entre os valores de rugosidade utilizando-se velocidades de corte diferentes; d) um estudo da correlação dos valores de desgaste da ferramenta e de rugosidade e) uma comparação entre a confiabilidade de uma estimativa do fim da vida da ferramenta baseada em um estudo da dispersão dos valores de rugosidade superficial da peça e a confiabilidade do procedimento de se substituir a ferramenta baseado no julgamento do valor de rugosidade realizado pelo operador.

Ao fim do trabalho pôde-se tirar conclusões confiáveis estatisticamente o que confirma a adequação dos procedimentos experimentais.

Tabela 4.2 - Resumo das Condições dos Ensaios

No. do Ensaio	Sequência	Ferramenta	f	v _c	a _p	No. de peças	Replições
1	1	KNUX	0.15	350	0.6	50	1
2	2	KNUX	0.15	350	0.6	50	1
3	3	KNUX	0.15	350	0.6	50	1
4	4	KNUX	0.15	350	0.6	50	1
5	5	KNUX	0.15	200	0.6	10	3
6	6	KNUX	0.15	275	0.6	10	3
7	7	KNUX	0.15	425	0.6	5	3
8	8	KNUX	0.15	385	0.6	5	2
9	9	KNUX	0.15	310	0.6	5	2
10	10	KNUX	0.15	235	0.6	5	2
11	11	KNUX	0.10	350	0.6	10	3
12	12	KNUX	0.20	350	0.6	10	3
13	13	TPGR	0.20	280	0.6	14	1
14	14	TPGR	0.20	280	0.6	11	1
15	15	TPGR	0.20	280	0.6	11	1
16	28	TPGR	0.20	280	0.6	16	1
17	23	TPGR	0.20	280	0.6	11	1
18	30	TPGR	0.20	280	0.6	9	1
19	31	TPGR	0.20	280	0.6	10	1
20	19	TPGR	0.20	280	0.6	8	1
21	21	TPGR	0.20	280	0.6	7	1
22	40	TPGR	0.20	280	0.6	8	1
23	16	TPGR	0.20	220	0.6	24	1
24	17	TPGR	0.20	220	0.6	17	1
25	26	TPGR	0.20	220	0.6	20	1
26	29	TPGR	0.20	220	0.6	10	1
27	33	TPGR	0.20	220	0.6	14	1
28	18	TPGR	0.20	220	0.6	25	1
29	39	TPGR	0.20	220	0.6	15	1
30	38	TPGR	0.20	220	0.6	12	1
31	33	TPGR	0.20	220	0.6	12	1
32	41	TPGR	0.20	220	0.6	13	1
33	37	TPGR	0.20	340	0.6	8	1
34	35	TPGR	0.20	340	0.6	5	1
35	24	TPGR	0.20	340	0.6	7	1
36	23	TPGR	0.20	340	0.6	4	1
37	27	TPGR	0.20	340	0.6	5	1
38	42	TPGR	0.20	340	0.6	5	1
39	36	TPGR	0.20	340	0.6	6	1
40	32	TPGR	0.20	340	0.6	7	1
41	25	TPGR	0.20	340	0.6	6	1
42	20	TPGR	0.20	340	0.6	4	1

Tabela 4.2 - Resumo das Condições dos Ensaios
(Continuação)

43	47	TPGR	0.25	280	0.7	12	1
44	50	TPGR	0.25	280	0.7	12	1
45	54	TPGR	0.25	280	0.7	12	1
46	46	TPGR	0.25	280	0.7	12	1
47	45	TPGR	0.25	280	0.7	12	1
48	51	TPGR	0.25	220	0.7	14	1
49	52	TPGR	0.25	220	0.7	14	1
50	49	TPGR	0.25	220	0.7	14	1
51	55	TPGR	0.25	220	0.7	14	1
52	48	TPGR	0.25	220	0.7	14	1
53	57	TPGR	0.25	340	0.7	7	1
54	43	TPGR	0.25	340	0.7	7	1
55	53	TPGR	0.25	340	0.7	7	1
56	56	TPGR	0.25	340	0.7	7	1
57	44	TPGR	0.25	340	0.7	7	1

CAPITULO V

RESULTADOS E DISCUSSOES

V.1 RESULTADOS E DISCUSSOES RELATIVOS AOS ENSAIOS REALIZADOS COM A FERRAMENTA KNUX

V.1.1 - Variabilidade da Vida da Ferramenta

As figuras 5.1 e 5.2 mostram os resultados dos quatro ensaios realizados para verificação da evolução de R_a e R_{max} , respectivamente, com o número de peças usinadas. Nestas figuras, cada ponto representa uma média das três medidas de rugosidade superficial realizadas em cada peça.

Cada curva mostrada nas figuras 5.1 e 5.2 foi aproximada por uma reta para que pudesse ser feita uma análise dos resultados. Os resultados das análises de regressão estão mostrados nas tabelas 5.1 e 5.2 e as figuras 5.3 a 5.10 mostram curvas dos resíduos da regressão linear contra o número de peças usinadas. A análise do $R_{quadrado}$ e dos resíduos destas regressões demonstra que o ajuste do modelo linear pode ser considerado adequado. As figuras 5.11 e 5.12 mostram as retas aproximadas. O Apêndice A resume os procedimentos estatísticos utilizados para a obtenção das tabelas e figuras citadas.

Utilizando-se destas curvas aproximadas pode-se ter uma visão da variabilidade da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas. As tabelas 5.3 e 5.4 foram construídas também com este objetivo.

As figuras 5.13 a 5.20 mostram fotos dos desgastes das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Estes resultados apresentam os seguintes fatos passíveis de análise:

a) As variações de R_a e R_{max} versus o número de peças usinadas são semelhantes (figuras 5.1, 5.2, 5.11 e 5.12), isto é, não existe nenhuma variação brusca de R_a que não é acompanhada por uma variação semelhante de R_{max} . Disto se pode concluir que a forma do perfil de rugosidade permanece aproximadamente constante

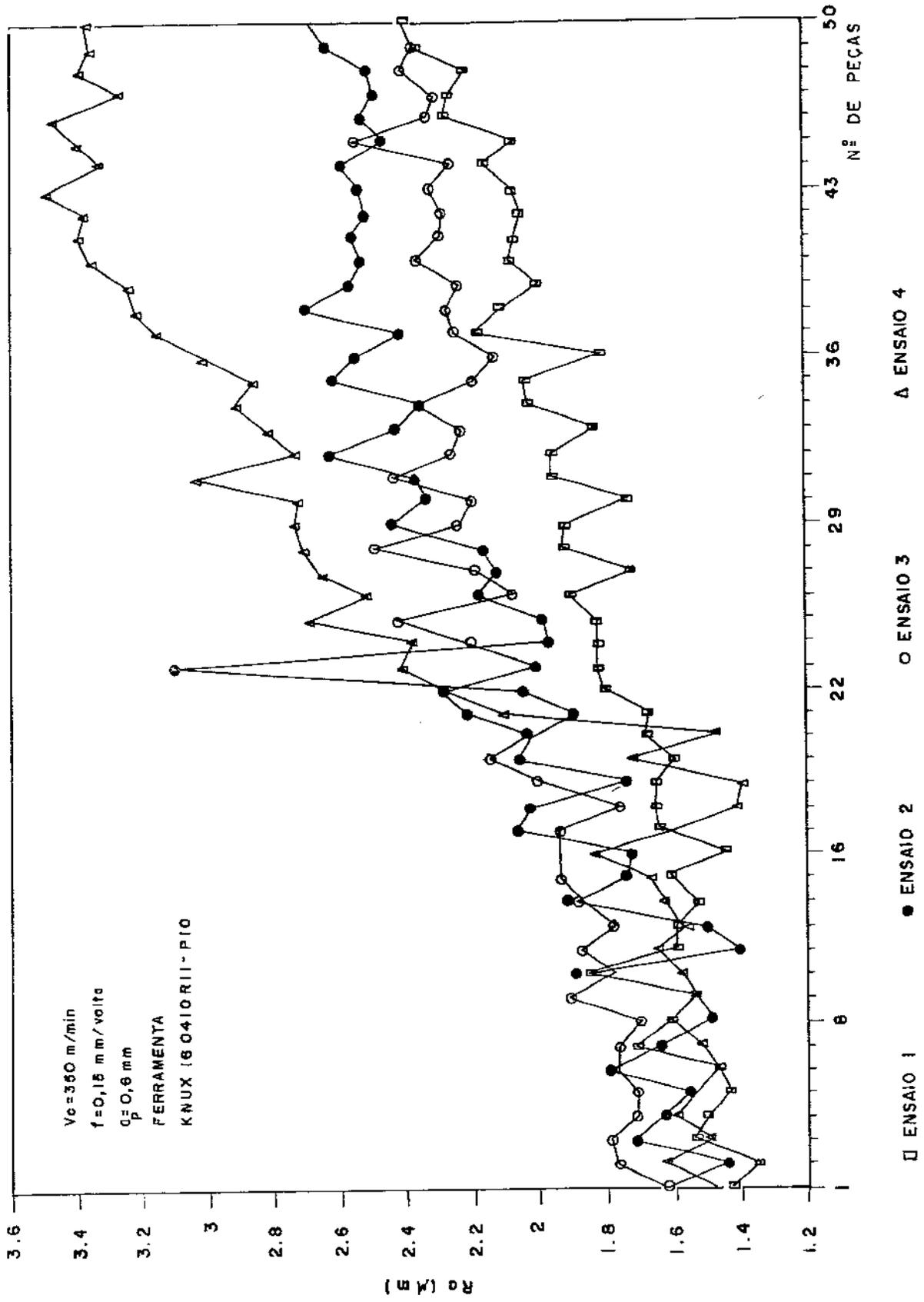
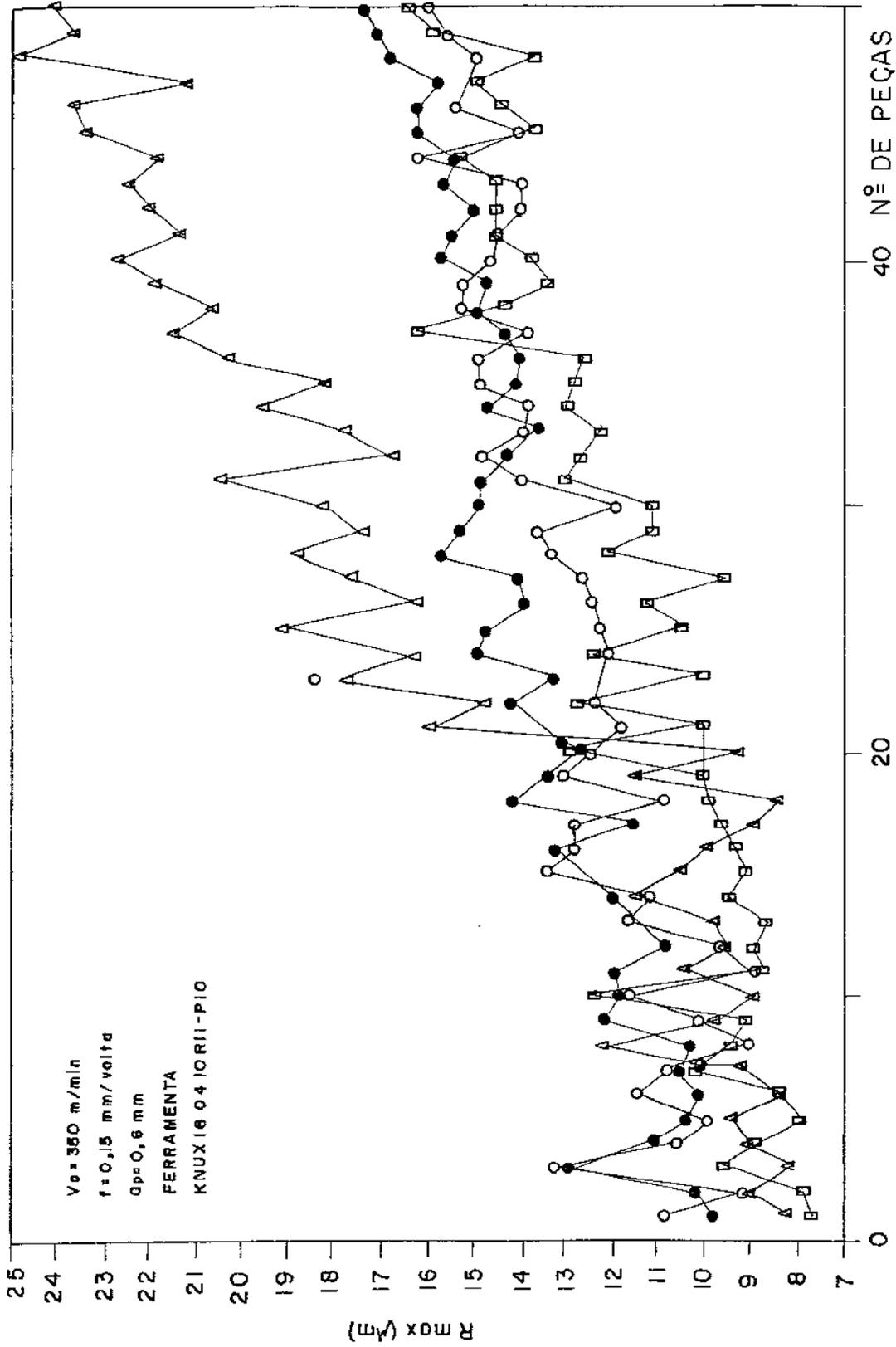


Figura 5.1.1 - Ra x número de peças - Ensaios de 1 a 4



□ ENSAIO 1 ○ ENSAIO 2 ● ENSAIO 3 △ ENSAIO 4

Figura 5.2 - Rmax x número de peças - Ensaios de 1 a 4

Tabela 5.1 - Resultados da Análise de Regressão
($R_a(\mu\text{m})$ x número de peças)

	b_0	$SD(b_0)$	b_1	$SD(b_1)$	R
Ensaio 1	1.085	0.031	0.024	0.001	0.78
Ensaio 2	1.475	0.027	0.025	0.001	0.83
Ensaio 3	1.661	0.030	0.015	0.001	0.58
Ensaio 4	1.062	0.040	0.049	0.001	0.89

Tabela 5.2 - Resultados da Análise de Regressão
($R_{\text{max}}(\mu\text{m})$ x número de peças)

	b_0	$SD(b_0)$	b_1	$SD(b_1)$	R_{quadrado}
Ensaio 1	7.772	0.254	0.153	0.009	0.68
Ensaio 2	10.14	0.265	0.113	0.009	0.51
Ensaio 3	10.52	0.207	0.125	0.007	0.68
Ensaio 4	6.348	0.310	0.371	0.011	0.89

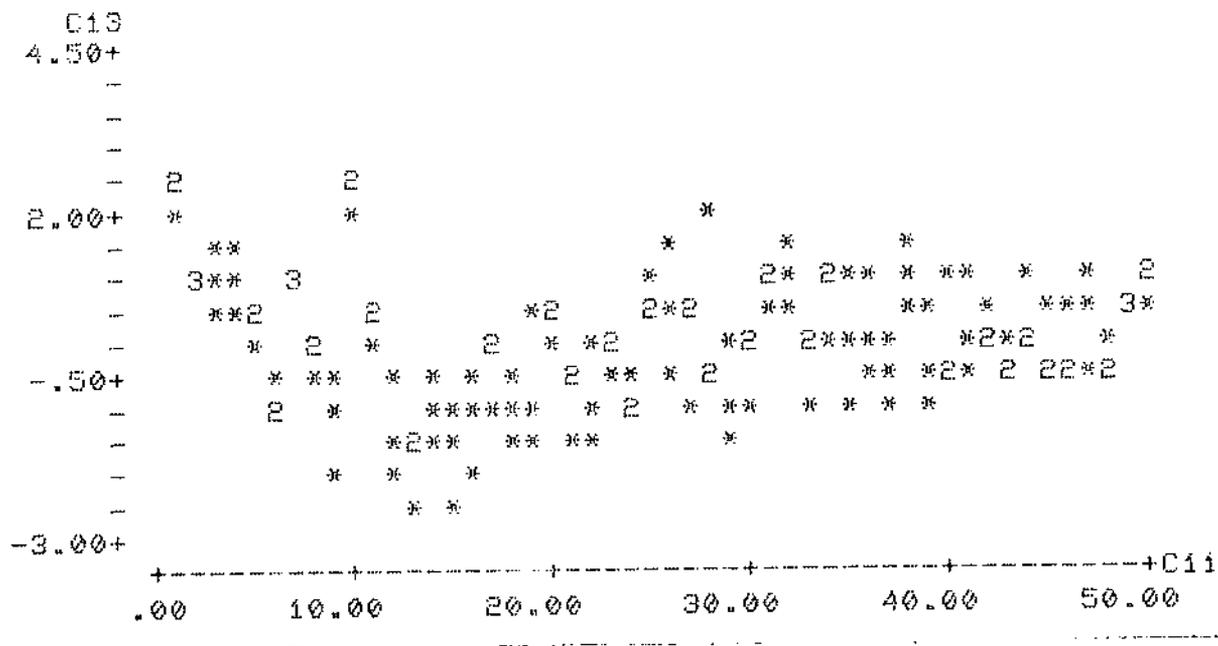


Figura 5.3 - Resíduos da regressão Ra x no. peças - ensaio 1

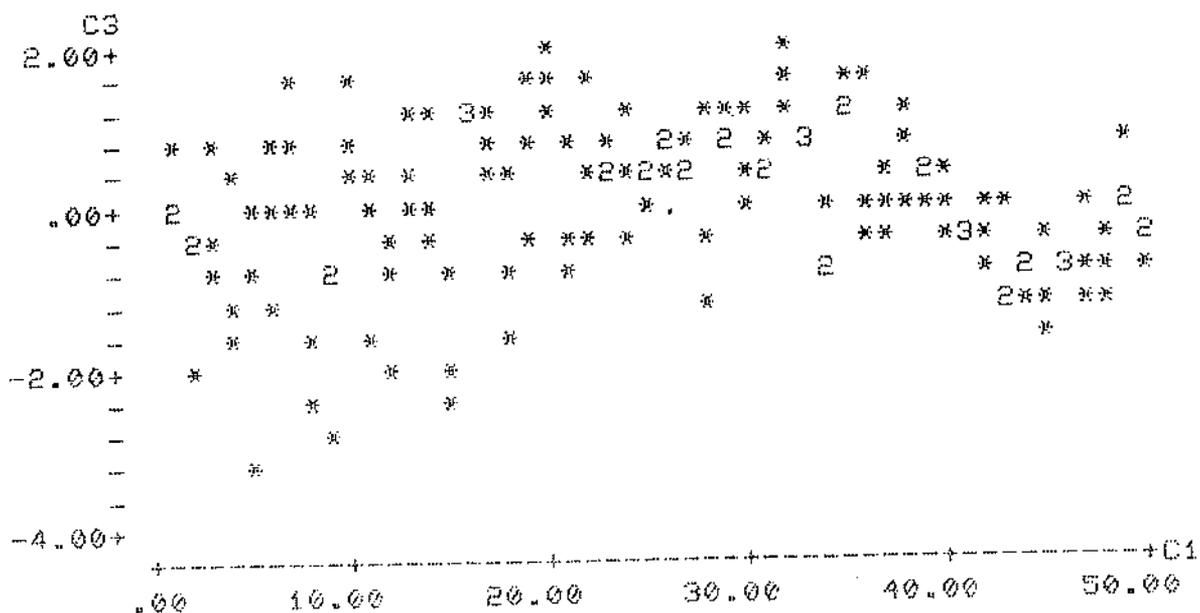


Figura 5.4 - Resíduos da regressão Ra x no. peças - ensaio 2

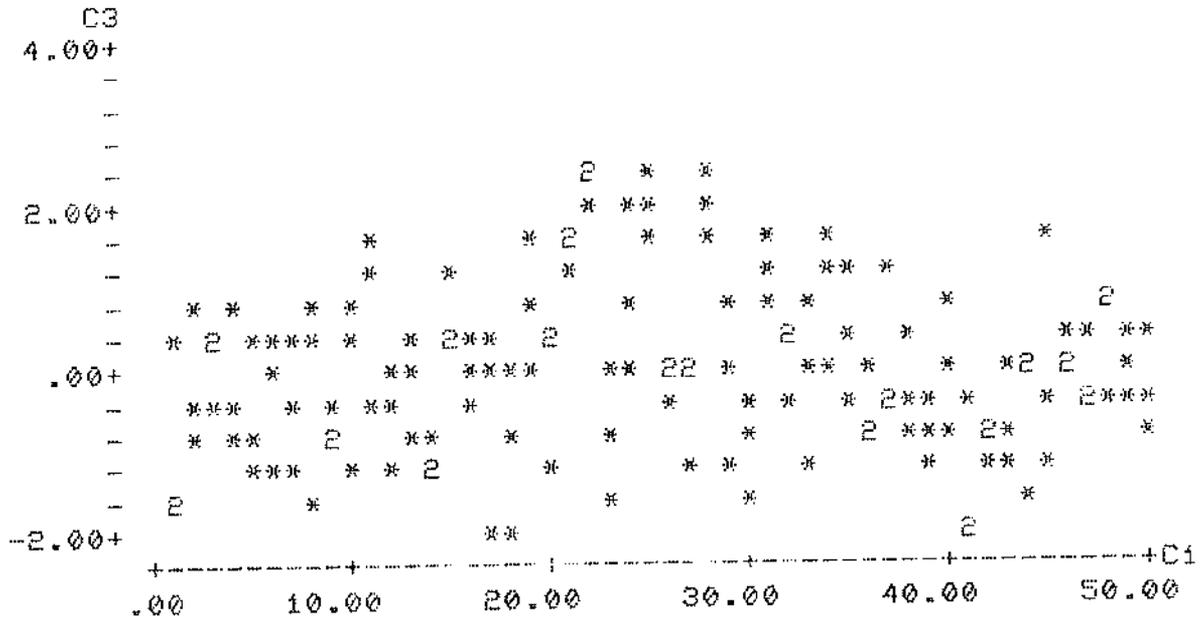


Figura 5.5 - Resíduos da regressão Ra x no. peças - ensaio 3

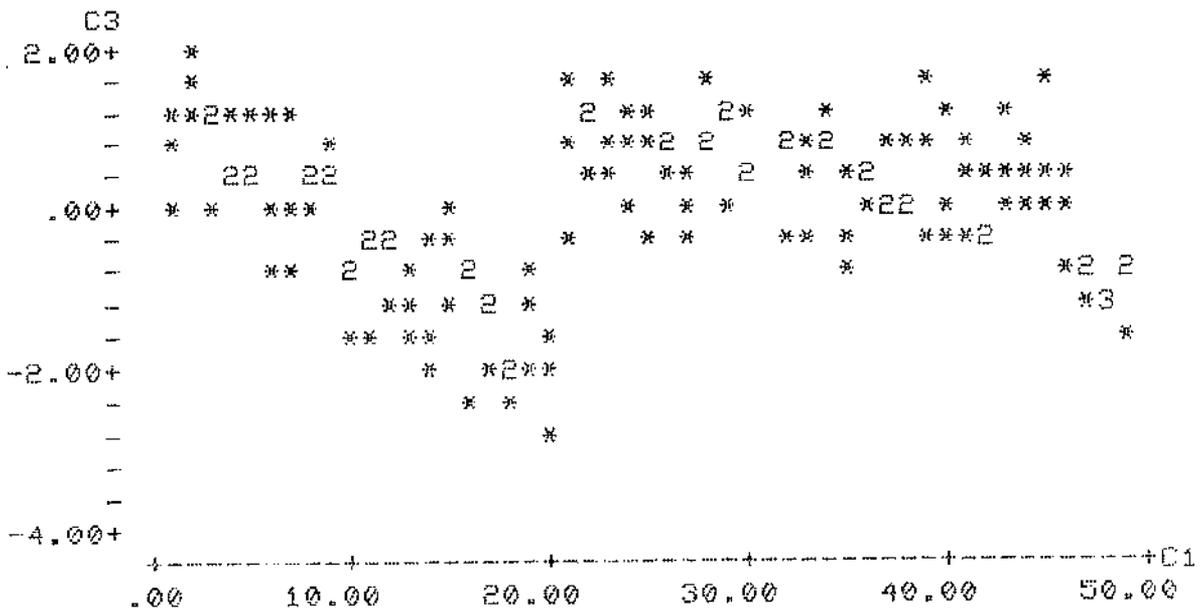


Figura 5.6 - Resíduos da regressão Ra x no. peças - ensaio 4

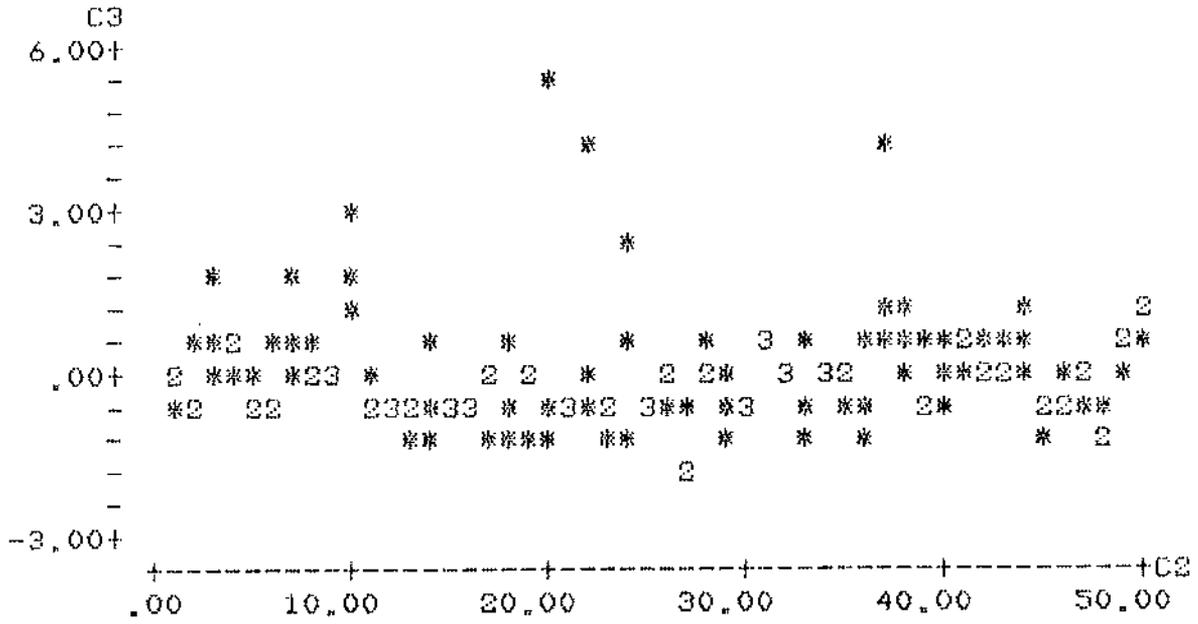


Figura 5.7 - Resíduos da regressão R_{max} x no. peças ensaio 1

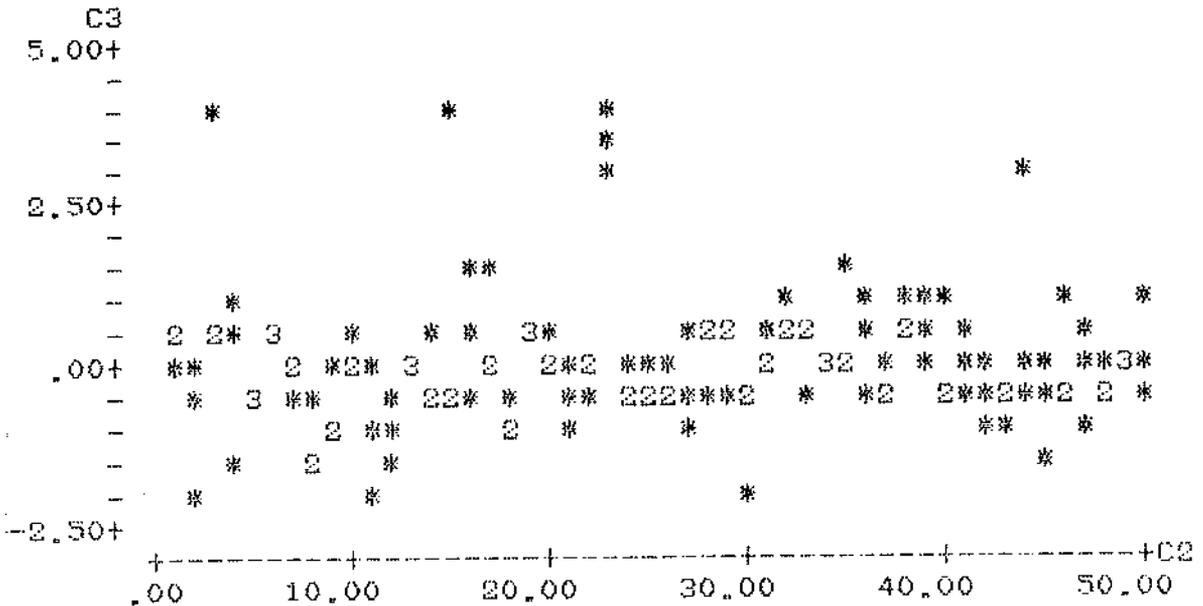


Figura 5.8 - Resíduos da regressão R_{max} x no. peças ensaio 2

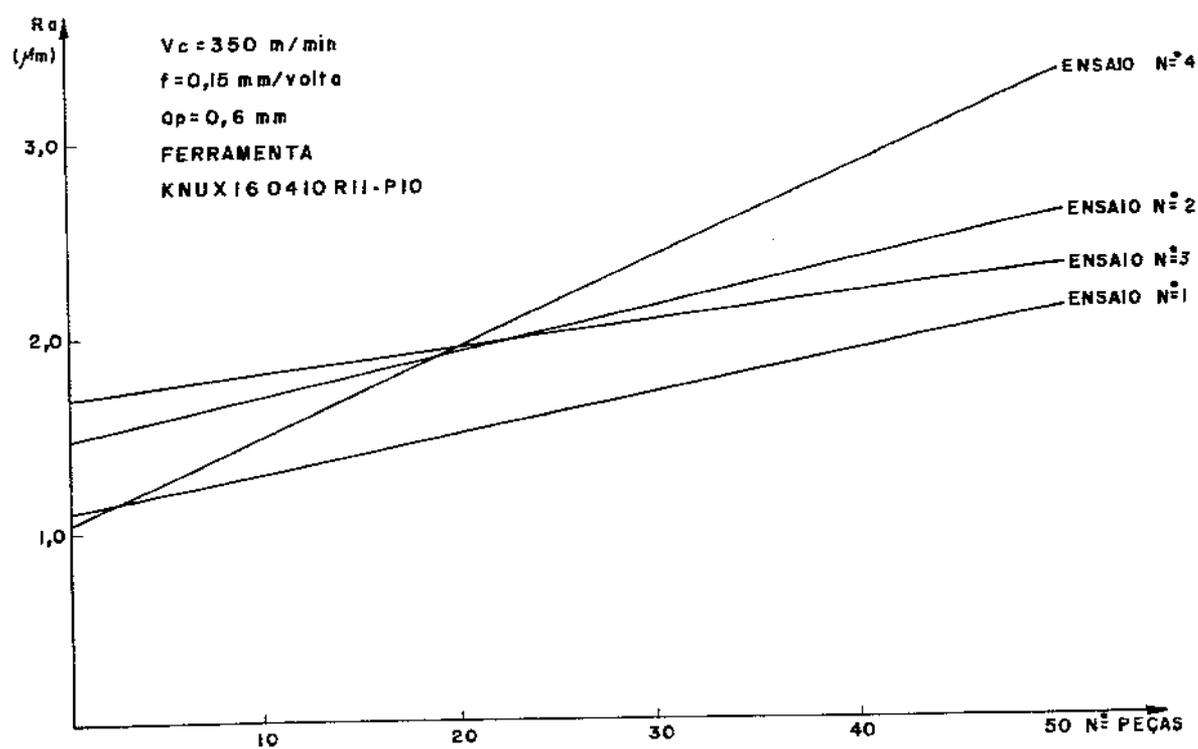


Figura 5.11 - Retas aproximadas extraídas da regressão linear R_a x no. de peças

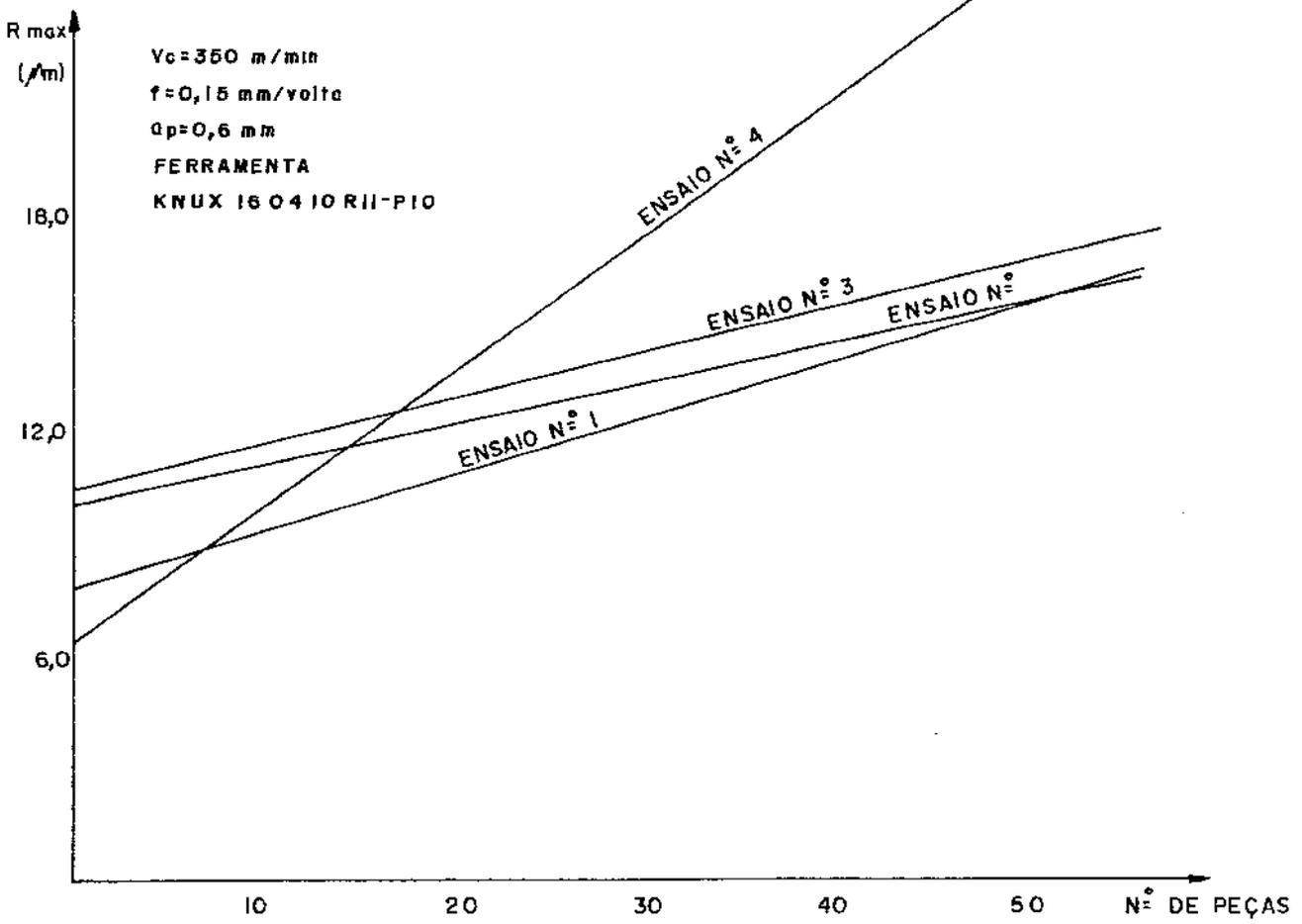


Figura 5.12 - Retas aproximadas extraídas da regressão linear
 ar R_{max} x no. de peças

em todas as peças usinadas, pois se, por exemplo, houvesse acontecido um aumento sensível de R_{max} sem um respectivo aumento de R_a , significaria que o perfil de rugosidades possui alguns picos e/ou vales proeminentes.

b) Quanto à variabilidade do processo podemos comentar os seguintes pontos (figuras 5.11 e 5.12 e tabelas 5.3 e 5.4):

- A medida que se aumenta o número de peças usinadas, aumenta a distância entre as curvas dos diversos ensaios, o que faz com que, quando o valor de rugosidade superficial tomado como limite para o critério de fim de vida da ferramenta for alto, exista maior variabilidade no número de peças usinadas por vida da ferramenta, tornando-se difícil estimar este fim de vida. Por exemplo, tomando-se $R_a = 2.25 \mu m$ como critério de fim de vida, deve-se trocar de ferramenta com 20 peças usinadas, pois 95% das vezes em que se usinam 20 peças com uma ferramenta, R_a é menor que $2.24 \mu m$. Neste caso, 90% das vezes em que se usinam 20 peças, o valor de R_a da vigésima peça estará entre 1.53 e $2.24 \mu m$, portanto o valor menor do intervalo é 68% do valor maior. Já com $R_a = 3.15 \mu m$ como critério de fim de vida, tem-se que deve-se trocar a ferramenta com 40 peças usinadas e, neste caso, para um intervalo de confiança de 90%, o limite menor do intervalo é 56% do limite maior (ver tabela 5.3), o que torna o momento de troca da ferramenta mais incerto, pois pode-se trocar uma ferramenta quando a peça ainda está com $R_a = 1.76 \mu m$, quando o limite é $3.15 \mu m$. Isto foi calculado baseado no fato destes valores seguirem uma distribuição normal, conforme citado no item III.1.

- Tudo o que foi analisado acima, não seria verdade se não tivéssemos o ensaio 4 que gerou resultados bem diferentes dos demais. Isto nos leva a concluir que um maior número de ensaios deve ser realizado para que possamos saber qual a frequência de aparição de acontecimentos tão dispersos. Além disso, para uma conclusão mais abrangente sobre a variabilidade do processo de torneamento em acabamento, deve-se também ensaiar-se em outras condições de usinagem, o que foi feito no presente trabalho.

- Analisando-se as fotos das ferramentas mostradas nas figuras 5.13 a 5.20, pode-se chegar à razão que levou o ensaio 4 a ter resultados tão diferentes. Pode-se ver nestas figuras que as ferramentas dos ensaios 1, 2 e 3 apresentam desgastes semelhantes, enquanto que a ferramenta do ensaio 4 apresentou desgaste em sulco, tanto na aresta principal de corte quanto na

Tabela 5.3 - Valores de Ra(μm) depois de algumas peças usinadas

Peça	10	20	30	40	50
Ens. 1	1.33	1.57	1.81	2.05	2.29
Ens. 2	1.73	1.98	2.23	2.47	2.72
Ens. 3	1.81	1.96	2.11	2.26	2.41
Ens. 4	1.55	2.04	2.53	3.02	3.51
Ramed.	1.605	1.887	2.170	2.450	2.983
σ	0.213	0.214	0.298	0.417	0.737
σ /Ramed	13.3%	11.3%	13.7%	17.0%	24.7%

Tabela 5.4 - Valores de Rmax (μm) depois de algumas peças usinadas

Peça	10	20	30	40	50
Ens. 1	9.3	10.8	12.4	13.9	15.4
Ens. 2	11.2	12.4	13.5	14.6	15.7
Ens. 3	11.7	13.0	14.2	15.5	16.7
Ens. 4	10.1	13.8	17.5	21.2	24.9
Rmaxmed	10.59	12.49	14.39	16.30	18.20
σ	1.110	1.248	2.198	3.326	4.499
σ /Rmed	10.5%	10.0%	15.3%	20.4%	24.7%



Figura 5.13 - Ponta da ferramenta - Ensaio 1 - 50 peças



Figura 5.14 - Ponta da ferramenta - Ensaio 2 - 50 peças

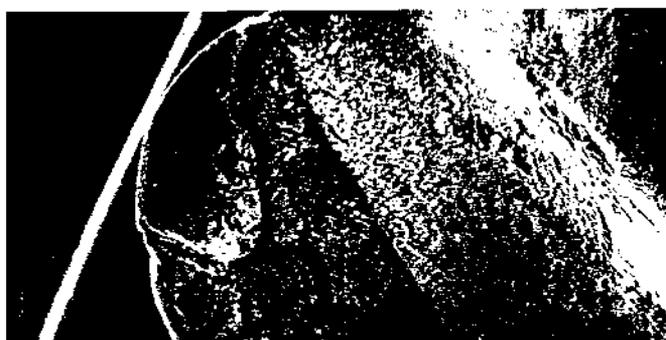


Figura 5.15 - Ponta da ferramenta - Ensaio 3 - 50 peças



Figura 5.16 - Ponta da ferramenta - Ensaio 4 - 10 peças



Figura 5.17 - Ponta da ferramenta - Ensaio 4 - 20 peças



Figura 5.18 - Ponta da ferramenta - Ensaio 4 - 30 peças



Figura 5.19 - Ponta da ferramenta - Ensaio 4 - 40 peças



Figura 5.20 - Ponta da ferramenta - Ensaio 4 - 50 peças

aresta secundária, a partir de 20 peças usinadas. As razões da aparição do desgaste em sulco estão relatadas no item II.4.4 deste trabalho, mas não foi possível detectar porque este tipo de desgaste somente apareceu no ensaio 4.

- Como se pode ver nas figuras 5.1 e 5.2 os valores de Ra e Rmax, apesar de terem uma tendência sempre crescente, oscilam bastante em torno da reta aproximada, confirmando o que foi dito pelo Prof. Nakayama e relatado neste trabalho também no item II.4.4.

V.1.2 - Influência de v_c e f na Rugosidade Superficial

As figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 mostram as curvas de variação de Ra e Rmax em relação à velocidade de corte e ao avanço. Cada ponto desses gráficos é uma média dos valores de Ra ou Rmax obtidos nas primeiras peças dos ensaios. Isto foi feito para se garantir que o desgaste das ferramentas não tivesse influência nos valores de rugosidade. A tabela 5.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos nestes ensaios.

Pode-se fazer as seguintes análises baseadas nestes resultados:

- Como pode ser visto na tabela 5.5 a variação do fator R_{max}/R_a é pequena para todos os ensaios. Isto significa que Ra e Rmax se comportam semelhantemente em relação ao avanço e à velocidade de corte, o que tem como consequência uma variação pequena da forma dos perfis de rugosidade nas diversas condições de usinagem.

- Nos experimentos encontrados na bibliografia e relatados no item II.4.5, viu-se que a rugosidade diminui o seu valor a medida que a velocidade de corte cresce até atingir um determinado valor de velocidade em que a rugosidade se estabiliza. Mostrou-se nas figuras 2.17 e 2.18 deste trabalho um experimento com o mesmo aço ABNT 1045 em que Ra e Rmax se estabilizavam em valores de velocidade de corte nunca superiores a 100 m/min. Citou-se também que a partir dessa velocidade uma variação da rugosidade seria devido à fenômenos dinâmicos do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça. Na revisão bibliográfica realizada constatou-se que experimentos

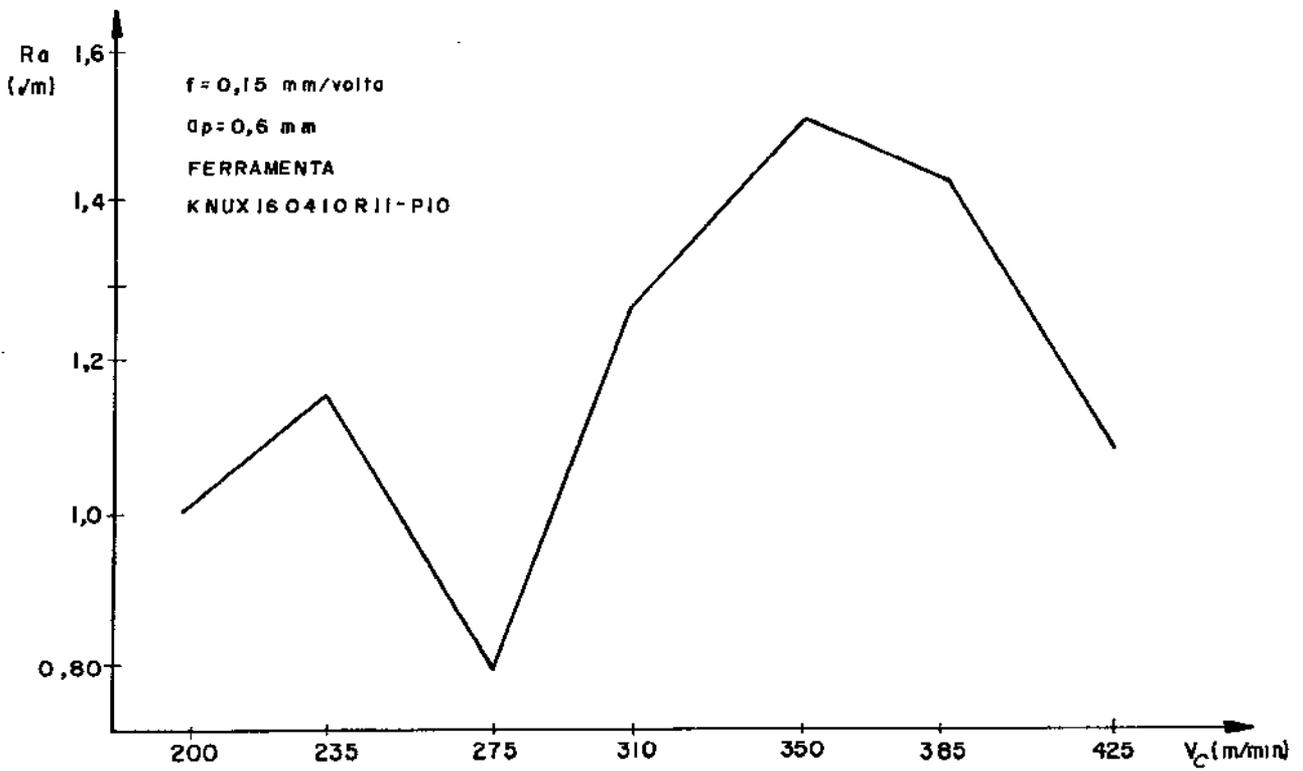


Figura 5.21 - Ra x velocidade de Corte (valores médios dos ensaios)

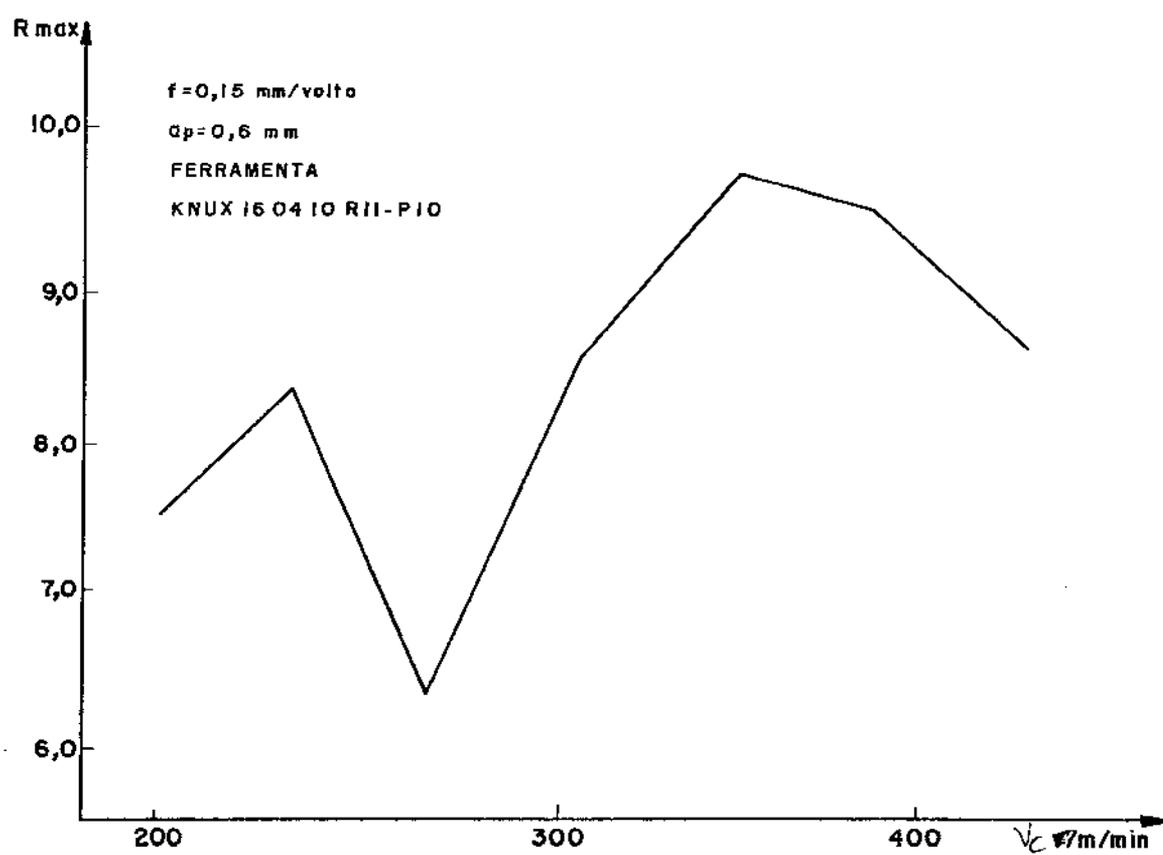


Figura 5.22 - R_{max} x velocidade de corte (valores médios dos ensaios)

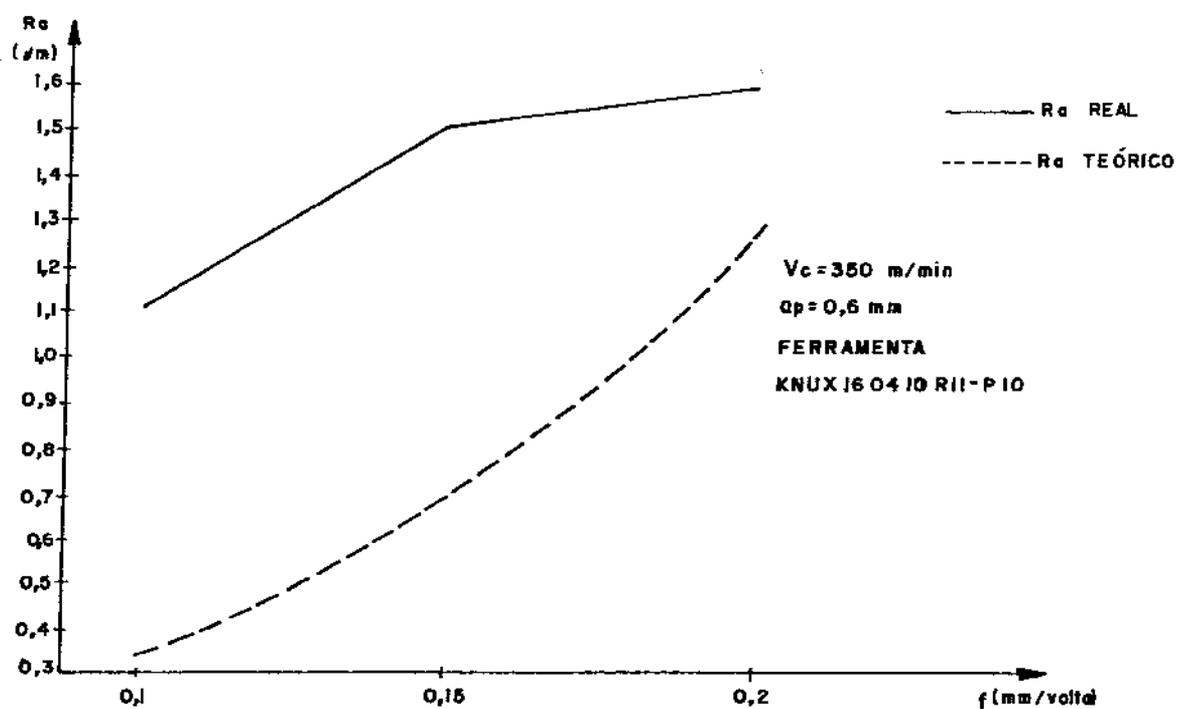


Figura 5.23 - Ra e Ra teórico x avanço (valores médios dos ensaios)

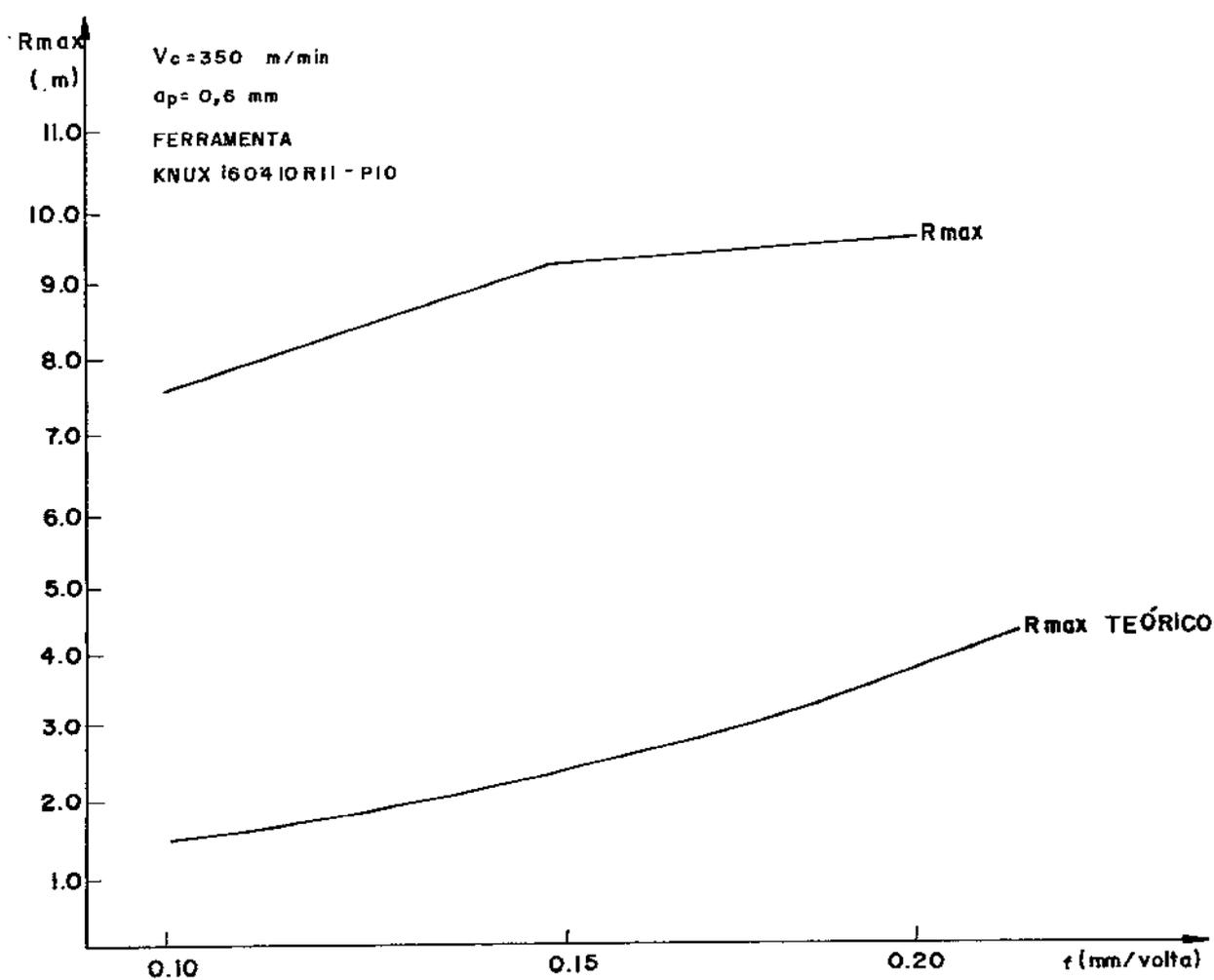


Figura 5.24 - R_{max} e R_{max} teórico x avanço (valores médios dos ensaios)

Tabela 5.5 - Valores de Ra e Rmax em diversas condições de usinagem

	Ra (μm)	Rmax (μm)	Rmax/Ra
f=0.15mm/rot v _c =200m/min	1.08	7.50	6.94
f = 0.15 v _c = 235	1.07	8.37	7.82
f = 0.15 v _c = 275	0.77	6.30	8.18
f = 0.15 v _c = 310	1.26	8.57	6.80
f = 0.15 v _c = 350	1.57	9.73	6.20
f = 0.15 v _c = 385	1.41	9.47	6.72
f = 0.15 v _c = 425	1.14	8.48	7.44
f = 0.10 v _c = 350	1.14	7.48	6.56
f = 0.20 v _c = 350	1.56	10.20	6.54
\bar{X}	-	-	7.02
σ	-	-	0.654
σ/\bar{X}	-	-	9.3%

buscando correlacionar rugosidade e velocidade de corte já foram realizados até valores de $v_c = 250$ m/min. Neste trabalho procurou-se utilizar velocidades de corte acima daquela em que a rugosidade se estabiliza e se atingir velocidades bem maiores do que aquelas encontradas na bibliografia e maiores também que as normalmente utilizadas na indústria. Constatou-se que, como mostram as figuras 5.23 e 5.24, R_a varia com a velocidade de corte em torno de um valor médio de $1.18 \mu\text{m}$ e R_{max} em torno de $7.16 \mu\text{m}$, mas com dispersões muito elevadas, o que faz com que o valor máximo de R_a , obtido com $v_c = 350$ m/min seja o dobro do valor mínimo obtido com $v_c = 275$ m/min e 55% maior no caso de R_{max} . Isto demonstra que os fenômenos dinâmicos são de grande importância no acabamento de peças torneadas fazendo com que o estabelecimento de um valor de velocidade de corte para a obtenção de bons acabamentos superficiais seja necessariamente precedido de ensaios utilizando o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça que for usado na usinagem do lote de peças. No caso deste trabalho, com o sistema utilizado e com $f = 0.15$ mm/volta, verificou-se que a velocidade de corte em que se obtém os melhores acabamentos superficiais se encontra em torno de 275 m/min.

- Com relação à variação de R_a e R_{max} em relação ao avanço (figuras 5.23 e 5.24) os resultados obtidos se aproximam bastante daqueles mostrados na literatura (item II.4.5), isto é, a rugosidade cresce com o avanço, aproximando-se cada vez mais dos valores teóricos, conforme mostra a tabela 5.6. Este resultado nos leva a supor que aumentando o avanço e o raio de ponta da ferramenta de tal maneira que se mantenham constantes os valores de rugosidade teóricos, teremos uma rugosidade menor, o que seria interessante, pois conseguir-se-ia um melhor acabamento superficial com maior remoção de cavaco na unidade de tempo. Pesquisas neste sentido serão objeto de trabalhos posteriores.

V.2 - RESULTADOS E DISCUSSOES RELATIVOS AOS ENSAIOS REALIZADOS COM A FERRAMENTA TPGR ($f = 0.2$ mm/volta $a_p = 0.6$ mm)

Tabela 5.6 - Relação entre os valores reais e teóricos de rugosidade ($v_c = 350$ m/min)

f[mm/rot]	0.10	0.15	0.20
Ra _{teor.} (μm)	0.32	0.72	1.28
Ra/Ra _{teor.}	3.56	2.18	1.22
R _{max} _{teor.} (μm)	1.25	2.80	5.00
R _{max} /R _{max} _{teor.}	5.98	3.47	2.04

r = 1.0 mm

A tabela 5.7 mostra os valores de Ra e Rmax ao se atingir um determinado valor de comprimento l utilizando-se a velocidade de corte $v_c = 280$ m/min (ensaios de 13 a 22). As tabelas 5.8 e 5.9 dão uma visão geral do acontecido nos ensaios com $v_c = 220$ m/min (ensaios 23 a 32) e com $v_c = 340$ m/min (ensaios 33 a 42). A tabela 5.10 mostra a relação entre a rugosidade superficial da peça (Ra) e os valores de desgaste frontal da ferramenta (Vb).

V.2.1 - Variabilidade dos valores de rugosidade

Pode-se ver nas tabelas 5.7 a 5.9 que houve uma variabilidade acentuada entre os resultados dos diversos ensaios, mesmo levando-se em conta somente os realizados sob uma mesma condição de usinagem. A principal razão para tamanha dispersão foi o fato de, em todos os ensaios, o cavaco formado ter sido em forma de fita. Isto pode ter gerado os seguintes fenômenos:

a) O cavaco enrolava-se sobre a peça, riscando-a. Este fator não foi preponderante na geração da variabilidade da rugosidade, pois se assim fosse, as medidas de rugosidade dentro de cada peça seriam bastante dispersas, devido ao fato de que o cavaco riscava algumas superfícies e outras não, o que não aconteceu. Via de regra, a relação entre o desvio padrão e a média dos quinze valores de Ra e Rmax medidos em cada peça não excedeu 10%, o que demonstra a baixa dispersão dentro de cada peça. Além disso, visualmente pode-se observar as regiões da peça riscadas pelo cavaco e procurava-se medir a rugosidade fora destas regiões.

b) A ferramenta, ao tocar o cavaco enrolado na peça quebrava-se. Vários fatos demonstram a elevada probabilidade deste fenômeno ter acontecido:

b1) Na verificação das ferramentas ao microscópio, constatou-se que muitas se apresentavam quebradas. (ver fotos da figura 5.25b).

b2) Muitas vezes os valores de Ra e Rmax cresciam abruptamente de uma peça para outra (tabelas 5.8 e 5.9) ou mesmo já se iniciavam as operações com uma ferramenta produzindo valores altos de rugosidade na peça, sugerindo quebra da ferramenta.

Tabela 5.7 - Valores de Ra e Rmax quando o comprimento
 $l = 215 \text{ m}$
 $v_c = 280 \text{ m/min}$ - Ensaaios de 13 a 22

Ensaio	Ra (μm)	Rmax (μm)
13	1.80	13.8
14	2.45	14.8
15	2.00	13.4
16	3.70	18.5
17	4.30	23.0
18	1.55	11.2
19	2.07	13.7
20	1.90	13.1
21	2.00	14.3
22	1.75	12.6
\bar{X}	2.35	14.8
σ	0.911	3.432
σ/\bar{X}	38.8%	23.1%
\bar{X}^*	1.94	13.4
σ^*	0.266	1.107
σ/\bar{X}^*	13.7%	8.3%

* - Valores que não consideram os resultados dos ensaios 16 e 17

Tabela 5.8 - Panorama Geral dos resultados dos ensaios
com $v_c = 220$ m/min - Ensaios de 23 a 32

Ensaio 23	- Peça 12 (l=425m) - Ra = 2.5 μ m Rmax = 12.7 μ m
"	24 - Peça 2 - l=70m - Ra > 8 μ m Rmax > 30 μ m
"	25 - Peça 1 - l=33m - Ra=3.25 μ m Rmax=14.6 μ m Peça 9 - l=302m - Ra > 7 μ m Rmax > 28 μ m
"	26 - Da peça 5 (l=167m) para a 6 (l=200m) Ra passou de 1.5 para 7.7 μ m e Rmax de 13 para 34 μ m
"	27 - Da peça 1 (l=33m) para a 2 (l=67m) Ra passou de 1.3 para 3.8 μ m e Rmax de 10 para 26 μ m
"	28 - Peça 1 (l=35m) - Ra > 6 μ m Rmax > 27 μ m
"	29 - Da peça 2 (l=70m) para a 3 (l=106m) Ra passou de 1.5 para 3.2 μ m e Rmax de 11.7 para 18.5 μ m Peça 8 (l=282m) Ra > 5 μ m e Rmax > 22 μ m Peça 10 (l=353m) Ra > 6 μ m e Rmax > 29 μ m
"	30 - Da peça 10 (l=335m) para a 11 (l=369m) Ra passou de 1.6 para 7.4 μ m e Rmax de 11 para 29 μ m
"	31 - Da peça 6 (l=197m) para a 7 (l=230m) Ra passou de 1.5 para 8.5 μ m e Rmax de 12.8 para 34.5 μ m
"	32 - Peça 1 (l=34.5m) - Ra = 2.2 μ m Rmax = 17.3 μ m Peça 13 (l=449m) - Ra = 2.1 μ m Rmax = 14.8 μ m

Tabela 5.9 - Panorama Geral dos resultados dos ensaios
com $v_c = 340$ m/min - Ensaios de 33 a 42

Ensaio 33	- Peça 1 (l=34m) - $R_a > 5 \mu m$ $R_{max} > 28.5 \mu m$ até o fim do ensaio (peça 8 l=274m) os valores de R_a e R_{max} mantiveram-se abaixo destes.
" 34	- Peça 5 (l=168m) - $R_a = 2.5 \mu m$ $R_{max} = 16 \mu m$
" 35	- Peça 1 (l=33.5m) - $R_a > 6 \mu m$ $R_{max} > 30 \mu m$
" 36	- Peça 1 (l=33.5m) - $R_a > 15 \mu m$ $R_{max} > 70 \mu m$
" 37	- R_a em torno de $5 \mu m$ e R_{max} em torno de $24 \mu m$ desde o início até o fim do ensaio (l=168m)
" 38	- Peça 1 (l=35.6m) - $R_a < 2 \mu m$ $R_{max} < 11.5 \mu m$ Peça 2 (l=71.3m) - $R_a > 7 \mu m$ $R_{max} > 36 \mu m$
" 39	- Peça 1 (l=32.5m) - $R_a = 8 \mu m$ $R_{max} = 32 \mu m$
" 40	- Peça 7 (l=237.5m) - $R_a = 2.2 \mu m$ $R_{max} = 15.2 \mu m$
" 41	- Peça 1 (l=33.5m) - $R_a = 2 \mu m$ $R_{max} = 14.2 \mu m$ Peça 2 (l=67.0m) - $R_a > 6 \mu m$ $R_{max} > 35.0 \mu m$
" 42	- Peça 2 (l=70.5m) - $R_a = 2.3 \mu m$ $R_{max} = 14 \mu m$ Peça 3 (l=105.8m) - $R_a > 6.5 \mu m$ $R_{max} > 40 \mu m$

Tabela 5.10 - Valores de Ra e Vbmax no fim de cada ensaio

	Ensaio	Vbmax (μm)
Ra < 1.60 μm	18	530
	22	333
2.00 < Ra < 2.30	20	203
	21	375
2.31 < Ra < 2.65	34	395
2.66 < Ra < 3.00	14	688
	15	501
3.00 < Ra < 4.00	23	633
	27	355
4.00 < Ra < 6.00	16	755
	33	779
	37	156
6.00 < Ra < 9.99	17	1690
	24	1386
	25	558
	26	1774
	28	972
	29	928
	30	340
	31	1156
	35	491
	38	1835
	41	295
42	1110	
Ra > 10.0 μm	39	622
	36	1808

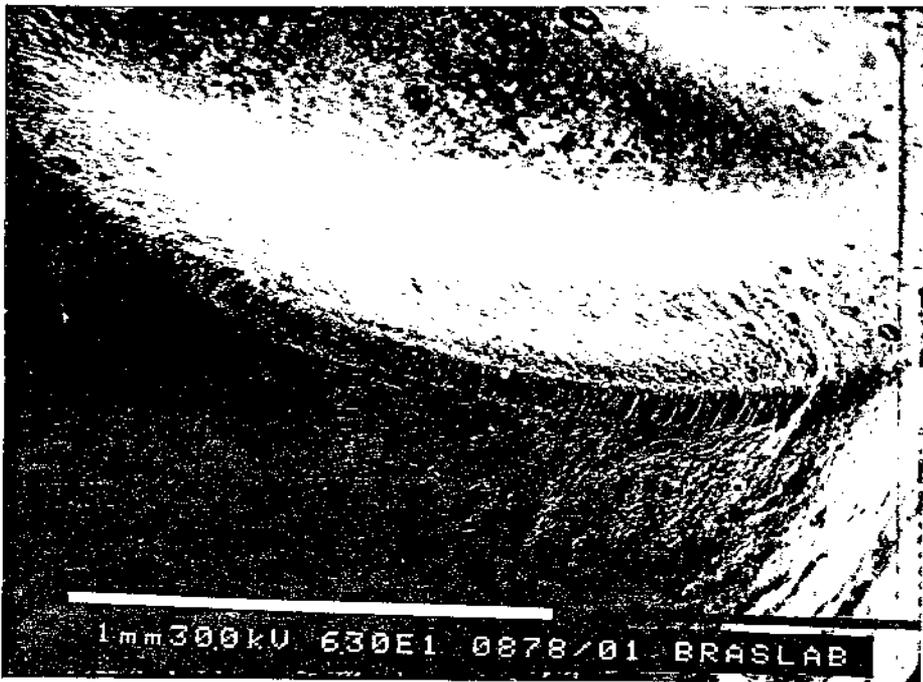
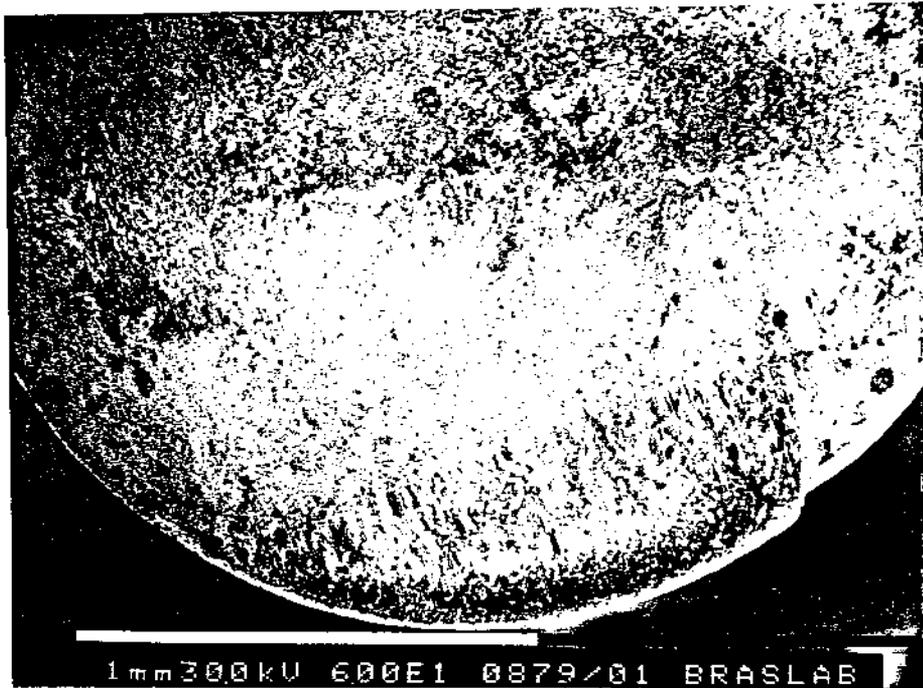


figura 5.25.a - Ponta da Ferramenta - Ensaio 22



figura 5.25.b - Ponta da Ferramenta - Ensaio 41

b3) Nos ensaios com a ferramentas KNUX, que também era da classe ISO P10 e portanto possui a mesma tenacidade da ferramenta utilizada nestes ensaios, mas o cavaco não se enrolava sobre a peça, as ferramentas não se apresentaram quebradas e nem houve mudança abrupta nos valores de rugosidade superficial, sugerindo que o cavaco enrolado sobre a peça foi o responsável pela quebra da ferramenta.

O fato de à velocidade de corte $v_c = 280$ m/min a variabilidade da rugosidade não ter sido tão acentuada, principalmente quando se exclui os resultados referentes aos ensaios 16 e 17 (tabela 5.7), prende-se à constatação de que com esta velocidade o cavaco apesar de ser longo, não se enrolava na peça, não apresentando os fenômenos citados acima.

Para se tirar alguma conclusão sobre a variabilidade do processo de torneamento em acabamento, necessário se faz realizar outros ensaios em condições de usinagem onde se tenha cavacos menores para esta ferramenta.

Para que isto possa ser feito, realizou-se ensaios para descobrir os valores de avanço e profundidade de corte onde se tenha boa quebra do cavaco. Os resultados destes ensaios estão mostrados e discutidos no item V.3.

V.2.2 - Relação entre os valores de desgaste da ferramenta e rugosidade da peça.

Vê-se pelos resultados mostrados na tabela 5.10, que não se pôde nestes ensaios estabelecer uma relação entre os valores de rugosidade superficial (R_a) e do desgaste frontal (V_b), pois em ensaios onde o R_a final era alto, suas ferramentas apresentavam V_b baixo, como nos ensaios 30 e 37 e vice-versa, como no ensaio 14.

Isto se prende ao fato de que, ao quebrar a ferramenta, o cavaco o faz de maneira bastante irregular. Assim, muitas ferramentas apresentaram baixos valores de desgaste frontal, mas, quando foram observadas olhando-se para suas superfícies de saída, verificou-se que suas pontas mostravam bastante quebradas, o que influi decisivamente nos valores de rugosidade. Pode-se como exemplo citar as ferramentas dos ensaios 22 e 41 que

apresentaram desgastes frontais com valores semelhantes, mas cujas pontas se mostraram bastante diferentes e, conseqüentemente tiveram valores de rugosidades diferentes. (figura 5.25)

V.3 - ENSAIOS DE FORMA DE CAVACO

Como mostrado no item anterior, o cavaco em forma de fita formado foi o principal responsável pela grande variabilidade do processo. Assim, para que o estudo da dispersão do processo de torneamento em acabamento pudesse ser realizado, era necessário que se obtivesse cavacos curtos na operação. Além disso, interessava também que se mantivesse a ferramenta para que se pudesse fazer alguma comparação entre os ensaios com cavaco longo e cavaco curto. Portanto, realizou-se ensaios buscando encontrar qual a faixa de avanço/profundidade de corte ideal para a ferramenta TPGR para cada velocidade de corte utilizada, isto é, encontrar o par f - a_p que gere cavacos curtos utilizando-se desta ferramenta e que ainda se encontre em condições de produzir um bom acabamento superficial.

As figuras 5.26, 5.27 e 5.28 mostram os resultados destes ensaios para as velocidades 220, 280 e 340 m/min respectivamente. Uma análise destas figuras leva a concluir que, para as três velocidades de corte, com avanço $f = 0.2$ mm/volta o cavaco mostra-se com uma forma boa (cavaco mais curto) com profundidade de corte da ordem de 0.9 mm e que com avanço $f = 0.25$ mm/volta, pode-se utilizar profundidade de corte dentro da faixa de 0.6 a 1.2 mm.

Assim, escolheu-se avanço $f = 0.25$ mm/volta e profundidade de corte $a_p = 0.7$ mm para a realização dos ensaios posteriores, os quais serão objeto de análise e discussão no próximo item.

V.4 - RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS REALIZADOS COM FERRAMENTA TPGR ($f = 0.25$ mm/volta; $a_p = 0.7$ mm)

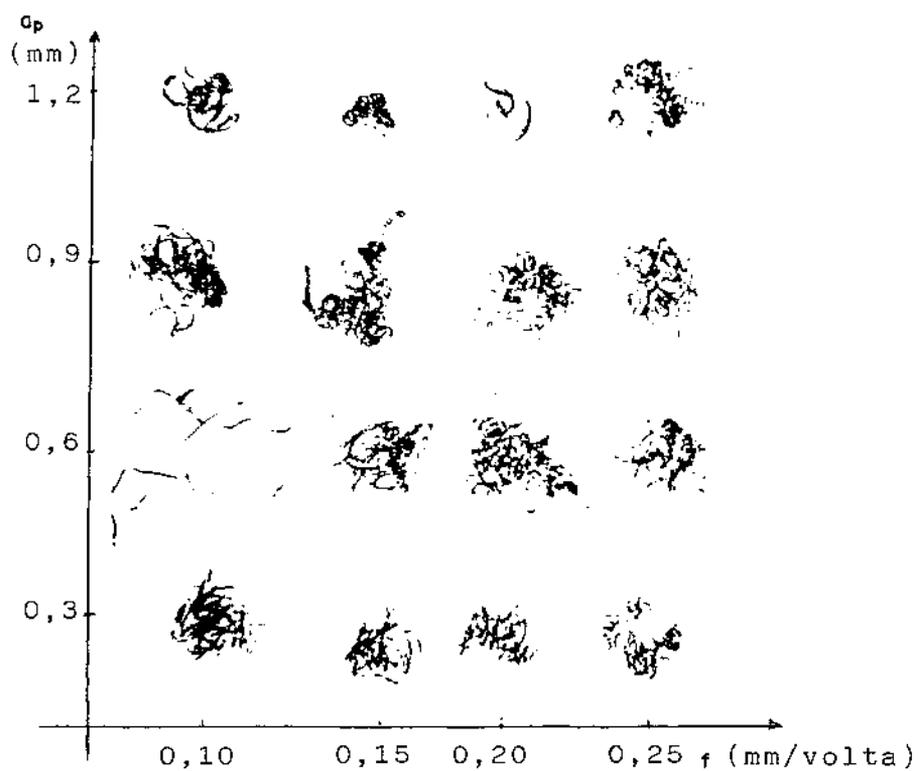


Figura 5.26 - Ensaio de forma do cavaco - $v_c = 220$ m/min

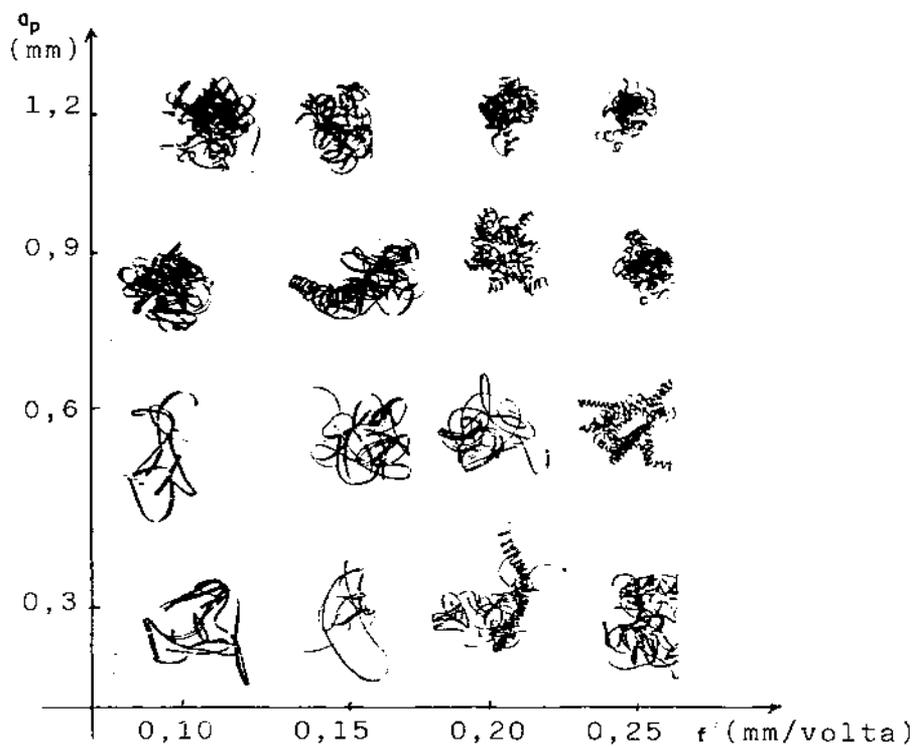


Figura 5.27 - Ensaio de forma do cavaco - $v_c = 280$ m/min

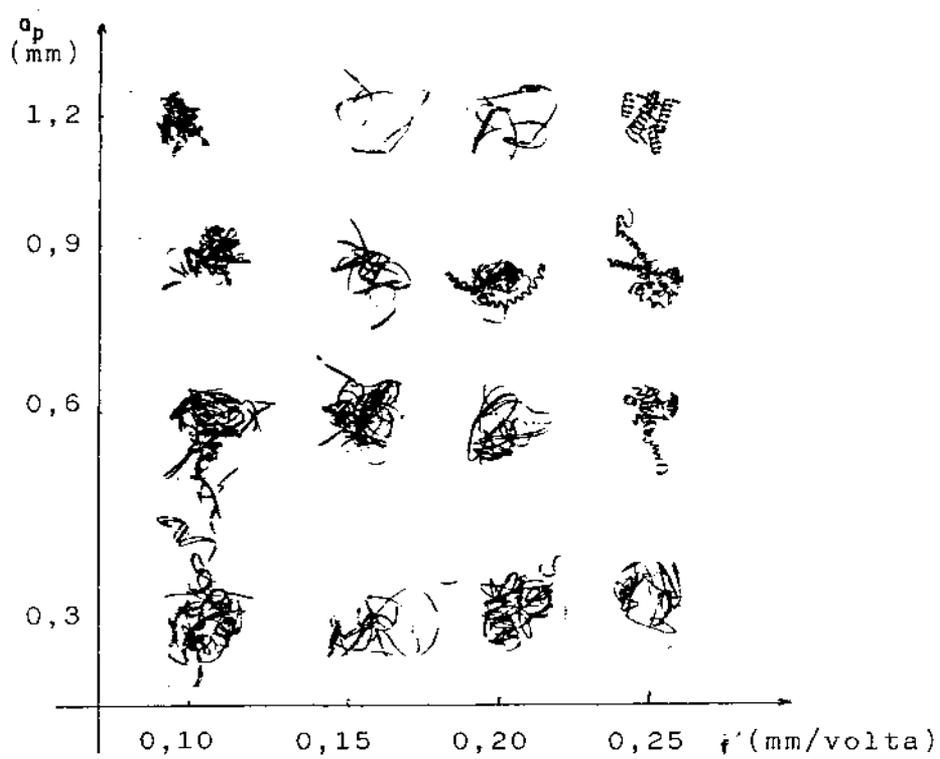


Figura 5.28 - Ensaio de forma do cavaco - $v_c = 340$ m/min

A tabela 5.11 mostra um resumo dos resultados obtidos para a rugosidade superficial das peças torneadas. As figuras 5.29 a 5.34 representam graficamente esta tabela. Para se calcular as bandas de confiança mostradas nas tabelas 5.12 a 5.14 utilizou-se do procedimento descrito no Apêndice A. Estas bandas representam a probabilidade (no caso 90%) da média de uma amostra qualquer desta população cair dentro do intervalo mostrado. Como os diâmetros das peças usinadas não eram exatamente iguais, utilizou-se $l = \pi \cdot d.la$.

A tabela 5.15 mostra as equações resultantes das análises de regressão feitas para se encontrar a relação entre $Ra \times l$ e $Rmax \times l$ para cada uma das três velocidades de corte ensaiadas, bem como os respectivos coeficientes de correlação (R^2).

As tabelas 5.16 e 5.17 mostram os resultados das análises de variância dos valores de Ra dos ensaios 53 a 57, onde se obteve o menor R^2 e de $Rmax$ dos ensaios 48 a 52, onde se obteve o maior R^2 respectivamente. O procedimento estatístico utilizado para a construção destas tabelas está mostrado no Apêndice A.

As tabelas 5.18 a 5.20 mostram os valores médios de Ra e $Rmax$ para cada uma das peças dos ensaios realizados com $v_c = 220, 280$ e 340 m/min respectivamente. Cada ponto destas tabelas é uma média dos valores de rugosidade das cinco peças de mesmo número de cada um dos ensaios com uma determinada velocidade de corte. Assim, cada um destes pontos apresenta uma pequena incorreção, pois fez-se uma média de valores de rugosidade tomados depois de comprimentos de corte diferentes, já que os diâmetros das peças usinadas não foram exatamente os mesmos em todos os ensaios. Como essa variação é pequena (no máximo 2%) foi desprezada. Os intervalos de confiança mostrados foram calculados partindo-se do pressuposto de que estes dados apresentam uma distribuição normal (conforme Petropoulos [8]) e portanto, 90% dos pontos caem dentro do intervalo $\bar{X} \pm 1.65$

As tabelas 5.21 e 5.22 mostram os resultados da estimativa feita pelo operador da máquina do momento de troca da ferramenta, baseado na rugosidade superficial de uma peça tomada como padrão.

A tabela 5.23 mostra os valores dos desgastes frontais versus os valores de Ra e $Rmax$ finais de cada um dos ensaios e a figura 5.35 mostra fotos destas ferramentas.

Tabela 5.11 - Resumo dos resultados obtidos
 $f=0.25$ mm/volta $a_p=0.7$ mm
 Ferramenta TPGR 160312 P10

Ensaio	Peça	l (mm)	Ramédio (m)	σ	Rmaxmed. (μ m)	σ	No. Ptos medidos
43	1	32515	2.13	0.201	14.3	1.162	6
	2	65030	1.82	0.041	11.6	0.417	6
	3	97545	1.82	0.048	11.3	0.650	6
	4	130060	2.02	0.142	13.4	0.903	6
	5	162575	2.25	0.172	15.9	0.654	6
	6	195090	2.08	0.093	14.9	0.726	6
	7	227605	2.41	0.189	16.5	1.607	6
	8	260120	2.38	0.124	17.5	1.340	6
	9	292635	3.11	0.156	19.5	0.969	6
	10	325150	3.11	0.262	19.7	1.656	6
	11	357665	2.45	0.188	19.0	1.600	6
	12	390180	2.57	0.183	16.9	0.989	6
44	1	32515	2.35	0.106	13.8	0.709	6
	2	65030	2.46	0.043	13.9	1.146	6
	3	97545	2.47	0.063	13.5	0.877	6
	4	130060	2.57	0.067	14.4	0.647	6
	5	162575	2.64	0.100	16.4	0.857	6
	6	195090	2.55	0.118	15.5	1.192	6
	7	227605	2.68	0.090	16.9	1.325	6
	8	260120	2.79	0.118	16.8	1.110	6
	9	292635	2.70	0.062	16.7	1.042	6
	10	325150	2.60	0.072	16.5	0.971	6
	11	337665	2.68	0.126	17.3	1.278	6
	12	390180	2.70	0.028	15.6	0.501	6
45	1	32044	2.63	0.159	15.6	0.920	6
	2	64088	2.50	0.080	13.5	1.007	6
	3	96132	2.49	0.064	13.4	0.654	6
	4	128176	2.41	0.086	13.1	0.779	6
	5	160220	2.46	0.080	13.5	0.527	6
	6	162264	2.50	0.064	13.7	1.362	6
	7	224308	2.58	0.118	15.4	1.318	6
	8	256352	2.55	0.123	15.6	1.326	6
	9	288396	2.63	0.155	16.4	1.063	6
	10	320440	2.71	0.152	17.3	1.033	6
	11	352484	2.60	0.085	16.7	1.165	6
	12	384528	2.68	0.147	17.5	1.093	6

Tabela 5.11 - Resumo dos Resultados Obtidos (Cont.)

46	1	32437	2.06	0.198	12.9	1.443	15
	2	64874	2.16	0.165	14.0	1.212	15
	3	97311	2.09	0.131	14.0	0.976	15
	4	129748	2.46	0.430	15.1	2.168	15
	5	162185	2.67	0.456	15.0	2.621	15
	6	194622	2.43	0.341	14.7	2.243	15
	7	227059	2.43	0.239	14.8	1.198	15
	8	259496	2.58	0.325	15.6	1.809	15
	9	291933	2.48	0.401	14.9	1.779	15
	10	324370	2.58	0.405	15.9	1.193	15
	11	356807	2.36	0.363	13.2	1.599	15
	12	389244	2.40	0.198	14.4	1.621	15
47	1	32437	2.49	0.416	13.6	2.261	15
	2	64874	2.82	0.477	15.7	2.391	15
	3	97311	2.42	0.400	14.7	2.054	15
	4	129748	2.27	0.391	13.0	2.016	15
	5	162185	2.24	0.246	14.3	1.624	15
	6	194622	2.29	0.389	13.8	2.260	15
	7	227059	2.39	0.397	13.9	1.247	15
	8	259496	2.60	0.379	16.7	1.708	15
	9	291933	2.67	0.424	16.9	2.749	15
	10	324370	2.26	0.345	15.1	1.454	15
	11	356807	2.57	0.403	16.7	1.342	15
	12	389244	2.72	0.421	16.9	1.578	15
48	1	32515	2.34	0.155	14.1	0.889	6
	2	65030	2.31	0.033	14.9	1.186	6
	3	97545	2.34	0.048	14.2	0.770	6
	4	130060	2.55	0.092	15.2	1.206	6
	5	162575	-	-	-	-	-
	6	195090	-	-	-	-	-
	7	227605	2.71	0.052	16.1	-	6
	8	260120	2.80	0.175	15.9	0.319	6
	9	292635	2.93	0.138	15.5	0.492	6
	10	325150	2.82	0.114	16.0	0.616	6
	11	357665	2.79	0.076	16.2	0.736	6
	12	390180	2.72	0.101	16.7	0.624	6
	13	422695	2.37	0.095	15.3	1.231	6
	14	455210	2.46	0.078	15.6	1.114	6

Tabela 5.11 - Resumo dos Resultados Obtidos (Cont.)

49	1	32437	1.57	0.037	11.7	0.302	6
	2	64874	1.76	0.048	13.2	0.727	6
	3	97311	1.91	0.143	13.1	0.977	6
	4	129748	1.91	0.052	13.2	0.560	6
	5	162185	1.95	0.071	14.1	1.370	6
	6	194622	2.04	0.095	13.5	1.191	6
	7	227059	2.04	0.157	13.9	1.248	6
	8	259496	2.14	0.151	14.4	0.488	6
	9	291933	2.31	0.131	15.5	1.280	6
	10	324370	2.30	0.158	15.4	1.378	6
	11	356807	2.27	0.050	15.1	0.476	6
	12	389244	2.41	0.061	15.4	0.782	6
	13	421681	2.50	0.250	15.7	1.042	6
	14	454118	2.42	0.216	14.8	0.877	6
50	1	32437	2.40	0.041	12.3	0.460	6
	2	64874	2.61	0.119	14.5	0.990	6
	3	97311	2.63	0.099	14.9	1.154	6
	4	129748	2.62	0.221	14.7	1.095	6
	5	162185	2.43	0.045	13.6	0.592	6
	6	194622	2.39	0.053	14.1	0.889	6
	7	227059	2.76	0.238	16.2	1.461	6
	8	259496	2.76	0.189	15.4	1.269	6
	9	291933	2.67	0.243	15.4	1.540	6
	10	324370	2.67	0.216	16.4	1.374	6
	11	356807	2.58	0.125	15.3	0.866	6
	12	389244	2.70	0.170	16.7	1.302	6
	13	421681	2.76	0.154	17.9	0.804	6
	14	454118	2.59	0.094	18.0	0.756	6
51	1	32044	1.64	0.088	12.1	0.698	6
	2	64088	1.78	0.044	11.5	0.690	6
	3	96132	1.88	0.088	12.7	0.844	6
	4	128176	1.97	0.121	13.6	1.100	6
	5	160220	1.97	0.081	12.6	0.419	6
	6	192264	1.90	0.099	13.2	1.020	6
	7	224308	2.10	0.106	14.3	0.886	6
	8	256352	2.12	0.110	14.2	1.300	6
	9	288396	2.06	0.067	14.8	0.634	6
	10	320440	2.11	0.073	14.6	1.050	6
	11	352484	2.10	0.089	14.2	1.141	6
	12	384528	2.01	0.132	14.1	0.869	6
	13	416572	2.14	0.116	16.8	1.147	6
	14	448616	2.02	0.049	17.1	1.688	6

Tabela 5.11 - Resumo dos Resultados Obtidos (Cont.)

52	1	32437	1.43	0.047	10.5	0.864	6
	2	64874	1.64	0.158	11.9	1.117	6
	3	97311	1.64	0.155	12.6	0.936	6
	4	129748	1.61	0.102	12.4	1.183	6
	5	162185	2.09	0.161	13.7	0.646	6
	6	194622	2.13	0.102	14.2	0.531	6
	7	227059	2.56	0.117	15.7	1.220	6
	8	259496	2.45	0.237	14.2	1.217	6
	9	291933	1.97	0.127	14.8	1.364	6
	10	324370	1.97	0.161	14.5	1.257	6
	11	356807	2.21	0.127	16.9	1.615	6
	12	389244	2.00	0.183	15.0	1.355	6
	13	421681	1.90	0.121	14.9	0.810	6
	14	454118	2.61	0.128	19.3	1.213	6
53	1	32437	2.34	0.126	16.4	1.141	6
	2	64874	2.43	0.077	15.0	1.633	6
	3	97311	2.01	0.177	12.7	0.712	6
	4	129748	2.07	0.088	13.7	0.808	6
	5	162185	2.32	0.140	16.1	1.031	6
	6	194622	2.63	0.178	18.4	1.155	6
	7	227059	3.09	0.125	21.8	0.889	6
54	1	32437	2.36	0.272	14.5	1.648	15
	2	64874	2.96	0.412	15.9	1.968	15
	3	97311	3.45	0.415	16.7	1.869	15
	4	129748	3.55	0.589	17.8	2.533	15
	5	162185	3.38	0.469	17.7	1.942	15
	6	194622	3.61	0.497	18.9	1.970	15
	7	227059	3.80	0.338	21.2	2.02	15
55	1	32437	2.40	0.355	14.2	1.848	15
	2	64874	2.75	0.431	17.2	2.170	15
	3	97311	3.02	0.320	18.3	1.300	15
	4	129748	3.72	0.633	19.7	2.237	15
	5	162185	3.31	0.553	19.3	2.133	15
	6	194622	3.00	0.470	18.1	1.773	15
	7	227059	3.09	0.463	18.3	1.593	15
56	1	32044	2.26	0.037	11.7	0.493	6
	2	64088	2.13	0.067	12.6	0.996	6
	3	96132	2.14	0.040	13.2	0.482	6
	4	128176	2.25	0.094	14.0	0.789	6
	5	160220	2.36	0.070	15.0	1.322	6
	6	192264	2.30	0.089	14.7	0.726	6
	7	224308	2.35	0.045	15.8	0.624	6

Tabela 5.11 - Resumo dos Resultados Obtidos (Cont.)

57	1	32044	1.85	0.052	10.9	0.611	6
	2	64088	1.73	0.044	11.7	0.943	6
	3	96132	1.79	0.128	11.6	0.696	6
	4	128176	2.32	0.300	14.7	1.520	15
	5	160220	2.40	0.337	14.6	2.125	15
	6	192264	2.22	0.348	15.1	2.416	15
	7	224308	2.53	0.381	16.7	1.568	15

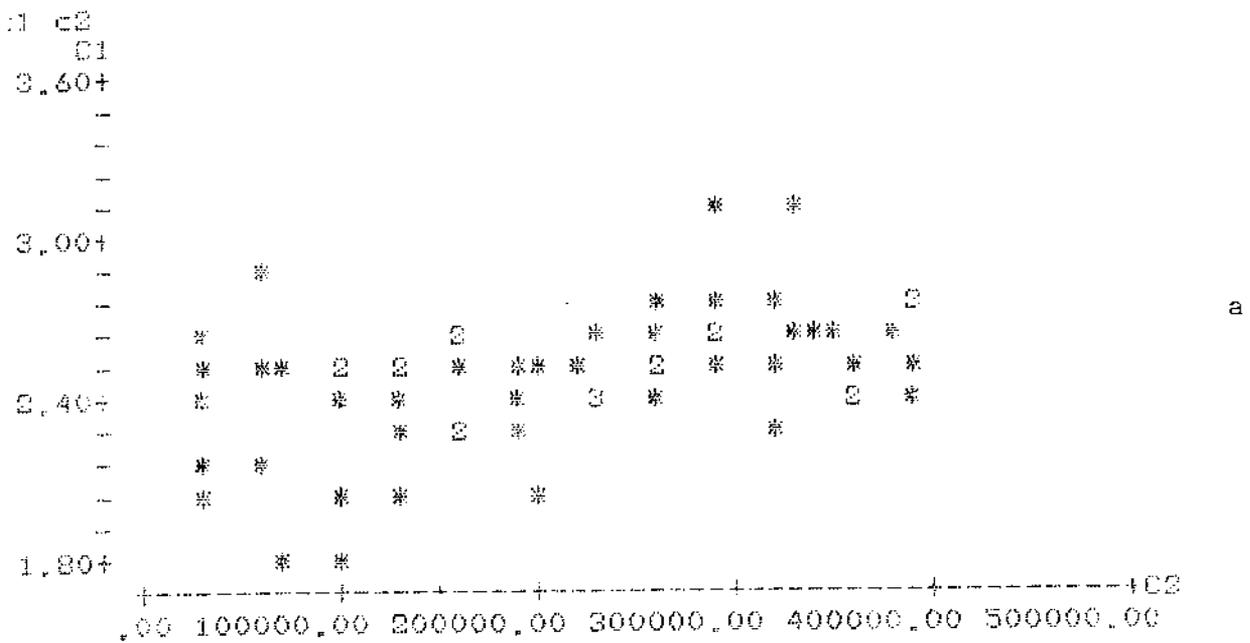
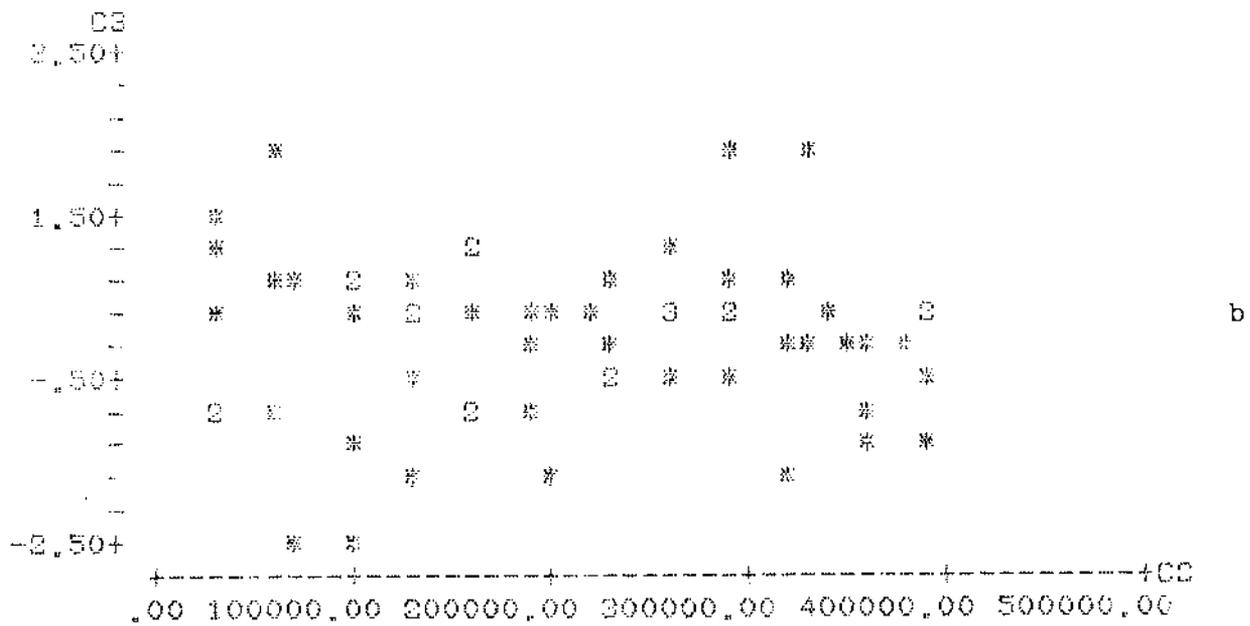


Figura 5.29 - a) Resíduos da Regressão Linear Ra x 1

b) Ra x 1 - Ensaios 43 a 47

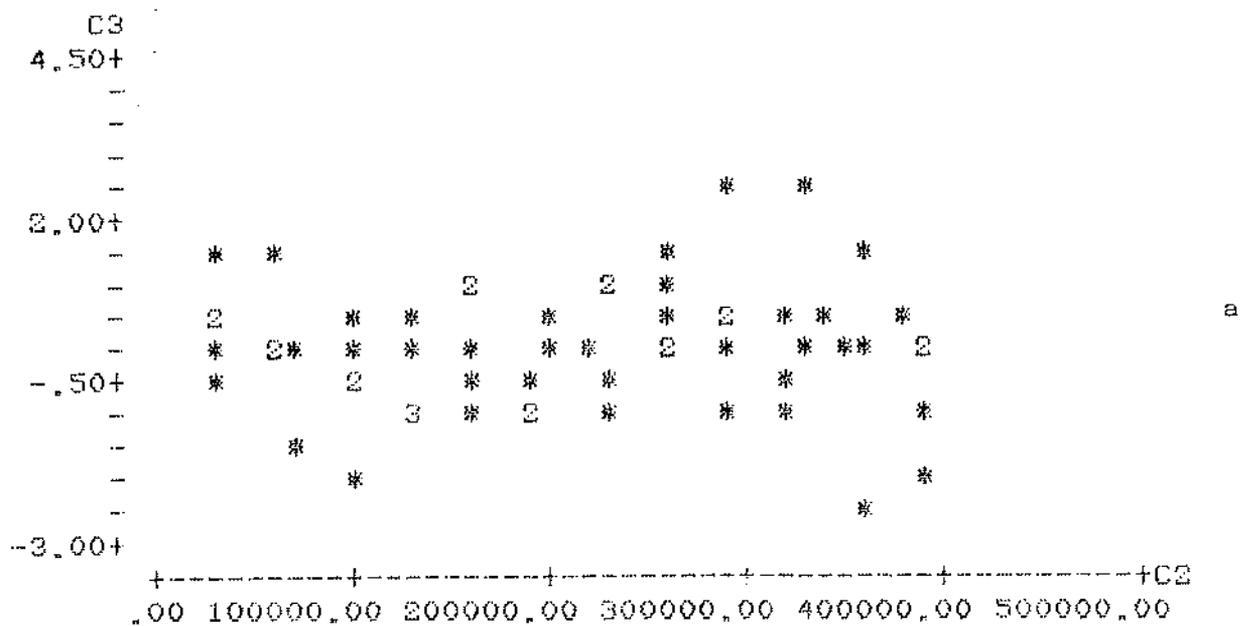
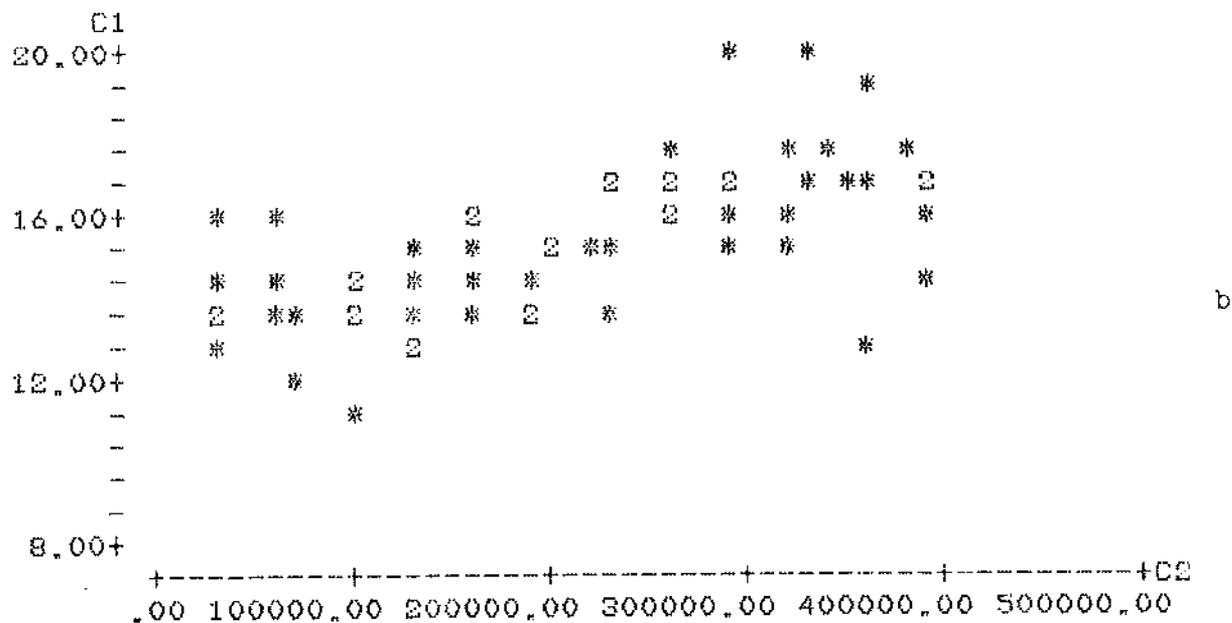


Figura 5.30 - a) Resíduos da Regressão Linear Rmax x 1
 b) Rmax x 1 - Ensaios 43 a 47

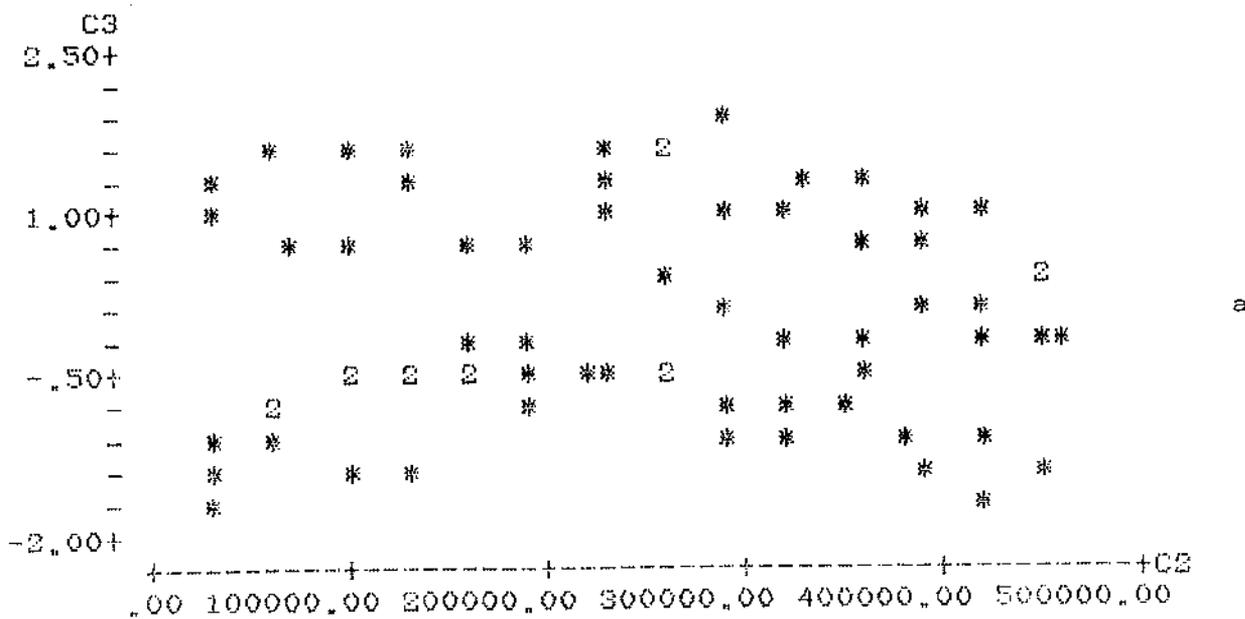
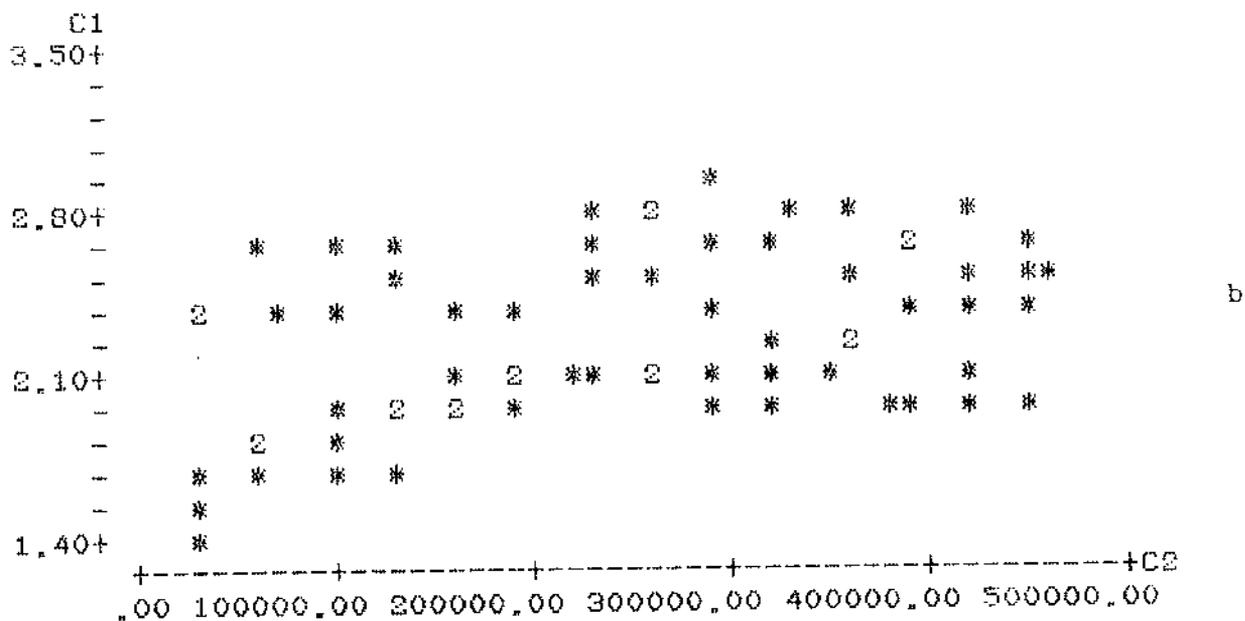


Figura 5.31 - a) Resíduos da regressão linear Ra x 1

b) Ra x 1 - Ensaios 48 a 52

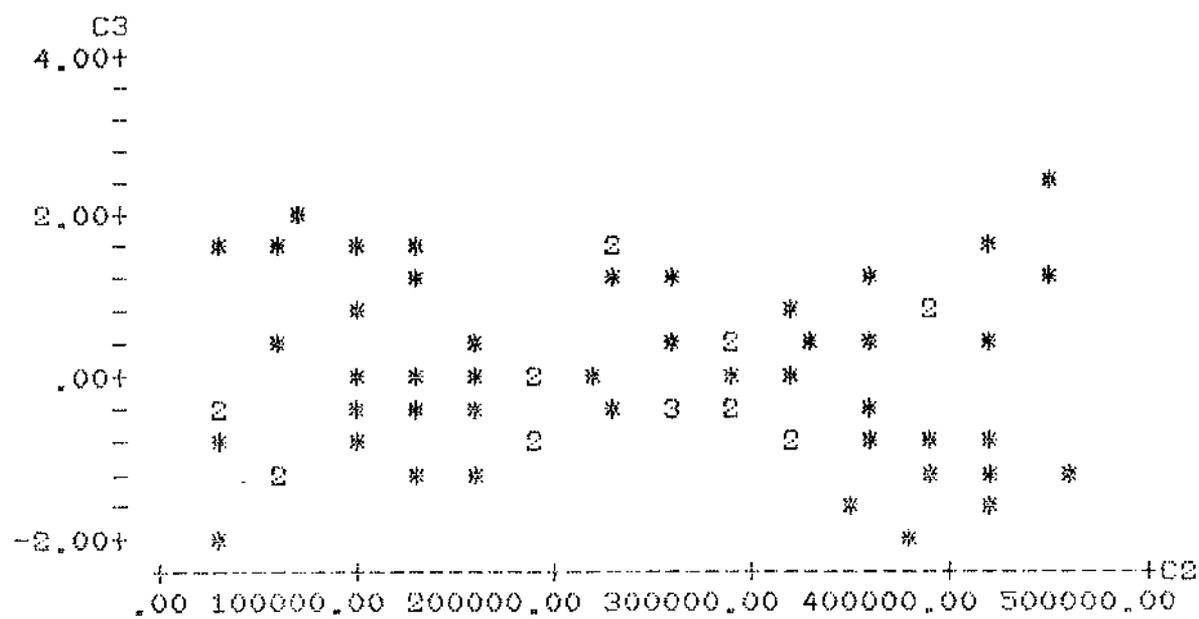
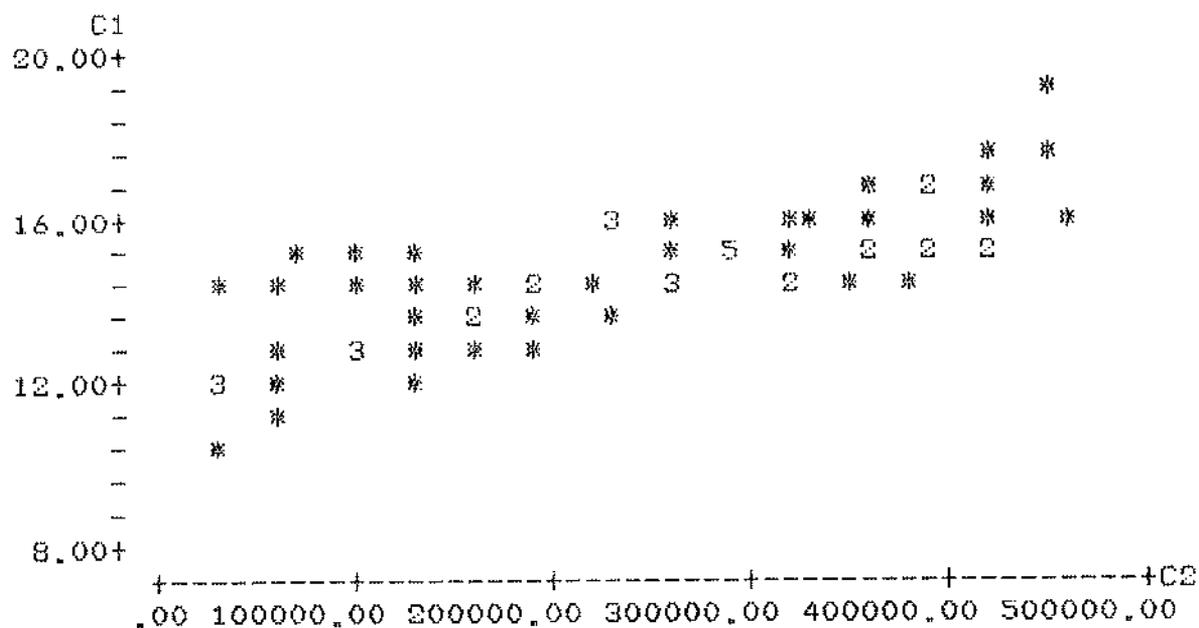


Figura 5.32 - a) Resíduos da Regressão Linear Rmax x 1

b) Rmax x 1 - Ensaios 48 a 52

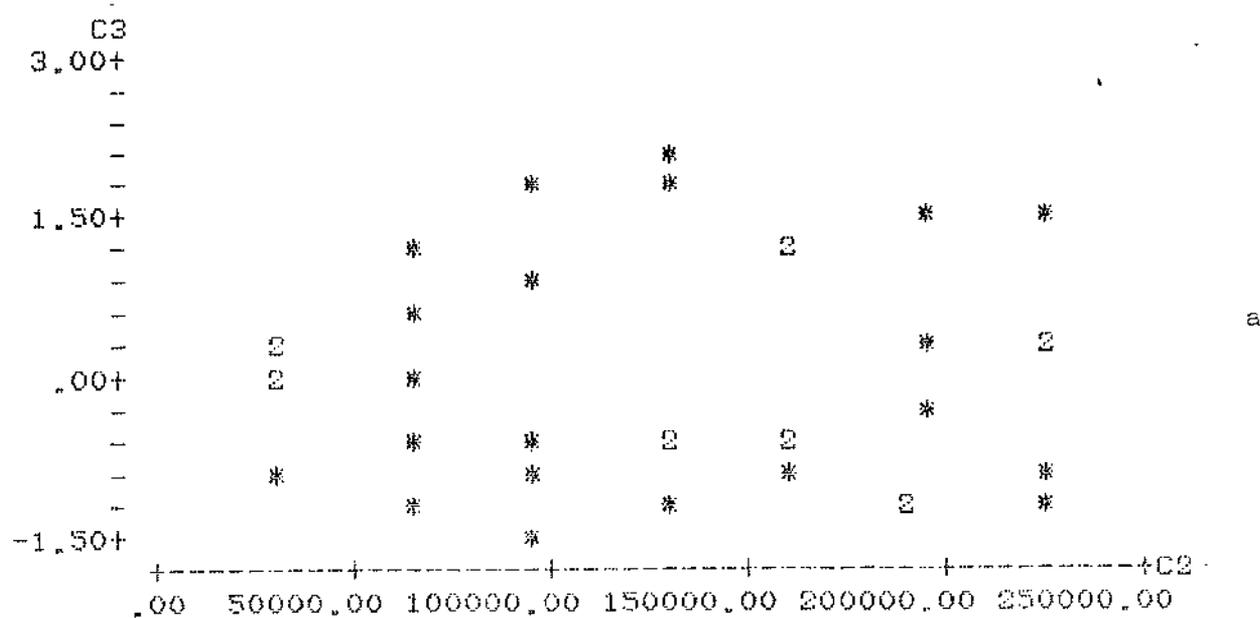
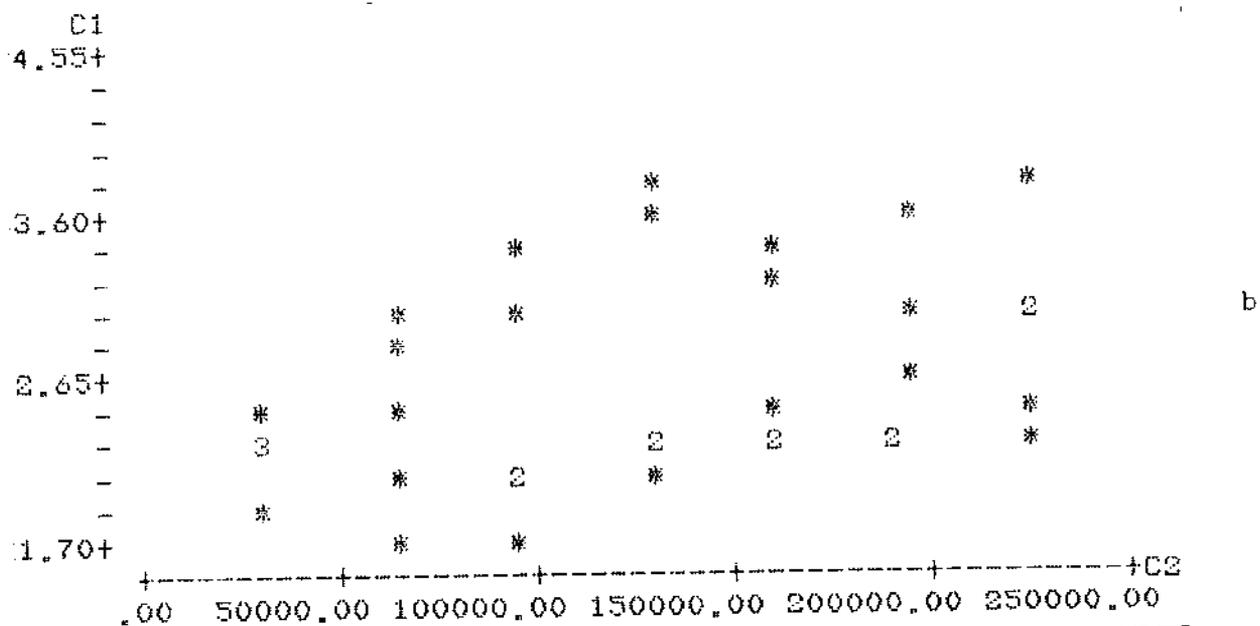


Figura 5.33 - a) Resíduos da Regressão Linear Ra x 1

b) Ra x 1 - Ensaios de 53 a 57

Tabela 5.12 - Intervalo de Confiança da média em torno dos valores estimados de Ra e Rmax
Ensaios de 43 a 47 - v = 280 m/min

l(mm)	R \bar{a} (μ m)	Rm \bar{a} x (μ m)
50.000	0.0840	0.5107
100.000	0.0674	0.4102
150.000	0.0544	0.3315
200.000	0.0481	0.2928
250.000	0.0509	0.3096
300.000	0.0615	0.3745
350.000	0.0769	0.4679
400.000	0.0946	0.5760
450.000	0.1137	0.6921

Tabela 5.13 - Intervalo de confiança da média em torno dos valores estimados de Ra e Rmax
Ensaaios de 48 a 52 - v = 220 m/min

l (mm)	R \bar{a} (μ m)	Rm $\bar{a}x$ (μ m)
50.000	0.1208	0.3819
100.000	0.1005	0.3180
150.000	0.0834	0.2637
200.000	0.0715	0.2262
250.000	0.0678	0.2144
300.000	0.0734	0.2323
350.000	0.0867	0.2741
400.000	0.1046	0.3309
450.000	0.1253	0.3963

Tabela 5.14 - Intervalo de confiança da média em torno dos valores estimados de Ra e Rmax
Ensaaios de 53 a 57 - v = 340 m/min

l (mm)	R \bar{a} (μ m)	Rm $\bar{a}x$ (μ m)
50.000	0.2423	1.0254
100.000	0.1681	0.7112
150.000	0.1610	0.6814
200.000	0.2275	0.9628
250.000	0.3252	1.3761
300.000	0.4335	1.8343

Tabela 5.15 - Resultados das Análises de Regressão Linear

Ensaio	de 43 a 47	de 48 a 52	de 53 a 57
Equação p/ Ra	$2.27+1.016 \times 10^{-6} \cdot l$ (μm)	$1.97+1.165 \times 10^{-6} \cdot l$ (μm)	$2.17+3.560 \times 10^{-6} \cdot l$ (μm)
R	21.2%	17.8%	16.2%
Equação p/ Rmax	$13.1+1.035 \times 10^{-5} \cdot l$ (μm)	$12.3+9.611 \times 10^{-6} \cdot l$ (μm)	$12.5+2.556 \times 10^{-5} \cdot l$ (μm)
R	43.1%	59.0%	37.0%

Tabela 5.16 - Análise de Variância - Ensaios 53 a 57
Regressão dos valores de Ra (pior R^2)

	df	SS	MS	Fratio
Regressão	1	1.8491	1.8491	6.385
Resíduos	33	9.5555	0.2896	
Falta de ajuste	5	0.1095	0.0219	0.0649
Erro Puro	28	9.4460	0.3374	
Total	34	11.4046		

Tabela 5.17 - Análise de Variância - Ensaios de 48 a 52
Regressão dos valores de Rmax (maior R^2)

	df	SS	MS	Fratio
Regressão	1	101.19	101.19	91.99
Resíduos	64	70.20	1.10	
Falta de ajuste	14	4.11	0.2936	0.2221
Erro Puro	50	66.09	1.3218	
Total	65	171.39		

Tabela 5.18 - Média dos valores de Ra e Rmax para peças de mesmo número - Ensaio de 48 a 52
v=220 m/min

Peça	Ra (μm)				Rmax (μm)			
	\bar{R}_a	σ	Interv	σ/\bar{R}_a	\bar{R}_{max}	σ	Interv	σ/R_{max}
1	1.88	0.458 ±	0.756	24.4%	12.1	1.300 ±	2.145	10.7%
2	2.02	0.419	0.691	20.7%	13.2	1.513	2.496	11.5%
3	2.08	0.398	0.657	19.1%	13.5	1.007	1.662	7.5%
4	2.13	0.436	0.719	20.5%	13.8	1.132	1.868	8.2%
5	2.11	0.222	0.366	10.5%	13.5	0.638	1.053	4.7%
6	2.11	0.206	0.340	9.8%	13.7	0.480	0.798	3.5%
7	2.43	0.341	0.563	14.0%	15.2	1.067	1.761	7.0%
8	2.45	0.325	0.536	13.2%	14.8	0.782	1.290	5.3%
9	2.39	0.407	0.672	17.0%	15.1	0.327	0.540	2.2%
10	2.37	0.362	0.579	15.3%	15.4	0.838	1.383	5.3%
11	2.39	0.286	0.472	12.0%	15.5	1.080	1.782	7.0%
12	2.37	0.353	0.582	14.9%	15.6	1.126	1.860	7.2%
13	2.33	0.330	0.544	14.2%	16.1	1.221	2.015	7.6%
14	2.42	0.238	0.393	9.8%	17.0	1.809	2.985	10.7%
			Média	15.4%			Média	7.0%

Tabela 5.19 - Média dos valores de Ra e Rmax para peças de mesmo número - Ensaaios de 43 a 47
v=280 m/min

Peça	Ra (μm)				Rmax (μm)			
	Ra	σ	Interv	σ/Ra	Rmax	σ	Interv	$\sigma/Rmax$
1	2.33	0.239 \pm	0.394	10.3%	14.0	1.013 \pm	1.671	7.2%
2	2.35	0.378	0.634	16.1%	13.7	1.464	2.416	10.7%
3	2.26	0.294	0.485	13.0%	13.4	1.272	2.099	9.5%
4	2.35	0.212	0.350	9.0%	13.8	0.914	1.508	6.6%
5	2.45	0.205	0.338	8.4%	15.0	1.173	1.935	7.8%
6	2.37	0.189	0.312	8.0%	14.5	0.763	1.259	5.3%
7	2.50	0.126	0.208	5.1%	15.5	1.227	2.025	7.9%
8	2.58	0.146	0.241	5.7%	16.4	0.826	1.363	5.0%
9	2.72	0.235	0.388	8.6%	16.9	1.701	2.807	10.0%
10	2.52	0.172	0.284	6.8%	16.9	1.760	2.904	10.4%
11	2.53	0.127	0.210	5.0%	16.6	2.110	3.481	12.7%
12	2.61	0.133	0.219	5.1%	16.3	1.250	2.062	7.7%
			Média	8.4%			Média	8.4%

Tabela 5.20 - Média dos valores de Ra e Rmax para peças de mesmo número - Ensaios de 53 a 57
v=350 m/min

Peça	Ra (µm)				Rmax (µm)			
	\bar{R}_a	σ	Interv	σ/\bar{R}_a	\bar{R}_{max}	σ	Interv	σ/\bar{R}_{max}
1	2.24	0.225 ±	0.371	10.0%	13.5	2.230 ±	3.679	16.5%
2	2.40	0.489	0.807	20.4%	14.5	2.288	3.775	15.8%
3	2.48	0.715	1.180	28.8%	14.5	2.856	4.712	19.7%
4	2.78	0.786	1.297	28.3%	16.0	2.641	4.358	16.5%
5	2.74	0.484	0.799	17.7%	16.5	1.955	3.226	11.8%
6	2.75	0.570	0.940	20.7%	17.0	1.979	3.265	11.6%
7	2.97	0.569	0.939	19.1%	18.8	2.665	4.397	14.2%
			Média	20.7%			Média	15.2%

Tabela 5.21 - Estimativa de fim de vida da ferramenta
 Julgamento realizado pelo operador
 Ensaio de 13 a 42
 Peça padrão : Ra=2.5 μm

Ensaio	Peça	Ra(μm)
13	13	2.00
14	10	2.90
15	10	2.51
16	15	4.50
17	10	5.79
18	8	1.55
19	9	2.26
20	6	1.89
21	6	1.98
22	7	1.65
23	23	3.77
24	16	>8.00
25	19	>7.00
26	9	>7.00
27	13	>5.00
28	24	>5.00
29	14	>6.50
30	11	>7.00
31	11	>8.00
32	12	2.08
33	7	4.58
34	4	2.52
35	6	>6.00
36	3	>15.0
37	4	>5.00
38	4	>7.00
39	5	>10.0
40	6	2.28
41	5	>6.00
42	3	>6.00

Tabela 5.22 - Estimativa de fim de vida da ferramenta
 Julgamento realizado pelo operador
 Ensaios de 43 a 57
 Padrão: Peça do ensaio 54 no. 7
 $R_a=3.80 \mu\text{m}$ $R_{\text{max}}=21.2 \mu\text{m}$

Ensaio	Peça	R_a	R_{max}
43	7	2.41	16.5
44	5	2.64	16.5
45	4	2.41	13.1
46	9	2.48	14.9
47	10	2.26	15.1
48	10	2.82	16.0
49	7	2.04	13.9
50	7	2.76	16.2
51	7	2.10	14.3
52	10	1.97	14.5
53	3	2.01	12.7
55	2	2.95	17.4
56	5	2.36	15.0
57	5	2.40	14.6

Tabela 5.23 - Valores do desgaste frontal (V_b) e da rugosidade (R_a e R_{max}) para cada ensaio

Ensaio	V_b (mm)	R_a (μm)	R_{max} (μm)	
43	0.209	2.57	16.9	$\bar{V}_b = 0.216mm$
44	0.193	2.70	15.7	$\sigma = 0.0259$
45	0.260	2.68	17.5	$\sigma / \bar{V}_b = 12\%$
46	0.214	2.40	14.4	$v_c = 280 \text{ m/min}$
47	0.203	2.72	16.9	
48	0.184	2.46	15.6	$\bar{V}_b = 0.182mm$
49	0.196	2.42	14.8	$\sigma = 0.0186$
50	0.184	2.59	18.0	$\sigma / \bar{V}_b = 10.2\%$
51	0.197	2.02	17.1	$v_c = 220 \text{ m/min}$
52	0.151	2.61	19.3	
53	0.293	3.09	21.8	$\bar{V}_b = 0.317mm$
54	0.299	3.80	21.2	$\sigma = 0.0465$
55	0.387	3.09	18.3	$\sigma / \bar{V}_b = 14.7\%$
56	0.338	2.94	17.7	$v_c = 340 \text{ m/min}$
57	0.268	2.53	16.7	

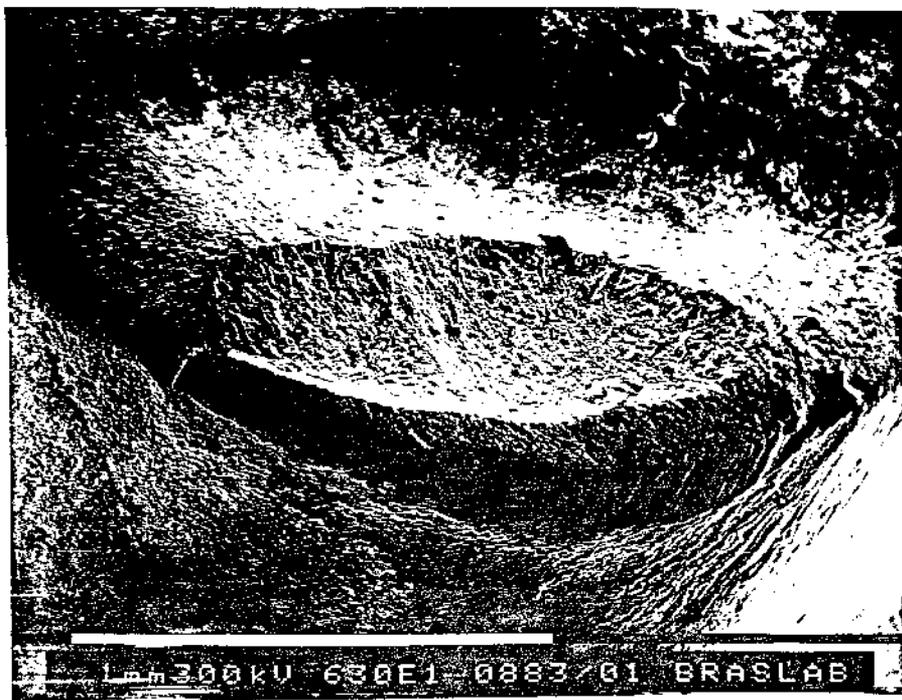
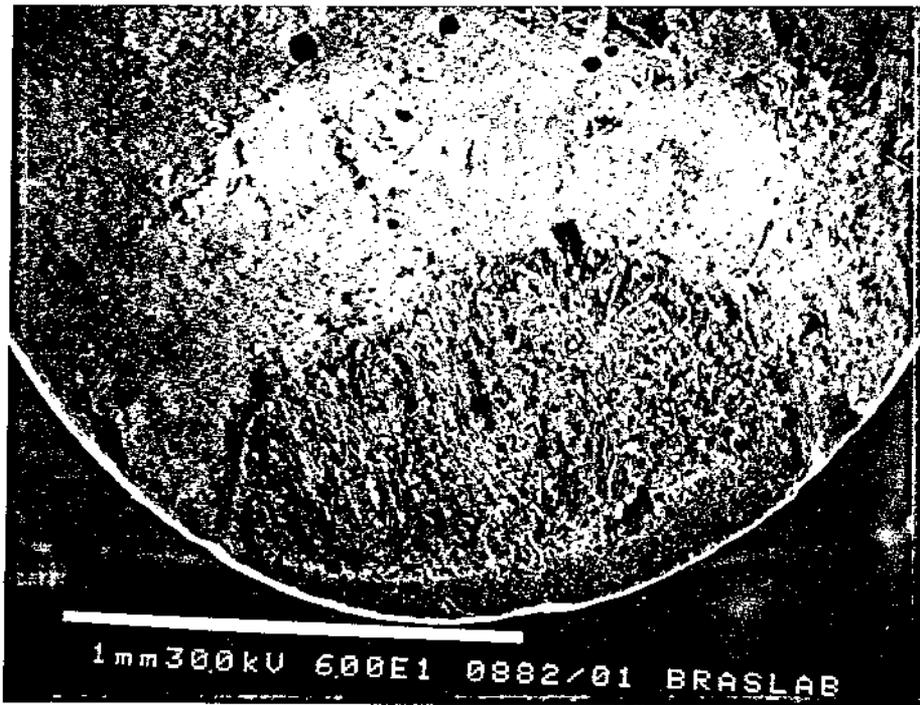


Figura 5.35.a - Ponta da Ferramenta - Ensaio 45

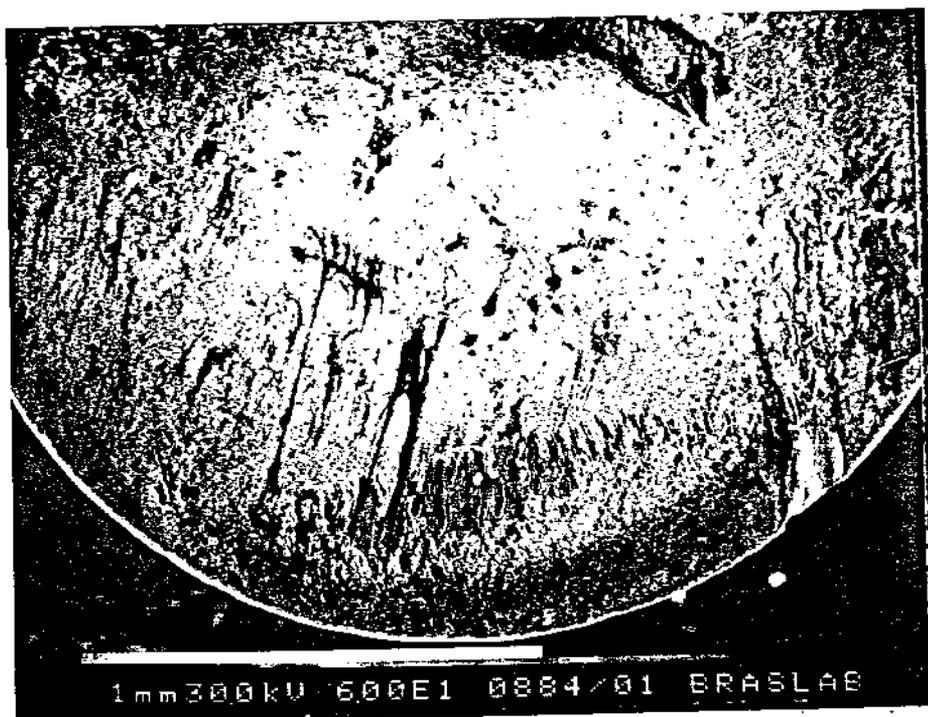


Figura 5.35.b - Ponta da Ferramenta - Ensaio 51

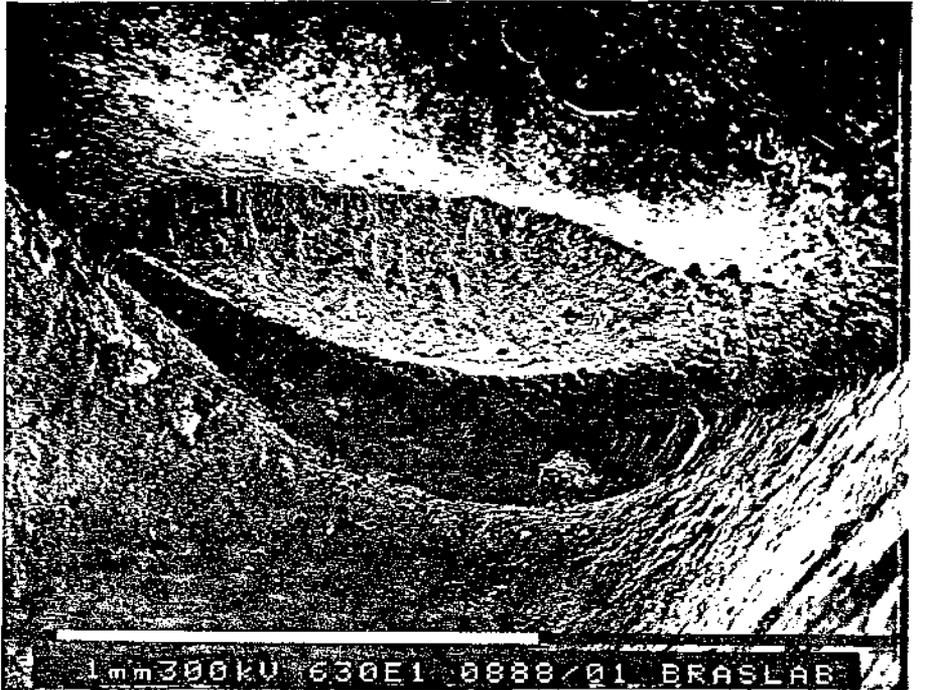
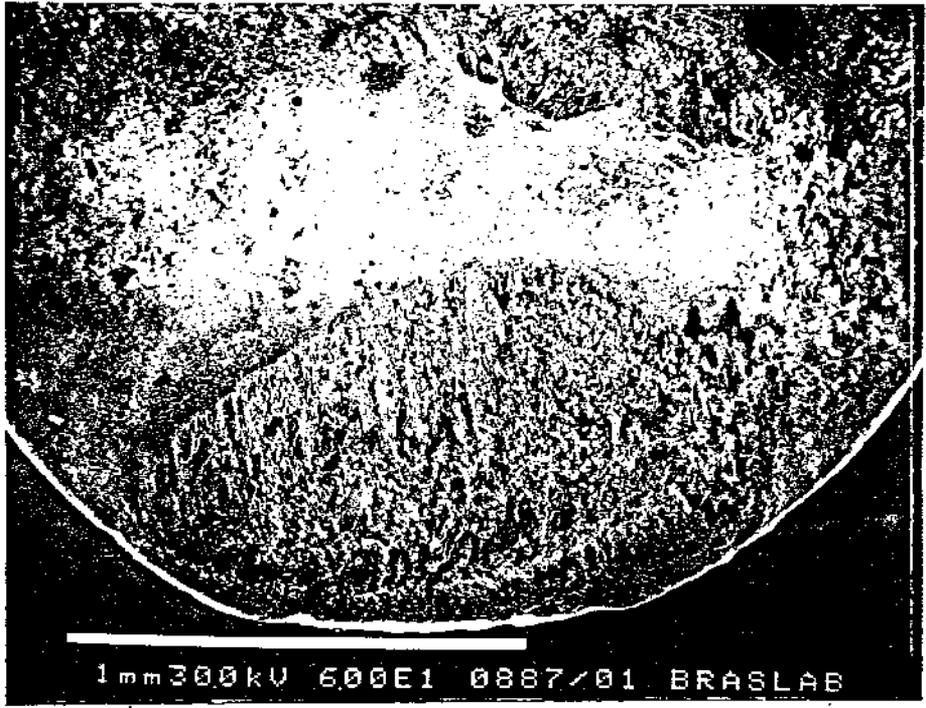


Figura 5.35.c - Ponta da Ferramenta - Ensaio 54

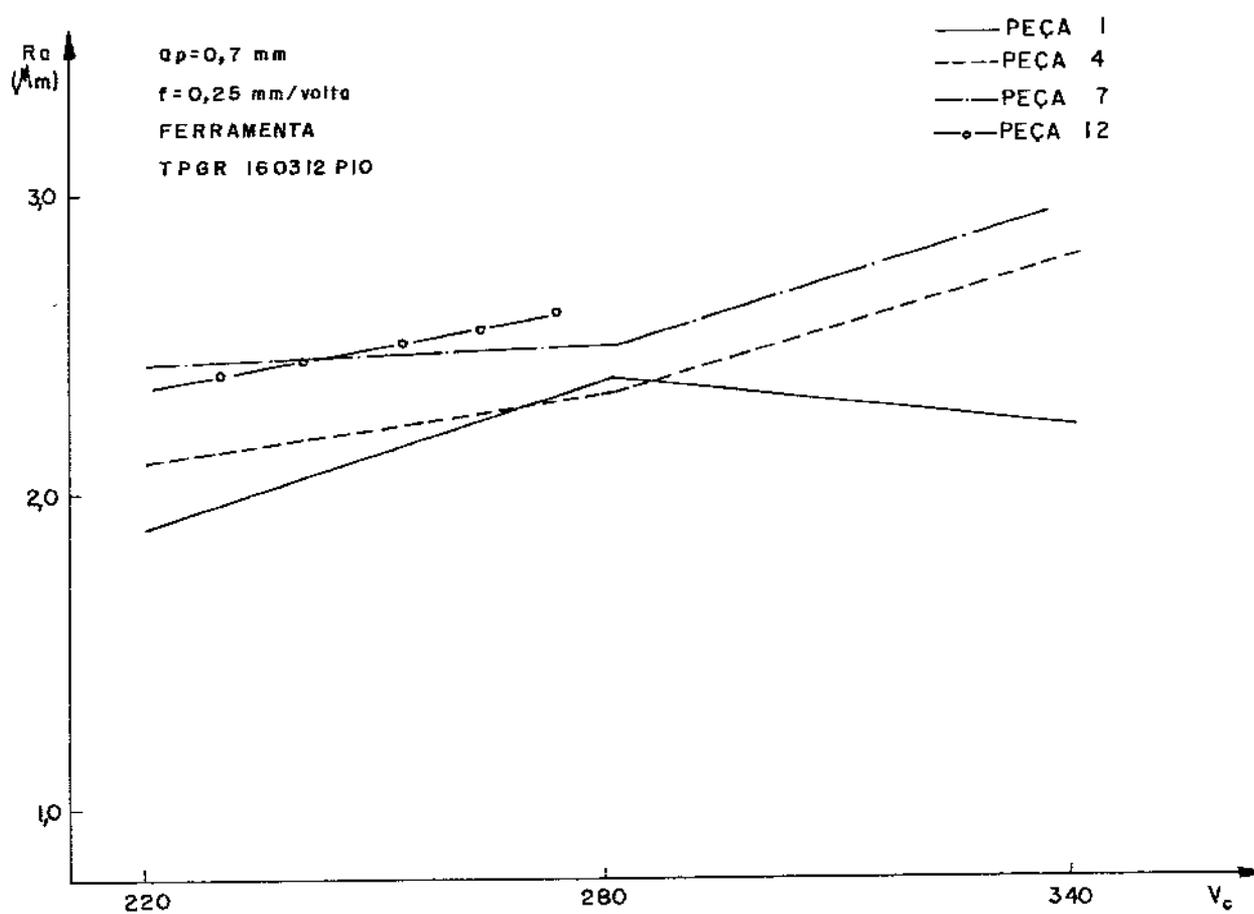


Figura 5.36 - R_a x velocidade de corte (valores médios dos ensaios)

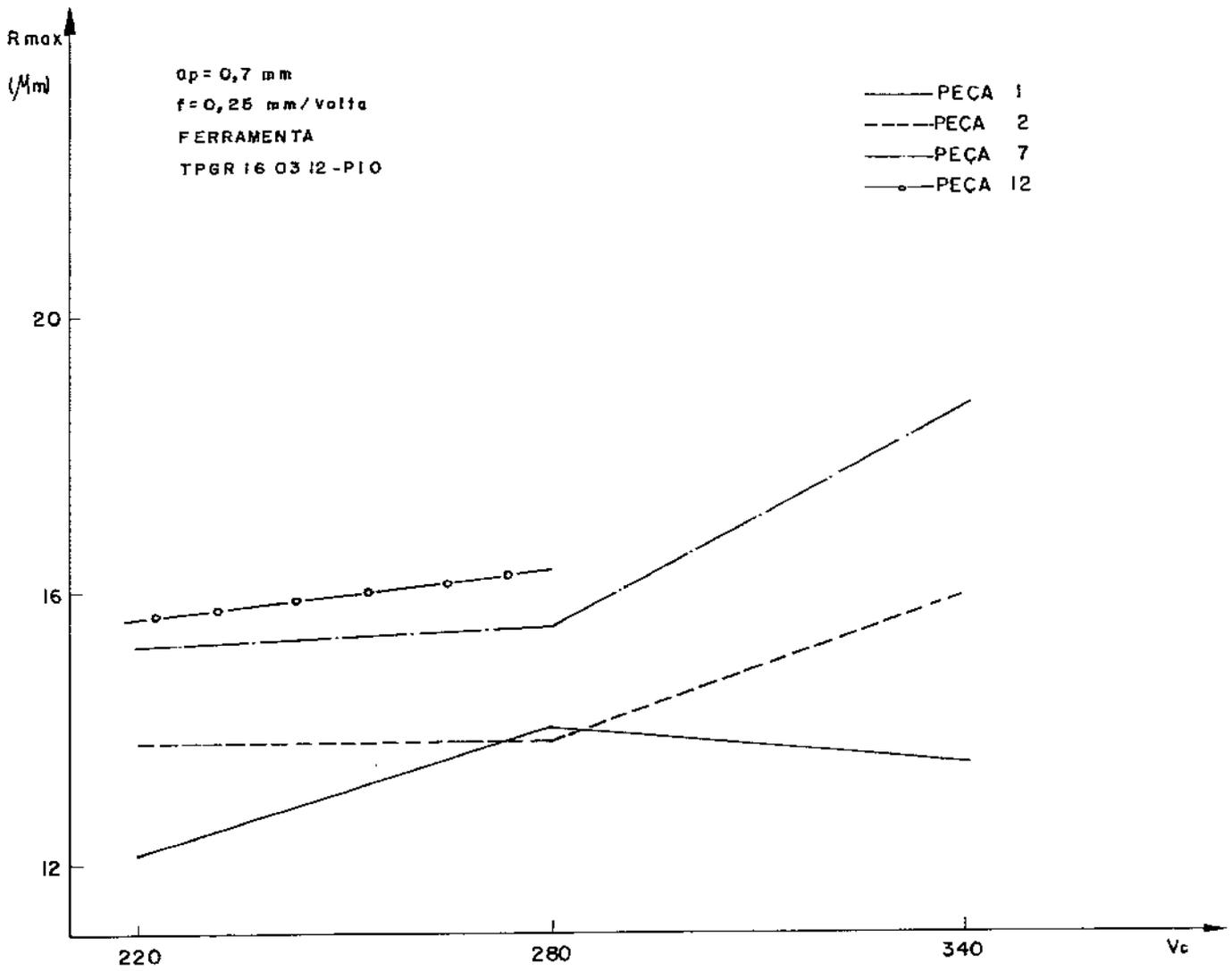


Figura 5.37 - Rmax x velocidade de corte (valores médios dos ensaios)

Tabela 5.24 - Relação entre os valores de Ra e Rmax e a velocidade de corte

v(m/min) Peça	Ra (µm)			Rmax (µm)		
	220	280	340	220	280	340
1	1.88	2.33	2.24	12.1	14.0	13.5
4	2.13	2.35	2.78	13.8	13.8	16.0
7	2.43	2.50	2.97	15.2	15.5	18.8
12	2.37	2.61	-	15.6	16.3	-

As figuras 5.36 e 5.37 mostram a variação de Ra e Rmax contra a velocidade de corte respectivamente. Os dados relativos a estas figuras estão mostrados na tabela 5.24.

V.4.1 - Dispersão dos valores de rugosidade dentro de cada peça

Uma análise da tabela 5.11 mostra que na maioria das peças ensaiadas foram necessárias somente 6 pontos de medição da rugosidade superficial em cada peça, para que a média da rugosidade superficial pudesse ser calculada dentro de uma confiança de 90%. O Apêndice B mostra o procedimento estatístico utilizado para obtenção do número de dados necessários para a representação da média de uma população.

Porém, nos ensaios 46 e 47 ($v_c = 280$ m/min) e 54, 55 e parte do ensaio 57 ($v_c = 340$ m/min) foram necessários 15 pontos de medição de rugosidade em cada peça para que a média pudesse ser representada com a mesma confiança, isto devido à maior dispersão dos valores medidos.

No item III.1 deste trabalho foram relacionados fatores que causam a dispersão da rugosidade superficial com os mesmos valores de desgaste da ferramenta (dentro de uma mesma peça) e são eles: a) acaso; b) rigidez e estabilidade do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça; c) fatores associados à aresta postiça de corte e fluxo lateral de cavaco; d) variação das propriedades da ferramenta e do material da peça.

No presente caso os itens a e d não se aplicam pois as maiores dispersões concentraram-se nos ensaios com somente dois valores de velocidade de corte (os dois maiores valores). Como a sequência dos ensaios foi aleatória, as ferramentas e o material da peça foram tomados de um mesmo lote de fabricação e a distribuição do material da peça e das arestas das ferramentas foi também aleatória para cada ensaio, é pouco provável que os fatores citados nos itens a e d tenham se concentrado somente em duas das três velocidades de corte. O item c também não se aplica pois não houve formação de aresta postiça de corte e nem de fluxo lateral de cavaco devido às altas velocidades envolvidas.

As causas desta maior dispersão se deve ao fato da utilização de maiores velocidades de corte, pois somente com a

menor velocidade utilizada ela não aconteceu. Assim, a velocidade de corte, provavelmente, influenciou no processo vibratório do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça (item c) e/ou em algum fenômeno inerente ao processo de formação do cavaco, gerando a dispersão observada.

V.4.2 - Dispersão dos valores de rugosidade superficial entre os ensaios com mesma velocidade de corte

Analisando-se as tabelas 5.15, 5.16 e 5.17 e as figuras 5.29 a 5.34 que mostram as análises de regressão e de variância realizadas, constata-se que o valor de R^2 foi sempre baixo, mas nunca se teve falta de ajuste e nem os resíduos apresentaram alguma tendência, o que demonstra que aproximar a relação R_a ou R_{max} contra l por uma reta é um procedimento adequado, mas como a dispersão é muito grande, fica sem significado. Assim, pode-se concluir que o modelo linear representa o fenômeno estudado qualitativa, mas não quantitativamente, isto é, o crescimento de R_a ou R_{max} com l pode ser considerado linear, mas a obtenção de um valor exato ou bem aproximado de R_a ou R_{max} , dado um comprimento l , via utilização do modelo linear é um procedimento com baixa confiabilidade.

Verifica-se pela análise das tabelas 5.18, 5.19 e 5.20 que a dispersão dos valores de R_a é, em geral, maior que dos valores de R_{max} , exceto quando se analisa os resultados obtidos com $v_c = 280$ m/min, onde a média dos valores de σ/\bar{R}_a é praticamente a mesma dos valores de σ/\bar{R}_{max} . Isto se explica pelo fato de que para se chegar ao valor de R_{max} necessita-se somente de uma saliência e uma reentrância dentro do comprimento de amostragem, enquanto para se obter R_a leva-se em consideração todos os perfis formados dentro do comprimento de amostragem. Assim, como qualquer fenômeno vibratório ou relativo ao desgaste da ferramenta deve influenciar todos os perfis formados, acontece uma maior dispersão de R_a . Com isto podemos supor também, que quando utilizamos $v_c = 280$ m/min obtivemos a situação mais propícia para o processo, pelo menos em termos de vibração.

Os maiores níveis de dispersão aconteceram com a maior velocidade de corte utilizada, isto é, $v_c = 340$ m/min, mas a

dispersão dos valores de R_a com $v_c = 220$ m/min também foi considerável. Aliás, nesta última condição de usinagem aconteceu a maior diferença entre a dispersão de R_a e R_{max} . Já com $v_c = 340$ m/min, a dispersão foi alta tanto com R_a quanto com R_{max} , levando a supor que, em velocidades de corte muito altas o fenômeno da dispersão deve se intensificar. Demonstra-se assim que altas velocidades de corte também geram uma maior aleatoriedade do processo. No item III.1 deste trabalho foi citado que em velocidades de corte logo acima daquelas em que se tem formação de aresta postiça de corte a dispersão dos valores de rugosidade é menor que utilizando-se velocidades onde se tem a formação da APC. Os resultados obtidos aqui, tanto no que diz respeito à dispersão dos valores de rugosidade dentro da peça, quanto entre os ensaios com mesma velocidade de corte, conduz à conclusão que ultrapassando-se as velocidades pouco acima daquelas onde se tem formação de APC, a aleatoriedade do processo volta a crescer, basicamente movida por fenômenos dinâmicos do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça ou do mecanismo de formação do cavaco geradores também da aleatoriedade dos desgastes da ferramenta.

Para se fazer uma simulação da validade da utilização da rugosidade superficial como critério de fim de vida da ferramenta em operações de torneamento, tomou-se os seguintes resultados como exemplo (tabelas 5.18, 5.19 e 5.20):

a) situação de menor dispersão - $v_c = 220$ m/min - valores de R_{max} - utilizando-se como critério de fim de vida da ferramenta $R_{max} = 17.0$ μm , tem-se que em 95% dos ensaios a rugosidade superficial não atinge este valor até a 11ª. peça usinada, mas com 14 peças usinadas 50% dos ensaios não atingem o R_{max} de 17.0 μm . Assim, para poder-se trocar a ferramenta com uma confiança razoável (95%), a vida da ferramenta deve ser 11 peças, mas boa parte das ferramentas vai ser trocada bem antes de atingir a rugosidade limite na peça usinada.

b) situação de menor dispersão de R_a - $v_c = 280$ m/min - utilizando-se $R_a = 2.8$ μm como critério de fim de vida da ferramenta, a vida da ferramenta será 8 peças (95% de confiança) e com 12 peças usinadas 80% dos ensaios não atingiram $R_a = 2.8$ μm .

c) situação de maior dispersão de R_{max} - $v_c = 340$ m/min - critério de fim de vida da ferramenta $R_{max} = 17.0$ μm ; vida da ferramenta = 2 a 3 peças usinadas; com 6 peças usinadas 50% dos ensaios não atingiram $R_{max} = 17.0$ μm .

d) situação de maior dispersão de R_a - $v_c = 340$ m/min - critério de fim de vida da ferramenta $R_a = 2.8$ μm ; vida da ferramenta = 1 a 2 peças usinadas; com 6 peças usinadas 50% dos ensaios não atingiram $R_a = 2.8$ μm .

Do exposto acima pode-se concluir que a utilização de um determinado valor de R_{max} como critério de fim de vida da ferramenta e a partir disto realizar-se ensaios prévios para se estabelecer a vida da ferramenta é um procedimento mais confiável do que fazê-lo utilizando-se de valores de R_a . Porém, pode-se verificar que mesmo usando-se R_{max} , para que se possa ter uma boa confiabilidade na estimativa do momento de troca da ferramenta, muitas ferramentas vão ser desperdiçadas, isto é, trocadas antes (e as vezes bem antes) do momento em que a peça atinge o valor limite de R_{max} .

As opções à este procedimento ao se utilizar a rugosidade superficial como critério de fim de vida são: a) utilização de sensoreamento da rugosidade; b) comparação feita pelo operador da rugosidade da peça usinada com uma peça padrão de uma maneira visual ou por tato, como já citado no capítulo III deste trabalho.

O item a é ainda bastante custoso e, provavelmente, ainda é mais barato desperdiçar ferramentas como no procedimento ensaiado neste trabalho, do que acoplar um rugosímetro a uma máquina ou mesmo a uma série de máquinas.

O item b também foi ensaiado no presente trabalho. As tabelas 5.21 e 5.22 apresentam os resultados obtidos nos diversos ensaios. Apesar do fato do operador ser inexperiente neste tipo de tarefa e de que um maior número de pessoas ou de operadores deveriam ser testados para se ter resultados mais confiáveis, uma rápida análise das tabelas citadas nos mostram que a utilização de ensaios prévios para a estimativa da vida da ferramenta é mais confiável que a comparação das rugosidades feita pelo operador da máquina. Além disto, podemos utilizar os valores de vida da ferramenta retirados da estimativa proposta com diversos outros propósitos, como por exemplo, no cálculo de custo mínimo com ferramentas de usinagem.

Um procedimento alternativo aos propostos acima, seria juntar a utilização do sensoreamento da rugosidade com a estimativa da vida da ferramenta baseada na rugosidade

superficial da peça usinada. Assim pode-se, por exemplo, se ter no ambiente de produção de uma empresa um rugosímetro portátil, que seria destinado a um grupo de tornos. Quando se atingisse o número mínimo de peças usinadas por uma ferramenta, onde ainda se tem uma confiança alta (95% nos exemplos deste trabalho) de que a rugosidade da peça não ultrapassou a rugosidade limite, o operador passaria a medir a rugosidade das peças seguintes (não necessariamente de todas elas) até realmente se atingir a rugosidade limite.

V.4.3 - Influência dos desgastes da ferramenta nos valores de rugosidade superficial

Os coeficientes angulares das equações lineares mostradas na tabela 5.15 são os valores que representam a contribuição do desgaste da ferramenta nos valores de rugosidade, pois são eles que mostram o nível de crescimento da rugosidade a medida que as peças vão sendo usinadas e as ferramentas vão se desgastando. Analisando tais coeficientes vê-se que, como era de se esperar, os maiores valores são aqueles referentes às equações com a maior velocidade de corte ($v_c = 340$ m/min), pois é bastante sabido que o aumento da velocidade de corte incentiva o desgaste da ferramenta. O que não era de se esperar é o fato de que os coeficientes referentes às equações com $v_c = 220$ m/min e $v_c = 280$ m/min são muito próximos. Isto significa que o aumento da velocidade de corte de $v_c = 220$ m/min para $v_c = 280$ m/min pouco significa em termos de aceleração dos desgastes que influenciam na rugosidade superficial, pelo menos até os níveis de desgaste alcançados nos ensaios. Verificando a tabela 5.23, vê-se que o desgaste frontal (V_b) foi, ao fim dos ensaios, 19% maior em média com $v_c = 280$ m/min que com $v_c = 220$ m/min. Estes fatos mostram um primeiro indício em favor de demonstrar que o crescimento do desgaste frontal não é fundamental no crescimento da rugosidade superficial, pois houve um crescimento dos valores de V_b , sem haver um crescimento nos coeficientes angulares das retas.

Analisando a tabela 5.23, constata-se a dificuldade de se estabelecer uma correlação entre os valores de V_b e os de R_a e

Rmax. Assim, os ensaios 44 e 45 que resultaram em Ra finais semelhantes, tiveram valores de Vb bem diferentes, o mesmo acontecendo com os ensaios 50-52 e 53-55. Os ensaios 49 e 51 tiveram Vb semelhantes e Ra bem diferentes, acontecendo o mesmo com os ensaios 53 e 54. O ensaio 52 que apresentou o menor Vb dentre os ensaios com $v = 220$ m/min, foi o que apresentou maior Ra e Rmax dentre estes ensaios. Isto leva a concluir que o crescimento da rugosidade com o tempo ou com o comprimento de corte é devido não somente ao desgaste frontal, mas a algum outro tipo de desgaste.

Parece mais lógico que algum tipo de desgaste que mensure a variação do formato da ponta da ferramenta, geradora do perfil de rugosidade, seria mais importante no crescimento dos valores de rugosidade. As fotos da figura 5.35 tentam lançar luz à este assunto.

Nesta figura pode-se notar que: a) o desgaste frontal da ferramenta do ensaio 51 ($v_c = 220$ m/min) foi o menor valor de desgaste frontal dentre as três ferramentas fotografadas, seguido pela ferramenta do ensaio 45 ($v_c = 280$ m/min) e do ensaio 54 ($v_c = 340$ m/min), nesta ordem; b) as três ferramentas apresentaram diferença entre a curvatura da ponta fotografada (ferramenta depois dos ensaios) e a curvatura da ponta original. Assim, a ferramenta do ensaio 45 apresenta uma leve ondulação que percorre toda extensão do raio de ponta, a ferramenta do ensaio 51 apresenta um sulco no início do raio de ponta, na região onde se inicia o corte e a ferramenta do ensaio 54 apresenta seu raio de ponta bastante deformado em relação ao raio de ponta original da ferramenta.

Os valores de Vb também apresentaram razoável dispersão. Isto pode ser visto na tabela 5.23 através dos valores de σ/\bar{V}_b , todos eles acima de 10%, sendo que sua maior dispersão coincidiu com os ensaios que apresentaram a maior dispersão de Ra e Rmax, levando a supor que, se o desgaste frontal apresenta razoável dispersão, outros tipos de desgaste também apresentarão esta dispersão (como aliás já foi mostrado no item V.1 deste trabalho) e, portanto, a ferramenta é responsável por boa parte da dispersão da rugosidade.

V.4.4 - Relação entre os valores de rugosidade

superficial e a velocidade de corte

Uma análise das figuras 5.36 e 5.37 e da tabela 5.24 mostra que, quando se leva em conta a relação rugosidade x velocidade de corte para a primeira peça ensaiada, onde a influência do desgaste da ferramenta ainda pode ser considerada desprezível, a velocidade de corte que gerou menores valores de Ra e Rmax foi $v_c = 220$ m/min e a que gerou os maiores valores foi $v_c = 280$ m/min. Estes resultados são diferentes daqueles obtidos nos primeiros ensaios realizados neste trabalho e discutidos no item V.1, onde se obteve os menores valores de rugosidade com o valor intermediário da velocidade de corte ($v_c = 275$ m/min - tabela 5.5). Isto vem reforçar a conclusão de que em valores de velocidade de corte acima daqueles onde se tem a formação da aresta postiça de corte, fica impossível estabelecer a priori a influência de v_c na rugosidade, ficando esta influência dependente da rigidez do sistema-máquina-ferramenta-dispositivo-peça e de como este sistema vibra a uma determinada velocidade de corte.

A medida que a análise passa dos resultados obtidos com as peças no. 1 para as peças no. 4, 7 ou 12 os desgastes das ferramentas começam a influenciar e, logo com as peças no. 4 $v_c = 340$ m/min já é a velocidade de corte que produz as maiores rugosidades superficiais. Além disso, comprovando o que já foi observado no item anterior, a influência dos desgastes com $v_c = 220$ m/min é igual ou superior à influência com $v_c = 280$ m/min, fazendo com que a diferença entre os valores de Ra ou Rmax da 12a. e 1a. peça sejam menores com $v_c = 280$ m/min que com $v_c = 220$ m/min.

Pode-se com estes resultados calcular a velocidade de máxima produção, utilizando-se da metodologia proposta por Villella et al. [72], onde os parâmetros da equação de Taylor são dados por:

$$x = \frac{\log(Z_i/Z_{i+1})}{\log(V_{ci+1}/V_{ci})} + 1$$

$$K = Z_i \cdot t_{ci} \cdot V_{ci}$$

onde os índices i e i+1 representam seus parâmetros nas iésima e iésima + 1 condições.

A velocidade de máxima produção é dada por:

$$V_{m\text{xp}} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}}$$

Utilizando-se do intervalo de validade dos parâmetros da equação de Taylor como v de 220 a 280 m/min, tem-se:

$$v_{m\text{xp}} = 294.3 \text{ m/min}$$

Se o intervalo de validade for $v = 280-340$ m/min tem-se:

$$v_{m\text{xp}} = 244.7 \text{ m/min}$$

Assim ao se usar $v_c = 280$ m/min sabe-se que se está trabalhando bem próximo à condição de máxima produção.

CAPITULO VI

CONCLUSOES

Dado o exposto nos capítulos anteriores, pode-se concluir que, no torneamento do aço ABNT 1045 com ferramenta de metal duro classe ISO P10 sem recobrimento:

- A utilização de um modelo linear que represente o crescimento dos valores de rugosidade superficial com o comprimento l é um procedimento que representa qualitativa mas não quantitativamente o fenômeno;

- A dispersão dos valores de R_{max} é menor que dos valores de R_a , fazendo com que, a utilização de um determinado valor de R_{max} como critério de fim de vida da ferramenta e a partir disto estimar-se o momento de troca da ferramenta, seja um procedimento mais confiável que a utilização de um dado valor de R_a ;

- A estimativa da vida da ferramenta baseada em valores limites de R_a e/ou R_{max} é um procedimento mais confiável que a verificação da rugosidade da peça feita por comparação pelo operador da máquina;

- Em altas velocidades de corte a dispersão dos valores de rugosidade superficial é maior que em velocidades de corte normalmente utilizadas;

- A rugosidade superficial da peça usinada cresce com o aumento do avanço e se aproxima de seus valores teóricos;

- Não existe correlação direta entre os valores de rugosidade superficial e velocidade de corte, pelo menos dentro do intervalo de velocidades experimentados;

- Não existe correlação direta entre os valores de desgaste frontal (V_b) e os valores de rugosidade superficial da peça usinada.

- A utilização do procedimento proposto neste trabalho pode ser feita não somente na estimativa da vida da ferramenta, mas como subsídio para o cálculo do custo mínimo com ferramentas de usinagem e também juntamente com a utilização de um rugosímetro na produção

CAPITULO VII

SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Estudar a utilização das tolerâncias dimensionais, de forma e posição como critério de fim de vida da ferramenta em operações de torneamento em acabamento, confrontando seus resultados com os resultados obtidos neste trabalho;

2) Fazer um estudo semelhante ao realizado neste trabalho para os desgastes da ferramenta, a fim de se estudar a confiabilidade de utilização destes, como critério de fim de vida da ferramenta;

3) Estudar a utilização de sensoreamento da rugosidade superficial no processo produtivo a fim de se obter um momento de troca da ferramenta mais exato, principalmente sobre o ponto de vista dos custos envolvidos;

4) Estudar a viabilidade de utilização da rugosidade superficial como critério de fim de vida da ferramenta na geração de dados otimizados de usinagem e também de dados a serem armazenados em bancos de dados de usinagem;

5) Estudar a geração da rugosidade superficial da peça em velocidades de corte mais altas que as utilizadas neste trabalho, usando-se ferramentas mais resistentes ao desgaste e sistemas máquina-ferramenta-dispositivo-peça mais rígidos;

6) A partir das conclusões que poderiam ser tiradas de um trabalho como o citado no item 5, estudar a viabilidade de substituição da operação de retificação cilíndrica pelo torneamento;

7) Estudar o fenômeno de formação do desgaste em sulco, bem como sua relação com o crescimento da rugosidade superficial com o tempo de corte;

8) Estudar a influência do raio de ponta da ferramenta na formação da rugosidade superficial no torneamento, em diversos valores de avanços diferentes, comparando os valores de rugosidade obtidos com os valores teóricos de rugosidade.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS [79]

- [1] AGOSTINHO, O. L. et alii. Tolerâncias Geométricas. In_ Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1977. cap. 3, p. 192-220.
- [2] BEDRIN, C. & ROUMESY, B.. Usinagem par Coupe. In_ Technologie de Fabrication. Lyon, INSA, 1980. 3a. Partie, 128 P.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rugosidades das Superfícies. Rio de Janeiro, NBR 6405/88, 1988.
- [4] FERRARESI, D.. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1977. 751 p.
- [5] AGOSTINHO, O. L. et alii. Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica - Processos de Fabricação. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1979. cap. V, p. 113-233.
- [6] SHAW, M. C.. Surface Finish. In_ Metal Cutting Principles. New York, Oxford University Press, 1986. cap. 17, p. 487-543.
- [7] VAJPAVEE, S.. Analytical Study of Surface Roughness in Turning. Wear. Lausanne, 70:165-75, 1981.
- [8] PETROPOULOS, P. G.. Statistical Basis for Surface Roughness Assessment in Oblique Finish Turning of Steel Components. Int. Journal Prod. Research. London, 12(3): 345-60, 1974.
- [9] SATA, T. et alii. Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications. Annals of the CIRP. Great Britain, 34:473-76, 1985.
- [10] WALLEBANK, J.. Surfaces Generated in Single-Point Turning. Wear. Lausanne, 56:391-407, 1979.

- [11] PEKELHARING, A. J.. Built-Up Edge: Is the Mechanism Understanding? *Annals of the CIRP. Great Britain*, 23:207-12, 1974.
- [12] NAKAYAMA, K. et alii. Relationship Between Cutting Forces, Temperatures, Built-Up Edge and Surface Finish. *Annals of the CIRP. Great Britain*, 15:211-23, 1966.
- [13] TURLEY, M. & DOYLE, E. D.. Effect of Material Aspects on the Production of Machined and Ground Surfaces. *Wear Lausanne*, 57:237-46, 1979.
- [14] SELVAM, M. S. & RADHAKRISHNAN, V.. Determination of the Direct and Indirect Influences of Groove Wear and Built Up Edge on Surface Roughness in Turning by Multiple Correlation Technique, *Int. Journal Prod. Research. London* 14(3):415-20, 1976.
- [15] SELVAM, M. S. & RADHAKRISHNAN, V.. Influence of the Side-Flow and Built-Up Edge on the Roughness and Hardness of the Surface Machined with a Single Point Tool. *Wear. Lausanne*, 26:393-403, 1973.
- [16] MICHELETTI, G. F.. *Mecanizado por Arranque de Viruta*. Barcelona, Editorial Blume, 1980. 334 p.
- [17] BOOTHROYD, G.. *Fundamentos del Corte de Metales y de las Maquinas-Herramientas*, Bogotá, Mc Graw-Hill, 1978. 403 p.
- [18] COOK, N. H.. Tool Wear and Tool Life, *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 931-38, november 1973.
- [19] LUK, W. K. & SCRUTTON, R. F.. The Origin of the Groove Wear in the Turning Operation. *Int. Journal of Production Research. London*, 6(3):197-206, 1968.
- [20] SUNDARAM, R. M. & LAMBERT, B. K.. Surface Roughness Va-

- riability of AISI 4140 Steel in Fine Turning Using Carbide Tools. *Int. Journal Prod. Research*. London, 17(3): 249-58, 1979.
- [21] OLSEN, K. V.. Surface Roughness on Turned Steel Components and the Relevant Mathematical Analysis. *The Production Engineer*. p. 593-606, December 1968.
- [22] WHITEHOUSE, D. J. et alii. Assessment of Surface Topology Analysis Techniques in Turning. *Annals of the CIRP*. 23:265-82, 1974.
- [23] CHANDIRAHANI, K. L. & COOK, N. H. Investigations on the Nature of Surface Finish and its Variation with Cutting Speed, *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 134-40, May 1964.
- [24] SUNDARAM, R. M. & LAMBERT, B. K.. Mathematical Model to Predict Surface Finish in Fine Turning of Steel. Part I *Int. Journal Prod. Research*. London, 19: 547-56, 1981.
- [25] VENKATESH, V. C. & SATCHITANANDAM, M.. A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes, *Annals of the CIRP*. Great Britain, 29:19-22, 1980.
- [26] TRENT, E. M.. *Metal Cutting*. Birmingham, Birmingham Butterworth, 1984. 354 p.
- [27] HENRIQUEZ, M. H. C.. Contribuição à Determinação das Características de Usinagem em Brocas Helicoidais. Tese de Mestrado. Campinas, UNICAMP, 1982. 123 p.
- [28] VILELLA, R. C.. Metodologia Prática Visando a Otimização das Condições de Usinagem em Células de Fabricação. Tese de Mestrado. Campinas, UNICAMP, 1988. 105 p.
- [29] YAMAKOTO, K.. Recent Development of Surface Roughness Measurement in Japan. *Bulletin of the N.R.I.M.*. 14:1-10 april 1967.

- [30] RAKHIT, A. K. et alii The Influence of Metal Cutting Forces of Surface Texture in Turning. *Int. Journal Machine Tool Design Research*. Great Britain, p. 281-92, 1976.
- [31] SELVAN, M. S. & BALAKRISHNAN, K.. The Study of Machined Surface Roughness by Random Analysis. *Wear*. Lausanne, 41:287-93, 1977.
- [32] SUNDARAM, R. M. & LAMBERT, B. K.. Mathematical Models to Predict Surface Finish in Fine Turning of Steel. Part II. *Int. Journal Prod. Research*. London, 19(5):557-64, 1981.
- [33] NASSIRPOUR, F. & WU, S. M. Statistical Evaluation of Surface Finish and its Relationship to Cutting Parameters in Turning. *Int. Machine Tool Design Res.*. Great Britain, p. 197-208, 1977.
- [34] BHATTACHARYYA, A. et alii. Regression Analysis for Predicting Surface Finish and its Application in the Determination of Optimum Machining Conditions. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. P. 711-16, August 1970.
- [35] VILLA, A. et alii. Surface Texture and Machining Conditions. Part I: Model Building Logic in View of Process Control. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 105:259-63, November 1983.
- [36] VILLA, A. et alii. Surface Texture and Machining Conditions. Part II: Development of Mathematical Model Based upon Pattern Recognition. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 105:264-69, November 1983.
- [37] PANDIT, S.M. & REVACH, K.. A Data Dependent System to Approach the Surface Roughness Generated in Machining. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 100: 203-08, August 1978.

- [38] TARAKAN, K. & LAMBERT, B.A Surface Roughness Model for a Turning Operation. *Int. Journal Prod. Research.* London, 12:691-703, 1974.
- [39] HASEGAWA, M. et alii. Surface Roughness Model for Turning. *Tribology International.* p. 285-89, December of 1976.
- [40] TARAKAN, K.. Multi Machining Output - multi independent Variable Turning Research by Response Surface Methodology. *Int. Journal Prod. Research.* London, 12(2):233-45 1974.
- [41] WU, S. M.. Tool Life Testing by Response Surface Methodology. Part I. *Journal of Engineering for Industry of the ASME.* p. 105-10, May 1964.
- [42] WU, S. M.. Tool Life Testing by Response Surface Methodology. Part II. *Journal of Engineering for Industry of the ASME.* p. 111-16, May 1964.
- [43] WU, S. M. & MEYER, R. N.. Cutting Tool Temperature Predicting by Response Surface Methodology. *Journal of Engineering for Industry of the ASME.* p. 150-56, May 1964
- [44] BOX, G. P. & WILSON, K.. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal Royal Stat. Soc., Belmont,* 13(1):1-45, 1951.
- [45] BOX, G. P. et alii.. *Statistical for Experimenters.* New York, John Wiley & Sons, 1978, 653 p.
- [46] FERRARESI, D.. Processo de Furação. In_ *Usinagem dos Metais.* São Paulo, Associação Brasileira dos Metais, 1972. p. 1-93.
- [47] TAYLOR, F. W.. On the Art of Metal Cutting. *Transaction of the ASME.* p. 31-279, 1907.
- [48] BOEHS, L.. Projeto e Implantação de um Sistema Computa-

- dorizado de Banco de Dados de Usinagem. Florianópolis, UFSC, 1988.
- [49] COLDING, B. & KONIG, W.. Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting. *Annals of the CIRP*. Great Britain, 19:793-812, 1971.
- [50] PALLEROSI, C. A. & CUPINI, M. L.. Durabilidade de Ferramentas de Corte na Usinagem dos Metais. *Anais do XXX Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais*. São Paulo, p. 645-49, 1975.
- [51] RAHALINGAM, S. & WATSON, J.D.. Tool Life Distributions. Part I: Single-Injury Tool-Life Model. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 519-522, August 1977.
- [52] RAHALINGAM, S.. Tool Life Distributions. Part II: Multiple-Injury Tool-Life Model. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 523-31, August 1977.
- [53] WAGER, J.G. & BARASH, M. M.. Study of the Distribution of the Life of HSS Tools. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 1044-50, November 1971.
- [54] ZOMPI, A.. Tool Life Distribution in Process Optimization: Parameter Identification and Applications. *Annals of the CIRP*. Great Britain, 28:371-75, 1979.
- [55] ARMAREGO, E. et alii. *The Machining of Metals*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1969. 368 p.
- [56] RAHALINGAM, S. & WATSON, J.D.. Tool Life Distributions. Part IV: Minor Phases in Work Material and Multiple-Injury Tool Failure. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 100:201-09, May 1978.
- [57] WRIGHT, P et alii. *Manufacturing Intelligence*. New York Addison-Wesley, 1988. 352 p.

- [58] LEVI, R. & ROSSETO, S. Some Considerations on Tool Life Scatter and its Implications. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*, p. 945-50, August 1975.
- [59] ROSSETO, S. & LEVI, R.. Fractur and Wear as Factors Affecting Stochastic Tool-Life Models and Machining Economics. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. p. 281-86, February 1977.
- [60] PANDIT, S. H.. Data Dependent System Approach to Stochastic Tool-Life and Reliability. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 100:183-89, 1978.
- [61] SHEIKH, A. K. et alii. Probabilistic Optimization of Multitool Machining Operations. *Journal of Engineering for Industry of the ASME*. 102:285-91, August 1980.
- [62] ZDEBLICK, W. J. & DE VOR, R. E.. A Comprehensive Machining Cost Model and Optimization Technique. *Annals of the CIRP*. Great Britain, 30:405-08, 1981.
- [63] SEKULIC, S. S.. Cost of Cutting Tools and Total Machining Costs as a Function of the Cutting Tool Reliability in Automatic Flow Lines. *Int. Journal Prod. Research London*, 20(2):187-200, 1982.
- [64] BILLATOS, S. B. et alii. A Statistical Wear Model for Certain Tool Materials with Application to Machining. *Wear*. Lausanne, 112:257-71, 1986.
- [65] BANERJEE, J. K.. Some Aspects of the Workpiece Surface Finish during Turning. *Annals of the 16th Int. Machine Tool Design and Research Conference*. Manchester, p. 43-46.
- [66] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos. Rio de Janeiro, 1976
- [67] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standards

- Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. A370, Philadelphia, 1974.
- [68] SANDVIK COROMANT. Turning Tools - Tools for External and Internal Turning. Suécia, 1986. 264 p. (Catálogo C-1000:2-ENG)
- [69] MACHINABILITY DATA CENTER. Machining Data Handbook. Cincinnati, 1972.
- [70] DIETER, G.. Engineering Statistics. In_ Engineering Design - A Materials and Processing Approach. Tokyo, Mc Graw-Hill, 1983.
- [71] MUKHERJEE, P. K. & BASU, S. K.. Surface Roughness - A Criterion for Machinability. 8(4):1977.
- [72] VILELLA, R. C. et alii. Otimização de Condições de Usinagem em Células de Fabricação. Anais do 1o. Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem - SOBRACON. São Paulo, p. 17.1-20, 1989.
- [73] MITAL, A. & MANISH, M.. Surface Finish Prediction Model for Fine Turning, Int. Journal Prod. Research. London, 6(12):1861-76, 1988. 2
- [74] DRAPER, N. R. & SMITH, H.. Applied Regression Analysis. New York, John Wiley & Sons, 1966. 434 p.
- [75] HOGG, R. V. & CRAIG, A. T. Introduction to Mathematical Statistics. Mac Milhan Publishing Co.. 40o. Edição.
- [76] SANTA, W. S.. Estudo da Modelagem Matemática para a Otimização das Condições de Usinagem. Tese de Doutorado. Campinas, UNICAMP, 1989. 145 p.
- [77] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Pastilhas Intercambiáveis para Ferramentas de Usinagem. NBR 6450/87 Rio de Janeiro, 1987.

- [76] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Porta-Pastilhas - Ferramenta Monocortante para Tornear e Copiar com Pastilhas Intercambiáveis - Dimensões. NBR 10044/87 Rio de Janeiro, 1987.
- [79] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Referências Bibliográficas. NB-66. Rio de Janeiro, 1978.
- [80] NAKAYAMA, K.. Comunicação Pessoal. 1987.

APENDICE A

CÁLCULO DOS VALORES DA TABELA DE ANÁLISE DE VARIANÇIA
[74]

$$SS_{total} = SS_{regressão} + SS_{resíduos} =$$

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2 + \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Y_i = variável dependente observada para X_i como
variável dependente

\hat{Y}_i = variável dependente estimada para X_i como variável
dependente

\bar{Y} = média dos valores de Y_i

df = graus de liberdade = n

df_{total} = df_{regressão} + df_{resíduos} = n_{reg} + n_{res}

df_{resíduos} = df_{faltadeajuste} + df_{erropuro} = n_{fa} + n_{ep}

MS = média quadrada

MS = SS/n

F_{ratio} regressão = MS_{regressão}/MS_{resíduos} = F_{rr}

F_{ratio} faltadeajuste = MS_{faltadeajuste}/MS_{erropuro} = F_{rfa}

R² = SS_{regressão}/SS_{total}

Para se verificar a adequação dos modelos pode-se fazer dois tipos de testes, quais sejam:

1) Compara-se F_{rr} com o valor retirado da tabela de distribuição de Fisher utilizando-se $v_1 = n_{reg}$ e $v_2 = n_{res}$ e confiança .

Se $F_{rr} > F_{fisher}$ - rejeita-se a hipótese de $\beta_1 = 0$ com confiança $1 - \alpha$

Se $F_{rr} < F_{fisher}$ - β_1 pode ser igual a zero

onde $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X$

Exemplo da tabela 5.16

$F_{rr} = 6.385$

F_{fisher} para $v_1 = 1$ e $v_2 = 33$ e $\alpha = 0.05$ é igual a 4.15

$6.385 > 4.15$ - rejeita-se a hipótese de $\beta_1 = 0$ com confiança de 95%

2) Compara-se F_{rfa} com o valor retirado da tabela de distribuição de Fisher com $v_1 = n_{fa}$ e $v_2 = n_{ep}$ e confiança

Se $F_{rfa} < F_{fisher}$ - F_{rfa} é não significativa

Se $F_{rfa} > F_{fisher}$ - F_{rfa} é significativa

Se F_{rfa} é significativa o modelo estimado parece ser inadequado.

Se F_{rfa} é não significativa não existe razão para duvidar da adequabilidade do modelo.

Exemplo da tabela 5.16

$F_{rfa} = 0.0649$

F_{fisher} para $v_1 = 5$, $v_2 = 28$ e $\alpha = 0.05$ é igual a 4.2

$0.0649 < 4.2$ - F_{rfa} é não significativa - não existe razão para se duvidar da adequabilidade do modelo.

CALCULO DO INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA EM TORNO DOS

VALORES ESTIMADOS

O intervalo de confiança da média representa a probabilidade da média de qualquer amostra da população em questão cair dentro deste intervalo.

Para cada valor da variável independente X_0 , tem-se um intervalo de confiança da média $Y_0 \pm b$ onde b é dado por:

$$b = \text{est.se}(Y_0) \cdot t(n-2, \alpha)$$

onde $t(n-2, \alpha)$ = valor retirado da tabela de distribuição t de Student para $n-2$ graus de liberdade e probabilidade $1 - \alpha$

n = número de valores de X_0 utilizados na regressão

$$\text{est.se}(Y_0) = \sqrt{\text{est.V}(Y_0)}$$

$$\text{est.V}(Y_0) = s^2 \left\{ \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \right\}$$

s^2 = variância dos valores Y_i colocados na regressão

\bar{X} = média dos valores de X_i

Tomando como exemplo a regressão linear realizada para os valores de R_a dos ensaios 43 a 47, tem-se para $X_0 = 50000$ mm:

$$\bar{X} = 210200 \quad s^2 = 0.04925 \quad n = 60$$

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 7,44725 \cdot 10^{11}$$

$$\text{est.V}(Y_0) = 0.0025 \quad \text{est.se}(Y_0) = 0.05018$$

$$t(58, 90\%) = 1.672$$

$$b = 0.084$$

APENDICE B

CALCULO DO TAMANHO MINIMO DE AMOSTRA [75]

Para encontrar o tamanho mínimo de amostra de modo a obter um valor médio confiável é necessário obter primeiramente uma amostra inicial de tamanho N_0 , julgada conveniente para estimar a dispersão da população. Em seguida calcula-se o valor do tamanho mínimo de amostra N . Se N_0 for maior que N , a amostra inicial já é representativa da população; caso contrário, é necessário tomar uma amostra maior $N_0 > N$ que garanta a representatividade exigida.

Para populações contínuas o tamanho mínimo de amostra é definido por:

$$N = \left(\frac{S \cdot t}{d} \right)^2$$

onde, S - Estimativa do desvio padrão da população ou desvio padrão da amostra inicial

d - erro tolerável

t - valor obtido da tabela de distribuição "t" Student para graus de liberdade ($\alpha = N_0 - 1$) e confiança P ($P = 1 - \alpha$)

Exemplificando com uma situação deste trabalho, foram obtidos os seguintes valores de rugosidade média (Ra) na medição da peça B do ensaio 47:

Medição	Ra (μm)
1	2.40
2	2.25
3	2.00
4	2.50
5	2.58
6	3.00
Média	2.45
S	0.337

Considerando-se uma confiança de 90% ($t = 2.015$ para 6 graus de liberdade) e um erro tolerável $0.2 \mu\text{m}$, obteve-se o seguinte tamanho mínimo de amostra:

$$N = \left(\frac{0.337 \times 2.015}{0.2} \right)^2 = 11.56$$

Como foram tomadas 6 medidas de rugosidade na peça como amostragem inicial, verifica-se que mais medições são necessárias para se representar a média da população com a confiança desejada. Assim, mais 9 medições foram realizadas, quais sejam:

Medição	Ra (μm)
7	2.73
8	2.88
9	2.40
10	2.70
11	3.00
12	3.25
13	2.98
14	2.35
15	1.98
Média (15 medições)	2.60
S	0.379

O novo tamanho mínimo de amostra para uma confiança de 90% ($t = 1.761$ para 14 graus de liberdade) com $d = 0.21 \mu\text{m}$, será:

$$N = \left(\frac{0.379 \times 1.761}{0.21} \right)^2 = 10.3$$

Como $N_0 = 15 > N = 10.3$, temos que a média $R_a = 2.60 \mu\text{m}$ representa a média da população com a confiança desejada (90%).