UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru

ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA USINAGEM DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

JEFFERSON LUIS CESAR SALLES

Dissertação Apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial

BAURU - SP
NOVEMBRO - 2001

Capes. 3.03.03.07-9 - Usinagem
A)
Número de chamada
Clas. T/UNESP
PHA S164e
Tombo n.º 991

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA USINAGEM DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

BIBLIOTECA UNESP CAMPUS BAURU

JEFFERSON LUIS CESAR SALLES

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Industrial

BAURU – SP
NOVEMBRO - 2001

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

Salles, Jefferson Luis Cesar
Estudo do acabamento superficial na usinagem do polietileno de ultra alto peso molecular / Jefferson Luis Cesar Salles - - Bauru : [s.n.], 2001.
150 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves.

1. Acabamento superficial. 2. UHMWPE. 3. Usinagem. I – Título. II – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

Maristela, 07/11/2001

PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA INDUSTRIAL

ATA Nº 016/2001.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *JEFFERSON LUIS CESAR SALLES*, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia quinze de outubro de dois mil e um, às quatorze horas, no anfiteatro do prédio da pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Bauru, Presidente da Banca, Luiz Eduardo de Angelo Sanchez do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Bauru e Luis Rogério de Oliveira Hein do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Guaratinguetá, a fim de proceder a argüição pública da Dissertação de Mestrado do candidato ***Jefferson Luis Cesar Salles***, intitulada "ESTUDO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA USINAGEM DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR". O Professor Doutor Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em quarenta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO**, atribuindo a menção ***com distinção.*** Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora. Bauru, quinze de outubro de dois mil e um. / . / . / . / . / . / . / . / . /

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves - Presidente _____

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez - Membro _____

Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein - Membro _____

unesp
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia - Bauru
Av.Engº Luiz Edmundo Carrijo Coube s/nº • Caixa Postal 473 • CEP 17 033-360 • Bauru • SP • Fone: 14 221 6000 e 14 221 6108 • Fax: 14 221 6104
E-mail: spg-fe@bauru.unesp.br • home page: www.bauru.unesp.br/pos/fe.htm

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Dedico este trabalho aos meus pais, exemplos de vida e dedicação, e à minha esposa Rosângela, pelo carinho, dedicação e estímulo ao meu progresso.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pela orientação, pelo incentivo, pelo apoio constante, pela amizade sincera, pelas valiosas sugestões e pela confiança depositada no sucesso deste projeto.

Às empresas: Titana Tecnologia Comércio e Indústria de Polímeros Ltda, na pessoa do Sr. Sérgio L. Pradez de Faria Jr. e PS Ferramentas, na pessoa do Sr. Paulo Marcus Sidinani, pelo apoio material e técnico na realização desta pesquisa.

Ao companheiro de trabalho e amigo Luiz Otávio Corrêa, pelo apoio e colaboração na realização dos ensaios.

À companheira de trabalho e amiga Giovana Priscila Mandello Rodrigues pela colaboração na realização desta pesquisa.

Ao Auxiliar Acadêmico MSc. Ulisses Frazão Tibúrcio Gonçalves pela valiosa ajuda.

Aos Professores Doutores Ivaldo De Domenico Valarelli, Luiz Eduardo de A. Sanchez, Célio Losnak, pela viabilização da usinagem e preparação dos corpos-de-prova.

Ao Coordenador do Curso de Pós-graduação, Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, por seu apoio à defesa desta dissertação.

À Deus pela saúde na realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS I

LISTA DE TABELAS II

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLO III

1 – INTRODUÇÃO 01

1.1 – Objetivos 03

2 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL 04

2.1 - Caracterização do Polietileno UHMW 04

2.2 – Usinabilidade 09

2.3 – Acabamento 10
2.3.1 – Rugosidade 11
2.3.2 - Parâmetros estatísticos 14
2.3.3 - Rugosidade em operações de torneamento 17
2.3.4 - Técnica de medida da rugosidade de superfícies 21

2.4 - **Características dos Polímeros Relacionadas com a Usinagem** 24
2.41 - Propriedades térmicas 25
2.4.2 - Propriedades mecânicas 26
2.4.3 - Mecanismos de formação do cavaco 30

2.5 - **Trabalhos desenvolvidos em Usinagem de Plásticos** 36

2.6 - **Aspectos Conclusivos da Revisão Bibliográfica** 62

3 - MATERIAIS E MÉTODOS 64

3.1 - Obtenção de Superfícies Usinadas 64
3.1.1 – Amostras 65
3.1.3 – Procedimentos empregados nos ensaio preliminares 66
3.1.2 - Parâmetros e ferramentas de corte utilizadas na geração das superfícies 68
3.1.4 – Procedimentos empregados na preparação dos corpos de prova 72
3.1.5 - Procedimentos empregados na obtenção das superfícies 74
3.1.6 – Procedimentos empregados na verificação de avarias e desgaste das ferramentas 76

3.2 – Avaliação do Acabamento superficial **77**
3.2.1- Procedimentos empregados na medição da rugosidade superficial **78**
3.2.2 – Procedimento empregados na análise da superfície dos corpos-de-prova **81**

3.3 – Procedimentos Empregados na Análise do Cavaco **81**

4 - RESULTADO E DISCUSSÃO **82**
4.1 - Resultados para a Ferramenta "A" **82**
4.1.1 - Rugosidade superficial **82**
4.1.2 - Análise da superfície **86**
4.1.3 - Estudo do cavaco **88**

4.2 - Resultados para a Ferramenta "B" **89**
4.2.1 - Rugosidade superficial **93**
4.2.2 - Análise da superfície **95**
4.2.3 - Estudo do cavaco **96**

4.3 - Resultados para a Ferramenta "C" **96**
4.3.1 - Rugosidade superficial **96**
4.3.2 - Análise da superfície **99**
4.3.3 - Estudo do cavaco **100**

4.4 - Resultado comparativo da rugosidade R_a para três tipos de ferramentas de corte, variando-se o avanço **101**

4.5 - Resultado comparativo da rugosidade R_a para três tipos de ferramentas de corte, variando-se a velocidade de corte **103**

4.6 Verificação de avarias e desgaste das ferramentas de corte **106**

5 - CONCLUSÕES **108**

6 - SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS **110**

7 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA **111**

ANEXO 1 ..... **114**
ANEXO 2 ..... **115**
ANEXO 3 ..... **116**
ANEXO 4 ..... **128**
ANEXO 5 ..... **129**
ANEXO 6 ..... **138**
ANEXO 7 ..... **139**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Demanda mundial do material UHMW.....02

FIGURA 2.1 - Representação esquemática do processo de polimerização do UHMW (MACROGALLERIA, 1997).....08

FIGURA 2.2 - Descrição geral do processo de usinagem. (TRIBOULOT et al, 1991).....10

FIGURA 2.3 - Linha média e áreas mínimas superiores e inferiores. (ABNT 6405, 1988).....12

FIGURA 2.4 - Percurso de apalpamento. (ABNT 6405, 1988).....13

FIGURA 2.5 - Rugosidade média aritmética, R_a.(ABNT 6405, 1988).....16

FIGURA 2.6 - Representação dos parâmetros de rugosidade R_z. (ERIKSEN, 1997).....16

FIGURA 2.7 - Representação esquemática da ferramenta considerada na rugosidade (SHAW, 1994).....17

FIGURA 2.8 - Representação esquemática da ferramenta para o primeiro caso (SHAW, 1994).....18

FIGURA 2.9 - Diagrama esquemático mostrando a relação entre Rth/r e f/r para três casos diferentes (SHAW e CROWELL ,1965).....20

FIGURA 2.10 - Características da superfície, adaptado de TalyProfile Operator's Handbook.....22

FIGURA 2.11 - Representação esquemática do sensor de rugosímetro, adaptado de TalyProfile Operator's Handbook (1985).....24

FIGURA 2.12 - Comportamento do PS com a variação da temperatura (CARR e FEGER 1993).....29

FIGURA 2.13 - Estudo do cavaco no torneamento do PS (KOBAYASHI,1967)... 33

FIGURA 2.14 - Efeito da velocidade de corte e profundidade de corte sobre o tipo de cavaco no torneamento do PR (KOBAYASHI ,1967).....34

FIGURA 2.15 - Mecanismos de formação de cavacos em materiais plásticos (CARR e FEGER 1993).....35

FIGURA 2.16 - Efeito das condições de usinagem e da ferramenta de corte sobre a rugosidade do PA (KOBAYASHI ,1967)..... 40

FIGURA 2.17 - Resultado comparativo de Ra no torneamento do PMMA (KOBAYASHI ,1967).....40

FIGURA 2.18 - Velocidade de avanço em função da relação $R_{má}/R_{th}$ (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).....45

FIGURA 2.19 - Gráficos de Rugosidade Superficial obtidos nos ensaios de Usinagem (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).....46

FIGURA 2.20 - Comparação entre a superfície usinada para três tipos de plástico (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984)..... 47
FIGURA 2.21 - Relação entre a rugosidade e o avanço na usinagem do PMMA (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984)..... 47
FIGURA 2.22 - Rugosidade superficial para o PMMA. Vc = 750 m/min, f = 3 μm/volta e p=10 μm (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984)..... 48
FIGURA 2.23 - Rugosidade Superficial em função da variação do peso molecular para o material PMMA (CARR e FEGER, 1993)..... 50
FIGURA 2.24 - Rugosidade Superficial em função da velocidade de corte para o VESPEL (CARR e FEGER, 1993)..... 51
FIGURA 2.25 - Rugosidade Superficial em função do Ângulo de saída (CARR e FEGER, 1993)..... 52
FIGURA 2.26 - Representação esquemática do equipamento utilizado na pesquisa (GRABCHENKO et al, 1998)..... 56
FIGURA 2.27 - Influência da velocidade de corte na rugosidade dos polímeros ópticos (GRABCHENKO et al, 1998)..... 56
FIGURA 2.28 - Influência da variação da velocidade de corte na rugosidade para os polímeros ópticos (GRABCHENKO et al, 1998)..... 57
FIGURA 2.29 - Efeito da velocidade de corte sobre a taxa de desgaste do UHMW (SONG et al, 1999)..... 59
FIGURA 2.30 - Variação do desgaste da superfície no UHMW em função da variação das condições de usinagem (SONG et al, 1999)..... 60
FIGURA 2.31 - Efeito da profundidade de corte sobre a taxa de desgaste e a rugosidade superficial da usinagem do UHMW (SONG et al, 1999)..... 61
FIGURA 3.1 - Representação dos ângulos de saída e quebra-cavacos das ferramentas de corte..... 70
FIGURA 3.2 - Geometrias das ferramentas de corte..... 71
FIGURA 3.3 -Torno CNC EMCO COMPACT 5 utilizado na preparação dos corpos de prova..... 72
FIGURA 3.4 - Corpos de prova utilizados no ensaio de torneamento..... 73
FIGURA 3.5 - Torno CNC EMCO TURN 120 utilizado para a obtenção dos corpos de prova..... 74
FIGURA 3.6 - Torneamento dos corpos de prova com as ferramentas DCGX070204 AL e RCGX 0803 AL..... 75
FIGURA 3.7 - Medição da rugosidade em amostras torneadas..... 79
FIGURA 3.8 - Sistema de aquisição de dados..... 80
FIGURA 4.1 - Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "A", variando-se o avanço..... 83

FIGURA 4.2 - Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "A", variando-se a velocidade de corte. 83
FIGURA 4.3 - Imagens da superfície torneada com a ferramenta "A", obtidas por um microscópio óptico..... 87
FIGURA 4.4 - Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "A"..... 88
FIGURA 4.5 - Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "B", variando-se o avanço. 89
FIGURA 4.6 - Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "B", variando-se a velocidade de corte..... 90
FIGURA 4.7 - Cavaco que aderiu na superfície da amostra para torneamento com a ferramenta "B"..... 91
FIGURA 4.8 - Imagens da superfície torneada com a ferramenta "B", obtidas por microscópio óptico..... 94
FIGURA 4.9 - Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "B"..... 96
FIGURA 4.10 - Variação da Rugosidade (Ra) em conseqüência do avanço, para a ferramenta "C"..... 97
FIGURA 4.11 - Variação da Rugosidade (Ra) em conseqüência da velocidade de corte, utilizando-se a ferramenta "C"..... 97
FIGURA 4.12 - Imagens da superfície torneada com a ferramenta "C", obtidas por microscópio óptico..... 100
FIGURA 4.13 - Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "C"..... 101
FIGURA 4.14 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometrias de ferramenta, Vc = 220 m /min..... 101
FIGURA 4.15 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometrias de ferramenta, Vc = 280 m /min..... 102
FIGURA 4.16 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometria de ferramenta, Avanço 0,05 mm/volta..... 103
FIGURA 4.17 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometria de ferramenta, Avanço 0,10 mm/volta..... 104
FIGURA 4.18 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometria de ferramenta, Avanço 0,20 mm/volta..... 104
FIGURA 4.17 Detalhe da ferramenta "A" após a realização dos ensaios..... 107
FIGURA 4.18 Detalhe das ferramenta "B" após a realização dos ensaios..... 107
FIGURA 4.17 Detalhe das ferramenta "C" após a realização dos ensaios..... 107

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Classificação de λ_c, le e lm, de acordo com o avanço por dente (ABNT 6405,1988)..... 13
TABELA 2.2 - Classificação de λ_c e lm, de acordo com a rugosidade média R_a. (ABNT 6405, 1988)..... 14
TABELA 2.3 - Grandezas de usinagem recomendadas para vários tipos de Polímeros (WEARMOUTH, 1946)..... 37
TABELA 2.4 - Ângulo de saída crítico para o PE. (KOBAYASHI ,1967)..... 39
TABELA 2.5 - Ângulo de saída critico para o PVC. (KOBAYASHI ,1967)..... 39
TABELA 2.6 - Variação da velocidade de corte em função da rotação (SONG et al, 1999)..... 58
TABELA 3.1 - Propriedades e características do UTEC 6540..... 66
TABELA 3.2 - Designação das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios preliminares..... 67
TABELA 3.3 - Grandezas de corte recomendadas pelo fabricante da resina (POLIALDEN, 1999)..... 67
TABELA 3.4 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaio preliminares..... 68
TABELA 3.5 - Parâmetros de corte e nomenclatura para a geração de superfícies torneadas..... 69
TABELA 3.6 - Designação das ferramentas de corte utilizadas para a geração das superfícies..... 70
TABELA 3.7 - Seqüenciamento do ensaios de torneamento..... 71
TABELA 3.8 – Modelo empregado para a identificação dos corpos-de-prova..... 73
TABELA 3.9 – Parâmetros de usinagem empregados nos ensaios..... 76
TABELA 3.10 - Estimativa do percurso de corte para os insertos utilizados..... 77
TABELA 3.11 - Configuração do rugosímetro para os ensaios..... 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

C_e[graus] – Ângulo de posição principal
C_s [graus] – Ângulo de posição secundário
f [mm/volta] - avanço
L_e [mm] – comprimento de amostragem
L_m [mm] – percurso de medição
L_n [mm] – percurso final de leitura
L_v [mm] – percurso inicial de leitura
M_w [g/mol]– peso molecular viscosimétrico
n [rpm] – rotação do fuso
p [mm] – profundidade de corte
r [graus] – raio da ponta da ferramenta
R_a [μm] – desvio médio aritmético
$R_{máx}$ [μm] – rugosidade máxima
R_p [μm] – altura máxima do perfila acima da linha média
R_q [μm] – desvio médio quadrática
R_v [μm] – profundidade máxima do perfil abaixo da linha média
R_z-ISO [μm] – altura das irregularidades de 10 pontos
S [μm] – espaçamento médio de picos locais adjacentes
T_m [°C] – temperatura de fusão cristalina
T_g [°C] – temperatura de transição vítrea
V_c [m/min] – velocidade de corte

ER – resina epoxídica
PA – poliamida
PC – policarbonato
PDMS – poli(dimetil-silano)
PE – polietileno
PEAD – polietileno de alta densidade
PEBD – polietileno de baixa densidade
PET – poli(tereftalato de etileno)
PMMA – poli(metacrilato de metila)
POM – poli(óxido de metileno)
PP – polipropileno
PPS – poli(sulfeto de fenileno)
PR – resina fenólica
PS – poliestireno

PTFE – poli(tetraflúor-etileno)
PVC – poli(cloreto de vinila)
UHMW - Ultra High Molecular Weight (Ultra Alto Peso Molecular)

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo o estudo do acabamento superficial no torneamento do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW), verificando-se a influência dos parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta sobre a rugosidade superficial. Foram testadas três diferentes ferramentas de metal duro, a influência da velocidade de corte e do avanço no acabamento de superfícies torneadas. Adicionalmente, estudou-se a relação entre o tipo de cavaco e o acabamento superficial. O parâmetro utilizado para avaliar o acabamento superficial foi a Rugosidade Média Aritmética (Ra). Para verificar o estado final da superfície foi utilizado um microscópio óptico. Como resultado, verificou–se que, com a utilização de ferramenta e parâmetros de usinagem adequados é possível obter resultados satisfatórios para o acabamento superficial, porém a utilização de parâmetros de usinagem inadequados ou a seleção de uma geometria de ferramenta imprópria pode levar a altos valores de rugosidade e danos na superfície usinada.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the surface finishing in the turning of the Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) through verification of the influence of machining parameters and tool geometry upon surface roughness. It has been tested three different tools of tungsten carbide, the influence of the cutting speed as well as the feed rate over the finishing of the turned surface. Moreover, it has also been studied the relationship between the kind of chip and the surface finishing. The parameter used to evaluate the surface finishing was Average Surface Roughness (Ra). In order to verify the final result of the surface it was used an optical microscopy. As a result, it was noticed that as long as it is applied adequate machining tools and parameters, it is possible to obtain outstanding results as for the surface finishing. Nevertheless, by either using inadequate machining parameters or selecting improper tool geometry it could result in high degree of roughness and damage to the machining surface.

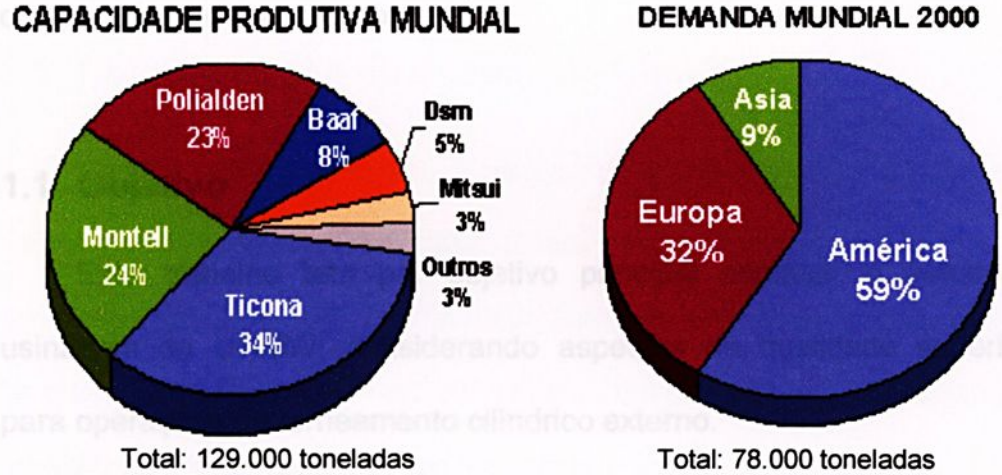
1 INTRODUÇÃO

Os componentes em plásticos, normalmente, são produzidos por processos de moldagem, mas para a produção de pequena quantidade, formas extremamente complexas ou quando se exige precisão, são empregados processos de usinagem. Em alguns casos, não se consegue resultados satisfatórios com a usinagem de plásticos, sobretudo pela grande variedade de materiais disponíveis e pela falta de conhecimento básico do comportamento dos plásticos durante a usinagem. As características da usinagem dependem das propriedades específicas do plástico utilizado. Sendo assim, para cada tipo de plástico será necessário um estudo particular de sua usinabilidade.

O comportamento dos plásticos durante a usinagem depende, especialmente, das propriedades mecânicas, térmicas e reológicas. Por conseguinte, qualquer avaliação das características de usinagem deve levar em conta as propriedades particulares do material a ser usado. Cada categoria de plástico, como também muitas subcategorias específicas, demandam diferentes geometrias de ferramenta para produtividade e desempenho satisfatório (ALAUDDIN et al - 1995) .

O Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW) possui propriedades e desempenho completamente diferentes dos encontrados nos outros tipos de polietileno. Sua excepcional resistência à abrasão e baixo coeficiente de atrito conferem-lhe grande potencialidade na substituição de outros materiais.

A produção em escala industrial do UHMW é recente, no Brasil, iniciou-se na década de noventa e o volume de produção mundial atingiu índices expressivos nos últimos anos. O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial deste material, mas o consumo do mercado interno ainda é pequeno se comparado com o volume consumido por alguns países.(fonte: Poliaden Petroquímica). A Figura 1.1 apresenta a capacidade produtiva e a demanda mundial do material UHMW.



Fonte: Polialden Petroquímica S/A

FIGURA 1.1 – Demanda mundial do material UHMW.

O índice de fluidez do UHMW é extremamente baixo no estado fundido, inviabilizando o seu processamento pelos métodos convencionais de injeção, sopro ou extrusão. O método empregado é o de compressão, como a prensagem e a extrusão por pistão ("Ram Extrusion"). Nestes dois casos, são obtidos produtos semi-acabados em forma de chapas ou tarugos que, em alguns casos, são usinados para atingirem suas dimensões finais.

A realização de um estudo do acabamento superficial na usinagem do UHMW, considerando a influência dos parâmetros de usinagem e da ferramenta de corte, fornece informações técnicas indispensáveis para a otimização do processo de usinagem. Neste trabalho, foi escolhida a rugosidade superficial, como critério para avaliar o acabamento do UHMW. A escolha deste critério deve-se ao fato que a principal característica deste material é a resistência a abrasão, de forma que uma melhor qualidade superficial pode influenciar diretamente no comportamento dos componentes.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal conduzir o estudo da usinagem do UHMW, considerando aspectos de qualidade superficial para operações de torneamento cilíndrico externo.

Verificou-se a influência da velocidade de corte, do avanço e da geometria da ferramenta, onde o acabamento superficial foi avaliado através da rugosidade média (Ra), pela análise da superfície e pelo estudo do cavaco.

2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

Além da fundamentação teórica necessária para o entendimento do presente estudo, apresentam-se nesta revisão, trabalhos relacionados com a usinagem do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW), bem como de outros materiais poliméricos, envolvendo a avaliação da qualidade superficial e a integridade da superfície na usinagem destes materiais.

2.1 Caracterização do Polietileno UHMW

OLLEY (1999) descreve a história do polietileno com as primeiras pesquisas iniciando-se em 1932. Neste período, o mundo passava por uma profunda recessão e o investimento em pesquisas era limitado. A "Imperial Chemical Industries" (ICI) iniciou um programa de pesquisa para investigar novas reações em condições de extrema pressão. Foram experimentadas cinqüenta reações diferentes. Todas sem sucesso, mas por uma série notável de coincidências, uma das reações resultou na descoberta do polietileno.

Uma das experiências utilizou o etileno e a reação esperada não ocorreu, mas formou-se um revestimento sólido de cera branca nas paredes do recipiente da reação. A análise mostrou que esta reação ocorreu em virtude do etileno.

Em 1935, a reação foi novamente experimentada sem um dos componentes utilizado na primeira experiência. Os pesquisadores desconfiaram que algo tinha ocorrido quando o recipiente de teste partiu-se, perdendo toda pressão. Ao abrir o tubo, eles foram surpreendidos ao encontrar uma cera branca muito semelhante a um plástico. Quando a experiência foi repetida, os cientistas analisaram cuidadosamente e descobriram que a perda de pressão foi devida, principalmente, a um processo de polimerização que ocorreu e assim se obteve o polietileno. Neste momento, a Empresa ICI tomou uma decisão mais arrojada e iniciou um grande programa de pesquisa, com base em apenas oito gramas deste produto promissor.

O polietileno foi revelado ao mundo após a segunda guerra mundial, e logo encontrou muitas aplicações. Porém, sua utilização possuía algumas limitações devido a baixa rigidez e, principalmente, a baixa temperatura de deflexão térmica.

Grande esforço de pesquisa foi realizado para melhorar o processo e, em 1953, na Alemanha, Karl Ziegler fez uma descoberta crucial, por qual as moléculas de etileno poderiam fazer ligações de uma maneira mais ordenada na presença do "catalisador Ziegler", não sendo necessárias altas pressões e elevadas temperaturas que o processo tradicional requeria. Desta forma, produziu-se o polietileno com as cadeias lineares. Logo depois, outro processo foi desenvolvido: o processo de Phillips, que utiliza um catalisador mais barato e mais fácil de

manipular, só que exigia a aplicação de pressões médias. Desta maneira, o que este processo ganhava de um lado perdia do outro, comparando com o processo de Ziegler, os resultados são praticamente os mesmos e, assim, ambos os processos são amplamente utilizados industrialmente.

Karl Ziegler compartilhou o prêmio Nobel pela sua descoberta com Giulio Natta que, simultaneamente, descobriu outra forma de ordenar as moléculas na produção de plásticos. Sendo assim, o catalisador passou a chamar-se Ziegler-Natta. A Figura 2.1 ilustra o processo de polimerização do Polietileno utilizando o catalisador Ziegler-Natta.

O UHMW é obtido por um processo em suspensão com catalisador tipo Ziegler-Natta, que permite a obtenção de plásticos com peso molecular na faixa de dois a oito milhões g/mol, aproximadamente dez vezes maior do que os pesos moleculares de resinas consideradas de alto peso molecular. O UHMW possui propriedades e desempenho completamente diferentes dos encontrados nos outros tipos de polietilenos. Sua excepcional resistência a abrasão e baixo coeficiente de atrito conferem-lhe grande potencialidade na substituição de outros materiais.

Como referência, para considerar-se um polietileno como sendo de ultra alto peso molecular, atualmente, é aceito o valor mínimo de 3.100.000 g/mol para o peso molecular. Acima deste valor, ocorre uma melhor combinação entre resistência ao impacto e resistência à abrasão,

porém com um conseqüente aumento na dificuldade do processamento deste material e consequentemente o aumento nos custos do produto.

O peso molecular extremamente elevado do UHMW proporciona uma viscosidade muito alta no estado fundido, que o seu índice de fluidez a 190 °C/21,6 Kg aproxima-se de zero. Assim, não é possível processá-lo por métodos convencionais de injeção, sopro ou extrusão. O método empregado é o de compressão, como a prensagem e a extrusão por pistão ("Ram Extrusion"). Nestes dois casos, são obtidos produtos semi-acabados em forma de chapas ou tarugos que, em alguns casos, são usinados para atingirem suas dimensões finais. (POLIALDEN, UTEC Boletim Técnico 3.01).

Uma característica interessante do UHMW é sua capacidade de trabalho em baixas temperaturas. Mesmo estando próximo do zero absoluto, onde praticamente nenhum outro polímero de engenharia pode ser usado, o material mantém suas propriedades úteis, como resistência ao impacto, coeficiente de abrasão e a inércia química. A temperatura de transição Vítrea (temperatura abaixo da qual a fratura deixa de ser dúctil, ou seja, o material passa a romper sem alongamento) do UHMW é menor que -269°C. (POLIALDEN, UTEC, Boletim Técnico 4.06).

O Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular é extremamente resistente a uma ampla gama de produtos químicos. O material é quase totalmente inerte, o que faz com que seja indicado para uso em praticamente todos os tipos de ambientes agressivos ou corrosivos, com

temperaturas moderadas. Mesmo em temperaturas elevadas, só é atacado por solventes aromáticos ou halogenados e por oxidantes fortes como ácido nítrico. (POLIALDEN, UTEC, Boletim Técnico 4.04). As principais características e propriedades do UHMW são apresentadas pelo Anexo 1.

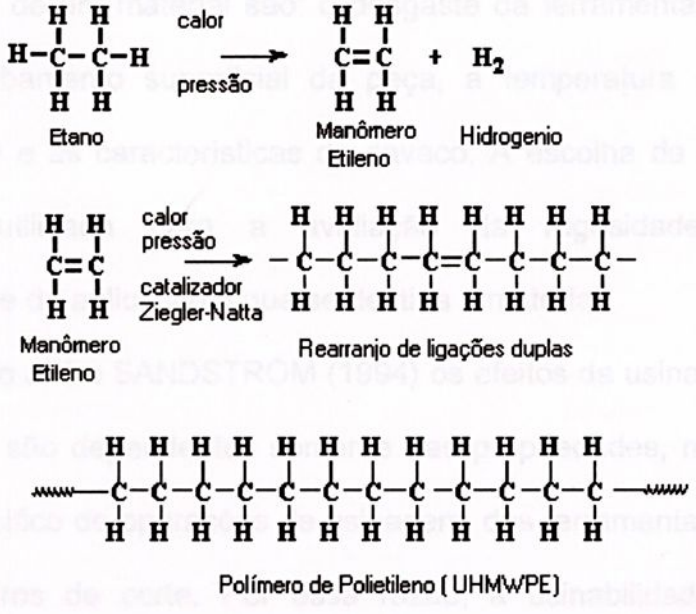


Figura 2.1 – Representação esquemática do processo de polimerização do UHMW (MACROGALLERIA, 1997)

Atualmente, as aplicações do material UHMW abrangem peças técnicas, rotores para bomba, correias transportadoras, tubos, guias, revestimento para caixas de sucção de máquinas de papel, mancais, peças para teares, fibra de alta resistência, materiais para uso médico cirúrgico e outros componentes que exijam máxima resistência à abrasão e ao impacto, além de baixo coeficiente de atrito.

2.2 Usinabilidade

A usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza comparativa que expressa, por meio de índice, um conjunto de propriedades de usinagem específicas do material para um determinado processo. As propriedades de usinagem utilizadas para a avaliação da usinabilidade de um material são: o desgaste da ferramenta, a força de corte, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco. A escolha da propriedade que será utilizada para a avaliação da rugosidade, depende especialmente da aplicação a que se destina o material.

Segundo JIN e SANDSTRÖM (1994) os efeitos da usinagem em um material não são dependentes somente das propriedades, mas também do tipo específico de operações de usinagem, das ferramentas de corte e dos parâmetros de corte. Por essa razão, a usinabilidade pode ser classificada como uma propriedade tecnológica que controla a capacidade de usinar-se um material para atender às exigências comerciais na dimensão, forma e acabamento superficial. Do ponto de vista da engenharia, a usinabilidade pode ser interpretada como a medida da facilidade ou dificuldade com que cada material pode ser usinado.

MALDONADO (1998) afirma que a usinabilidade serve para descobrir as propriedades de mecanização de um determinado material, definindo-a ainda como a facilidade de manipular-se um material em formas e dimensões definidas, com uma certa qualidade superficial, por

unesp

operações de corte. A usinabilidade ou facilidade de usinagem, é influenciada pelo tipo e forma da ferramenta de corte. Porém, usinagem é um termo livremente definido; é expressado como o tempo de vida de ferramenta, potência de corte, custo da operação de usinagem ou estado final da superfície. A Figura 2.2 apresenta a relação entre os fatores envolvidos em um processo de usinagem.

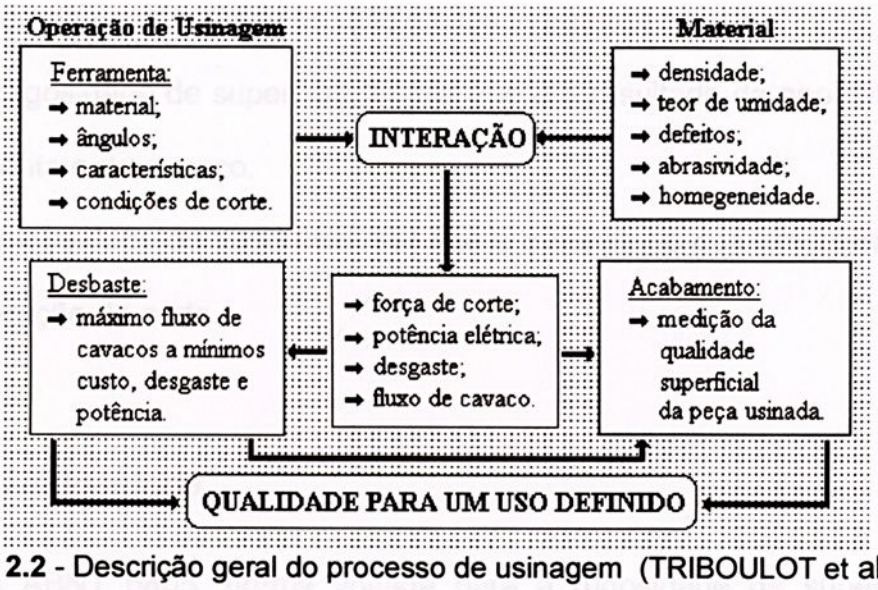


Figura 2.2 - Descrição geral do processo de usinagem (TRIBOULOT et al, 1991)

2.3 Acabamento

Segundo LEMASTER e BEALL (1996) todo material possui uma superfície, caracterizada por uma determinada textura e rugosidade superficial, que é dependente do processo de fabricação envolvido, da natureza do próprio material ou da combinação dos dois. De acordo com a aplicação do produto final, a rugosidade superficial torna-se uma característica de controle extremamente importante.

Segundo BOOTHROYD e KNIGHT (1989) a rugosidade superficial é utilizada como uma ferramenta para o estudo da usinabilidade dos materiais. Nos ensaios, os parâmetros de usinagem podem ser variados e os menores valores de rugosidade superficial determinam quais são as características ideais para esse processamento. A rugosidade da superfície final, obtida durante uma operação de usinagem, pode ser considerada como a soma de dois efeitos independentes:

- A rugosidade de superfície teórica que é o resultado da geometria da ferramenta e do avanço.
- A rugosidade de superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte.

2.3.1 Rugosidade

A ABNT 6405, norma voltada para a rugosidade de superfícies, destinada a todo e qualquer material e também para todo e qualquer processo, define uma série de conceitos e padrões importantes na condução de medições da rugosidade superficial. A ABNT 6405 adota o "Sistema M" que tem por base a linha média, que secciona o perfil de tal modo que as áreas acima e abaixo dela sejam iguais e mínimas. A Figura 2.3 ilustra o perfil de uma superfície representando a linha média.

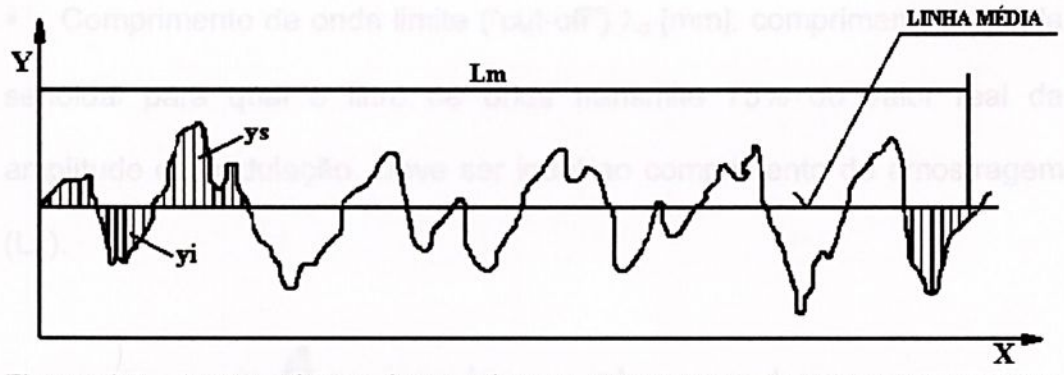


Figura 2.3 – Linha média e áreas mínimas superiores e inferiores (ABNT 6405, 1988).

No texto normativo citado, uma considerável atenção é dada aos aspectos de condicionamento para a medição, que determina correlações entre:

- Comprimento total L1 [mm]: segmento da superfície percorrido pelo sensor (stylus).
- Percurso de medição L_m [mm]: extensão do trecho útil do perfil de rugosidade utilizado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média.
- Comprimento de amostragem L_e [mm]: segmentos dentro do comprimento de medição, sobre os quais se calculam os parâmetros estatísticos quantitativos dos erros de rugosidade. Normalmente, utiliza-se um quinto de L_m.
- Percurso inicial L_v e percurso final L_n [mm]: extensão da primeira e última parte do trecho apalpado não utilizado na avaliação, com a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema e centragem do perfil de rugosidade.

- Comprimento de onda limite ("cut-off") λ_c [mm]: comprimento de onda senoidal para qual o filtro de onda transmite 75% do valor real da amplitude da ondulação. Deve ser igual ao comprimento de amostragem (L_e).

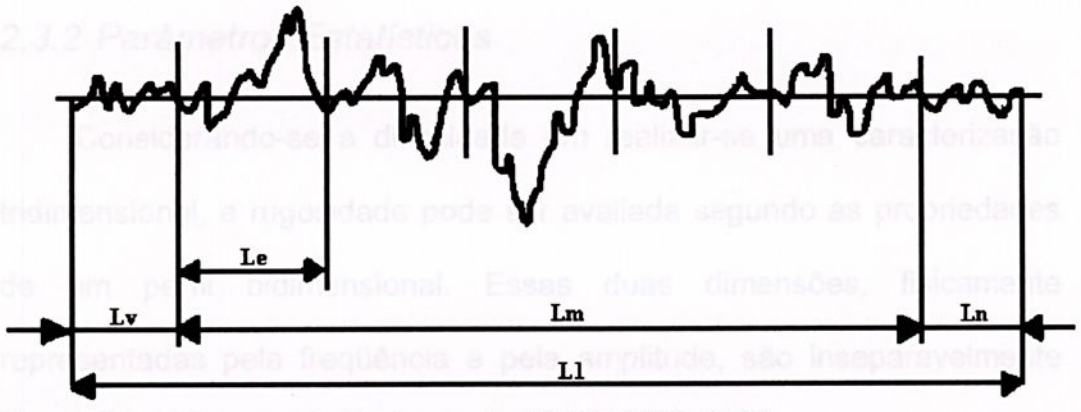


Figura 2.4 - Percurso de Apalpamento (ABNT 6404, 1988).

Para a medição de perfis periódicos, a ABNT 6405 sugere uma relação, apresentada na Tabela 2.1, envolvendo a distância entre sulcos (avanço) e os parâmetros λ_c, L_e e L_m. É apresentada também uma relação entre a rugosidade média (R_a) e os parâmetros λ_c e L_m na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Classificação de λ_c, L_e e L_m, de acordo com a distancia entre sulcos. (ABNT 6405, 1988).

f [mm]	λ_c [mm]	l_e [mm]	l_m [mm]
0,010< f≤ 0,032	0,08	0,08	0,40
0,032< f≤ 0,100	0,25	0,25	1,25
0,100< f≤ 0,320	0,80	0,80	4,00
0,320< f≤ 1,000	2,50	2,50	12,50
1,000< f≤ 3,200	8,00	8,00	40,00

Tabela 2.2 – Classificação de λ_c e I_m de acordo com a rugosidade média. (ABNT 6405, 1988).

Rugosidade Ra (μm)	λ_c [mm]	I_m [mm]
$R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,80	4,00
$2 < R_a \leq 10$	2,50	12,50
$10 < R_a$	8	40

2.3.2 Parâmetros Estatísticos

Considerando-se a dificuldade em realizar-se uma caracterização tridimensional, a rugosidade pode ser avaliada segundo as propriedades de um perfil bidimensional. Essas duas dimensões, fisicamente representadas pela freqüência e pela amplitude, são inseparavelmente fundamentais para medição da rugosidade superficial. Uma classificação geral dos parâmetros de medição de rugosidade pode ser feita dividindo-se em três grupos:

- Parâmetros de amplitude: são medições dos deslocamentos verticais do perfil.
- Parâmetros de espaçamento: são medições de espaçamentos irregulares ao longo da superfície, independente da amplitude dessas irregularidades.
- Parâmetros híbridos: relacionados tanto com a amplitude como o espaçamento das irregularidades superficiais.

Mediante as técnicas de medição disponíveis, os dados de rugosidade superficial são obtidos e, em seguida, interpretados de acordo

com o parâmetro de avaliação empregado. Os parâmetros utilizados são definidos a seguir:

- R_a: Desvio Médio Aritmético. Corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento y_i, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Este parâmetro de avaliação da rugosidade superficial, conforme Figura 2.5, pode ser representado por:

$$Ra = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y(x)| dx \qquad (1)$$

Onde $y(x)$ é a função das ordenadas de afastamento e L_m é o percurso de medição.

- R_q: Desvio Médio Quadrático. Corresponde a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} y^2(x) dx} \qquad (2)$$

- R_z (ISO) Altura das Irregularidades dos dez pontos: corresponde a média aritmética das diferenças de altura entre os cinco picos mais elevados e os cinco vales mais profundos, existentes dentro de um comprimento de amostragem. É representada por:

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=5}^{5} zi \qquad (3)$$

- R_v: é a profundidade máxima do perfil abaixo da linha média dentro do comprimento de amostragem.

- R_p: é a altura máxima do perfil acima da linha média dentro do comprimento de amostragem.
- S: é o espaçamento médio de picos locais adjacentes, medidos no comprimento de avaliação, sendo que um pico local é a altura mais elevada do perfil medido entre dois mínimos adjacentes, Figura 2.6.
- $R_{máx}$: Maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (L_m). Z3 é o $R_{máx}$, conforme Figura 2.6.

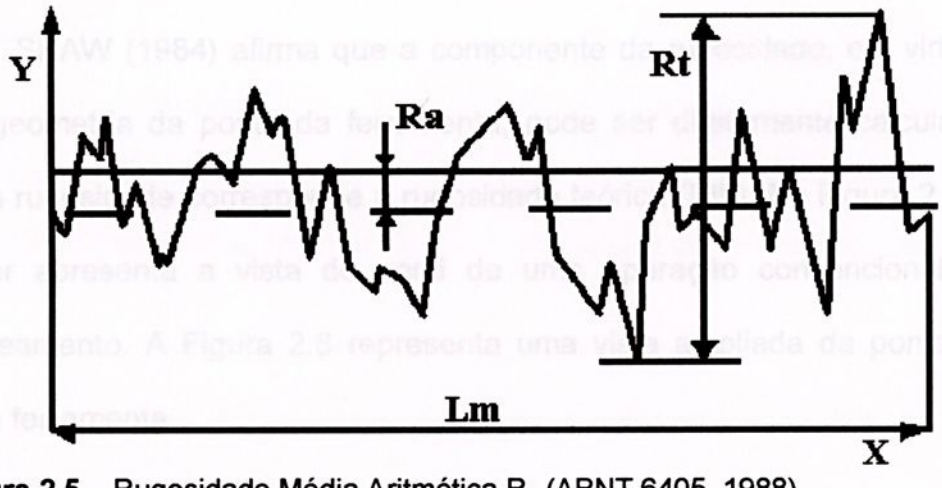


Figura 2.5 – Rugosidade Média Aritmética R_a (ABNT 6405, 1988).

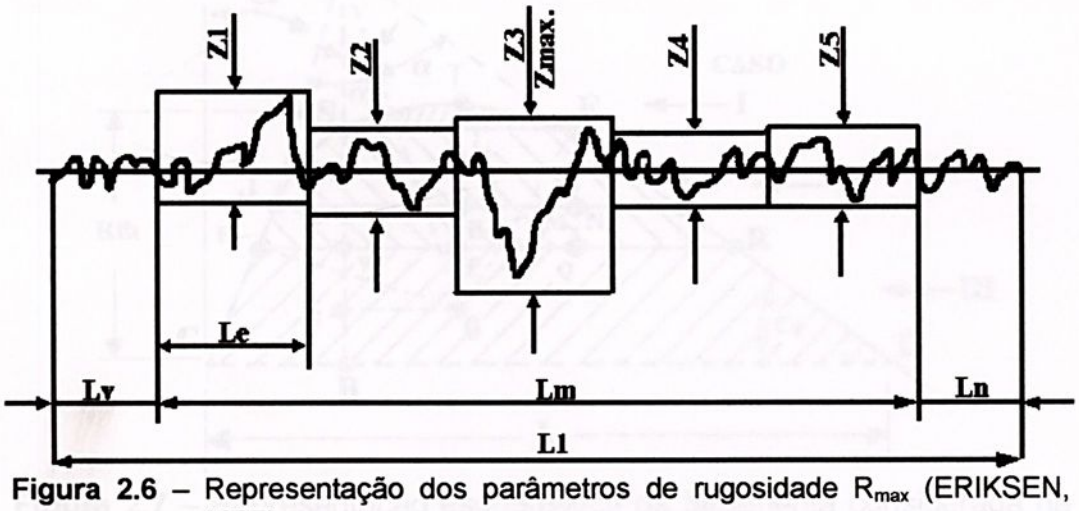


Figura 2.6 – Representação dos parâmetros de rugosidade R_{max} (ERIKSEN, 1997).

2.3.3 Rugosidade em operações de torneamento

A rugosidade de superfície teórica representa o melhor acabamento final que pode ser obtido para determinada forma de ferramenta e avanço e só pode ser obtido se arestas postiças, trepidação, inexatidões no movimento da máquina ferramenta, e assim por diante, forem eliminados (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). A superfície teórica seria obtida sob tais condições ideais.

SHAW (1984) afirma que a componente da rugosidade, em virtude da geometria da ponta da ferramenta, pode ser diretamente calculada. Esta rugosidade corresponde a rugosidade teórica (Rth). Na Figura 2.7, o autor apresenta a vista do perfil de uma operação convencional de torneamento. A Figura 2.8 representa uma vista ampliada da ponta de uma ferramenta.

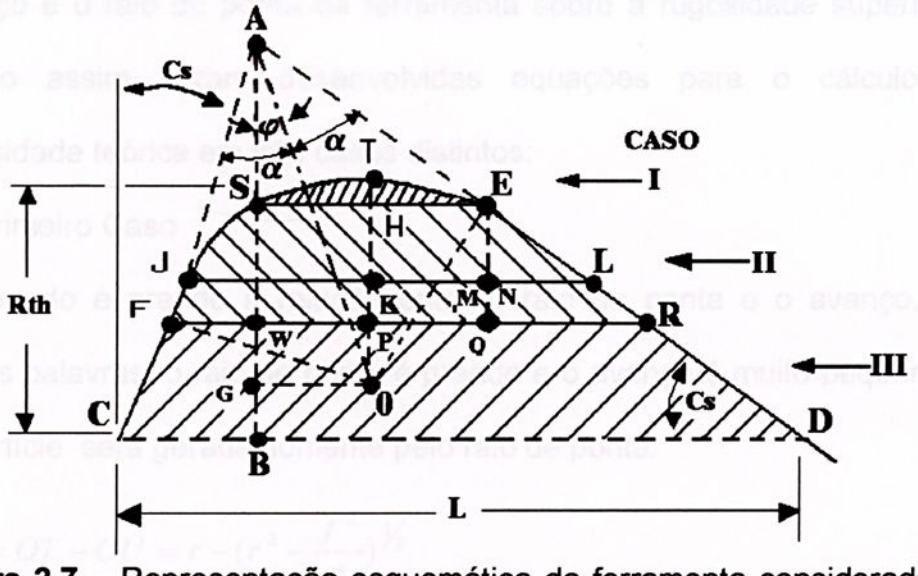


Figura 2.7 – Representação esquemática da ferramenta considerada na rugosidade teórica (SHAW ,1994).

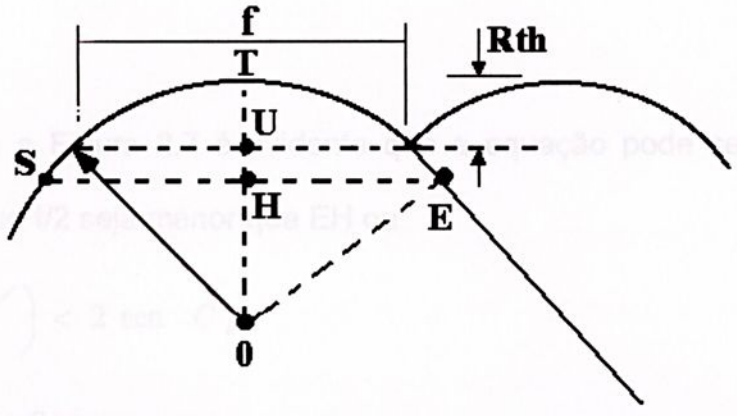


Figura 2.8 – Representação esquemática da ferramenta para o primeiro caso (SHAW, 1994).

Onde:

r = Raio de ponta (mm)

C_e = Ângulo de posição principal

C_s = Ângulo de posição secundário

$R_{máx}$=Altura máxi. da irregularidade

R_a = Rugosidade Média (μm)

f = Avanço da ferramenta (mm/volta)

SHAW (1984) apresenta um equacionamento para a rugosidade superficial teórica (Rth), levando em conta a influência da relação entre o avanço e o raio de ponta da ferramenta sobre a rugosidade superficial. Sendo assim, foram desenvolvidas equações para o cálculo da rugosidade teórica em três casos distintos:

A. Primeiro Caso

Quando é grande a relação entre o raio de ponta e o avanço. Em outras palavras, o raio de ponta é grande e o avanço é muito pequeno, a superfície será gerada somente pelo raio de ponta.

$$Rth = OT - OU = r - (r^2 - \frac{f^2}{4})^{1/2}$$

$$Rth \cong \frac{f^2}{8r} \qquad (4)$$

Para a Figura 2.7 é evidente que a equação pode ser derivada, contanto que f/2 seja menor que EH ou:

$$0 < \left({}^{f}\!/_{r} \right) < 2 \text{ sen } C_e$$

B. Segundo Caso

Quando os valores do avanço forem altos, ou seja, maiores que o raio de ponta da ferramenta, terá que ser considerado para cálculo de R_{th} os valores de C_e . De maneira que, a fórmula para cálculo da rugosidade teórica ficará da seguinte forma:

$$f = JK + HE + NL$$

$$f = \left[r^2 - (r - Rth)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + r.\text{sen } Ce + r\left(\frac{Rt}{r} - 1 + \cos Ce \right) \cot gCe$$

Esta equação será derivada, contanto que f esteja entre SE (+ 2r sen C_e) e o comprimento FR,

$$2.\text{sen } Ce < {}^{f}\!/_{r} < \left[\cos Cs + \text{sen } Ce + (\cos Ce - \text{sen } Cs) \cot gCe \right]$$

C. Terceiro Caso

Para grandes valores de f e C_s, deve-se considerar r e C_e, isto será denominado caso III. De maneira que a fórmula para cálculo da rugosidade teórica ficará da seguinte forma:

$$Rth = AB - r$$

$$Rth = \frac{f/r}{tg.Cs + \cot g.Ce} - \frac{r.\cos.\left(45 - \frac{Ce}{2} - \frac{Cs}{2}\right)}{\text{sen.}\left(45 - \frac{Ce}{2} + \frac{Cs}{2}\right)} + r$$

Mediante um estudo prático, conforme apresentado pela Figura 2.9, SHAW (1994) verificou que a curva do caso II não diverge significativamente do caso I, conforme a Figura 2.9, e que, no caso de acabamento superficial, o caso III normalmente não é empregado. Desta forma, a equação do caso I fornece-nos uma boa aproximação para a rugosidade de superfície teórica.

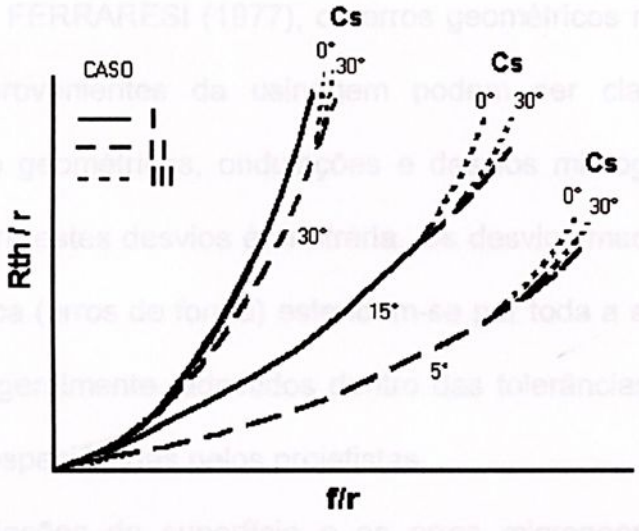


Figura 2.9 – Diagrama esquemático mostrando a relação entre Rth/r e f/r para três casos diferentes (SHAW e CROWELL, 1965).

Boothroyd e Knight (1989) apresentam a equação para o Desvio Médio Aritmético (Ra) teórico de uma superfície, relacionando o avanço e raio da ferramenta, como a seguir :

$$Ra\,(teórico\ ) = \frac{0{,}0321 \times f^2}{r} \qquad (5)$$

Opitz e Moll (1941), definiram a eficiência da usinagem (C) em termos de uma relação entre a rugosidade medida (Rt) e a rugosidade teórica (Rth), como a seguir:

$$C = Rt / Rth$$

O resultado que pode ser considerado como ideal, para o acabamento final, é aquele que se aproxima de C=1.

2.3.4 Técnica de Medida da Rugosidade de Superfícies

Segundo FERRARESI (1977), os erros geométricos nas superfícies das peças, provenientes da usinagem podem ser classificados em desvios macro geométricos, ondulações e desvios microgeométricos. A separação entre estes desvios é arbitrária. Os desvios macrogeométricos da forma teórica (erros de forma) estendem-se por toda a superfície a ser testada. São, geralmente, admitidos dentro das tolerâncias dimensionais de usinagem especificadas pelos projetistas.

As ondulações da superfície e os erros microgeométricos estão diretamente ligados à qualidade de superfícies da peça. As ondulações referem-se às séries de desvios regularmente repetidos, de forma aproximadamente senoidal e com um comprimento de onda aproximadamente constante. A Figura 2.10 apresenta as características de uma superfície usinada.

Ondulações superficiais provêem da deflexão da peça ou da máquina operatriz durante a usinagem, excentricidade da peça, jogos no eixo árvore e nas guias da máquina e operações de desbaste com grande avanço.



Figura 2.10 – Características da superfície adaptado de TalyProfile Operador's Handbook (1985)

Os desvios microgeométricos, ou as micro irregularidades, constituem a rugosidade superficial. Esses desvios são os de maior importância, uma vez que a rugosidade superficial é avaliada pela altura e certas características das micro irregularidades. São originados pelo próprio processo de formação de cavaco, vibrações da ferramenta, aresta postiça de corte, marcas de avanço da ferramenta nas operações de acabamento, atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça (FERRARESI, 1977).

Conforme ERIKSEN (1997), uma maneira de classificar os métodos de avaliação da qualidade da superfície é dividindo em métodos qualitativos e métodos quantitativos. Alguns métodos podem fornecer medidas quantitativas da qualidade da superfície obtida durante um

processo, mas para a maioria dos métodos, isto não é possível. Os métodos qualitativos são utilizados, normalmente, para obter-se imagens da superfície, sendo utilizados os microscópios para visualização de detalhes na superfície. Eles podem empregar princípios diferentes, como: o óptico, eletrônico e acústico.

Segundo ERIKSEN (1997), o método quantitativo freqüentemente usado pelas indústrias é a caracterização da qualidade de superfícies por meio de parâmetros de rugosidade normalizados. Nos instrumentos que trabalham pelo princípio do apalpador, um sensor desloca-se pela superfície a uma velocidade constante. Os movimentos verticais do sensor resultam em um perfil que corresponde à superfície. Porém, devido à geometria e ao tamanho do sensor, haverá sempre alguns desvios mecânicos. A Figura 2.11 ilustra um sensor para medição da rugosidade pelo princípio do apalpador.

Ao invés de utilizar um *apalpador*, o perfil pode ser obtido por um feixe laser. As análises dos perfis obtidas pelos dois métodos são semelhantes. As diferenças principais entre os dois princípios de funcionamento estão no tamanho do apalpador e que, com o feixe laser, não ocorre o contato mecânico com a superfície da peça.

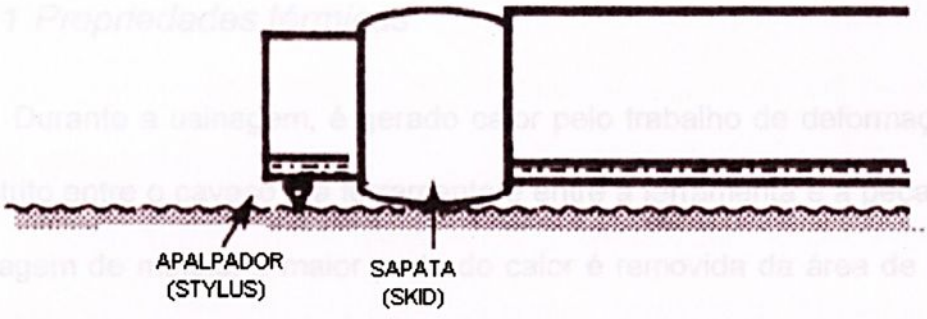


Figura 2.11 – Representação esquemática do sensor de rugosímetro, adaptado de TalyProfile Operador's Handbook (1985)

2.4 Características dos Plásticos Relacionadas com a Usinagem

KOBAYASHI (1967), afirma em seu livro, que ao examinar-se detalhadamente a superfície usinada de um plástico, nota-se, em alguns casos, que a rugosidade é alta e com fissuras, em outros casos, apresenta-se coberta com as indesejáveis marcas de avanço. Pode ocorrer que, o calor excessivo gerado pela usinagem, cause carbonização (termorrígidos) ou derretimento (termoplásticos) na superfície usinada, exigindo um processo de acabamento. Também pode ocorrer que, a aresta de corte da ferramenta apresente lascamento ou desgaste, diminuindo o tempo de uso. Estes problemas ocorrem porque não se conhece o bastante sobre as características reológicas e térmicas dos plásticos, como: calor específico, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica. Então, antes que este trabalho seja descrito, são fornecidas informações básicas sobre a característica de usinagem dos plásticos.

2.4.1 Propriedades térmicas

Durante a usinagem, é gerado calor pelo trabalho de deformação e de atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça. Na usinagem de metais, a maior parte do calor é removida da área de corte pelos cavacos. Na usinagem de plásticos, graças a baixa condutividade térmica, a maior parte do calor tem que ser removida pela ferramenta. Isto resulta em um aumento de temperatura que pode influenciar no processo de usinagem de dois modos: o aumento do desgaste da ferramenta e a mudança das propriedades do material, podendo alterar as características de usinagem.

Conforme KOBAYASHI (1967), o calor específico por unidade de peso dos plásticos é superior a 0,2 cal / g °C, sendo mais elevado do que para os metais. Porém, devido a densidade dos plástico ser muito mais baixa que a dos metais, o calor especifico por unidade de volume para os plásticos é bem inferior a dos metais. Então, o aumento de temperatura para o plástico será maior quando se aplica uma quantidade calor, se comparado ao mesmo volume de metal. Além disto, a condutividade térmica do plástico é menor que 2,2 x 10^{-3} cal / cm s °C, que é muito pequena se comparado com os aços. Desta forma, praticamente todo o calor produzido pela atrito entre a ferramenta e o plástico deverá ser conduzido pela ferramenta. Realizando um cálculo, verifica-se que a taxa de transferência térmica para a ferramenta de metal é de 99,2 a 99,8% do calor gerado; o remanescente, ou de 0,2 a 0,8%, será conduzido pelo

plástico. Também, como o calor transferido para o plástico não pode alcançar sua massa interior, só a superfície exibirá um aumento significativo de temperatura.

Desta forma, KOBAYASHI (1967) expõe que o processo de usinagem dos plásticos também varia com a temperatura de trabalho. O tipo de cavaco formado pela usinagem pode variar com o aumento de temperatura durante a usinagem, desde que a relação entre a tensão/deformação varie com a temperatura. A fratura torna-se dúctil com a elevação da temperatura e frágil com a diminuição. As temperaturas de amolecimento e degradação dos plásticos são relativamente baixas. Consequentemente, a oxidação ou descoloração nos termorrígidos e o derretimento ou descoloração nos termoplásticos, podem ocorrer devido ao calor gerado na usinagem.

Os fluidos de corte, que são usados para resfriar a área de corte durante a usinagem dos metais, podem degradar os plásticos, sendo assim seu uso deve ser evitado. Se for necessário resfriamento, as alternativas mais adequadas são o ar ou a água.

2.4.2 Propriedades mecânicas

Conforme KOBAYASHI (1967), nos metais, a deformação e fratura ocorrem ao longo de planos cristalinos. Nos plásticos, a fratura pode ocorrer entre áreas amorfas e cristalinas. A baixa dureza dos plásticos resultará em uma deformação elástica ou plástica, devido à fixação e à

força de corte. As forças de fixação também podem causar deformação em virtude da fluência do plástico. A deformação causada pela pressão da ferramenta pode resultar em uma maior área de contato entre a ferramenta e a peça. Isto conduz a um aumento da fricção e, então, a escolha dos ângulos da ferramenta é mais crítica que na usinagem dos metais. O fenômeno de fratura nos plásticos varia com o tipo de plástico e também com as condições de corte, especialmente a velocidade de corte e a temperatura de trabalho. Também existem fenômenos peculiares da usinagem dos plásticos, isto é, os fenômenos devido ao comportamento reológico dos plásticos. A natureza viscoelástica dos plásticos é reconhecida claramente, e são usados modelos para explicar alguns fenômenos que ocorrem durante o processo de usinagem.

CARR e FEGER (1993) descrevem a teoria da viscoelasticidade do polímero pela maneira com que o material responde a um distúrbio. A descrição pode ser dada em função da variação do tempo ou a da temperatura. Para uma determinada temperatura, todo plástico tem um tempo de resposta fixo que é relacionado à soma de seus movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais. Estas características de tempo são definidas como um tempo de recuperação (relaxation time). Se o distúrbio acontece a uma taxa mais alta, a resposta será elástica e os plásticos se comportarão como um sólido. Se a velocidade do distúrbio for menor que o tempo de recuperação, a resposta será deformação plástica. O material fluirá para acomodar a força aplicada de forma semelhante a

um líquido. Em tempos intermediários, o polímero exibe ambos os tipos de comportamento em graus variados. Esta resposta é chamada comportamento de viscoelasticidade. Desta descrição simples, segue aquela velocidade decrescente com que um distúrbio é aplicado dando ao polímero mais tempo para se recuperar, neste caso, o polímero aparenta ser mais suave e mais dúctil, quando usinado, com baixas velocidades.

De acordo com CALLISTER (1990), o comportamento viscoelástico dos materiais plásticos depende do tempo e da temperatura, diversas técnicas podem ser utilizadas para medir e qualificar este comportamento. A tensão de recuperação é uma possibilidade. Através deste teste, uma amostra é deformada por uma tensão predeterminada. Esta tensão é, necessariamente, mantida e a deformação é medida em função do tempo, sendo que, a temperatura é constante. A tensão decresce com o tempo devido ao processo de recuperação molecular. Pode-se definir a módulo de recuperação como sendo:

$$Er\,(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$$

Onde $\sigma(t)$ é o valor medido da deformação pelo tempo e ε_0 é o nível de tensão que foi mantido constante.

Com a variação da temperatura, os plásticos lineares e amorfos exibem três comportamentos distintos em relação ao módulo de recuperação (relaxation modulus - E_r), eles podem estar no estado vítreo, na fase elástica ou no regime de fluxo, conforme apresentado pela Figura 2.12. A transição entre o estado vítreo e os outros estados é denominada

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

temperatura de transição vítrea (T_g). O comportamento na redondeza da temperatura de transição vítrea também é distinto.

Aumentando a temperatura e mantendo o tempo sobre o qual uma carga constante é aplicada, aumentarão os movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais em um polímero, deste modo, diminui o tempo de resposta do material. Em outras palavras, o tempo de recuperação decresce com o aumento da temperatura. Novamente, isto pode ser pensado como uma mudança de dureza, com o polímero que se torna mais brando e mais dúctil com o aumento da temperatura.

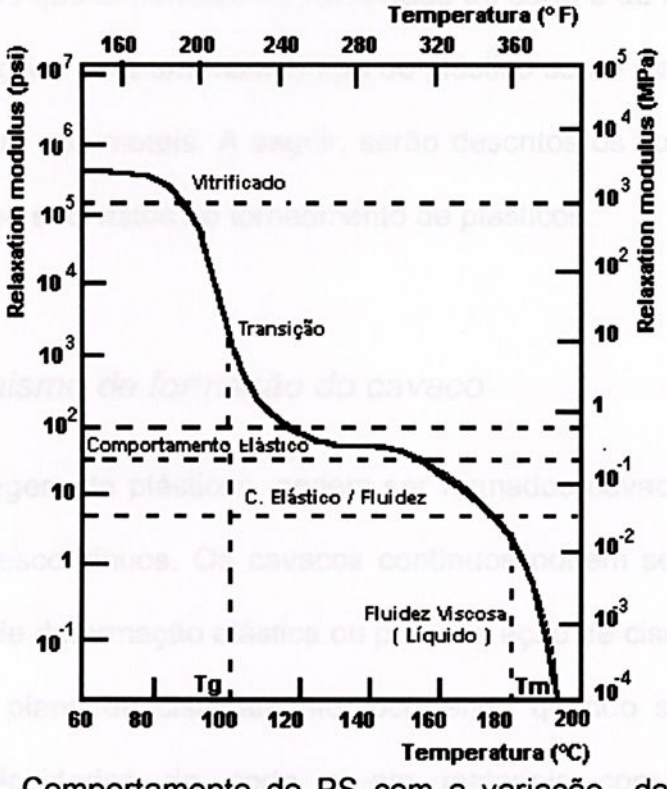


Figura 2.12 – Comportamento do PS com a variação da temperatura (CARR e FEGER, 1993).

KOBAYASHI E HIRAKAWA (1984) argumentam que a rugosidade de superfície obtida de um polímero depende da interação entre a deformação elástica e a plástica que apresentam dependência do tempo de recuperação. É observado o comportamento plástico em baixos avanços da ferramenta, é observado o comportamento elástico a altos avanços.

Os plásticos são caracterizados por terem as propriedades mecânicas influenciadas por pequenas variações da taxa de deformação e da temperatura. Na usinagem, isto resulta em uma grande variação no tipo de cavacos que dependem da velocidade de corte e do avanço. Além disto, as variações para um mesmo tipo de plástico serão maiores do que as que ocorrem nos metais. A seguir, serão descritos os tipos diferentes de cavacos que são vistos no torneamento de plásticos.

2.4.3 Mecanismo de formação do cavaco

Na usinagem de plásticos, podem ser formados cavacos contínuos ou cavacos descontínuos. Os cavacos contínuos podem ser produzidos por uma grande deformação elástica ou por uma ação de cisalhamento ao longo de um plano de cisalhamento, ocorrendo quando se empregam pequenas velocidades de corte e em materiais com um grande alongamento. O plano de cisalhamento estará na direção em que o trabalho mínimo é exigido para formar o cavaco. Este tipo de cavaco é

produzido quando a tensão de cisalhamento, sobre o plano de cisalhamento, é menor que a tensão de ruptura.

KOBAYASHI (1967) realizou um estudo sobre a usinagem de diversos materiais plásticos, apresentando uma classificação para os tipos de cavacos gerados na usinagem dos plásticos. A Figura 2.13 e 2.14, apresentam exemplos do estudo do cavaco segundo Kobayashi. Os cinco tipos de cavaco propostos por Kobayashi são apresentado a seguir:

- *Cavaco Contínuo*

Observado para baixas velocidades de corte e em materiais com alta elasticidade, possuindo grande alongamento antes da fratura, tal como o PTFE ou PE, como apresentado na Figura 2.13-A.

A deformação que ocorre no cavaco é predominantemente elástica e a espessura do cavaco é aproximadamente igual a profundidade de corte. Este tipo de cavaco é diferente do cavaco contínuo formado na usinagem de metais, pois é produzido por alta deformação elástica e não por fratura plástica. Quando este tipo de cavaco é produzido, a força de corte apresenta pequenas oscilações, apresentando bons resultados para a rugosidade superficial e precisão dimensional.

- *Cavaco Contínuo de Cisalhamento*

O plano de cisalhamento é gerado acima da ponta da ferramenta de corte e a formação do cavaco ocorre pela ação do cisalhamento ao longo deste plano. O cavaco é contínuo devido ao pequeno intervalo de cisalhamento. As características deste mecanismo de cisalhamento do

plástico resultam em marcas ao longo da superfície dos cavacos e a espessura do cavaco é, geralmente, maior que profundidade de corte. Este tipo de cavaco pode ser observado freqüentemente na usinagem dos plásticos. O plano de cisalhamento será produzido na direção do mínimo trabalho para formar o cavaco, sendo produzido quando a tensão de cisalhamento sobre o plano de cisalhamento for menor que a tensão limite de ruptura. O cavaco contínuo de cisalhamento é muito semelhante ao cavaco contínuo produzido na usinagem dos metais. Quando este tipo de cavaco é produzido, pode ser considerado, boa a qualidade da superfície usinada. O cavaco contínuo de cisalhamento é apresentado pela Figura 2.13-B.

- *Cavaco Descontínuo de Cisalhamento*

O cavaco é produzido pela ação de cisalhamento ao longo do plano de cisalhamento, porém, o intervalo de cisalhamento é grande, e um cavaco descontínuo é produzido. Este tipo de cavaco ocorre quando a tensão de cisalhamento, ao longo do plano de cisalhamento, é maior que o limite de ruptura. A superfície usinada é excessivamente rugosa e a precisão dimensional normalmente é inadequada. Devem ser evitadas, as condições que originam este tipo de cavaco. O cavaco descontínuo de cisalhamento é apresentado pela Figura 2.13-D.

- *Cavaco Descontínuo de Ruptura*

Este tipo de cavaco pode ser observado na usinagem de materiais frágeis, como os termorrígidos (PR, LCP, ou ER) e alguns termoplásticos,

como o PMMA ou o PS, quando as ferramentas possuem grandes ângulos de saída e envolvem grandes profundidades de corte. Esta condição resulta em cavaco descontínuo e em fissuras na superfície da peça. As fissuras ocorrem em ângulos inclinados obliquamente, e o cavaco descontínuo é produzido por momento fletor, o qual atua sobre o cavaco, após a fissura aumentar por um certo comprimento. Deste modo, este mecanismo de formação de cavaco é do tipo fratura frágil. Grandes fissuras são observadas na superfície usinada, quando este tipo de cavaco é produzido. A rugosidade da superfície usinada é muito alta e a precisão é pequena.



A - Cavaco contínuo
Ângulo de saída 0° Prof. de corte 0,10 mm
Vel. de corte 0,2 m/min Poliestireno



B – Cavaco contínuo de cisalhamento
Ângulo de saída 20° Prof. de corte 0,5 mm
Vel. de corte 0,8 m/min Poliestireno



C - Cavaco descontínuo complexo
Ângulo de saída -30° Prof. de corte 0,25 mm
Vel. de corte 0,2 m/min Poliestireno



D – Cavaco descontínuo de cisalhamento
Ângulo de saída 40° Prof. de corte 0,5 mm
Vel. de corte 0,2 m/min Poliestireno

Figura 2.13 – Estudo do cavaco no torneamento do PS (KOBAYASHI, 1967).

- *Cavaco Descontínuo Complexo*

Nesta condição, ocorre a adesão do cavaco durante o torneamento. Pode ser observado para alguns tipos de plásticos, quando são utilizadas grandes ângulos de saída negativos. Os cavacos são produzidos por tensões combinadas, resultantes de alta tensão de compressão com a tensão de cisalhamento originada pela usinagem. A precisão dimensional do componente usinado é baixa e a rugosidade superficial também é alta

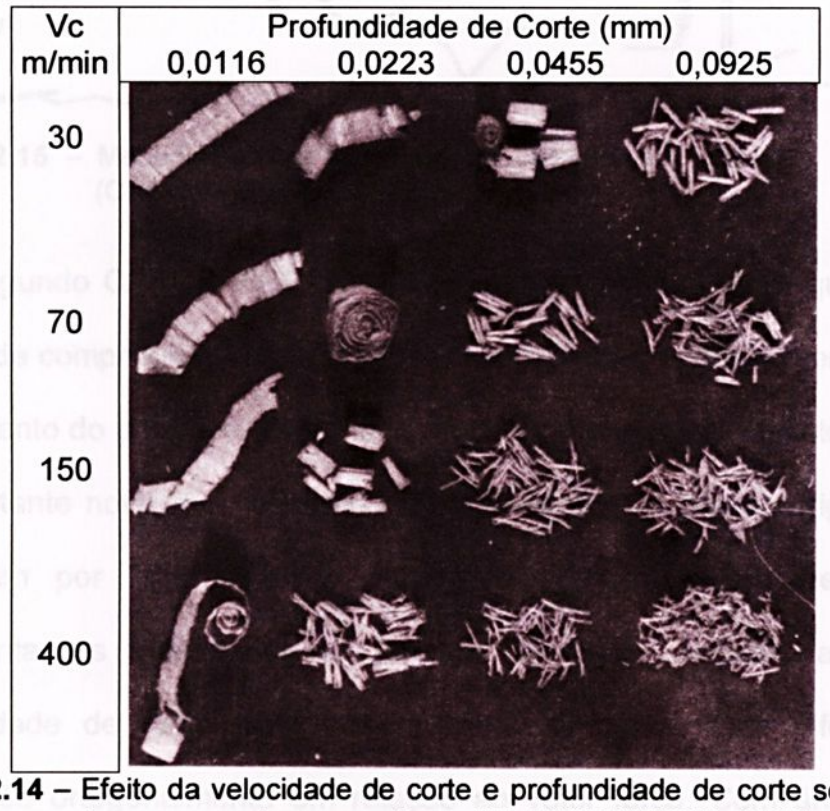


Figura 2.14 – Efeito da velocidade de corte e profundidade de corte sobre tipo de cavaco no torneamento do PR. (KOBAYASHI, 1967).

CARR e FEGER (1993) apresentaram um modelo para explicar o comportamento do material plástico durante a usinagem, em função do

ângulo de saída de uma ferramenta monocortante, conforme a Figura 2.15.

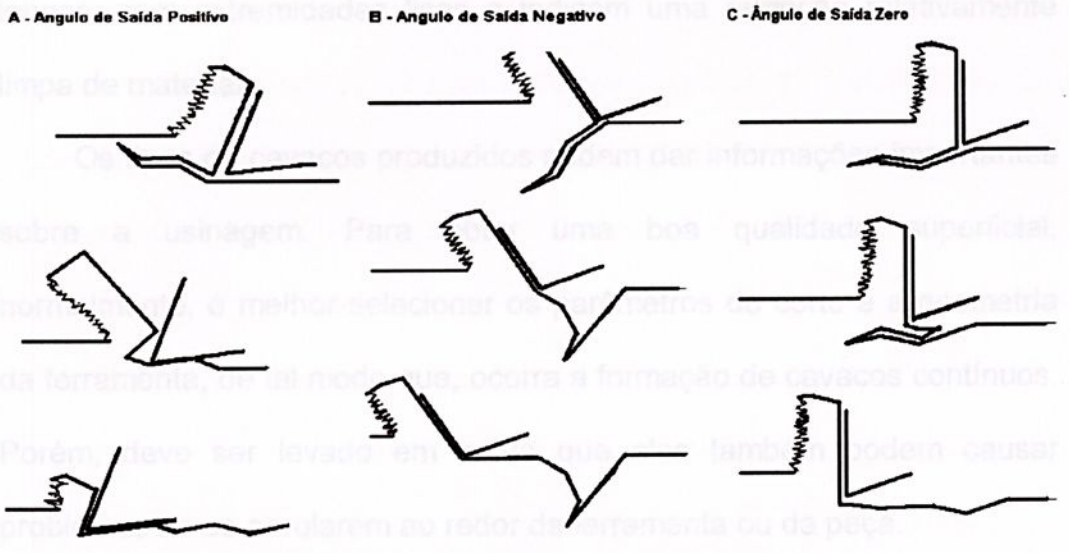


Figura 2.15 – Mecanismos de formação de cavacos em materiais plásticos (CARR e FEGER, 1993).

Segundo CARR e FEGER (1993), em um material frágil, quando a tensão de compressão induzida pela aresta de corte excede a tensão de escoamento do polímero, uma trinca propagará na direção do vetor força. É importante notar que, este modelo assume que as trincas originam e propagam por intermédio do campo de compressão à frente da ferramenta. As trincas que se formam no campo elástico, atrás da extremidade de corte, têm características de propagação diferentes, movem-se ortogonalmente em relação ao vetor força. Com ângulo de saída altamente negativo, a trinca estenderá em direção ao interior do material. A ferramenta mover-se-á além da trinca e arrancará um pedaço grande de material em sua progressão . O cavaco produzido nesta situação é maciço e tende a ser descontínuo e a superfície final consiste,

em grande parte, em erosões produzidas pelo arrancamento do material. Os cavacos produzidos por ângulos de saída próximos de zero são longos, com extremidades lisas e indicam uma remoção relativamente limpa de material.

Os tipos de cavacos produzidos podem dar informações importantes sobre a usinagem. Para obter uma boa qualidade superficial, normalmente, é melhor selecionar os parâmetros de corte e a geometria da ferramenta, de tal modo que, ocorra a formação de cavacos contínuos. Porém, deve ser levado em conta que eles também podem causar problemas ao se enrolarem ao redor da ferramenta ou da peça.

2.5 Trabalhos Desenvolvidos em Usinagem de Plástico

A seguir, são apresentados alguns trabalhos de pesquisas sobre a usinagem de materiais plásticos, considerados relevantes para o embasamento desta pesquisa sobre o acabamento superficial no torneamento do material UHMW.

Wearmouth, W. G.

Em artigo publicado, em 1946, o autor compara a usinagem de materiais plásticos com a usinagem da madeira. Nesta época, a usinagem de plásticos em escala industrial não era uma prática comum, e ainda não existia os denominados plásticos de engenharia. Neste contexto, o autor

fornece valores de referência para os parâmetros de usinagem de plásticos, baseado em seu conhecimento prático.

Foram estudados sete tipos de plásticos em forma de barras e um laminado, sendo eles: Nitrato de Celulose, Acetato de Celulose (CAC), Poliestireno (PS), Polimetil Metacrilato (PMMA), Polietileno (PE), Casein Formaldeido, Fenol Formaldeido Fundido (PR), Fenol Formaldeido Laminado(PR). O artigo apresenta um resumo das grandezas de usinagem recomendadas para cada tipo de plástico, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Grandezas de usinagem recomendadas para vários tipos de polímeros (Wearmouth, 1946).

Material	Ângulo de folga (α)	Ângulo de saída (γ)	Velocidade de Corte m/min	Lubrificante
Plásticos moldados	12°	0°	30,5	A seco
Plásticos fundidos	14°	0°	45/60	Óleo de corte
Fibra	15°	0°	24	A seco
Borracha	20°	0°	45	Refrigerante

Kobayashi, A.

O autor publicou, em 1967, um trabalho sobre a usinagem de plástico que, apesar de não envolverem todos os materiais, em particular os que surgiram após esta época, é utilizado como referência para diversos trabalhos sobre a usinagem de plásticos. Foram avaliadas a influência da velocidade de corte, da profundidade de corte, do avanço e do ângulo de saída sobre a força de corte e sobre o tipo de cavaco. Em alguns casos, o comportamento da rugosidade superficial, também foi analisado.

A natureza viscoelástica dos plásticos é reconhecida claramente, e são usados modelos para explicar a dependência do tempo (velocidade de corte), observadas na usinagem de plásticos. Assim, Kobayashi argumenta que a rugosidade da superfície, obtida para o plástico, depende da interação entre deformação elástica e plástica, sendo influenciada pela velocidade de corte. É observado o comportamento plástico em baixas velocidades de avanço, é observado o comportamento elástico em altas velocidades. Embora esta descrição de comportamento viscoelástico do polímero seja determinada por Kobayashi, ele não explora as conseqüências deste comportamento.

Em sua pesquisa, Kobayashi considerou que os parâmetros de ferramenta foram muito importantes com respeito à qualidade de superfície e, realmente, isto é verdade para a classe de materiais frágeis. Por conseguinte, o ângulo de saída é identificado como o parâmetro mais importante que determina a rugosidade de superfície na usinagem de plásticos. Foi estabelecido um ângulo de saída crítico para cada tipo de plástico. O ângulo de saída crítico foi definido como ângulo de saída ótimo, para a obtenção de alta precisão dimensional na usinagem de materiais plásticos, utilizando ferramentas monocortantes. Isto ocorre devido a direção da força de corte coincidir exatamente com a direção de corte. Nesta circunstâncias, diminui a deformação do material durante a usinagem. O ângulo de saída crítico depende do material, da velocidade

unesp

de corte e da profundidade de corte. As Tabelas 2.4 e 2.5, apresentam os ângulos de saída crítico para o torneamento do polietileno (PE) e do PVC.

Tabela 2.4 - Ângulo de saída crítico para o PE (KOBAYASHI, 1967)

	Ângulo de saída crítico por profundidade de corte		
Velocidade de corte Vc (m/min)	0,05 mm	0,10 mm	0,15 mm
0,8	41°	30°	24°
50	35°	25°	20°
100	26°	16°	13°
200	18°	9°	8°
400	10°	4°	3°

Tabela 2.5 - Ângulo de Saída crítico para o PVC. (KOBAYASHI, 1967)

		Ângulo crítico por velocidade de corte			
Profundidade de corte (m/min)	**Resinas**	50 m/min	100 m/min	200 m/min	400 m/min
0,05	**PA 6**	31°	28°	24°	21°
	PA 66	30°	27°	22°	-
	PA 610	29°	27°	23°	20°
0,10	**PA 6**	25°	22°	17°	15°
	PA 66	25°	21°	15°	-
	PA 610	25°	22°	18°	15°

O comportamento da rugosidade Rmax em conseqüência do aumento da velocidade de corte no torneamento, utilizando ferramentas de diamante e de metal duro, foi estudado para o PVC, PMMA e PA. Para o PA, foi verificada também, a influência da velocidade de avanço e do ângulo de saída. As Figuras 2.16 e 2.17 apresentam os resultados para a rugosidade, segundo Kobayashi, respectivamente, para o PA e PMMA.

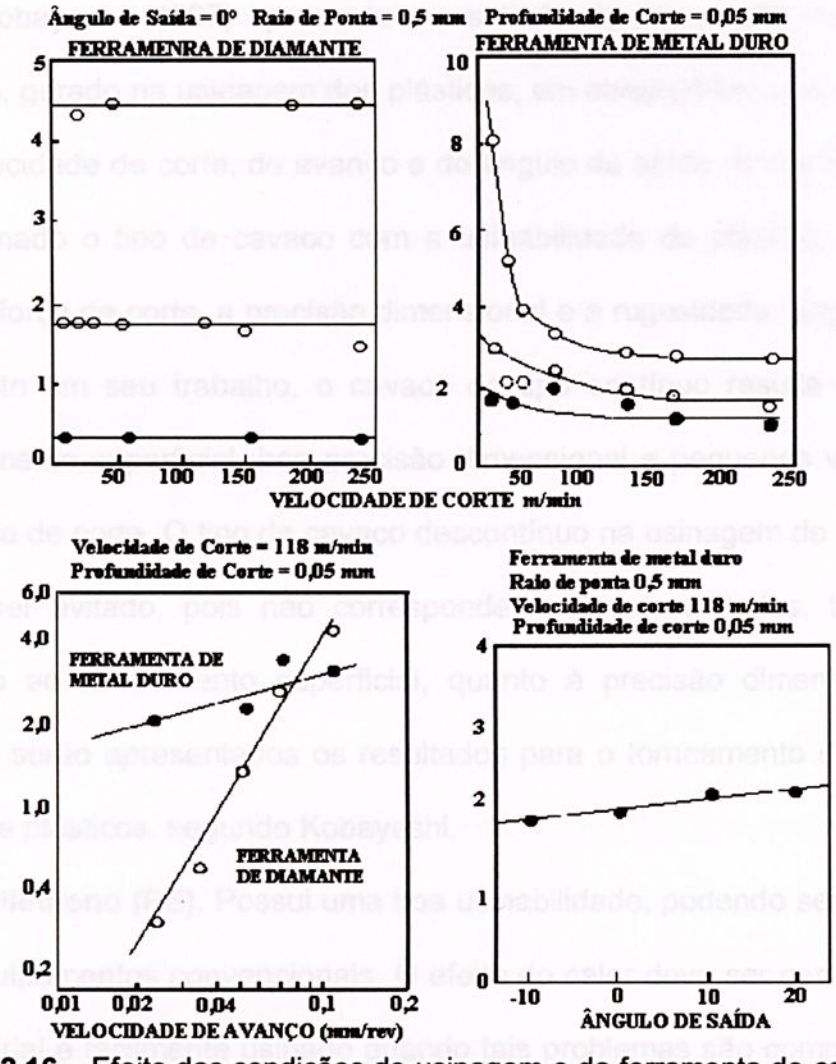


Figura 2.16 – Efeito das condições de usinagem e da ferramenta de corte sobre a rugosidade do PA (KOBAYASHI, 1967).

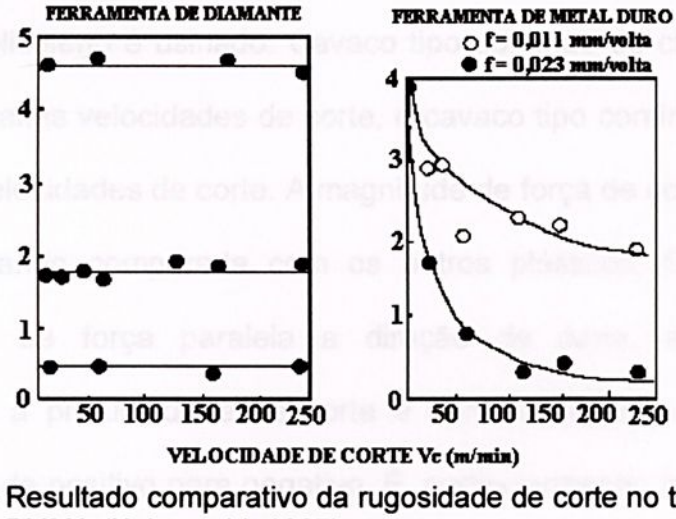


Figura 2.17 – Resultado comparativo da rugosidade de corte no torneamento do PMMA (Kobayashi, 1967)

Kobayashi (1967) apresenta o resultado de um estudo do tipo do cavaco, gerado na usinagem dos plásticos, em conseqüência da variação da velocidade de corte, do avanço e do ângulo de saída. Desta forma, foi relacionado o tipo de cavaco com a usinabilidade do plástico, ou seja, com a força de corte, a precisão dimensional e a rugosidade. Segundo foi proposto em seu trabalho, o cavaco do tipo contínuo resulta em bom acabamento superficial, boa precisão dimensional e pequenas variações de força de corte. O tipo de cavaco descontínuo na usinagem de plásticos deve ser evitado, pois não corresponde a bons resultados, tanto em relação ao acabamento superficial, quanto à precisão dimensional. A seguir, serão apresentados os resultados para o torneamento de alguns tipos de plásticos, segundo Kobayashi.

- **Polietileno (PE).** Possui uma boa usinabilidade, podendo ser usinado em equipamentos convencionais. O efeito do calor deve ser considerado, o material é facilmente usinado quando tais problemas são compensados na operação de usinagem. Cavaco tipo contínuo, é sempre formado quando o polietileno é usinado. Cavaco tipo contínuo de cisalhamento é formado em altas velocidades de corte, e cavaco tipo contínuo é formado em baixas velocidades de corte. A magnitude de força de corte é bastante pequena quando comparada com os outros plásticos. Geralmente, a componente de força paralela a direção de corte, é diretamente proporcional à profundidade de corte e aumenta quando o ângulo de saída passa de positivo para negativo. É, particularmente, importante que

o ângulo de saída crítico seja utilizado na usinagem do polietileno, devido à alta elasticidade do material.

Policloreto de vinila (PVC): A usinagem é relativamente fácil, exceto quando são utilizados grandes valores de profundidade de corte, de velocidade de corte e do ângulo de saída. O cavaco tipo contínuo é formado em várias condições de usinagem. Três tipos de cavaco são produzidos na usinagem do PVC: contínuo de cisalhamento, descontínuo de cisalhamento, e descontínuo de ruptura. A rugosidade da superfície usinada do PVC, apresenta valores relativamente baixos, o que significa que pode ser obtido facilmente quando as condições de corte são corretamente selecionadas.

Polimetacrilato de metila (PMMA): Embora o PMMA (ou acrílico) possa ser considerado de fácil usinagem, condições impróprias de usinagem podem causar muitos problemas. Em algumas circunstâncias, o cavaco contínuo é formado pela ação suave de cisalhamento. As condições de usinagem que resultam em cavacos contínuos podem ser utilizadas para obter excelentes resultados. Em geral, o cavaco contínuo é produzido por pequenas velocidades de corte e profundidades de corte, além de elevadas temperaturas de trabalho.

Poliestireno (PS): A usinagem é relativamente difícil, quando comparado com o polimetil metacrilato ou outros termoplásticos, porém, a usinagem pode alcançar resultados satisfatórios quando os parâmetros forem corretamente selecionadas. O cavaco produzido na usinagem do

poliestireno é similar àquele obtido na usinagem do polimetil metacrilato. O cavaco enrola-se fortemente quando a profundidade de corte decresce, e torna-se aderente, quando o ângulo de saída torna-se negativo. Na usinagem do poliestireno, é muito importante selecionar parâmetros de corte que resultem na formação de cavaco contínuo de cisalhamento. As condições ótimas de usinagem do poliestireno consistem em utilizar velocidade de corte inferiores a 1 m/min, ângulo de saída na faixa de -10° a 30° e profundidade de corte inferior a 0,3 mm. Cavacos do tipo descontínuo de ruptura podem ser formados em altas velocidades de corte. Deste modo, as profundidades de corte e velocidades de corte utilizadas devem ser tão pequenas quanto possível na usinagem do poliestireno. Outros problemas que ocorrem na usinagem do poliestireno são: empastamento, a erosão e o lascamento. Devido ao empastamento ser causado pelo calor gerado, deve ser utilizado fluido refrigerante.

Poliamida (PA): Três tipos de poliamidas: 6, 6.6 e 610, são testadas através do corte ortogonal. Quatro tipos de cavacos são observados na usinagem da poliamida, quando o ângulo de saída varia de -20 a 40°, a velocidade de corte variou entre 0,4 a 400 m/min e a profundidade de corte varia entre 0,013 e 0,105 mm. Os tipos de cavacos foram: contínuo de cisalhamento, descontínuo de cisalhamento, descontínuo complexo e descontínuo de ruptura. A poliamida é facilmente usinada com sucesso, devido a grande faixa de condições de corte que produzem o cavaco contínuo. Porém, o cavaco descontínuo, pode ser produzido quando se

utiliza valores excessivos para o ângulos de saída, profundidade de corte e velocidade de corte.

Kobayashi, A. e Hirakawa, K.

Em trabalho publicado em 1984, os autores descrevem um estudo do torneamento de plásticos utilizando ferramentas de diamante. Foi estudada a relação da forma da ferramenta com a qualidade da superfície para quatro tipos de plásticos considerados de fácil usinagem, sendo eles: o Polimetil Metacrilato (PMMA), Policarbonato (PC), Polipropileno (PP) e o Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e três tipos de plásticos de difícil usinagem, sendo eles: Polietileno de Baixa Densidade (LDPE), Politetrafluoretileno (PTFE) e a Resina Epoxídica (ER).

Os valores de rugosidade superficial ($R_{máx}$) foram medidos para diferentes avanços e três tipos de plásticos. A relação $R_{máx}/R_{th}$ é mostrada na Figura 2.18. A relação $R_{máx}/R_{th}$ torna-se grande quando a velocidade de avanço torna-se menor que 100 μm para o Policarbonato e para o Polietileno de Alta Densidade. Porém, a relação $R_{máx}/R_{th}$ tem valores próximos de 1 para o PMMA.

A Figura 2.19, apresenta o perfil da superfície torneada do PMMA, PC e HDPE. Os materiais foram usinados com os mesmos parâmetros de corte. Observa-se que a rugosidade é maior para o PC e o HDPE.

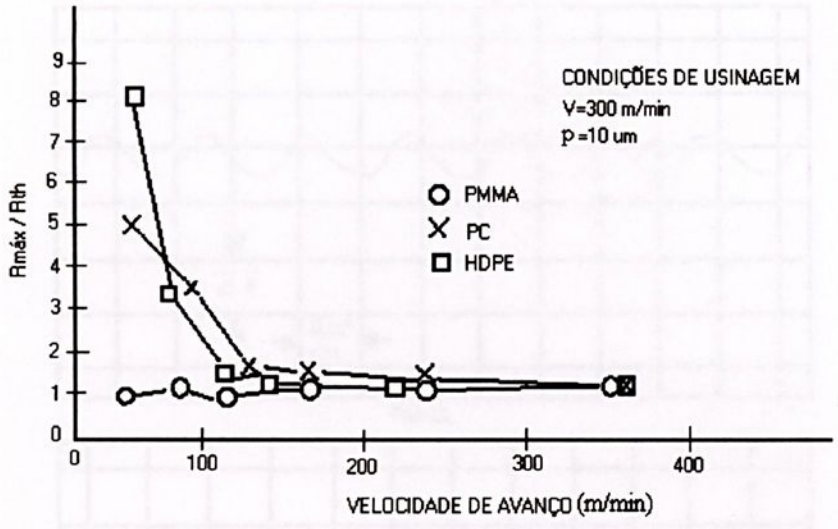


Figura 2.18 – Velocidade de avanço em função da relação $R_{máx}/R_{th}$ (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

A Figura 2.20 apresenta a imagem da superfície torneada do PC, PMMA e HDPE para três diferente avanços. Nestas fotos, é evidente a diferença entre as superfícies usinadas para os três tipos de plásticos. Este fenômeno pode ser explicado pela diferença entre as propriedades dos plásticos, afetando os mecanismos de corte. Quando o avanço é menor que 100 μm/volta, as marcas de avanço diminuem para o HDPE e PC. Riscos peculiares ocorrem na usinagem do PC. Na usinagem do PMMA, ocorrem riscos finos perpendicularmente a direção de avanço, quando o avanço é alto. Porém, os riscos diminuem, quando o avanço é menor que 100 μm/volta.

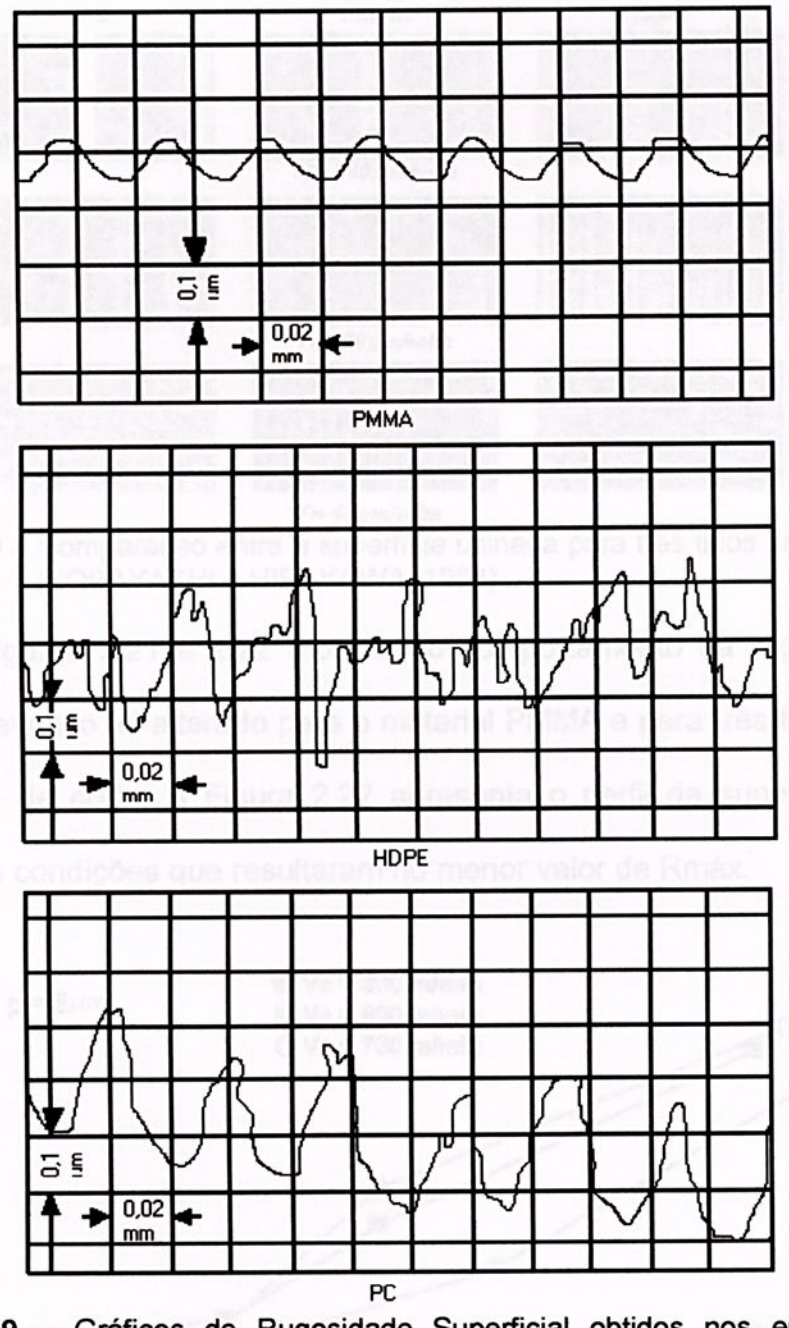


Figura 2.19 – Gráficos de Rugosidade Superficial obtidos nos ensaio de Usinagem (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

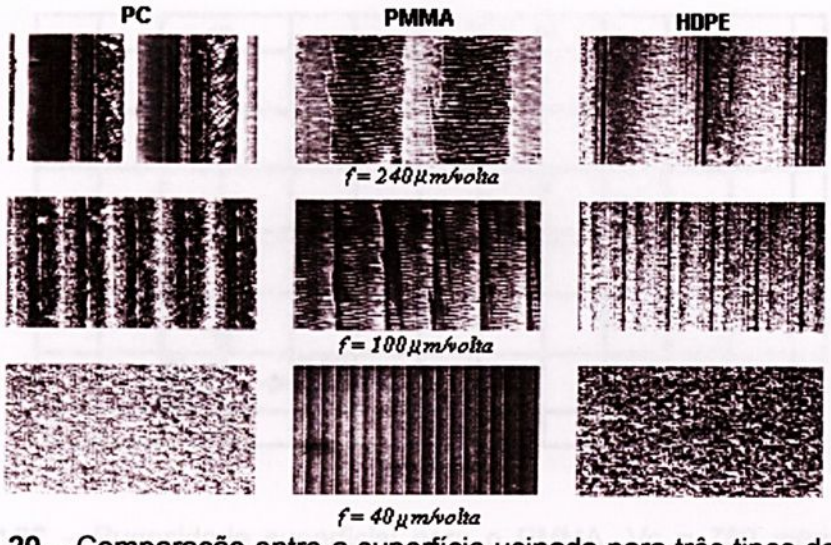


Figura 2.20 – Comparação entre a superfície usinada para três tipos de plástico (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

As Figuras 2.21 e 2.22 mostram o comportamento da rugosidade quando o avanço foi alterado para o material PMMA e para três faixas de velocidade de corte. A Figura 2.22 apresenta o perfil da superfície do PMMA nas condições que resultaram no menor valor de Rmáx.

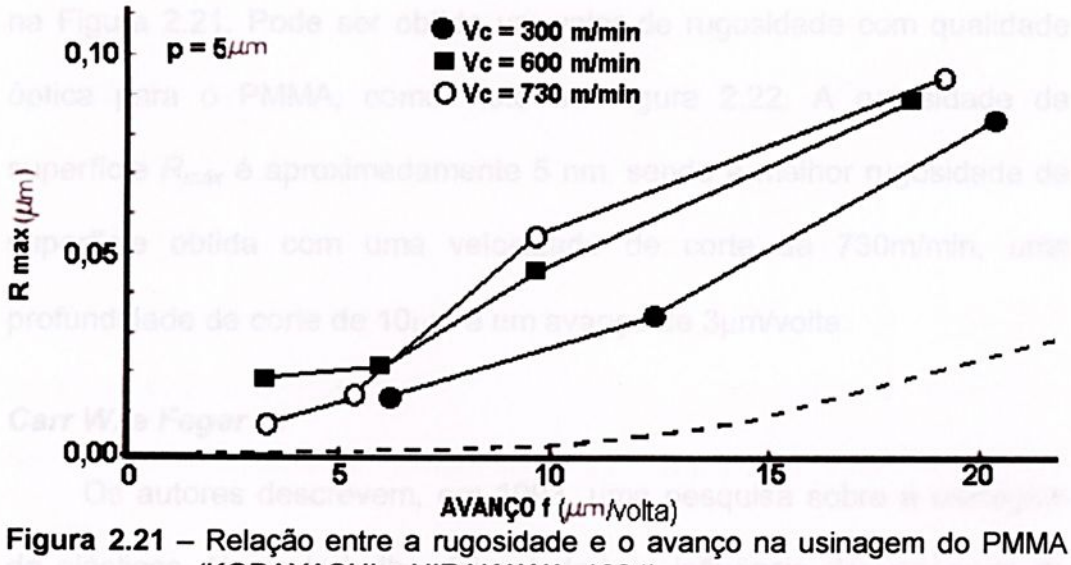


Figura 2.21 – Relação entre a rugosidade e o avanço na usinagem do PMMA (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

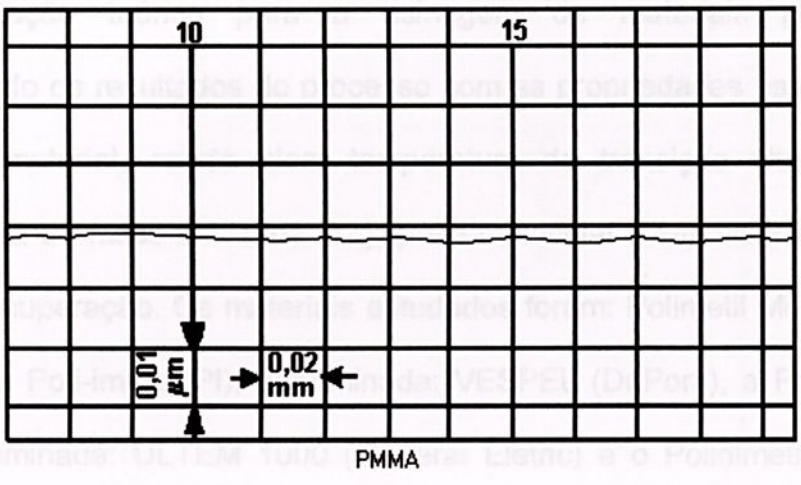


Figura 2.22 – Rugosidade superficial para o PMMA. Vc = 750 m/min, f = 3 µm/volta e p = 10 µm (KOBAYASHI e HIRAKAWA, 1984).

Neste trabalho, concluiu-se que, entre os sete tipos de plásticos usinados, as superfícies apresentaram diferenças graças às características específicas de cada material. Na usinagem do PMMA, a rugosidade superficial diminui à medida que o avanço diminui, como visto na Figura 2.21. Pode ser obtido um valor de rugosidade com qualidade óptica para o PMMA, como visto na Figura 2.22. A rugosidade da superfície $R_{máx}$ é aproximadamente 5 nm, sendo a melhor rugosidade de superfície obtida com uma velocidade de corte de 730m/min, uma profundidade de corte de 10µm e um avanço de 3µm/volta.

Carr W. e Feger C.

Os autores descrevem, em 1993, uma pesquisa sobre a usinagem de plásticos. Neste trabalho, foi estudada a influência da geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem na rugosidade de superfície e na estrutura dos materiais. Os autores procuram estabelecer uma

fundamentação teórica para a usinagem de materiais plásticos, relacionando os resultados do processo com as propriedades específicas de cada material, sendo elas: temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão cristalina (T_m), peso molecular (M_W), viscosidade e taxa de recuperação. Os materiais estudados foram: Polimetil Metacrilato (PMMA), a Poli-imida (PI), denominada: VESPEL (DuPont), a Poli-imida (PI), denominada: ULTEM 1000 (General Eletric) e o Polidimetil Silano (PDMS).

Na usinagem do material PMMA, conforme apresentado pela Figura 2.23, uma superfície de alta qualidade pode ser produzida sobre uma ampla extensão de parâmetros operacionais e configurações de diamante. Nos ensaio realizados, uma superfície aceitável pôde ser produzida em quase qualquer velocidade de corte e avanço. Não houve nenhuma evidência de fissuras ou "pitting" inerente a uma superfície usinada de um material frágil. Como resultado, o PMMA pode ser considerado um polímero dúctil sob as condições de usinagem com diamante. O bom desempenho do PMMA é aparente quando o material é usinado com uma ferramenta que possui 38° no ângulo de saída. Até mesmo debaixo destas condições extremas, o polímero não apresenta nenhum sinal de fratura. A rugosidade de superfície foi medida em 33,6 nm (Ra) .

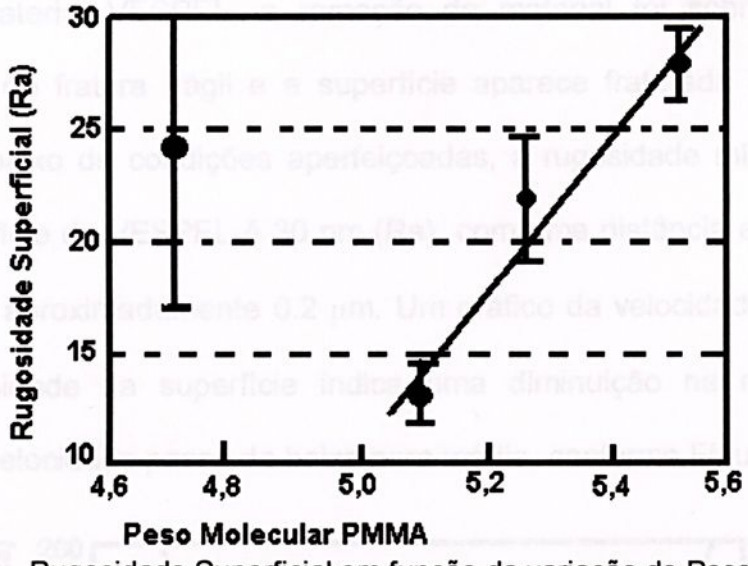


Figura 2.23 – Rugosidade Superficial em função da variação do Peso Molecular para o material PMMA (CARR e FEGER, 1993).

O material "ULTEM 1000" foi usinado em três velocidades de corte diferentes: 11,5 m/s, 23 m/s e 34,5 m/s. Com 11,5 m/s, a superfície ficou bastante áspera, com uma rugosidade média de 75,0 nm. No microscópio aparece claramente a superfície fraturada, aparentando possuir uma fratura frágil típica do mecanismo de remoção de material. Quando a velocidade de corte foi de 34,5 m/s, a superfície final foi significativamente mais lisa, com rugosidade média de 45,9 nm. Os dados de rugosidade indicam que as duas superfícies são significativamente diferentes. Na análise em microscópio, a superfície usinada em alta velocidade demonstrou ser menos fraturada. Embora não apresente uma superfície completamente dúctil, exibe menos sinais de fratura do que a superfície usinada com 600 rpm. O mecanismo para remoção de material em ULTEM 1000 passa de um comportamento frágil a 34,5 m/s para um predominantemente dúctil a 45,9 m/s.

No material VESPEL, a remoção de material foi sobretudo por intermédio de fratura frágil e a superfície aparece fraturada no exame óptico. Debaixo de condições aperfeiçoadas, a rugosidade mínima para uma superfície de VESPEL é 30 nm (Ra), com uma distância entre picos e vales de aproximadamente 0.2 μm. Um gráfico da velocidade de corte pela rugosidade da superfície indica uma diminuição na rugosidade quando a velocidade passa de baixa para média, conforme Figura 2.24.

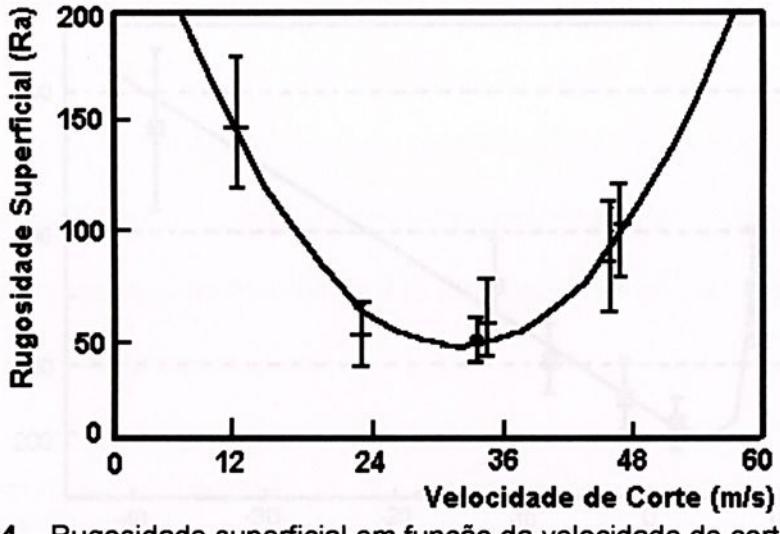


Figura 2.24 – Rugosidade superficial em função da velocidade de corte para o VESPEL (CARR e FEGER, 1993).

Nesta região, atribui-se a diminuição na rugosidade como sendo uma transição parcial no regime dúctil. O VESPEL responde ao aumento de calor gerado com um aumento da ductilidade de polímero, até alcançar o fundo da curva. Com um aumento adicional na velocidade de corte, a rugosidade de superfície não continua diminuindo. Após aproximadamente 30 m/s, a rugosidade da superfície tende a aumentar. Fica claro que o número de fraturas e a rugosidade de superfície aumenta

com o aumento da velocidade, acima de um valor limite. Para estudar o efeito da rugosidade de superfície, vários pratos de VESPEL foram usinados. O ângulo de saída do diamante foi variado entre -38° e 10 °. A rugosidade de superfície exibiu uma diminuição gradual de 74,5 nm (Ra) em -38 ° até um valor mínimo de 30,4 nm (Ra) em +2°, conforme Figura 2.25. Quando o ângulo de saída fica mais positivo, a superfície final fica mais áspera atingindo 50,7 nm (Ra) em +8°.

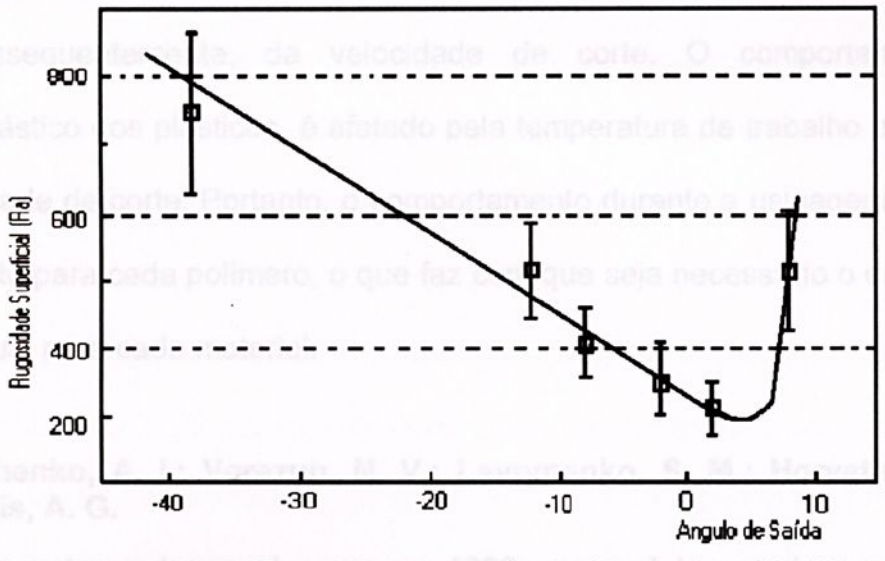


Figura 2.25 – Rugosidade Superficial em função do ângulo de saída (CARR e FEGER, 1993).

O estudo da usinagem dos materiais poliméricos, com ferramenta de diamante monocortante, mostrou que as propriedades dos materiais e a viscoelasticidade do polímero representam um papel decisivo para a rugosidade de superfície final. Sendo que as propriedades viscoelásticas dependem do tempo e da temperatura. Variando os parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, pode-se mudar o mecanismo de

corte por fratura frágil com superfícies irregulares e ásperas para remoção dúctil com superfícies lisas.

Os resultados deste trabalho são de grande importância para o desenvolvimento de outras pesquisas sobre a usinagem de plásticos. Com certeza, os parâmetros utilizados para a usinagem destes plásticos não poderão ser utilizados diretamente na usinagem de outros materiais, mas a importância deste trabalho deve-se ao fato de ter demonstrado que a usinagem do polímero depende muito da temperatura na zona de corte, e, consequentemente, da velocidade de corte. O comportamento viscoelástico dos plásticos é afetado pela temperatura de trabalho e pela velocidade de corte. Portanto, o comportamento durante a usinagem será diferente para cada polímero, o que faz com que seja necessário o estudo individual para cada material.

Grabchenko, A. I.; Verezub, N. V.; Lavrynenko, S. M.; Horvath, M.; Mamalis, A. G.

Os autores desenvolveram, em 1998, um modelo complexo para a usinagem de precisão de materiais plásticos ópticos, baseado nos fenômenos de corte, na descrição física do processo de usinagem e a qualidade dos componentes ópticos poliméricos.

No processo, quando a cunha de corte da ferramenta penetra a peça polimérica, o resultado é a destruição dirigida do material na forma de uma camada removida. A quebra dos laços químicos nos polímeros, como conseqüência da destruição, conduz a formação de radicais livres

com a subseqüente combinação deles, dando origem a micro fissuras, seu desenvolvimento e a confluência em grandes fissuras em uma nova superfície. A destruição de materiais plásticos conduz ao aparecimento de luminescência que é caracterizado pela emissão de fótons com parâmetros que correspondem à condição dos pontos centrais luminescentes do material. O método de luminescência mecânica (fóto-emissão) é um novo método comparativo de investigação do processo de destruição do material polímero. A emissão de fótons luminescentes mecânicos é diretamente relacionada com a mudança da estrutura elementar. A emissão com um comprimento de onda no campo visível do espectro é vista quando se deforma um polímero, sendo conseqüência de um defeito na estrutura inicial no material, então, tal emissão é considerada como um índice de destruição material. Portanto, o registro da intensidade e o caráter luminescente podem ser usados como métodos para a investigação experimental de micro processos durante a usinagem de precisão de peças em plástico.

A Figura 2.26 apresenta um diagrama do equipamento utilizado para o ensaio, sendo que a ferramenta de corte (1) é fixa em um fuso (2). No momento do registro do sinal, uma camada de material (3) está sendo usinada com uma determinada seção transversal de corte, sendo que, um dispositivo micrométrico permite obter os parâmetros essenciais de corte com uma precisão de 0,01 mm (4). A sincronização do início do processo de corte e o registro do sinal é provida por uma unidade de contato. O

unesp

fluxo de fótons emitido durante a destruição na zona de corte é registrado por meio de um amplificador fotoelétrico (5), a força de corte foi medida por um dinamômetro piezoelétrico (6), sobre o qual as amostras a serem usinadas foram apoiadas por meio de um suporte. São recebidos os sinais do amplificador fotoelétrico e do dinamômetro piezoelétrico em registros eletrônicos de impulsos únicos e são processados em um computador (7). O registro do torneamento é implementado de acordo com impulsos externos no momento da aproximação da ferramenta de corte pelo material de amostra. O intervalo de tempo entre os sinais está dentro dos limites de $0{,}25 \times 10^{-6}$ a $1{,}0 \times 10^{-5}$ (s).

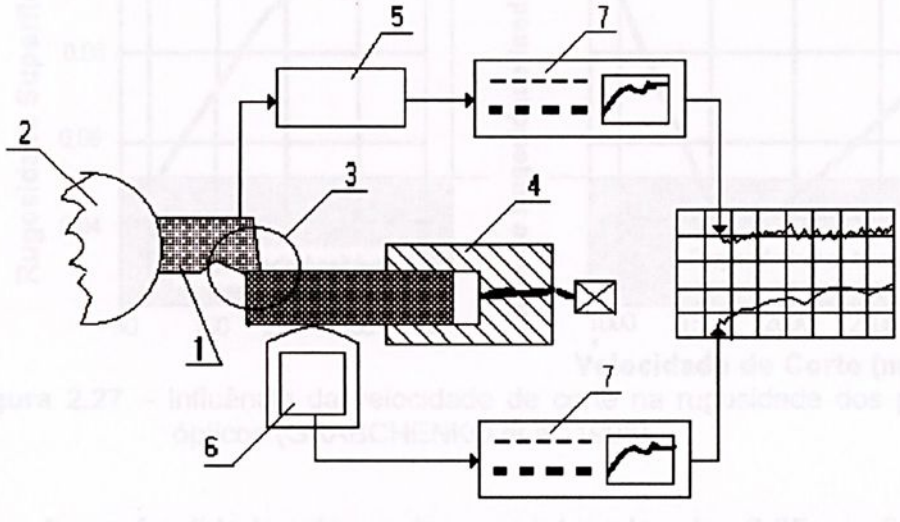


Figura 2.26 – Representação esquemática do equipamento utilizado na pesquisa (GRABCHENKO et al, 1998).

O critério de rugosidade de superfície ($K_{rz} = R_z < \lambda \times 10^3$) foi estabelecido para os componentes ópticos. Isto amarra a correlação numérica às medidas de rugosidade e a duração da onda óptica (λ nm)

que atravessam o detetor de feixe de luz. O valor do parâmetro de rugosidade de superfície deve ser provido no estágio de usinagem.

A mínima rugosidade de superfície na usinagem de componentes ópticos foi obtida no caso de velocidade de corte baixa (até 1 m/s) ou muito alta (25-34 m/s), conforme Figura 2.27.

A curva Ra = f(Vc) para a ferramenta de diamante natural tem o comprimento máximo para o intervalo ótimo, independente da mudança de outros parâmetros do processo de corte. As ferramentas de diamantes naturais permitem usinagem sem fluido de corte.

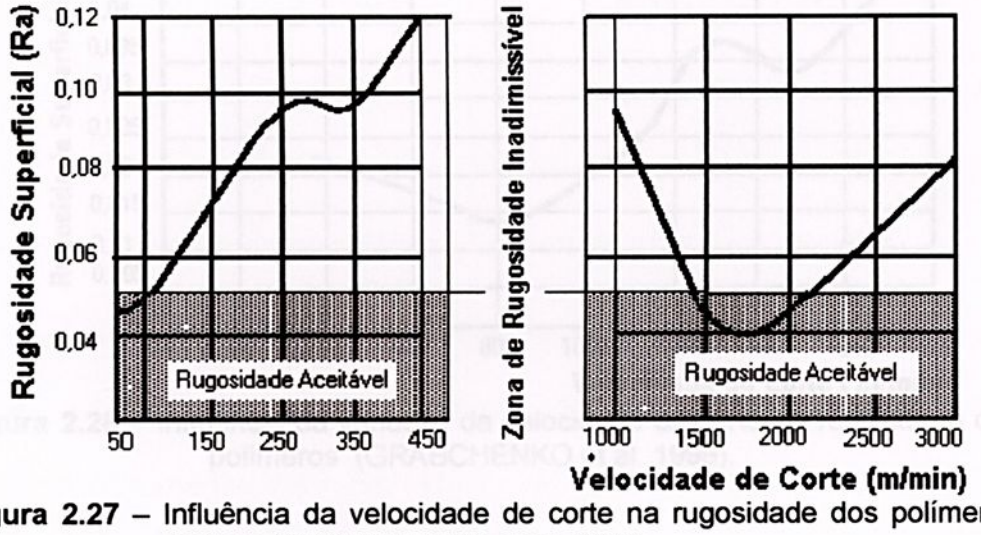


Figura 2.27 – Influência da velocidade de corte na rugosidade dos polímeros ópticos (GRABCHENKO et al, 1998).

A profundidade de corte no intervalo de 0,05 a 0,20 mm praticamente não teve uma influência na qualidade da superfície usinada. Uma profundidade pequena de corte e a baixa resistência do material na usinagem definem um baixo nível de força de corte e a estabilidade do sistema dinâmico. Os valores ótimos de avanço são de 0,005 a 0,007 mm/volta. No caso de usinagem de precisão, os resultados devem ser

estudados em conexão rígida com o equipamento, os dispositivos e as ferramentas aplicadas, já que a precisão e parâmetros geométricos de todos os componentes do sistema de afetam a qualidade de usinagem.

Investigações foram realizadas para o fresamento de polímeros ópticos do mesmo grupo material com o mesmo alcance de velocidade de corte alto, mas com o avanço de 0,8 μm/volta e o raio de ponta da ferramenta de corte de diamante natural com 3,5 mm. Conforme a Figura 2,28, a curva Ra = f(Vc) neste caso assume outra forma.

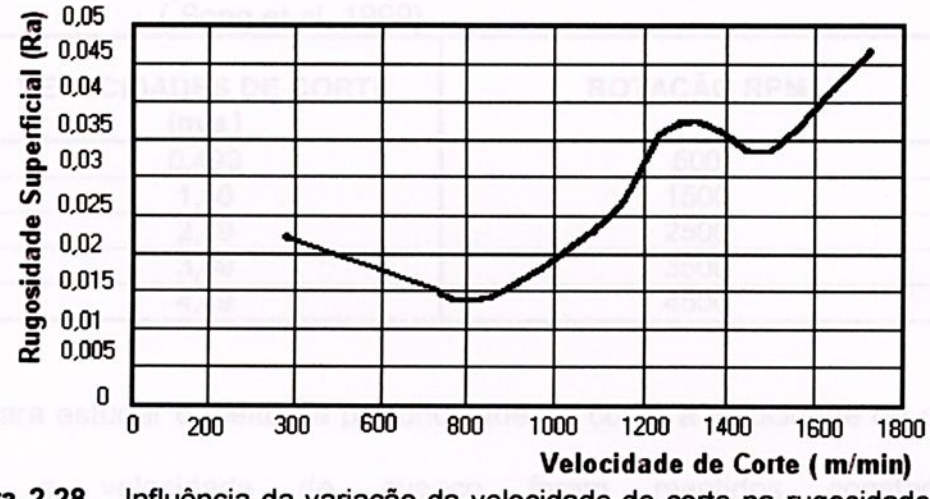


Figura 2.28 – Influência da variação da velocidade de corte na rugosidade dos polímeros (GRABCHENKO et al. 1998).

Song, J. L.; Crements P. M. and Bonutti, P.

Os autores publicaram, em 1999, um estudo sobre o efeito da usinagem nas propriedades tribológicas do UHMW em termos de coeficiente de fricção e taxa de desgaste, para tanto, foi verificada a influência da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na estrutura polimérica e na textura da superfície usinada. Testes de

desgaste foram realizados em um tribômetro do tipo pino-contra-disco, na configuração de discos de UHMW usinados e pinos metálicos.

Foram realizados três tipos de ensaios distintos, com objetivos e parâmetros diferentes. Os ensaios realizados foram:

a) Para estudar o efeito de velocidade de corte, a velocidade de avanço da ferramenta foi mantida em 8,47 mm/s e a profundidade de corte em 0,203 mm. A velocidade de corte variou conforme a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Variação da velocidade de corte em função da rotação. (Song et al, 1999).

VELOCIDADES DE CORTE (m/s)	ROTAÇÃO RPM
0,499	500
1,50	1500
2,49	2500
3,49	3500
4,49	4500

b) Para estudar o efeito da profundidade de corte, a velocidade de corte e a velocidade de avanço foram mantidos constantes, respectivamente: 4,49 m/s (4500 rpm) e 8,47 mm/s. As profundidades de corte foram 0.0508, 0,127, 0,203, 0,508 e 1,02 mm.

c) Para avaliar a rugosidade da superfície em virtude da usinagem, foi realizado um ensaio com relação constante entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço, ao passo que a profundidade de corte foi mantida em 0,203 mm. A relação foi 0,499 m/s (500 rpm) / 1,058 mm/s. A rugosidade superficial dos pinos de metal e dos pratos de UHMW foi medida antes e depois do ensaio de desgaste. Estas

medidas foram realizadas utilizando um sistema Surfcom 120A, com capacidade para avaliar a topografia da superfície por meio de um software de monitoramento de perfil. O desgaste da superfície foi observado usando um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura (VP - SEM).

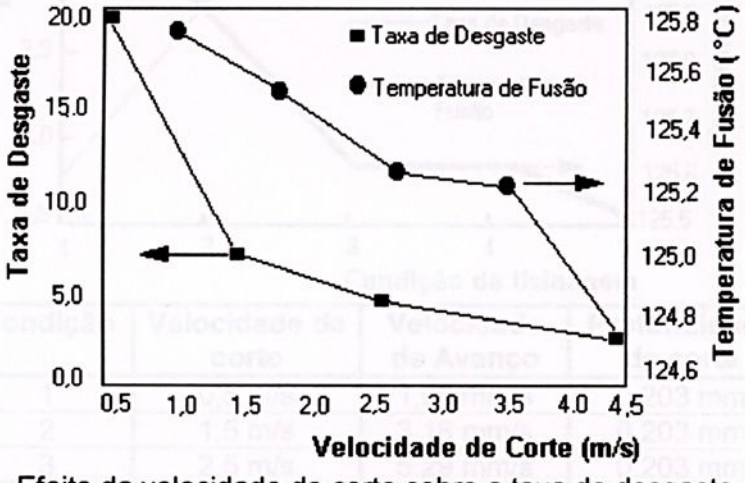
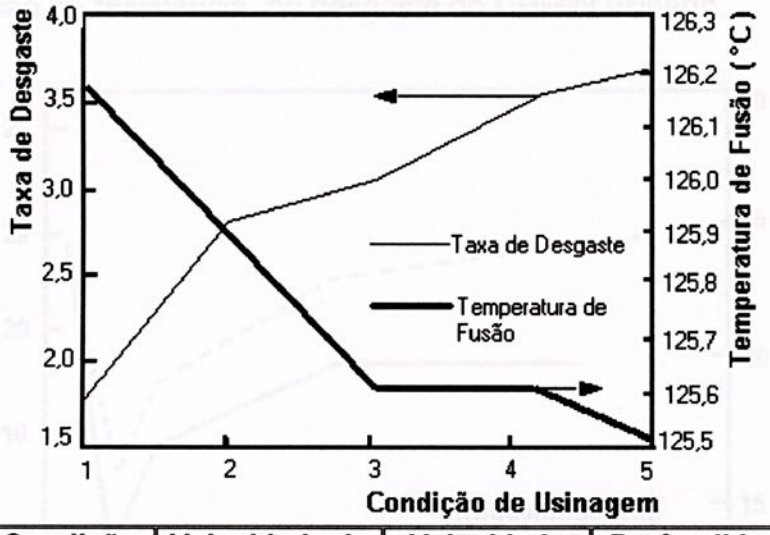


Figura 2.29 – Efeito da velocidade de corte sobre a taxa de desgaste do UHMW (SONG et al, 1999).

A Figura 2.29 apresenta a variação da taxa de desgaste no UHMW usinado em função da velocidade de corte. Pode ser visto que a taxa de desgaste diminuiu quando a velocidade de corte aumentou fixando o avanço da ferramenta e a profundidade de corte em 8,47 mm/s e 0,203 mm, respectivamente. Em outras palavras, quando a velocidade de corte aumentou, a resistência ao desgaste do UHMW usinado melhorou. É apresentada também, na Figura 2,29, a variação da temperatura de fusão em função da velocidade de corte. Quando a velocidade de corte aumentou, a temperatura de fusão diminuiu significativamente. A

diminuição da temperatura de fusão do polímero é relacionada aos danos na sub-superfície ou diminuição na cristalinidade.



Condição	Velocidade de corte	Velocidade de Avanço	Profundidade de corte
1	0,5 m/s	1,06 mm/s	0,203 mm
2	1,5 m/s	3,18 mm/s	0,203 mm
3	2,5 m/s	5,29 mm/s	0,203 mm
4	3,5 m/s	7,41 mm/s	0,203 mm
5	4,5 m/s	9,53 mm/s	0,203 mm

Figura 2.30 – Variação do desgaste da superfície no UHMW, em função da variação das condições de usinagem (SONG et al, 1999).

A Figura 2.30 apresenta as variações da taxa de desgaste e o início da temperatura de fusão do UHMW usinado, quando a relação entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço foi mantida constante. A taxa de desgaste aumentou com o aumento da velocidade de corte ao passo que a temperatura de fusão diminuiu quando a velocidade de corte diminui. Era esperado que a textura de superfície não se alterasse quando a relação da velocidade de corte e do avanço permanecesse constante. Porém, ocorreu maior degradação mecânica quando a velocidade de corte aumentou. Assim, a mudança na taxa de desgaste foi

atribuída à mudança estrutural em virtude da usinagem. Em resumo, a velocidade de corte alta causa maior degradação mecânica que conduz a uma redução na resistência ao desgaste do UHMW usinado.

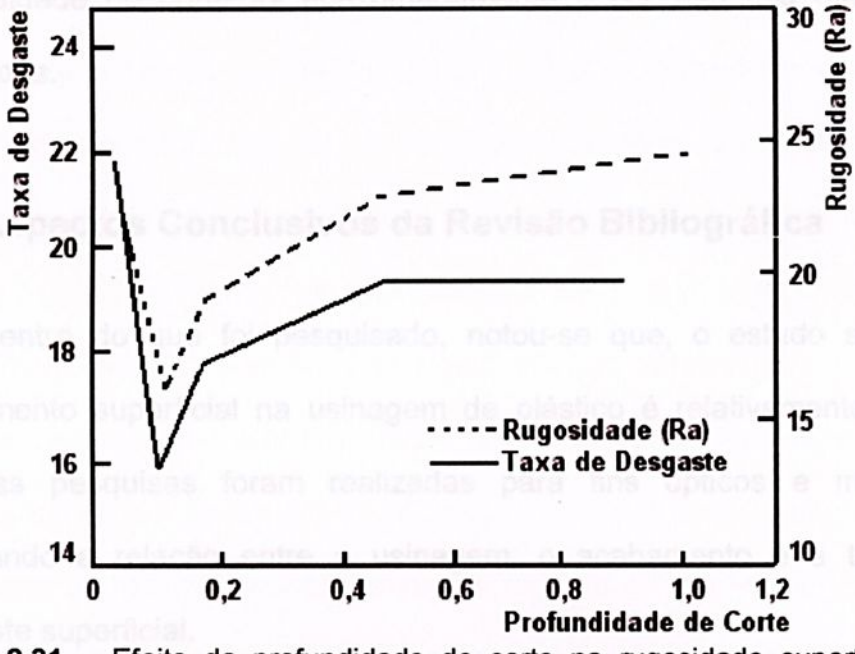


Figura 2.31 – Efeito da profundidade de corte na rugosidade superficial da usinagem do UHMW (SONG et al, 1999).

A Figura 2.31 ilustra o efeito da profundidade de corte na taxa de desgaste e na rugosidade superficial do UHMW usinado. A taxa de desgaste e a rugosidade da superfície (R_a) mostraram a mesma tendência quando a profundidade de corte aumentou. Quando a profundidade de corte foi menor que 0,127 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade de superfície R_a diminuiu com o aumento da profundidade de corte. Quando a profundidade de corte estava na faixa de 0,127 mm até 0,500 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade de superfície (R_a) aumentou com o aumento da profundidade de corte. Quando a profundidade de corte foi maior que 0,5 mm, a taxa de desgaste e a rugosidade (R_a) permaneceram

razoavelmente estáveis com o aumento da profundidade de corte. Houve uma ótima profundidade de corte, resultando na melhor resistência ao desgaste e ao acabamento superficial do UHMW. O valor ótimo para a profundidade de corte foi aproximadamente 0,127 mm nas condições estudadas.

2.6 Aspectos Conclusivos da Revisão Bibliográfica

Dentro do que foi pesquisado, notou-se que, o estudo sobre o acabamento superficial na usinagem de plástico é relativamente novo. Algumas pesquisas foram realizadas para fins ópticos e médicos, analisando a relação entre a usinagem, o acabamento e a taxa de desgaste superficial.

O desempenho do processo de usinagem depende muito das propriedades de cada material. Como as propriedades que influenciam a usinagem, no caso dos plásticos, são totalmente diferentes das propriedades dos metais, não é possível aplicar diretamente as teorias bem estabelecidas para usinagem dos metais na usinagem de materiais plásticos. Nos plásticos as propriedades térmicas e o comportamento viscoelástico fazem com que o efeito da velocidade de corte e do avanço seja decisivos na qualidade da superfície usinada.

A avaliação dos parâmetros de qualidade superficial para os plásticos é algo recente e ainda não existe um consenso sobre a melhor técnica, mas em todos os trabalhos pesquisados a utilização dos

unesp

perfilômetros de apalpamento apresentou resultados satisfatórios. Sendo que, em trabalhos mais específicos, a avaliação por microscopia da superfície usinada, além dos perfilômetros, apresentou resultados mais abrangentes, quando se analisou os danos da superfície processada.

As equações desenvolvidas para estimar a rugosidade superficial foram bastante estudadas para a usinagem de metais, apresentando boa correlação com a rugosidade efetiva, quando se utiliza equipamentos com boa rigidez. Estas equações são válidas para prever a rugosidade de outros materiais, já que se baseia na geometria da ferramenta.

As orientações disponíveis sobre a geometria das ferramentas e os parâmetros para a usinagem de plásticos são genéricas e alguns casos utilizam-se os mesmos valores empregados para os metais não ferrosos. Em vários estudos, foi concluído que, as grandezas para um processo de usinagem eficiente devem ser estudadas especificamente para cada plástico, já que são grandes as diferenças entre as suas propriedades.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os equipamentos e materiais necessários para a realização dos procedimentos experimentais, bem como a metodologia empregada nos ensaios, sendo dividido em três partes distintas: a obtenção das superfícies torneadas, a avaliação do acabamento superficial e o estudo do cavaco.

Os procedimentos experimentais deste estudo foram realizados nos Laboratórios da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru e no Laboratório de Análise de Imagem de Materiais da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Guaratinguetá.

3.1 Obtenção das Superfícies Torneadas

Nesta etapa, foram obtidos corpos-de-prova usinados em condições definidas nos ensaios preliminares. O acabamento foi avaliado considerando-se a operação de torneamento cilíndrico externo, realizada em um Torno a Comando Numérico Computadorizado da marca EMCO, modelo EMCO TURN 120. Foram geradas superfícies torneadas em tarugos cilíndricos de UHMW, dos quais foram obtidos os valores de rugosidade em função das condições de corte utilizadas e três geometrias de ferramenta de corte. Foram realizados ainda, a análise da superfície por microscopia óptica e um estudo do cavaco.

Para o desenvolvimento desta etapa, foram utilizados os materiais e equipamentos listados:

- 5 barras de UHMW com diâmetro 35 mm e comprimento de 1000 mm, denominado UTEC 6540;
- 2 barras de UHMW com diâmetro 25 mm e comprimento de 1000 mm, denominado UTEC 6540;
- Serra circular esquadrejadeira;
- Torno a Comando Numérico Computadorizado EMCO COMPACT 5;
- Torno a Comando Numérico Computadorizado EMCO TURN 120;
- Porta ferramentas: SDJCR 1212 F07 e SRDCN 1616 H08, marca Sandvik;
- Ferramentas de Metal Duro (Insertos): DCGX 070204 AL, DCMT 070204 UM, RCGX 0803 MO AL, marca Sandvik;
- Torno Convencional , marca ROMI, modelo "TORMAX 30"; potência: 7,5 CV, faixa de rotação: 45 – 2240 rpm;
- Paquímetro universal, com resolução de 0,02 mm, marca Starrett;
- Projetor de perfil de médio porte, com mesa de dois eixos e cabeçotes micrométricos;

3.1.1 Amostras

O material utilizado neste trabalho foi o UHMW, designado UTEC 6540, cedido pela Empresa Titana Tecnologia Comércio e Indústria de Polímeros Ltda, na forma de barras cilíndricas, com diâmetro de 35 mm e

comprimento de 1000 mm. As principais propriedades do UTEC 6540 são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades e características do UTEC 6540.

PROPRIEDADES	MÉTODOS ASTM	UNIDADES	VALORES TÍPICOS
Peso molecular Viscosimétrico		g/mol	$>6,0 \times 10^6$
Densidade (no moldado)	D - 1505	g/cm^3	> 0,93
Densidade Aparente	D - 1895	g/cm^3	> 0,4
Resistência à tração na ruptura	D - 1708	MPa	35
Resistência ao impacto IZOD	D - 256	J/m	Não quebra
Dureza Shore	D - 2240	Shore D	63
Temperatura de fusão	D - 3418	°C	133
Temperatura de amolecimento	D - 1525	°C	128
Coeficiente de dilatação linear	D - 696	10^{-4} /°C	1,5
Condutividade térmica a 23°C	D- 177	W/m°K	0,4
Absorção de água	D - 570	%	0,01

Fonte: Polialden Petroquímica S/A, Junho de 1999

3.1.2 Procedimentos empregados nos ensaios preliminares.

Nesta etapa, foram determinadas as condições de usinagem empregadas na obtenção das superfícies torneadas. Inicialmente, o acabamento foi avaliado considerando-se a operação de torneamento cilíndrico externo, realizada em um torno convencional, marca ROMI, modelo TORMAX 30. Os insertos de metal duro utilizados foram selecionados através do catálogo do fabricante, sendo empregadas geometrias compatíveis com os porta-ferramentas disponíveis. A Tabela 3.2 apresenta a especificação dos insertos utilizados neste trabalho, bem como as suas características, extraídas do catálogo do fabricante.

Os Porta-ferramentas utilizados foram: SDJCR 20202 K11 e MTJNR 2020 K11, marca Sandvik;

Tabela 3.2 – Designação das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios preliminares.

Especificação	Características
DCGX 11T 308 AL	Pastilha rômbica 55°, de metal duro sem cobertura, geometria positiva indicada para alumínio.
DCMT 11T304 PM	Pastilha rômbica 55°, de metal duro com cobertura, geometria positiva indicada para aço / usinagem média.
TNMG 160404 PF	Pastilha triangular, de metal duro com cobertura, geometria negativa indicada para aço / acabamento.

Fonte: Sandvik Coromant, 2000.

As faixas de velocidades de corte e avanços utilizadas foram selecionadas com base nas orientações fornecidas pela empresa Polialden Petroquímica, conforme apresentado pela Tabela 3.3. A velocidade de corte ficou limitada em 170 m/min, devido a rotação máxima do TORMAX 30 e ao diâmetro da barra de UHMW disponível, que era de 25 mm. Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios preliminares são apresentados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.3- Grandezas de corte recomendadas pelo fabricante da resina.

Parâmetros de Corte	Valores Recomendados
Ângulo de Corte - α (graus)	de 0 até 25
Ângulo de saída - γ (graus)	de 5 até 30
Avanço [mm / volta]	de 0,1 até 0,5
Velocidade de corte [m / min]	de 200 até 400

Fonte: Polialden Petroquímica S/A, Boletim Técnico 6.01.

Para as condições dos ensaios preliminares, utilizando-se o torno Tormax 30, os resultados da rugosidade Ra foram elevados. Neste

momento, concluiu-se que, seria necessário utilizar uma faixa maior de velocidades de corte. A opção foi continuar os ensaios preliminares utilizando o torno CNC EMCO TURN 120, que possui rotação máxima de 4000 rpm, possibilitando assim, o emprego de maiores velocidades de corte. Selecionou-se um diâmetro maior para as barras de UHMW, permitindo ampliar ainda mais, a faixa de velocidades de corte.

Tabela 3.4 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaio preliminares.

Parâmetros de Corte	Valores Efetivos
Avanço [mm / volta]	0,062 0,114 0,523
Velocidade de corte [m / min]	50 100 170
Profundidade de corte [mm]	0,4 0,6

Novos ensaios preliminares foram realizados, para tanto, utilizou-se o Torno EMCO TURN 120 e o inserto DCGX 11T 308 AL. Os resultados de Ra, nestas condições, foram satisfatórios e então, definiu-se a faixa de velocidades de corte e avanços utilizadas nos ensaios.

3.1.3 Parâmetros e ferramentas de corte utilizadas na geração de superfícies.

Normalmente, em processos de torneamento, alguns parâmetros podem ser variados independentemente um do outro, dentro dos limites das máquinas, sendo eles: o avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte. Estes parâmetros são de grande importância industrial, pois estão relacionados diretamente com a taxa de remoção de material, e consequentemente com o custo do produto. O avanço foi considerado neste estudo por possuir influência direta no acabamento

superficial, conforme descrito na revisão da literatura e nas deduções das expressões teóricas sobre a rugosidade superficial.

A velocidade de corte exerce grande influência na geração de calor, podendo interferir nas propriedades do UHMW durante a usinagem. O desgaste da ferramenta também é influenciado pela velocidade de corte, podendo comprometer o acabamento superficial. Desta forma, considerou-se, neste estudo, a influência da velocidade de corte na geração da rugosidade. A profundidade de corte foi mantida constante, pois sua influência na rugosidade de pode ser considerada previsível. Os parâmetros de corte considerados na usinagem são apresentados na Tabela 3.5, sendo apresentada também a nomenclatura utilizada para identificação dos corpos-de-prova.

Tabela 3.5 – Parâmetros de corte e nomenclatura para a geração de superfícies torneadas.

Parâmetros de Corte	Valores Efetivos	Códigos das Variáveis
Avanço [mm / volta]	0,025 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 0,30	*f1 / f2 / f3 / f4 / f5 / f6 / f7*
Velocidade de corte [m / min]	400 340 280 220 160	*V1 / V2 / V3 / V4 / V5*

A escolha da ferramenta foi direcionada para pastilhas de metal duro, acreditando-se que, desta forma os resultados obtidos com este estudo poderiam ser aplicados diretamente pelo setor produtivo. A seleção dos insertos utilizados foi realizada através do catálogo e da consulta direta à Empresa Sandvik do Brasil. Os insertos de metal duro,

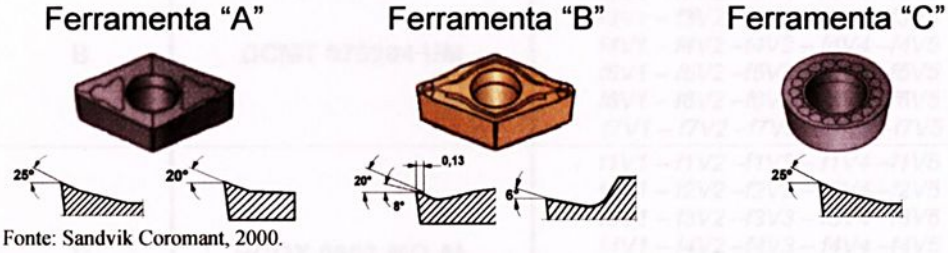
utilizados nos ensaios deste trabalho, incluindo os preliminares, foram cedidos pela Empresa PS Ferramenta.

Os catálogos de ferramentas para torneamento, geralmente, não definem ferramentas específicas para a usinagem de materiais plásticos, sendo recomendadas as ferramentas para metais não ferrosos. Neste estudo, utilizaram-se duas ferramentas de metal duro indicadas para o torneamento de alumínio e uma ferramenta indicada para o torneamento de aço carbono. A Tabela 3.6 apresenta o código adotado para cada especificação dos insertos utilizados neste trabalho, bem como as suas características, extraídas do catalogo do fabricante. As Figuras 3.1 e 3.2, apresentam as geometrias das ferramentas utilizadas, segundo catálogo do fabricante.

Tabela 3.6 – Designação das ferramentas de corte utilizadas para a geração das superfícies torneadas.

Código Ensaio	Especificação	Características
A	DCGX070204 AL	Pastilha rômbica 55°, de metal duro sem cobertura, geometria positiva indicada para alumínio.
B	DCMT070204 UM	Pastilha rômbica 55°, de metal duro sem cobertura, geometria positiva indicado para aço / usinagem média.
C	RCGX0803 AL	Pastilha redonda, de metal duro sem cobertura, geometria positiva indicada para alumínio.

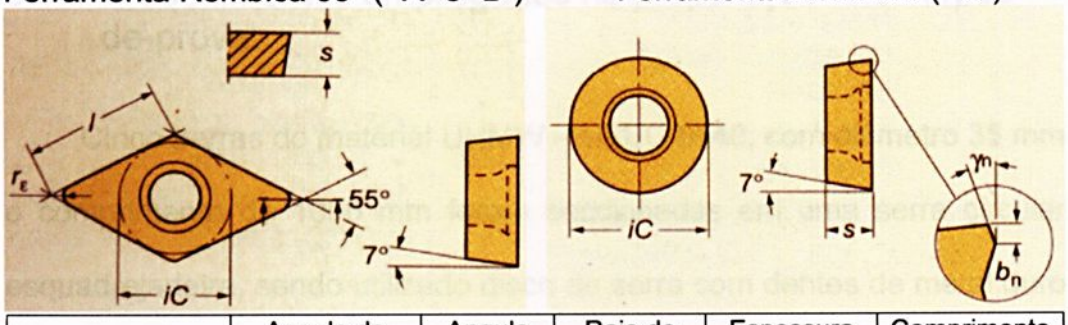
Fonte: Sandvik Coromant, 2000.



Fonte: Sandvik Coromant, 2000.

Figura 3.1 – Representação dos ângulos de saída e quebra – cavaco das ferramentas de corte.

Ferramenta Rômbica 55° ("A" e "B") Ferramenta Redonda ("C")



Ferramenta	Angulo de posição (χ)	Angulo de Folga (α)	Raio de Ponta (r) mm	Espessura (S; mm)	Comprimento iC
A	93°	7°	0,4	2,38	6,35
B	93°	7°	0,4	2,38	6,35
C	-	7°	-	3,18	8,00

Fonte: Sandvik Coromant, 2000.

Figura 3.2 – Geometria das ferramentas de corte.

A combinação entre os parâmetros de corte utilizados resultaram em 35 condições de usinagem, sendo que, como foram utilizadas três diferentes geometrias de ferramenta, o número de ensaios passou a ser de 105, conforme apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Seqüenciamento dos ensaios de torneamento.

CONDIÇÃO	INSERTO	COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS
A	DCGX 11T 308 AL	*f1V1 – f1V2 –f1V3 – f1V4 –f1V5* *f2V1 – f2V2 –f2V3 – f2V4 –f2V5* *f3V1 – f3V2 –f3V3 – f3V4 –f3V5* *f4V1 – f4V2 –f4V3 – f4V4 –f4V5* *f5V1 – f5V2 –f5V3 – f5V4 –f5V5* *f6V1 – f6V2 –f6V3 – f6V4 –f6V5* *f7V1 – f7V2 –f7V3 – f7V4 –f7V5*
B	DCMT 070204 UM	*f1V1 – f1V2 –f1V3 – f1V4 –f1V5* *f2V1 – f2V2 –f2V3 – f2V4 –f2V5* *f3V1 – f3V2 –f3V3 – f3V4 –f3V5* *f4V1 – f4V2 –f4V3 – f4V4 –f4V5* *f5V1 – f5V2 –f5V3 – f5V4 –f5V5* *f6V1 – f6V2 –f6V3 – f6V4 –f6V5* *f7V1 – f7V2 –f7V3 – f7V4 –f7V5*
C	RCGX 0803 MO AL	*f1V1 – f1V2 –f1V3 – f1V4 –f1V5* *f2V1 – f2V2 –f2V3 – f2V4 –f2V5* *f3V1 – f3V2 –f3V3 – f3V4 –f3V5* *f4V1 – f4V2 –f4V3 – f4V4 –f4V5* *f5V1 – f5V2 –f5V3 – f5V4 –f5V5* *f6V1 – f6V2 –f6V3 – f6V4 –f6V5* *f7V1 – f7V2 –f7V3 – f7V4 –f7V5*

unesp

3.1.4 Procedimentos empregados na preparação dos corpos-de-prova

Cinco barras do material UHMW – UTEC 6540, com diâmetro 35 mm e comprimento de 1000 mm foram seccionadas em uma serra circular esquadrejadeira, sendo utilizado disco de serra com dentes de metal duro inclinados alternados para a obtenção de peças com comprimento de 50 mm, conforme apresentado pela Figura 3.4-A.

O processo de seccionamento das barras não resultou em faces devidamente retilíneas e, para melhorar a sujeição destas na placa do torno, realizou-se uma operação de faceamento em todos os corpos-de-prova. Na Figura 3.3 é apresentado o torno CNC EMCO COMPACT 5, utilizado para facear os corpos-de-prova.

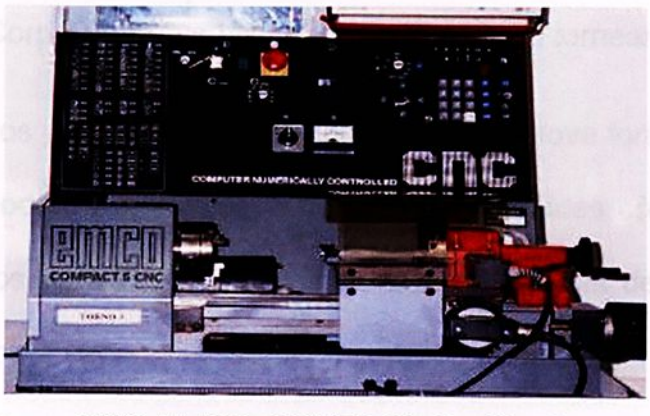


Figura 3.3 – Torno CNC EMCO COMPACT 5 utilizado na preparação dos corpos-de-prova.

Com a finalidade de amenizar a influência de erros de forma ou eventuais imperfeições resultantes do processo de fabricação do material, foram realizadas operações preliminares de torneamento em todos os corpos-de-prova. Para isto, utilizou-se o torno EMCO TURN 120. O

desenho esquemático da Figura 3.4-B apresenta as dimensões dos corpos-de-prova, utilizado para a obtenção das superfícies torneadas.

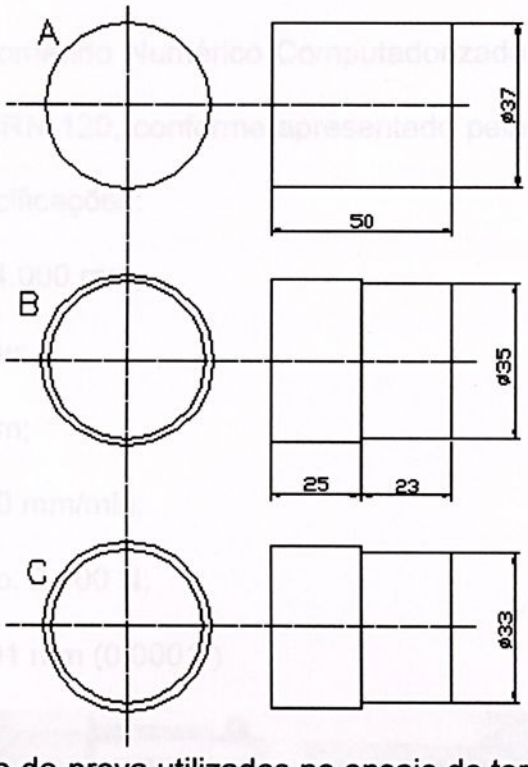


Figura 3.4 – Corpo-de-prova utilizados no ensaio de torneamento.

Os códigos para identificação dos corpos-de-prova foram elaborados conforme o modelo exemplificado na Tabela 3.8. Estes códigos também foram utilizados para nomear os arquivos do programa de avaliação de rugosidade e para separar os cavacos gerados no ensaio.

Tabela 3.8 - Modelo empregado para identificação dos corpos-de-prova.

Exemplo: **A132**	
DESCRIÇÃO DOS DÍGITOS	**DESCRIÇÃO DO EXEMPLO**
1° dígito – ferramenta utilizada	inserto DCGX 11T 308 AL
2° dígito – códigos utilizados para identificar os avanços, Tabela 3.3	avanço de 0,25 mm/volta
3° dígito - identifica as velocidades de corte, Tabela 3.3	velocidade de corte de 280 m/ min
4° dígito – número da amostra	amostra número 2

3.1.5 Procedimentos empregados na obtenção das superfícies.

Os corpos-de-prova com as superfícies torneadas, foram gerados em um Torno a Comando Numérico Computadorizado da marca EMCO, modelo EMCO TURN 120, conforme apresentado pela Figura 3.5, e com as seguintes especificações:

- rotação: 150 - 4.000 rpm;
- potência: 2,6 Kw;
- torque: 17,6 N.m;
- avanço: 1-2.000 mm/min;
- força de avanço: 2.000 N;
- resolução: 0,001 mm (0,0001")



Figura 3.5 – Torno EMCO TURN 120 utilizado para a obtenção dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram usinados utilizando um único programa CNC, sendo que, antes de cada ensaio, eram alterados os valores de velocidade de avanço e velocidade de corte, conforme o código do corpo-de-prova. Realizou-se uma operação de desbaste na amostra, permitindo

que fossem eliminadas todas as imperfeições resultantes do processo de extrusão do material. A utilização de uma operação de torneamento, utilizando a mesma ferramenta e o mesmo programa do ensaio proporcionou uma segurança adicional quanto à referência da ferramenta. O desenho esquemático da Figura 3.4-C, apresenta as dimensões do corpo-de-prova, após a geração das superfícies tornadas.. A Figura 3.6, mostra os corpos-de-prova posicionados no torno EMCO TURN 120.

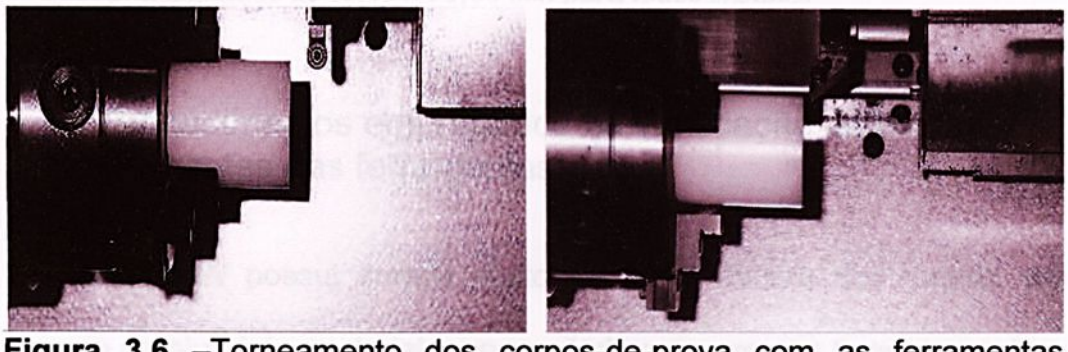


Figura 3.6 –Torneamento dos corpos-de-prova com as ferramentas DCGX 11T 308 AL e RCGX0803 MO AL.

O estudo do acabamento do Polietileno UHMW no torneamento, realizou-se através de quatro tipos de análises, sendo elas: a condição de melhor acabamento, a influência da velocidade de corte, a influência do avanço e a comparação do desempenho das ferramentas em função do acabamento superficial. Os três primeiros estudos foram desenvolvidos para cada ferramenta e o último para as três ferramentas. A Tabela 3.9 apresenta os parâmetros de corte utilizados nos estudos realizados.

As operações de torneamento deste trabalho realizaram-se sem empregar qualquer tipo de refrigerante ou óleo de corte.

unesp

Tabela 3.9 - Parâmetros de usinagem empregados nos ensaios.

ENSAIOS	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	AVANÇO (mm/volta)
Condição de Melhor Acabamento Superficial	160 / 220 / 280 /340 / 400	0,025 / 0,050 / 0,100 / 0,150 0,200 / 0,250 / 0,300
Influência da Velocidade de Corte	160 / 220 / 280 / 340 / 400	0,025 / 0,050 / 0,100 / 0,150 0,200 / 0,250 / 0,300
Influência do Avanço	160 / 220 / 280 / 340 / 400	0,025 / 0,050 / 0,100 / 0,150 0,200 / 0,250 / 0,300
Comparação das Ferramentas em Função do Avanço	220 / 280	0,025 / 0,050 / 0,100 / 0,150 0,200 / 0,250 / 0,300
Comparação das Ferramentas em Função da Velocidade de Corte	160 / 220 / 280 / 340 / 400	0,05 - 0,10 0,20

A profundidade de corte foi 1,00 mm para todos ensaios.

3.1.6 Procedimentos empregados na verificação de avarias e desgastes das ferramentas

O UHMW possui dureza muito inferior à dureza dos metais, até mesmo do alumínio, material recomendado para um dos tipos de pastilha utilizada. Outras características do UHMW, que devem ser consideradas neste caso, é o baixo coeficiente de atrito e as características auto-lubrificantes. Desta forma, acredita-se que o desgaste da ferramenta será muito pequeno no torneamento deste material. Portanto, neste trabalho, a influência do desgaste da ferramenta não foi considerada, apesar de que se realizou uma verificação final do desgaste e avarias das ferramentas.

Com o objetivo de minimizar ainda mais a influência do desgaste da ferramenta nos resultados de Ra, foram estabelecidos percursos de corte efetivos para os ensaios, muito inferiores aos percursos de corte recomendados por aresta no torneamento de metais, segundo dados obtidos no catálogo do fabricante. A Tabela 3.10, apresenta o percurso de

corte recomendado, segundo dados extraídos do catálogo do fabricante e o percurso efetivo de corte empregado para cada tipo de inserto utilizado.

Tabela 3.10 – Estimativa do percurso de corte para os insertos utilizados .

Código Ensaio	Especificação	Classes	Material referência	Dureza Brinell*	Percurso de Corte recomendado** (mm)	Percurso de Corte efetivo (mm)
A	DCGX070204AL	K10	Alumínio	60	57.873	805
B	DCMT070204UM	P10	Aço	150	10.704	805
C	RCGX0803AL	K10	Alumínio	60	57.873	805

* Dureza do material UHMW: 63 Shore D
** Percurso de Corte calculado segundado dados para a vida útil da ferramenta segundo catálogo SANDVIK

A visualização da aresta de corte da ferramenta foi realizada com o auxílio de um projetor de perfil, para o desgaste de flanco (V_B). Sendo utilizado também, um microscópio estereoscópio, para verificar se houve adesão do cavaco ou ocorrência de crateras na superfície de saída ou de entalhes na aresta de corte.

3.2 Avaliação do Acabamento Superficial

A seguir, serão descritos os procedimentos experimentais empregados na avaliação do acabamento superficial, bem como os equipamentos e materiais necessários. O acabamento superficial foi avaliado através da medição da rugosidade e por análise das imagens da superfície.

3.2.1 Procedimentos empregados na medição da rugosidade superficial

As medições da rugosidade nas superfícies torneadas foram realizadas, inicialmente, com ângulos de 90°, sendo, portanto, realizadas quatro medições por corpo-de-prova. O UHMW pode ser considerado homogêneo, de forma que, entre os quatro valores de rugosidade medidos por corpo-de-prova não houve variação significativa, isto possibilitou adotar-se apenas três medições por corpo-de-prova, sendo assim, os ângulos entre as regiões medidas passaram a ser 120°.

Nesta etapa, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- 105 corpos-de-prova de UTEC 6540, com diâmetro 35 mm e comprimento 50 mm, com as superfícies geradas por torneamento cilíndrico externo;
- Bloco em V de aço temperado com superfícies retificadas;
- Computador para aquisição e análise de dados;
- Paquímetro com resolução de 0,02 mm.
- Rugosímetro marca TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 3+, equipado com uma ponta apalpadora de diamante, de forma cone-esférica, com raio de ponta de 2 μm (código 112/1503), em conjunto com o programa de análise de superfícies Talyprofile;

Sobre a bancada de medição foram determinadas posições para o rugosímetro e para o bloco V de forma a assegurar que a distância entre estes dispositivos permanecessem constantes.

Na parte superior do bloco em V fixou-se um adesivo contendo as marcas para o posicionamento dos corpos-de-prova, desse modo, estes foram girados sem sair do posicionamento estabelecido. A Figura 3.7 apresenta em detalhe o posicionamento do corpo-de-prova para medir a rugosidade superficial.

Comprimentos de Amostragem e Onda Limite

Os comprimentos de amostragem (l_e), que são numericamente iguais aos comprimentos de onda limite (cut-off - λ_c), foram adotados segundo os valores sugeridos pela ABNT 6405, de acordo com o R_a esperado, correspondendo à Tabela 2.2 no capítulo 2.



Figura 3.7 – Medição da rugosidade em amostras torneadas.

O comprimento de amostragem adotado foi 0,8 mm, indicado para uma faixa de rugosidade entre $0,1 < R_a \leq 2$ μm. O filtro utilizado foi o 2CR-fase corrigida. A Tabela 3.11 apresenta a configuração do rugosímetro empregado nos ensaios.

Tabela 3.11 – Configuração do rugosímetro para os ensaios.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO
Parâmetro de Medição	R_a
Percurso de Medição (I_m)	4,0 mm
Escala de Resolução	2 (resolução =0,02μm – valor mínimo =0,02μm – valor máximo = 50μm)
Ampliação Vertical	X 1000
Ampliação Horizontal	X 500

Os dados do perfil de rugosidade superficial foram gravados e analisados pelo programa de aquisição e análise, para a obtenção dos valores numéricos de rugosidade superficial. A Figura 3.8 mostra a tela do sistema de aquisição de dados interligado com o rugosímetro.

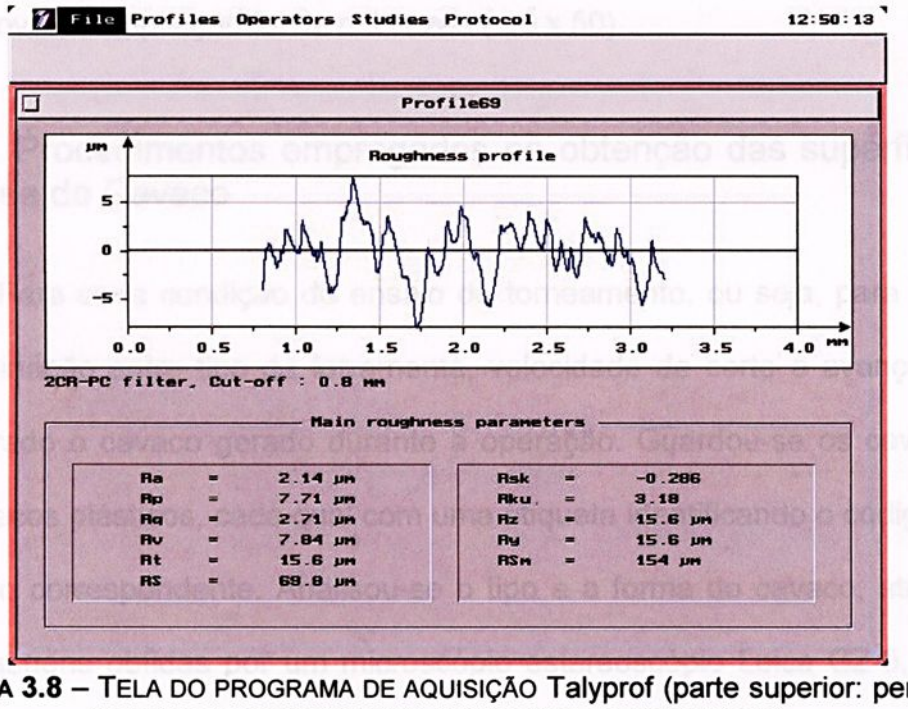


FIGURA 3.8 – TELA DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO Talyprof (parte superior: perfil da rugosidade; parte inferior: parâmetros de rugosidade)

3.2.2 Procedimentos empregados na análise da superfície dos corpos-de-prova.

Para a análise das superfícies torneadas, utilizou-se uma Bancada Metalográfica, tipo Neophot 21, da marca: Carl Zeiss Jena, com uma câmara CCD Sony XC107A. A aquisição e processamento da imagem, realizou-se através de um microcomputador, com placa de conversão A/D para vídeo MV-Lite, utilizando-se o software Media Cybernetics Image Pro Express 4.0. Inicialmente, os corpos-de-prova foram posicionados de forma aleatória, sobre a Bancada Metalográfica. Através da imagem apresentada no monitor, pôde-se acertar o posicionamento dos corpos-de-prova. A ampliação foi de mil vezes (20 x 50).

3.3 Procedimentos empregados na obtenção das superfícies análise do Cavaco

Para cada condição do ensaio de torneamento, ou seja, para cada combinação entre tipo de ferramenta, velocidade de corte e avanço, foi separado o cavaco gerado durante a operação. Guardou-se os cavacos em sacos plásticos, cada qual com uma etiqueta identificando o código do ensaio correspondente. Analisou-se o tipo e a forma do cavaco, através de imagens obtidas por um microscópio estereoscópio Leica GZ-6, com uma câmara CCD Sony XC107A. A aquisição e processamento da imagem, realizou-se através de um microcomputador, com placa de conversão A/D para vídeo MV-Lite, utilizando-se o software Media Cybernetics Image Pro Express 4.0

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capitulo, são apresentados resultados do acabamento superficial obtidos, variando-se os parâmetros de usinagem e as geometrias das ferramentas. Os resultados de rugosidade são apresentados na forma de gráficos, onde cada ponto representa a média de três medições efetuadas na superfície do corpo-de-prova. O resultados da análise da superfície são apresentados através de fotos, que se relacionam com principais pontos do gráfico da rugosidade. O estudo do cavaco apresenta os principais tipos de cavacos obtidos em função do avanço, sendo que, aparentemente, não ocorreram variações do tipo de cavaco com aumento da velocidade de corte.

4.1 Resultados para a Ferramenta "A"

4.1.1 Rugosidade superficial

Os resultados comparativos da rugosidade em conseqüência da variação da velocidade de corte e do avanço, utilizando-se a ferramenta "A" , são apresentados pelos gráficos da Figura 4.1 e 4.2. Os resultados do estudo da rugosidade para a ferramenta "A", obtidos pelo programa de aquisição, são apresentados pelos Anexos 2 e 3.

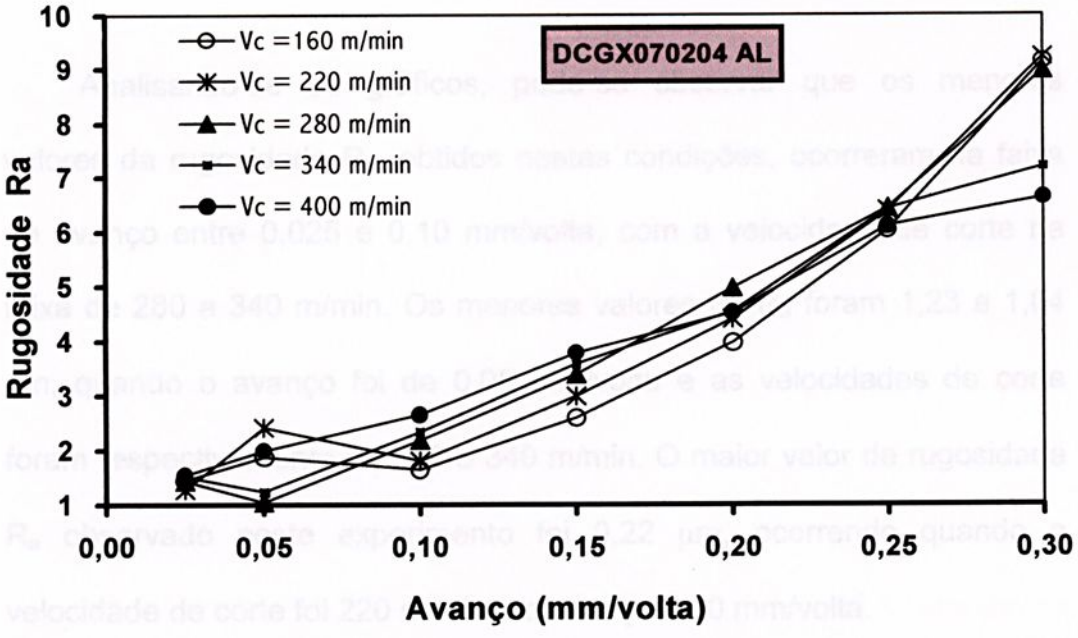


Figura 4.1.- Resultado comparativo da rugosidade Ra para ferramenta "A", variando-se o avanço.

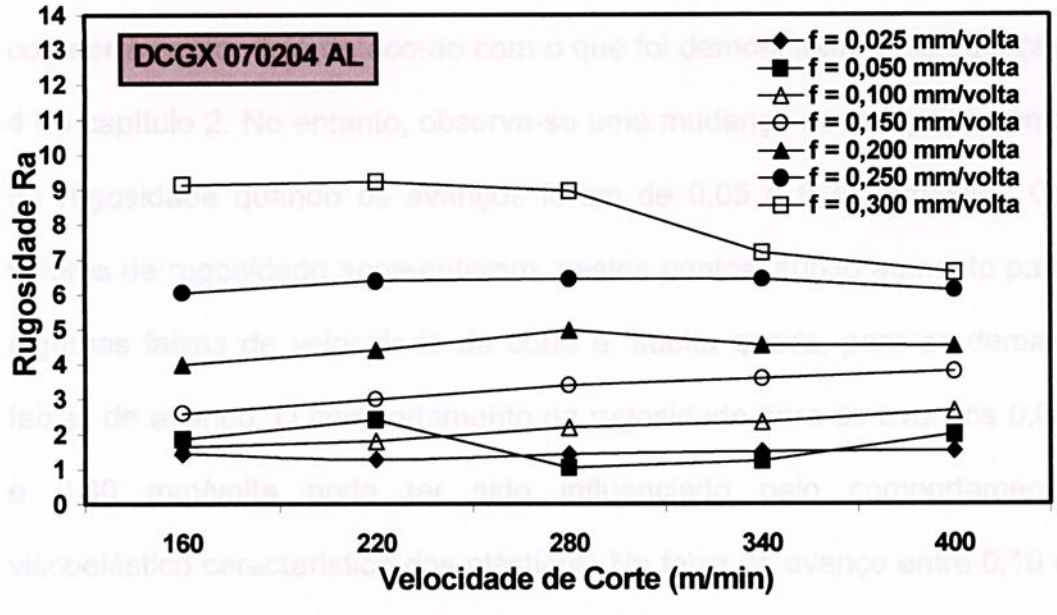


Figura 4.2- Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "A", variando-se a velocidade de corte.

Analisando-se os gráficos, pode-se observar que os menores valores da rugosidade R_a, obtidos nestas condições, ocorreram na faixa de avanço entre 0,025 e 0,10 mm/volta, com a velocidade de corte na faixa de 280 a 340 m/min. Os menores valores de R_a foram 1,23 e 1,04 μm, quando o avanço foi de 0,05 mm/volta e as velocidades de corte foram respectivamente de 280 e 340 m/min. O maior valor de rugosidade R_a observado neste experimento foi 9,22 μm, ocorrendo quando a velocidade de corte foi 220 m/min e o avanço 0,30 mm/volta.

Da análise da Figura 4.1, pode-se verificar a tendência de aumento dos valores da rugosidade, com o aumento do avanço. Este comportamento, está de acordo com o que foi demonstrado pela equação 4 do capítulo 2. No entanto, observa-se uma mudança no comportamento da rugosidade quando os avanços foram de 0,05 e 0,30 mm/volta. Os valores de rugosidade apresentaram, nestes pontos, súbito aumento para algumas faixas de velocidade de corte e, súbita queda, para as demais faixas de avanço. O comportamento da rugosidade para os avanços 0,05 e 0,30 mm/volta pode ter sido influenciado pelo comportamento viscoelástico característico dos plásticos. Na faixa de avanço entre 0,10 e 0,25 mm/volta a rugosidade Ra apresentou a mesma tendência para todas as curvas, aumentando de forma praticamente linear com o acréscimo do avanço. Na faixa de avanço entre 0,025 e 0,10 mm/volta, as curvas para rugosidade Ra apresentaram comportamentos distintos. Entre os avanços 0,025 e 0,05 mm/volta houve o aumento da rugosidade, para

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

as velocidades de corte de 160, 220 e 400 m/min. Enquanto que, para as velocidades de corte intermediárias, Vc = 280 e 340 m/min, a rugosidade diminuiu quando o avanço passou a ser 0,05 mm/volta. Quando o avanço passou de 0,05 para 0,10 mm/volta, a rugosidade Ra diminui para as menores velocidades de corte empregadas, já para velocidades intermediárias, a rugosidade aumenta, quando o avanço passa a ser de 0,10 mm/volta.

Analisando-se o gráfico da Figura 4.2, verifica-se que a variação da velocidade de corte não teve influência significativa sobre o comportamento da rugosidade Ra, exceto quando os avanços foram 0,05 e 0,30 mm/min. A curva da rugosidade Ra, variando-se a velocidade de corte e fixando-se o avanço em 0,05 mm/volta, apresenta um comportamento que se distingue das demais curvas, inclusive da curva para o avanço 0,30 mm/volta. O comportamento da curva para o avanço 0,05 mm/volta pode ter sido influenciado pelas mudanças de propriedades do UHMW, provocando a variação do comportamento durante o processo de usinagem. O aumento da velocidade de corte teve influência insignificante sobre a curva da rugosidade Ra, quando os avanços utilizados foram de 0,10 a 0,25 m/volta e para 0,025 mm/volta. A variação de Ra, com o aumento da velocidade corte para estas faixas de avanço, foi inferior a 0,3 μm.

4.1.2 Análise da superfície

Na Figura 4.3, pode-se observar que, nas imagens da superfície gerada pelo torneamento, estão bem caracterizadas as denominadas marcas de avanço. Estando de acordo com os resultados apresentados pelos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, indicando que o avanço teve grande influência nos valores de Ra. Provavelmente, influenciado pelos picos formados pela aresta lateral da ferramenta de corte que se observa em todas as imagens de superfície geradas por esta ferramenta. Na Figura 4.3-A, correspondente a amostra torneada com o avanço 0,025, pode-se observar que, além da marcas de avanço, a superfície apresenta fissuras.

Quando o avanço passou a ser de 0,05 mm/volta, a rugosidade Ra atingiu o valor mais baixo, conforme o gráfico da Figura 4.1, e pode-se observar pela Figura 4.3-B que diminuiu a presença de fissuras na superfície da peça. Esta mudança na imagem da superfície, coincidindo com o ponto de menor rugosidade, está de acordo com a hipótese que ocorreu mudança do mecanismo de corte, devido às mudanças nas propriedades do material.

Para os demais avanços, a partir de 0,10 mm/volta, observa-se a presença das marcas de avanço, como também, a presença de fissuras sob as superfícies torneadas.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

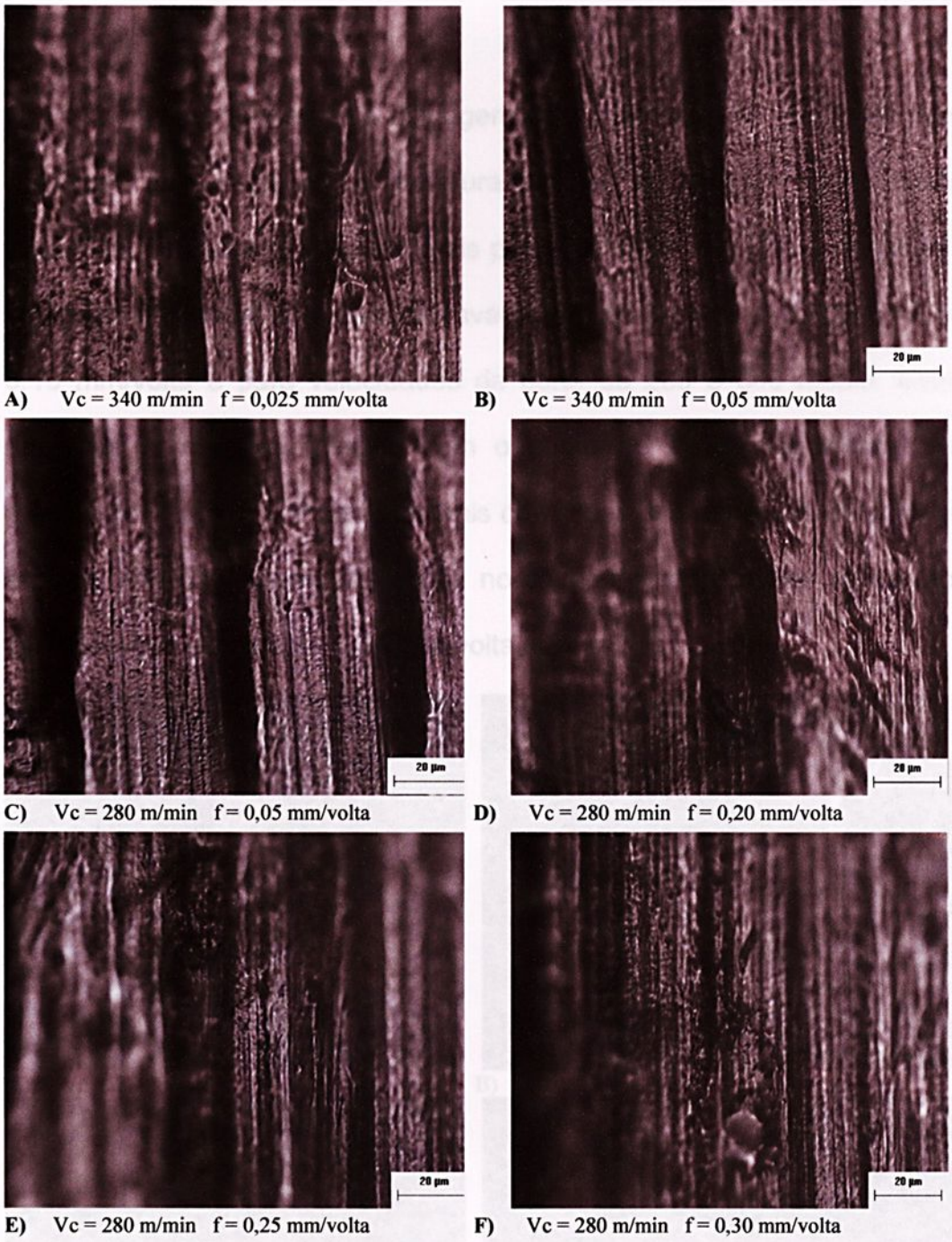
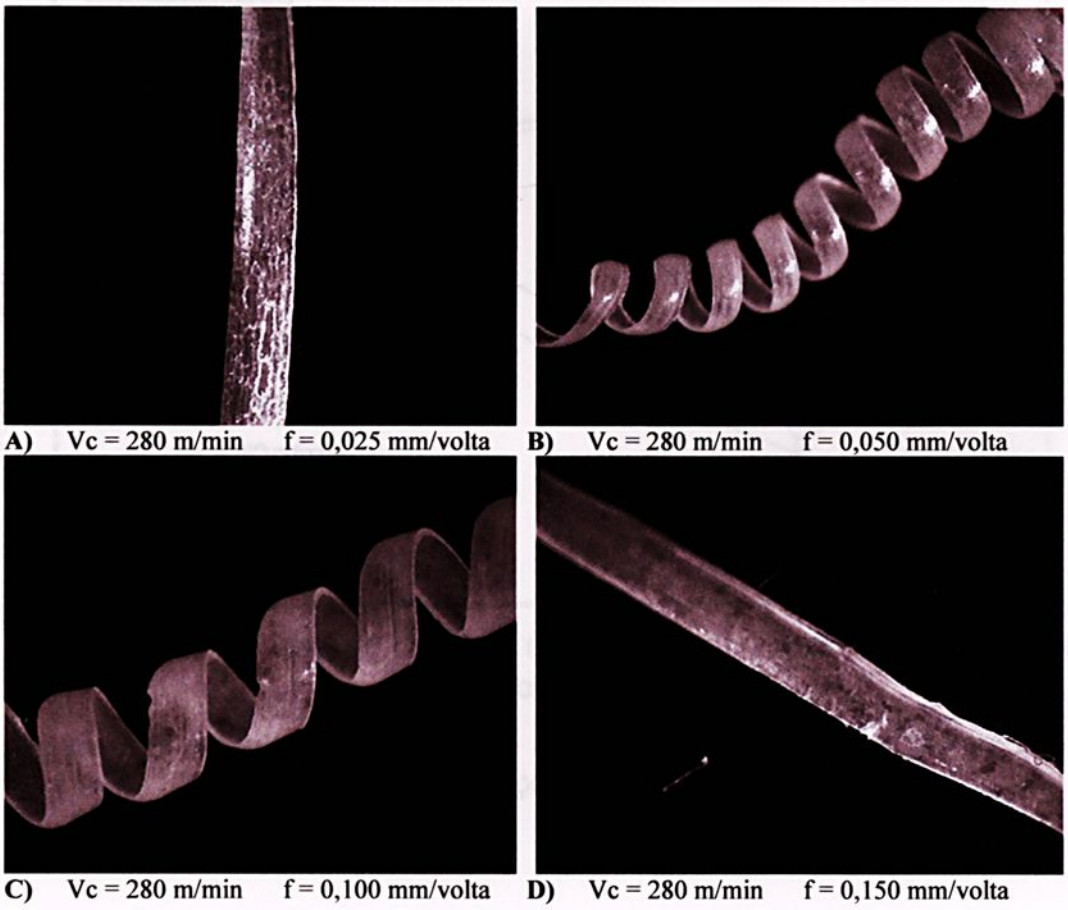


Figura 4.3 – Imagens da superfície torneada com a ferramenta "A", obtidas por um microscópio óptico. Aumento 1000 x.

4.1.3 Estudo do cavaco

O cavaco formado na usinagem com a ferramenta "A" foi do tipo contínuo, que segundo a literatura resulta no melhor acabamento superficial na usinagem de materiais plásticos. Pela Figura 4.4, observa-se ligeira mudança na forma do cavaco gerado para os avanços 0,05 e 0,10 mm/volta e para velocidades de corte de 280 e 340 m/min. Esta mudança no cavaco coincide com o ponto de menor rugosidade no gráfico da Figura 4.1. Para as demais condições de velocidade de corte e avanço, não observa-se alterações no cavaco gerado, sendo similar ao tipo apresentado para f = 0,15 mm/volta e Vc = 280 m/min.



A) Vc = 280 m/min f = 0,025 mm/volta **B)** Vc = 280 m/min f = 0,050 mm/volta

C) Vc = 280 m/min f = 0,100 mm/volta **D)** Vc = 280 m/min f = 0,150 mm/volta

Figura 4.4 – Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "A".

4.2 RESULTADOS PARA A FERRAMENTA "B".

4.2.1 Rugosidade Superficial

Os resultados da rugosidade, em conseqüência da variação da velocidade de corte e o avanço utilizando-se a ferramenta "B", são apresentados pelos gráficos das Figuras 4.5 e 4.6.

Os resultados do estudo da rugosidade para a ferramenta "B", obtidos pelo programa de aquisição, são apresentados pelos Anexos 4 e 5.

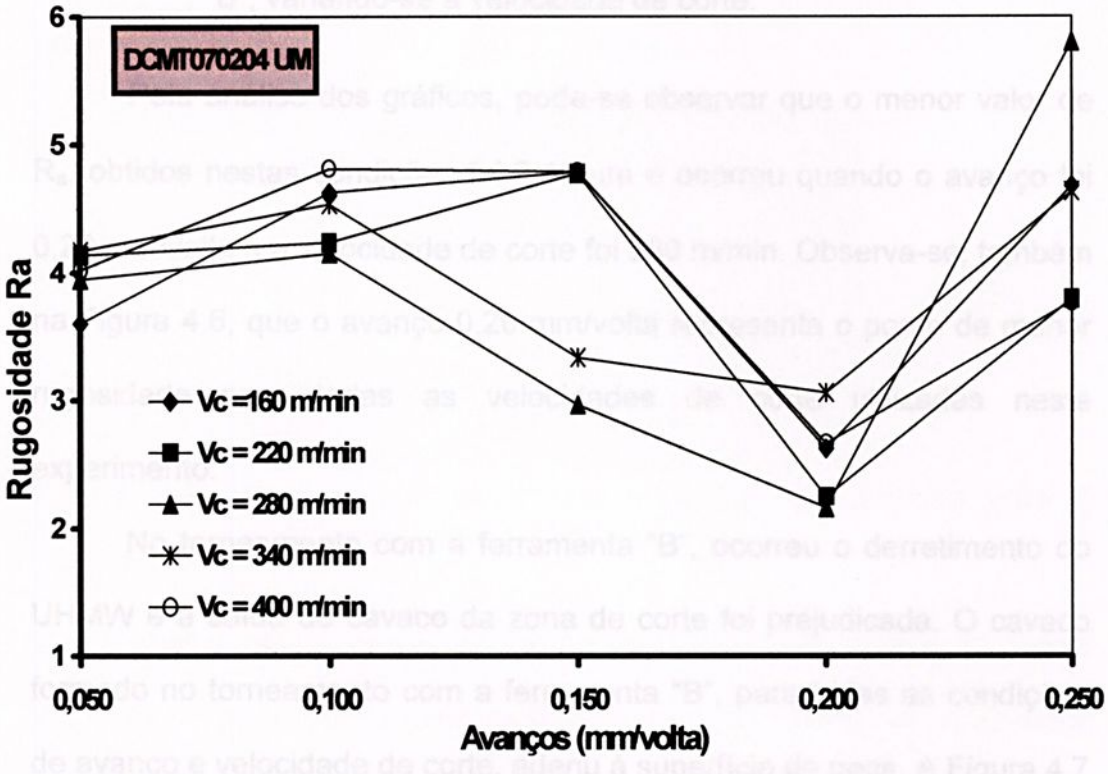


Figura 4.5- Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "B", variando-se o avanço.

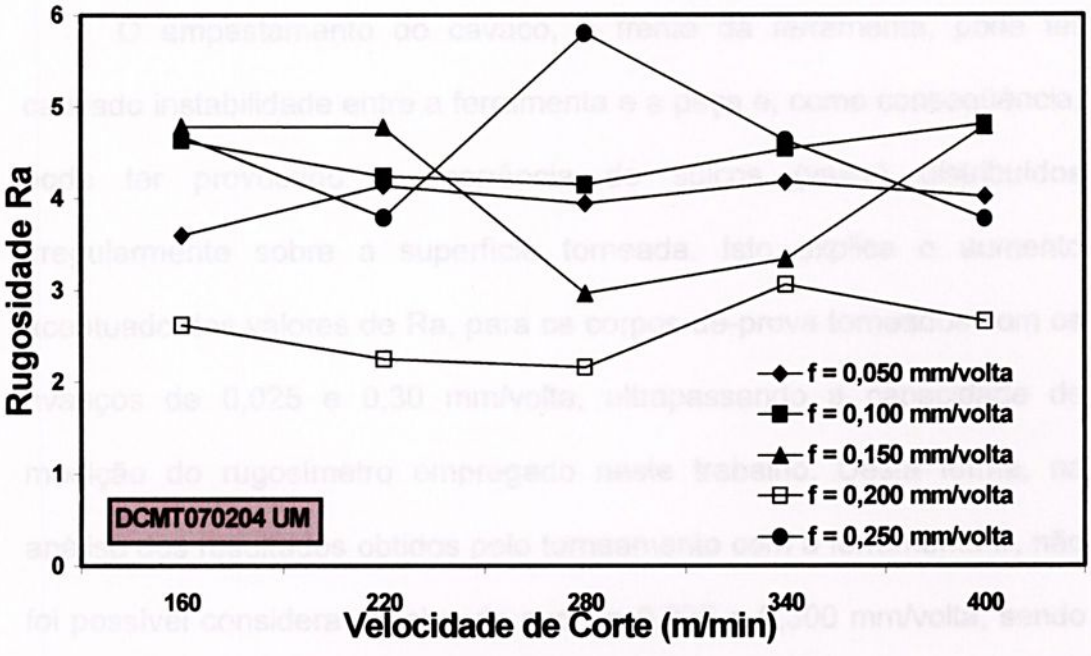


Figura 4.6 – Resultado comparativo da rugosidade Ra para a ferramenta "B", variando-se a velocidade de corte.

Pela análise dos gráficos, pode-se observar que o menor valor de R_a, obtidos nestas condições foi 2,16 μm e ocorreu quando o avanço foi 0,20 mm/volta e a velocidade de corte foi 280 m/min. Observa-se, também na Figura 4.6, que o avanço 0,20 mm/volta representa o ponto de menor rugosidade para todas as velocidades de corte utilizadas neste experimento.

No torneamento com a ferramenta "B", ocorreu o derretimento do UHMW e a saída do cavaco da zona de corte foi prejudicada. O cavaco formado no torneamento com a ferramenta "B", para todas as condições de avanço e velocidade de corte, aderiu à superfície da peça. A Figura 4.7 apresenta o cavaco gerado neste ensaio. O cavaco enrolou-se na peça, formando um anel fundido, posicionando-se a frente da aresta principal de corte.

O empastamento do cavaco, a frente da ferramenta, pode ter causado instabilidade entre a ferramenta e a peça e, como conseqüência, pode ter provocado a ocorrência de sulcos (vales) distribuídos irregularmente sobre a superfície torneada. Isto explica o aumento acentuado dos valores de Ra, para os corpos-de-prova torneados com os avanços de 0,025 e 0,30 mm/volta, ultrapassando a capacidade de medição do rugosímetro empregado neste trabalho. Desta forma, na análise dos resultados obtidos pelo torneamento com a ferramenta B, não foi possível considerar a faixa de avanço 0,025 e 0,300 mm/volta, sendo que os demais parâmetros do estudo foram aqueles definidos anteriormente.

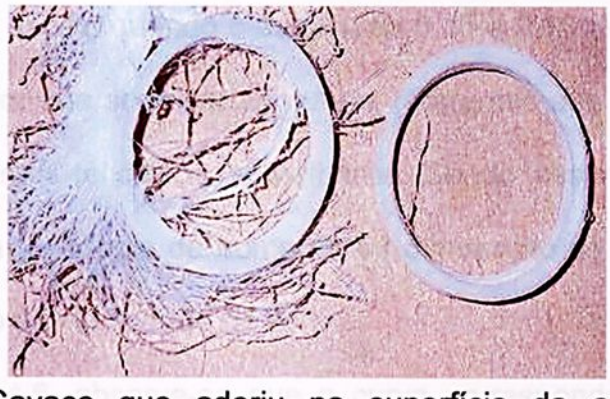


Figura 4.7.- Cavaco que aderiu na superfície da amostra para o torneamento com a ferramenta "B".

Analisando-se os resultados apresentados pelo gráfico da Figura 4.5, não se pôde definir uma tendência para os valores de rugosidade com o aumento do avanço, utilizando-se a ferramenta "B". Porém, para todas as curvas do gráfico, ocorreu súbita queda nos valores de rugosidade, quando o avanço foi 0,20 mm/volta. Entre os avanços de

0,100 até 0,150 mm/volta, e para as velocidades de corte de 160, 220 e 400 m/min, a tendência das curvas de rugosidade foram semelhantes, ou seja, apresentam altos valores de rugosidade, com uma pequena tendência de aumento. Para as velocidades de corte intermediárias deste experimento, 280 e 340 m/min, e para os avanços de 0,100 até 0,200 m/min, ocorreu diminuição dos valores de rugosidade Ra. Entre os avanços 0,200 e 0,250 m/min, para todas as velocidades de corte, as curvas apresentam a mesma tendência, ou seja, ocorreu aumento acentuado nos valores de rugosidade Ra.

Analisando-se o gráfico da Figura 4.6, verifica-se que o aumento da velocidade de corte influenciou significativamente o comportamento da rugosidade Ra, exceto quando o avanço foi 0,05 e 0,10 mm/min. Pode-se notar no entanto, que somente as curvas referentes aos avanços 0,05 e 0,10 apresentaram tendência semelhante. Sendo assim, não se pôde comprovar uma tendência de aumento ou diminuição da rugosidade Ra, com a alteração da velocidade de corte.

Na figura 4.6, observa-se que a curva correspondente ao avanço 0,20 mm/volta apresentou os melhores resultados, para todas as velocidades de corte. Para as curvas correspondentes aos avanços 0,05 e 0,10 mm/volta, a influência do aumento da velocidade de corte, entre 220 e 400 m/min foi insignificante. Os maiores valores de Ra obtidos neste experimento correspondem ao avanço 0,25 mm/volta, na faixa de velocidade de corte compreendida entre 220 a 340 m/min.



4.2.2 Análise da superfície

A Figura 4.8 apresenta o resultado da análise microscópica da superfície da peça, para a ferramenta B. Observa-se nas imagens das superfícies a presença de fissuras e de material aderido, provavelmente, devido à adesão do cavaco na superfície da peça. Acredita-se que a formação de fissuras sob a superfície da peça possa estar relacionada com a ocorrência de adesão do cavaco. O cavaco aderido pode ter sido parcialmente arrancado, causando a fratura da superfície usinada, resultando na formação de fissuras.

Para a faixa de avanço de 0,05 à 0,15 mm/volta, as marcas de avanço não estão bem definidas nas imagens da superfície, sendo bem caracterizado o material aderido e fissuras na superfície. Nesta faixa, o fenômeno da adesão do cavaco pode ter sido mais acentuado, explicando a grande instabilidade das curvas de rugosidade pelo avanço, apresentadas na Figura 4.5.

Quando o avanço foi 0,20 mm/volta, pode-se observar, pelas Figuras 4.8-C e D, a presença das marcas de avanço, enquanto que diminuiu a ocorrência de fissuras. Para este avanço, ocorreram os menores valores de rugosidade Ra, observados para esta ferramenta. Acredita-se que, para este avanço, o fenômeno da adesão do cavaco tenha diminuído e as marcas de avanço passaram a ser o principal componente na geração da rugosidade. Pelas Figuras 4.8-E e F, correspondentes aos avanços 0,25 e 0,30, pode-se observar a presença

de sulcos que, possivelmente, causaram o súbito aumento de Rmáx e de acordo com a hipótese que houve o riscamento da superfície da peça com o acúmulo de cavaco à frente da ferramenta.

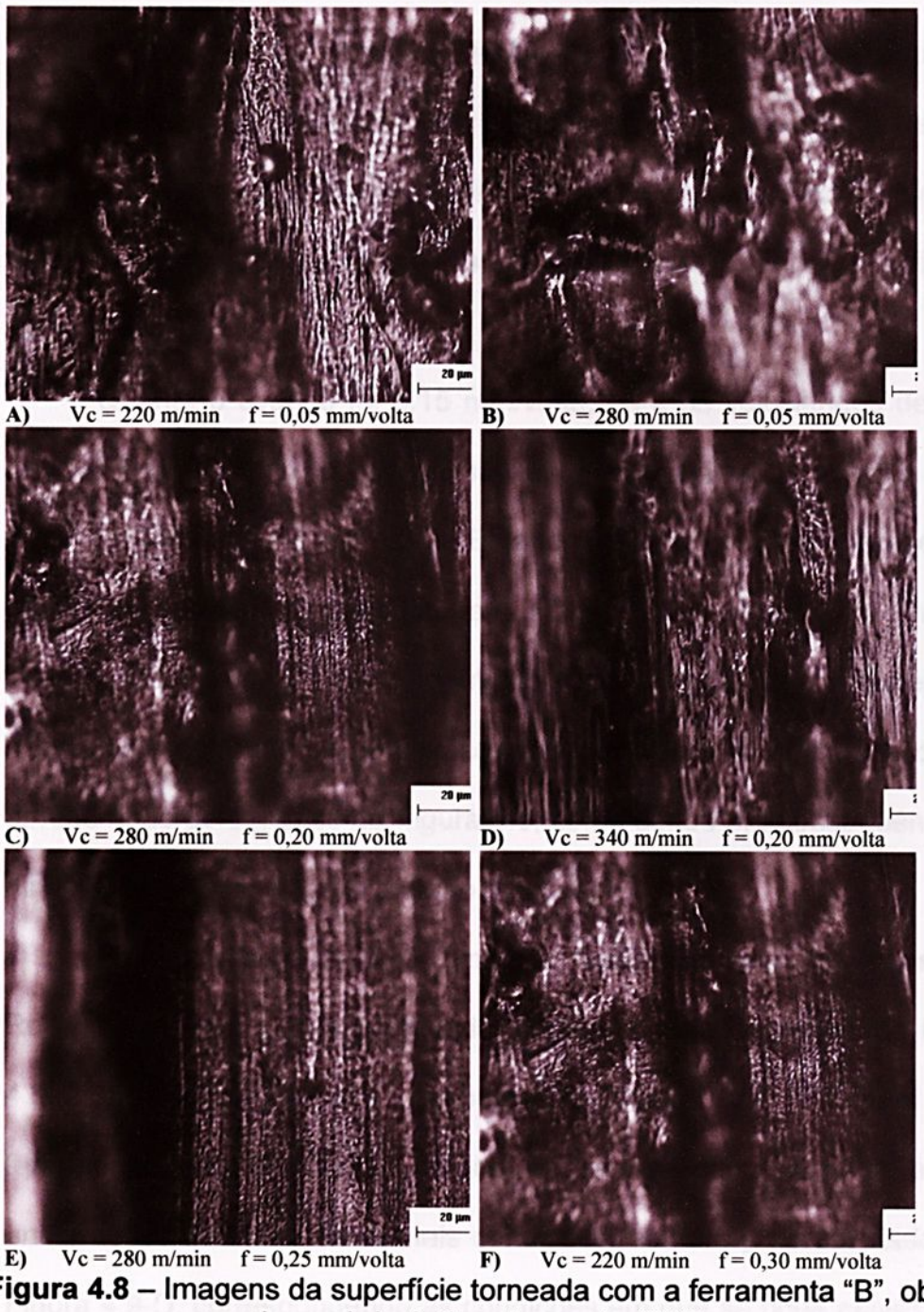


Figura 4.8 – Imagens da superfície torneada com a ferramenta "B", obtidas por microscópio óptico. Aumento 1000 x.

4.2.3 Estudo do cavaco

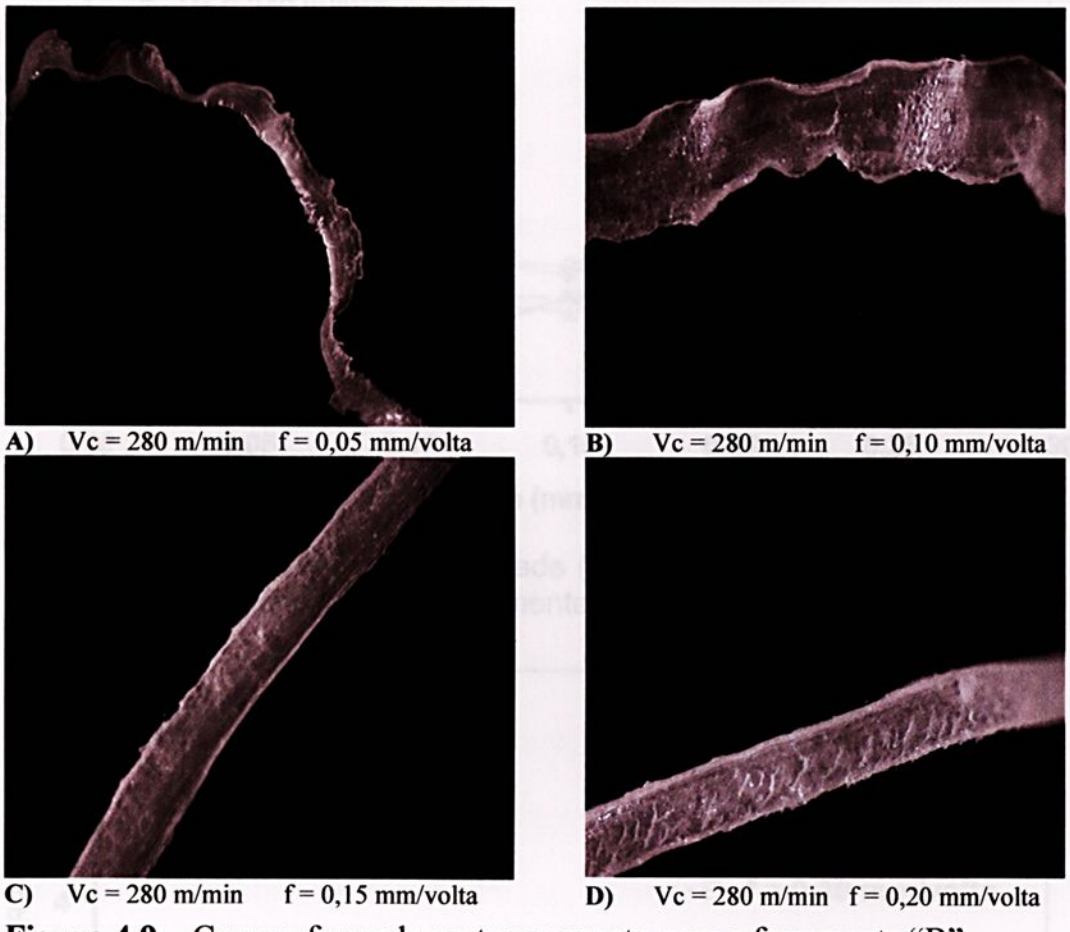
A Figura 4.9 apresenta o cavaco do tipo contínuo formado no torneamento com a ferramenta "B". Pode-se observar que, o cavaco formado quando os avanços foram 0,05; 0,10 e 0,25 mm/volta, apresentam irregularidades nas faces laterais, provavelmente, em conseqüência do processo de adesão. Estando de acordo com a hipótese de que, nesta faixa de avanço, a adesão do cavaco tenha ocorrido de forma mais intensa.

Quanto o avanço foi 0,15 mm/volta, para as velocidades de corte de 280 e 340 m/min, o cavaco não apresenta sinais de adesão, como pode ser visto na Figura 4.9-C. Estando de acordo com a imagem da superfície, apresentada pela Figura 4.8-D, que não apresenta os sinais de adesão do material. Pelo resultado apresentado pela imagem da superfície e pela análise do cavaco, pode-se atribuir a diminuição de Ra, apresentado pelo gráfico da Figura 4.5, como sendo em conseqüência da diminuição do processo de adesão do cavaco.

Para o avanço de 0,20 mm/volta, todas as curvas de rugosidade Ra apresentaram queda acentuada, conforme visto no gráfico da Figura 4.5, correspondendo aos melhores resultados de Ra para esta ferramenta. Pela análise do cavaco, observa-se que sua forma é mais uniforme do que para as demais condições, conforme apresentado pela Figura 4.9-D, correspondendo às condições em que se pode observar as marcas de avanço, apresentadas pela figura 4.8-E. Os resultados de Ra,



para o avanço 0,20 mm/volta, podem ser explicados pelas evidências que a adesão do cavaco diminui significativamente e o processo de corte ocorreu com a geometria da ferramenta atuando de maneira normal.



A) Vc = 280 m/min f = 0,05 mm/volta

B) Vc = 280 m/min f = 0,10 mm/volta

C) Vc = 280 m/min f = 0,15 mm/volta

D) Vc = 280 m/min f = 0,20 mm/volta

Figura 4.9 – Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "B".

4.3 Resultados para a Ferramenta "C"

4.3.1 Rugosidade superficial

Os resultados da rugosidade em conseqüência da variação da velocidade de corte e o avanço, utilizando-se a ferramenta "C", são apresentados pelos gráficos da Figura 4.10 e 4.11.

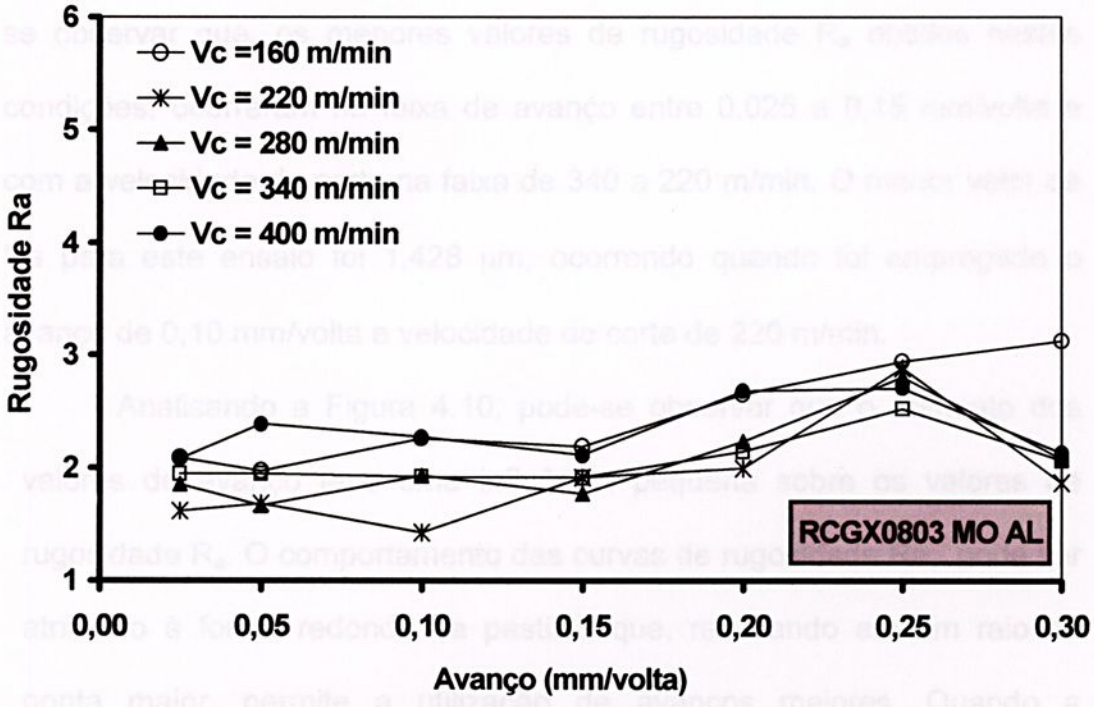


Figura 4.10 - Variação da Rugosidade (Ra) em conseqüência do avanço, utilizando-se a ferramenta "C".

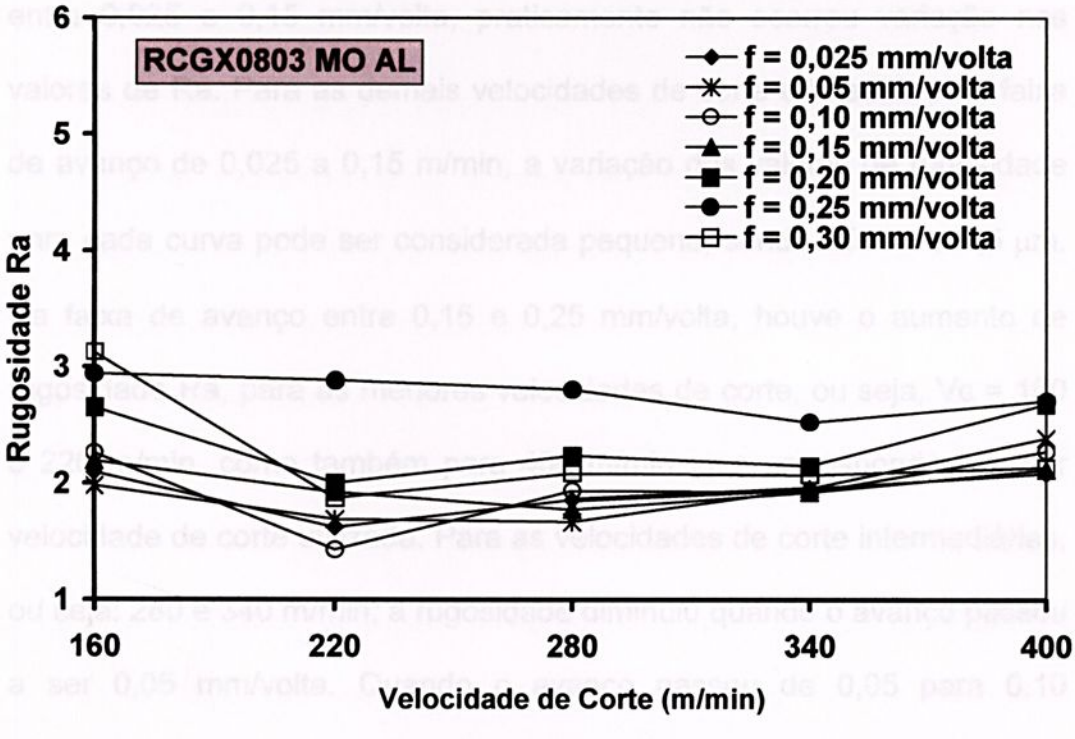


Figura 4.11 - Variação da Rugosidade (Ra) em conseqüência da velocidade de corte, utilizando-se a ferramenta "C".

Analisando-se os gráficos do comportamento da rugosidade, pode-se observar que, os menores valores de rugosidade R_a obtidos nestas condições, ocorreram na faixa de avanço entre 0,025 e 0,15 mm/volta e com a velocidade de corte na faixa de 340 a 220 m/min. O menor valor de Ra para este ensaio foi 1,428 μm, ocorrendo quando foi empregado o avanço de 0,10 mm/volta e velocidade de corte de 220 m/min.

Analisando a Figura 4.10, pode-se observar que o aumento dos valores de avanço teve uma influência pequena sobre os valores de rugosidade R_a. O comportamento das curvas de rugosidade Ra, pode ser atribuído à forma redonda da pastilha que, resultando em um raio de ponta maior, permite a utilização de avanços maiores. Quando a velocidade de corte foi de 340 m/min, na faixa de avanço compreendida entre 0,025 e 0,15 mm/volta, praticamente não ocorreu variação nos valores de Ra. Para as demais velocidades de corte utilizadas e na faixa de avanço de 0,025 a 0,15 m/min, a variação dos valores de rugosidade para cada curva pode ser considerada pequena, sendo inferior a 0,5 μm. Na faixa de avanço entre 0,15 e 0,25 mm/volta, houve o aumento de rugosidade Ra, para as menores velocidades de corte, ou seja, Vc = 160 e 220 m/min, como também para 400 m/min, que corresponde a maior velocidade de corte utilizada. Para as velocidades de corte intermediárias, ou seja: 280 e 340 m/min, a rugosidade diminuiu quando o avanço passou a ser 0,05 mm/volta. Quando o avanço passou de 0,05 para 0,10 mm/volta, a rugosidade Ra diminui para as menores velocidades de corte

empregadas, sendo que, para as velocidades de corte intermediárias, a rugosidade aumenta,

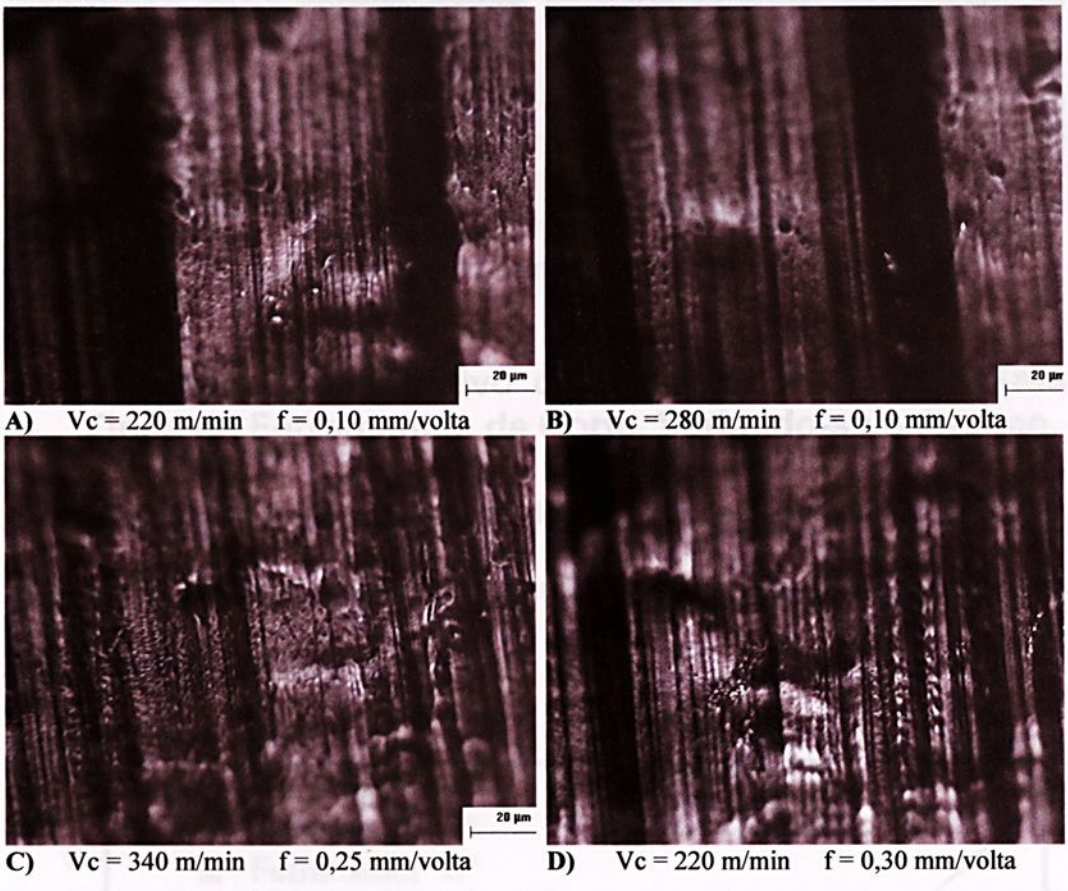
Analisando-se o gráfico da Figura 4.11, pode-se verificar uma tendência comum entre as curvas de Ra, quando se aumentou a velocidade de corte. Entre as velocidades de corte de 160 e 220 m/min, ocorre a redução dos valores de Ra, que se mantém praticamente constantes entre 220 e 340 m/min, aumentando a partir deste valor. A exceção foi a curva correspondente ao avanço 0,25 mm/volta, que manteve-se praticamente constante para a faixa de velocidade de corte de 160 a 400 m/min, apresentando os valores mais elevados de Ra para este experimento.

4.3.2 Análise da Superfície

Na Figura 4.12, observa-se nas superfícies geradas no torneamento, utilizando-se os avanços de 0,025 a 0,10 mm/volta, que é pequena a presença de fissuras e demais danos na superfície, exceto as marcas de avanço. Nesta condição, as curvas de Ra apresentaram uma boa estabilidade, correspondendo aos valores mais baixos obtidos para esta ferramenta.

Quando se utilizou o avanço 0,25, conforme Figura 4.12-C, a presença de danos na superfície aumenta, correspondendo ao aumento de Ra, apresentado pela Figura 4.6. As marcas de avanço, para esta ferramenta, apresentam um espaçamento maior do que o observado para

as demais ferramentas, devido a um raio de ponta maior, estando de acordo com os resultados obtidos para rugosidade Ra, ou seja, demonstram que o torneamento com a ferramenta "C" foi pouco influenciado pela variação do avanço.



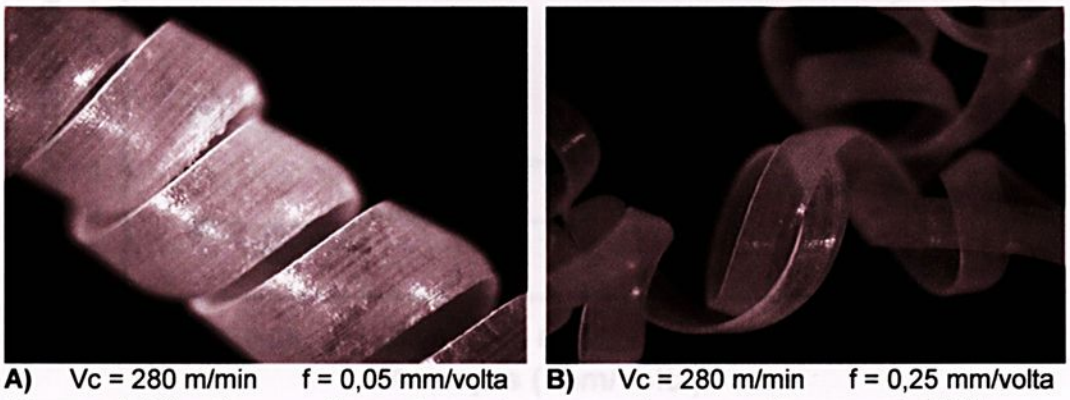
A) Vc = 220 m/min f = 0,10 mm/volta
B) Vc = 280 m/min f = 0,10 mm/volta
C) Vc = 340 m/min f = 0,25 mm/volta
D) Vc = 220 m/min f = 0,30 mm/volta

Figura 4.12 – Imagens da superfície torneada com a ferramenta "C", obtidas por microscópio óptico. Aumento 1000 x.

4.3.3 Estudo do cavaco

Na análise do cavaco formado no torneamento com a ferramenta "C", realizado por um microscópio do tipo estereoscópio, não se observaram diferenças significativas. O cavaco formado foi do tipo contínuo, confirmando o bom desempenho desta ferramenta na usinagem

do UHMW. No entanto, para os avanços acima de 0,25 mm/volta, o cavaco mudou sensivelmente, como apresentado pela Figura 4.13A e B.



A) Vc = 280 m/min f = 0,05 mm/volta **B)** Vc = 280 m/min f = 0,25 mm/volta

Figura 4.13 – Cavaco formado no torneamento com a ferramenta "C".

4.4 Resultado Comparativo da Rugosidade R_a para Três Tipos de Ferramentas de Corte, Variando-se o Avanço.

Os resultados comparativos da rugosidade em conseqüência da variação do avanço, para três ferramentas de corte, são apresentados pelos gráficos da Figura 4.14 e 4.15.

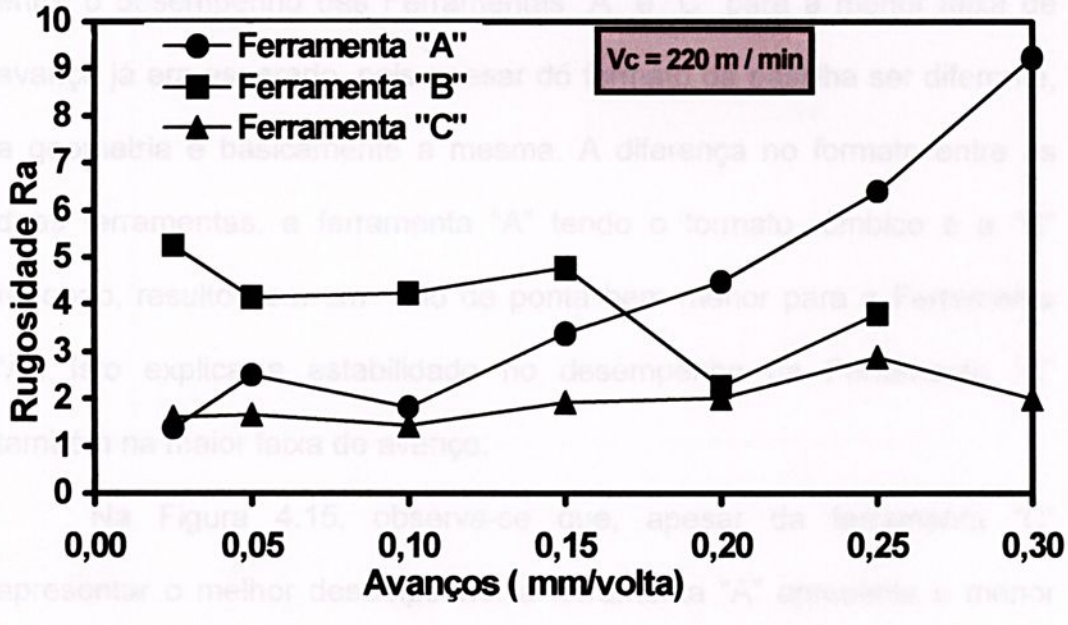


Figura 4.14 – Resultado comparativo entre três geometrias de ferramenta.

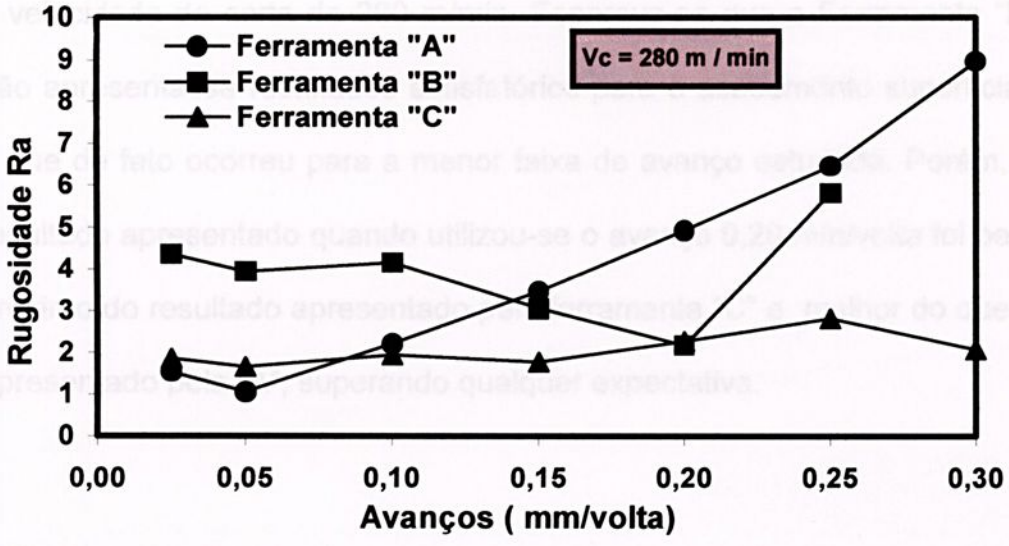


Figura 4.15 – Resultado comparativo entre três geometrias de ferramenta.

Analisando-se os resultados apresentados pelas três geometrias de ferramenta, aumentando-se o avanço, pode-se observar o melhor desempenho da ferramenta "C". O desempenho apresentado pela ferramenta "A" esteve próximo dos resultados apresentados pela "C", para os menores valores de avanço, de 0,025 à 0,15 mm/volta. A semelhança entre o desempenho das Ferramentas "A" e "C" para a menor faixa de avanço já era esperado, pois apesar do formato da pastilha ser diferente, a geometria é basicamente a mesma. A diferença no formato entre as duas ferramentas, a ferramenta "A" tendo o formato rômbico e a "C" redondo, resultou em um raio de ponta bem menor para a Ferramenta "A". Isto explica a estabilidade no desempenho da Ferramenta "C" também na maior faixa de avanço.

Na Figura 4.15, observa-se que, apesar da ferramenta "C" apresentar o melhor desempenho, a ferramenta "A" apresenta o menor valor de Ra deste trabalho, quando o avanço utilizado foi 0,05 mm/volta e

a velocidade de corte de 280 m/min. Esperava-se que a Ferramenta "B" não apresentasse resultados satisfatórios para o acabamento superficial, o que de fato ocorreu para a menor faixa de avanço estudada. Porém, o resultado apresentado quando utilizou-se o avanço 0,20 mm/volta foi bem próximo do resultado apresentado pela ferramenta "C" e melhor do que o apresentado pela "A", superando qualquer expectativa.

4.5 Resultado Comparativo da Rugosidade R_a para Três Tipos de Ferramentas de Corte, Variando-se a Velocidade de Corte.

Os resultados comparativos da rugosidade em conseqüência da variação da velocidade de corte, para as três ferramentas de corte, são apresentados pelos gráficos da Figura 4.14 e 4.15.

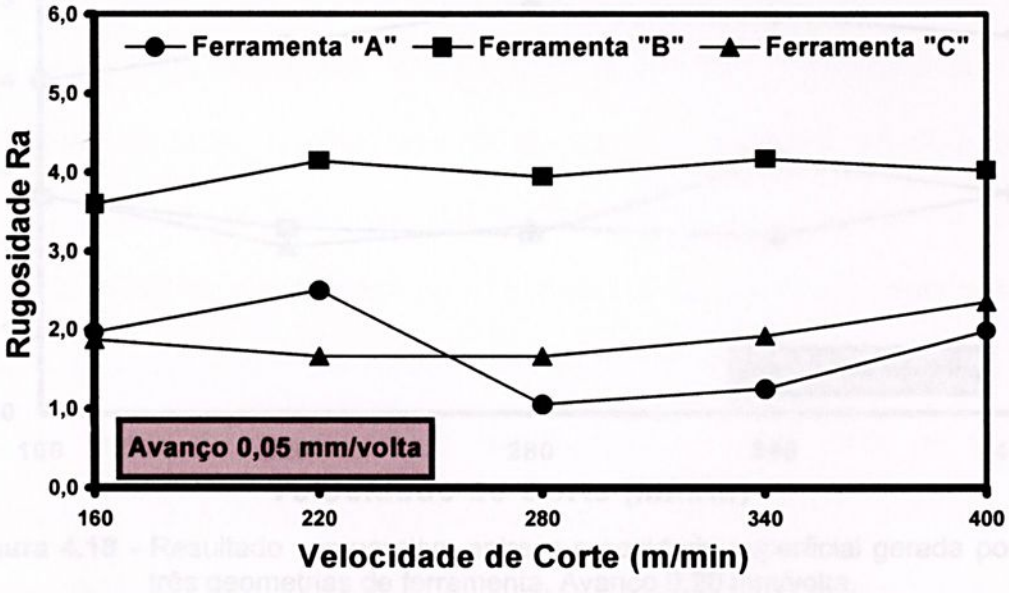


Figura 4.16 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometrias de ferramenta, Avanço 0,05 mm/volta.

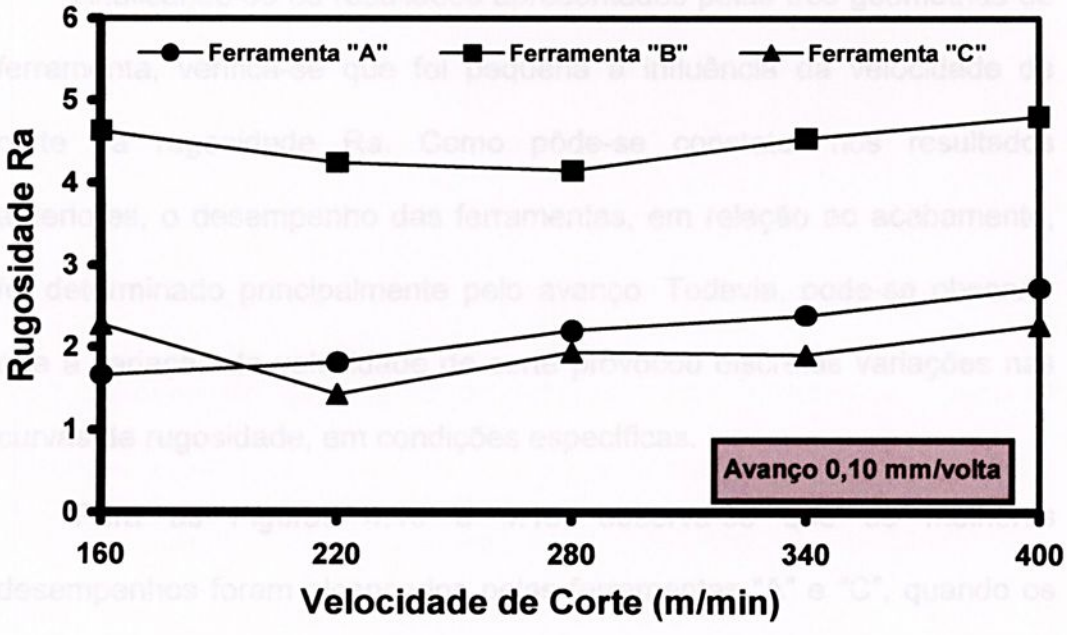


Figura 4.17 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometrias de ferramenta, Avanço 0,10 mm/volta.

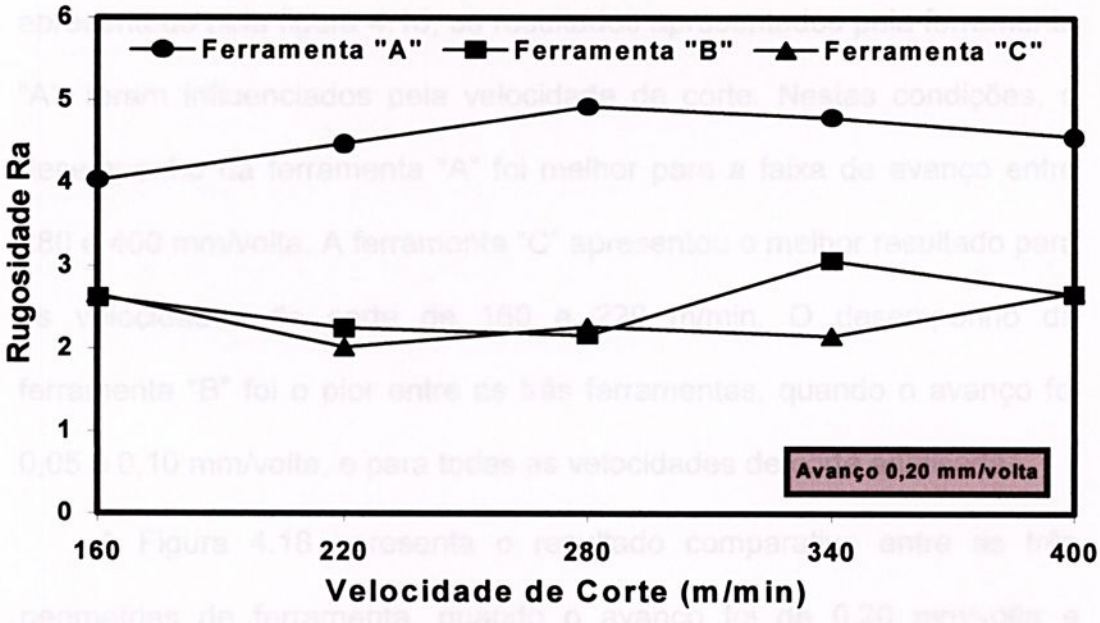


Figura 4.18 - Resultado comparativo entre a rugosidade superficial gerada por três geometrias de ferramenta, Avanço 0,20 mm/volta.

Analisando-se os resultados apresentados pelas três geometrias de ferramenta, verifica-se que foi pequena a influência da velocidade de corte na rugosidade Ra. Como pôde-se constatar nos resultados anteriores, o desempenho das ferramentas, em relação ao acabamento, foi determinado principalmente pelo avanço. Todavia, pode-se observar que a variação da velocidade de corte provocou discretas variações nas curvas de rugosidade, em condições específicas.

Para as Figuras 4.15 e 4.16, observa-se que os melhores desempenhos foram alcançados pelas ferramentas "A" e "C", quando os avanços foram 0,05 e 0,10 mm/volta. Pela figura 4.17, os desempenhos das duas ferramentas é equivalente, sendo pouco influenciado pelo aumento da velocidade de corte. Quando o avanço foi de 0,05 mm/volta, apresentado pela figura 4.16, os resultados apresentados pela ferramenta "A", foram influenciados pela velocidade de corte. Nestas condições, o desempenho da ferramenta "A" foi melhor para a faixa de avanço entre 280 e 400 mm/volta. A ferramenta "C" apresentou o melhor resultado para as velocidades de corte de 160 e 220 m/min. O desempenho da ferramenta "B" foi o pior entre as três ferramentas, quando o avanço foi 0,05 e 0,10 mm/volta, e para todas as velocidades de corte analisadas.

A Figura 4.18 apresenta o resultado comparativo entre as três geometrias de ferramenta, quando o avanço foi de 0,20 mm/volta e variou-se a velocidade de corte. Nesta condição, pode-se observar que a ferramenta "A" não teve bom desempenho. A ferramenta "B" apresenta

seu melhor desempenho, para as velocidades de corte de 160 a 280 m/min. Nesta faixa de velocidade, os valores de Ra para a ferramenta "B" foram muito próximos dos apresentados pela "C".

4.6 Verificação de Avarias e Desgaste das Ferramentas de Corte

Através da verificação do desgaste das ferramentas, pôde-se confirmar aquilo que tinha sido previsto, o desgaste da ferramenta seria muito pequeno nas condições deste trabalho e, portanto, não influenciariam de forma significativa os resultados de Ra. Dentro da resolução do projetor de perfil utilizado, não se verificou nenhum desgaste do flanco (V_B) para as ferramentas empregadas.

Pela análise visual das ferramentas após a geração das superfícies, utilizando um microscópio estereoscópio, pode-se observar que não ocorreu adesão de material nas superfícies da ferramenta e, aparentemente, não ocorreram avarias nas arestas de corte e na superfície de saída. As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, apresentam as fotos das ferramentas após o término do ensaio de torneamento.

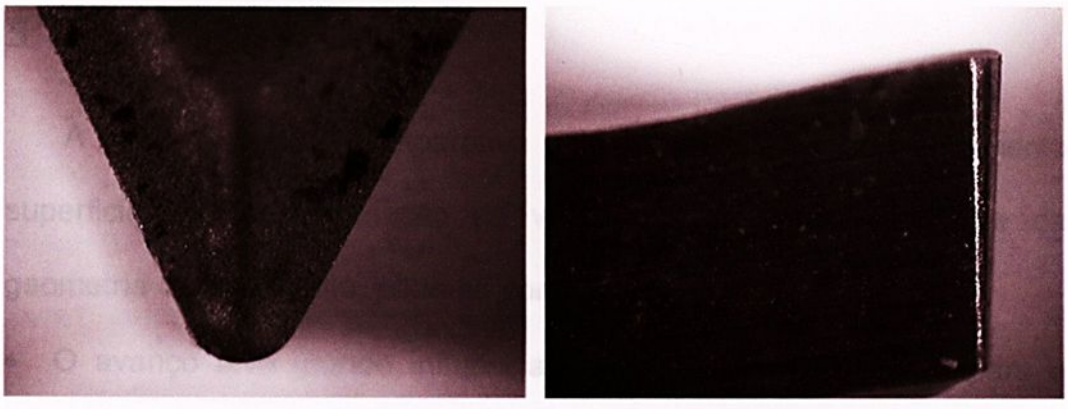


Figura 4.17 – Detalhe da ferramenta "A" após a realização dos ensaios.

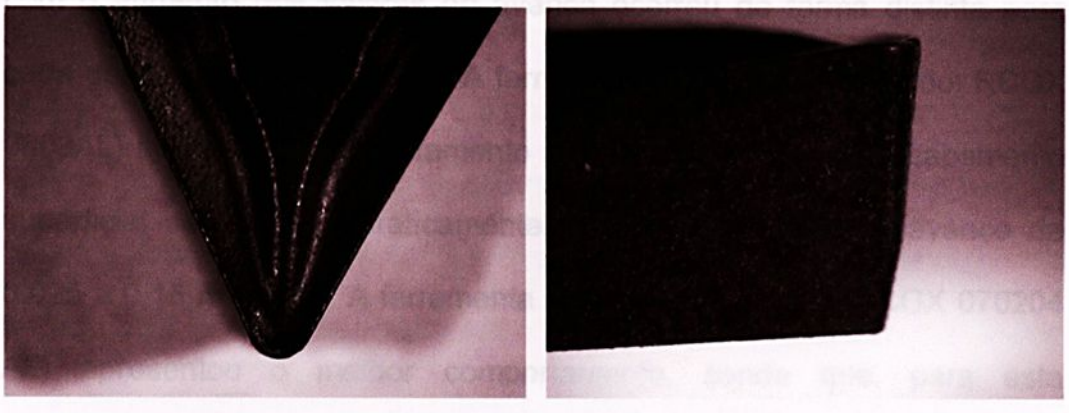


Figura 4.18 – Detalhe das ferramenta "B" após a realização dos ensaios.

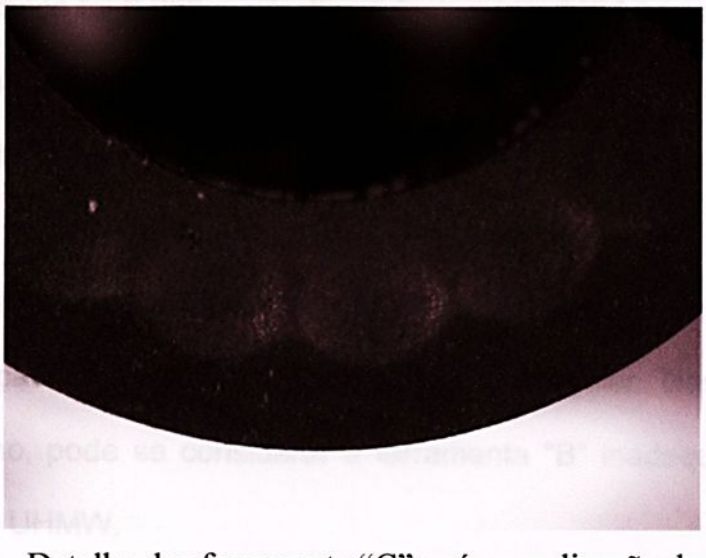


Figura 4.17 – Detalhe das ferramenta "C" após a realização dos ensaios.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa entre os resultados do acabamento superficial mediante variação da velocidade corte, do avanço e da geometria da ferramenta, pôde-se concluir que:

- O avanço teve grande influência no acabamento superficial para o torneamento do material UHMW. O comportamento da rugosidade Ra com o aumento dos valores do avanço ocorreu de forma distinta para cada geometria de ferramenta. A ferramenta "C" (inserto redondo: RCGX 0803AL) apresentou comportamento satisfatório, visto que o acabamento superficial se manteve praticamente constante na faixa de avanço de 0,025 a 0,15 mm/volta. A ferramenta "A" (inserto rômbico: DCGX 070204 AL) apresentou o melhor comportamento, sendo que, para esta ferramenta se obteve o melhor acabamento superficial desta pesquisa, quando o avanço foi 0,050 mm/volta. A ferramenta "A" foi também a mais sensível a variações nas condições de usinagem. A ferramenta "B", inserto rômbico: DCMT 070204 UM, apresentou sérios problemas relacionados com a saída do cavaco. A superfície usinada apresentou danos e sinais de adesão do cavaco. O comportamento da rugosidade com a variação do avanço foi completamente irregular. Nas condições deste trabalho, pode se considerar a ferramenta "B" inadequada para a usinagem do UHMW.
- A velocidade de corte não teve grande influência no acabamento das superfícies geradas no torneamento do material UHMW pelas ferramentas

"B" e "C", a exceção foi a velocidade de corte de 400 m/min para a ferramenta "C" e a velocidade de 160 m/min para a ferramenta "B". O acabamento das superfícies geradas pela ferramenta "A" sofreu maior interferência da velocidade de corte. Pode-se concluir que, para as ferramentas utilizadas neste estudo, as velocidades de corte que resultaram em melhor acabamento superficial foram 220 e 280 m/min.

- Dentre as ferramentas utilizadas neste trabalho, conclui-se que as ferramentas "A" e "C", respectivamente os insertos DCGX 070204AL e RCGX 0803AL , são as mais indicadas para o torneamento do material UHMW quando o objetivo é a obtenção de boa qualidade superficial. A faixa de avanço que para estas ferramentas apresentou melhor resultado foi de 0,025 a 0,100 mm/volta e a velocidade de corte foi de 220 a 280 mm/volta. A ferramenta "B", inserto DCMT 070204UM, foi inadequada para o torneamento nas condições deste trabalho, devido a problemas em relação ao cavaco e valores de rugosidade elevados, porém, para o avanço de 0,20 mm/volta e velocidade de corte de 220 e 280 m/min ocorreram os menores valores de Ra para esta ferramenta.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Tendo em vista que as operações de fresamento são muito utilizadas na produção de componentes em UHMW, é de fundamental importância a realização de um estudo da usinabilidade do UHMW no fresamento utilizando ferramentas de metal duro e aço rápido.
- A realização de novos ensaios variando-se o raio de ponta da ferramenta e aumentado a gama de velocidades de corte.
- Estudo da influência do desgaste da ferramenta e da utilização de fluidos refrigerantes no acabamento de materiais plásticos.



7 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALAUDDIN, M. et al. Plastics and their machining. *Jounal of Material Processing Tecnology.* V.54, p.40 – 46, 1995.

ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M. A.; HASHMI, M. S. J. Computer – aided analysis of a surface-roughness model for end milling. *Journal of Materials Processing Technology,* Irlanda, 1995. N^0 55, p. 123-127.

ALBUQUERQUE, Jorge Artur Cavalcanti. *O plástico na prática.* 1. ed. São Paulo: Editora SAGRA, 1990.

ARMAREGO, E. J. A.; BROWN, R. H. *The machining of metals.* 1. ed. New Jersey: Pretice-Hall, Inc., 1969. 437p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Rugosidade das superfícies,* NBR 6405. Rio de Janeiro, 1988.

BARBOUR, P. S. M.; STONE, M. H., FISHER, J. A study of the wear resistance of three types of clinically applied UHMWPE for total replacement hip prostheses. *Biomaterials,* 13 maio 1999. P. 2101-2106.

BENNETT, J. M. Comparision of techniques for measuring the roughness of optical surfaces. *Optical Engineering,* Califórnia, Maio-Junho 1985. V. 24, n^0 3, p. 380-387.

BLASS, Arno. *Processamento de polímeros.* 3 ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1985.

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A. *Fundamentals of machining and machine tools.* 2 ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 1989. ISBN 0-8247-7852-9.

CALLISTER, W. D. Materials science and engineering, na introduction. 2 edition. Salt Lake City. 1990

CARR, J. W.; FEGER, C. *Ultraprecision machining of polymers. Precision Engineering,* outubro 1993. N^0 4, p. 221-235.

DEGARMO, E. P.,BLACK, J.T., KOHSER, R.A. *Material and Processes in manufacturing.* 8. edition. Prentice-Hall, Inc. 1997. ISBN 0-02-328621-0

CASTRO, E. M. *Estudo da usinabilidade de chapas MDF (Medium Density Fiberboard) para usinagem de desbaste e acabamento.* São Carlos. 2000. 122p. Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais – Universidade de São Paulo.

CASTRO, E. M.; GONÇALVES, M.T.T. Estudo do acabamento superficial em chapas MDF usinadas em processos de fresamento. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 7, São Carlos, 2.000. Anais. São Paulo, LaMEM/EESC/USP

ERIKSEN, E. *Machining of short fibre reiforced thermoplastics.* Aalborg, August 1997. 169p. Ph.D thesis: Aalborg University, Denamark.

FERNANDES, João Cândido. *Metodologia científica.* 1.ed. Bauru: UNESP, 1997. 50p.

FERRARESI, Dino. *Fundamentos da usinagem dos metais.* 7 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1977, 751p.

GRABCHENKO, A. I. et al. Precision cutting of optical polymer components for bioengineering applications. *Journal of Materials Processing Technology,* Grécia, 21 junho 1998. N^0 97, p. 126-131.

GRZESIK, W. A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*, Polônia, outubro 1995. N^0 194, p. 143-148.

JIN, L. Z.; SANDSTRÖM, R. Evaluation of Machinability Data. *Journal of Testing and Evaluation,* Suécia, Estocolmo, Maio 1994. Volume 22, n^0 3, p. 204-211.

KIM, J.; CHOI, I. Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics. *Journal of Materials Processing Technology,* Coréia, 7 novembro 1995. P. 89-98.

KOBAYASHI, A. Ultraprecision Machining of Plastics. New York: McGraw-Hill,1967.

KOBAYASHI, A.; HIRAKAWA, K. Ultraprecision Machining of Plastics, part 1, polymethyl methacrylate. *Polym. Plast. Technol. Eng.,* Japão, 1984. N^0 1, p. 15-25.

LEMASTER, R. L.; BEALL, F. C.. The use on optical profilometer to measure surface roughness in medium density fiberboard. *Forest Products Journal.* 1996, v46, n 11-12

MACROGALLERIA. Department of Polymer Science. University of Souther Mississippi, 1997. Disponível em: <http://www.psrc.usm.edu/macrog/ziegler.htm. Acesso em : 20 maio 2000.

MALDONALDO, M. R.*Trabajabilidad de tableros.* Maderas Cs & Tec. Chile,1998 v1, n1,

MANO, Eloisa Biasotto. *Polímeros como materiais de engenharia.* 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher.Ltda, 1996.

OLLEY, R. H., *The story of polyethylene*. University of polymer physics centre reading, England, 16Th june 1999. Disponível em:
<http://www.americanplastics.org/polyethylene.htm> Acesso em: 16 maio. 2000.

OSTWALD, P. F., MUÑOZ, J. *Manufaturing process and systems.* 9. edition, p.166-168, 1996. ISBN 0-471-04741-4

POLIADELDEN. *Boletim técnico 6.* São Paulo, 1998.

SILVA, E. J, *Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3.* Bauru, 2000. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP.

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles.* Nova Iorque : Oxford Science Publications, 1984.

SONG, J. et al. Effects of Machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding. *Wear,* Charlton, EUA, 1999. p. 716-723.

STEMMER, C. E. *Ferramenta de corte I.* 4 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995



TRIBOULOT, P.; KREMER, P.; MARTIN, P., 1991. *Planning of Norway Spruce With Very Ring Width.* Holz als Roh und Werkstoff, v49, p 181-184.

VAN NISER, Removing the heat from cutting tool, *Plastic Machining and Fabrication,* Vance Publishing, Lincolnshire, setembro, 1997

VAN NISER, Desing of plastic cutting tool, *Plastic Machining and Fabrication,* Vance Publishing, Lincolnshire, janeiro, 1999

WEARMOUTH, W. G. Notes on the Machining of Plastics. *Journal of Scientific Instruments,* London, Junho 1946. V. 23, n^0 6, p.109-113.

WANG, Y. Q.; LI, J. Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene. *Materials Science and Engineering,* China, 1999. P. 155-160.

WENNERBERG, A. et al. Characterizing three-dimensional topography of engineering and biomaterial surfaces by confocal laser scanning and stylus techniques. *Med. Eng. Phys.,* Suécia, outubro 1996. V. 18, p. 548-556.

YAN, D. et al. Surface Roughness Measurements in Finish Turning. Canadá, 1996. P. 91-100.

ANEXO 1

Características e Propriedades do UHMW

Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular PE-UAPM UTEC® 6540

PROPRIEDADES FÍSICAS	MÉTODOS ASTM	UNIDADES	VALORES TÍPICOS
Peso Molecular Viscosimétrico		g/mol	>6.0 x 10^6
Densidade (no moldado)	D-1505	g/cm³	>0,93
Densidade Aparente	D-1895	g/cm³	>0,4
Tamanho médio de partícula d_{50}		µm	120 - 220
PROPRIEDADES MECÂNICAS			
Resistência à tração no escoamento	D-1708	MPa	25
Resistência à tração na ruptura	D-1708	MPa	35
Alongamento final	D-1708	%	>300
Resistência ao impacto IZOD	D-256	J/m	não quebra
Resistência ao impacto Charpy*		KJ/m²	>80
Dureza Shore	D-2240	Shore D	63
Resistência à abrasão		mg/1000 ciclos	23
Desgaste por abrasão em lama de areia		índice de abrasão (aço 1020 = 100)	25
Coeficiente de fricção	D-1894		
Estático µe		-	0,32
Dinâmico µk		-	0,26
PROPRIEDADES TÉRMICAS			
Temperatura de fusão	D-3418	°C	133
Temperatura de amolecimento VICAT	D-1525	°C	128
Temperatura de deflexão térmica	D-648	°C	
0,45 MN/m²			79
1,81 MN/m²			48
Condutividade térmica a 23°C	D-177	W/m°K	0,4
Coeficiente de dilatação linear	D-696	10^{-4}/°C	1,5
Calor específico (23°C)	D-150	cal/g°C	0,48
Entalpia específca de fusão		cal/g	34
PROPRIEDADES ELÉTRICAS			
Resistência volumétrica	D-257	ohm-cm	>10^{16}
Resistência superficial	D-257	ohm	>10^{13}
Resistência dielétrica	D-149	kV/cm	900
Constante dielétrica (10^6 cps)	D-150	-	2,3
Tangente dielétrica	D-150	-	2,3 x 10^{-4}
OUTRAS PROPRIEDADES			
Absorção de água	D-570	%	0,01

*Determinado com corpos de prova de duplo entalhe de 15° em ambos os lados de acordo com a norma ISO / FDIS 11542-2

UTEC® 6540

ULTRA ALTO PESO MOLECULAR POLIETILENO

POLIALDEN

POLIALDEN PETROQUÍMICA S.A.
Rua Geraldo Flausino Gomes, 61 - 2º andar - Brooklin Novo - São Paulo - SP - CEP 04575-060
Telefone: (++5511) 5505-3166 - Fax: (++5511) 5505-2595

JUN/99

ANEXO 2

Parâmetros utilizados nos ensaio e resultados médios para a ferramenta "A"

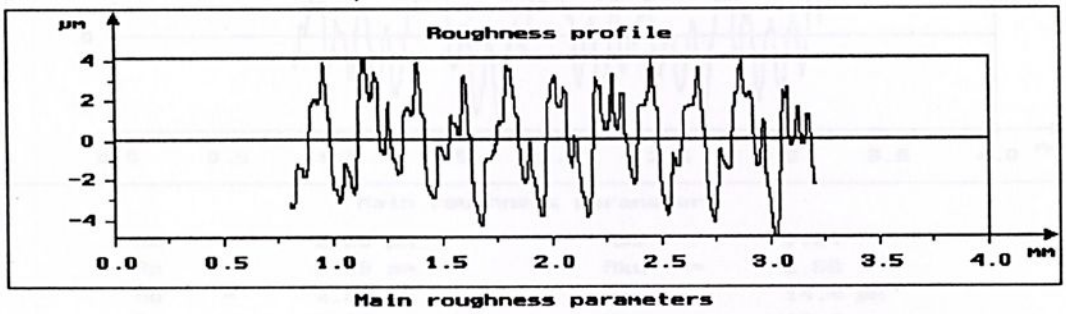
AMOSTRA	AVANÇO	Ra	Rt	Vc	Ra`
A111	0,025	1,620	9,785	400	0,090
A121	0,025	1,380	8,478	340	0,090
A131	0,025	1,520	9,383	280	0,090
A141	0,025	1,368	10,303	220	0,090
A151	0,025	1,357	9,737	160	0,090
A211	0,050	1,990	10,237	400	0,350
A221	0,050	1,245	7,468	340	0,350
A231	0,050	1,063	7,020	280	0,350
A241	0,050	2,495	14,250	220	0,350
A251	0,050	1,970	10,800	160	0,350
A311	0,100	2,718	14,625	400	1,400
A321	0,100	2,380	11,950	340	1,400
A331	0,100	2,210	10,715	280,	1,400
A341	0,100	1,818	10,145	220	1,400
A351	0,100	1,660	10,295	160	1,400
A311	0,150	3,820	16,875	400	3,200
A421	0,150	3,823	16,900	340	3,200
A431	0,150	3,465	14,425	280	3,200
A441	0,150	3,378	16,575	220	3,200
A451	0,150	3,080	15,400	160	3,200
A511	0,200	4,558	18,100	400	5,600
A521	0,200	4,790	19,225	340	5,600
A531	0,200	4,915	18,150	280	5,600
A541	0,200	4,468	16,775	220	5,600
A551	0,200	4,025	16,400	160	5,600
A611	0,250	6,083	25,275	400	8,700
A621	0,250	6,360	25,025	340	8,700
A631	0,250	6,440	26,200	280	8,700
A641	0,250	6,398	24,700	220	8,700
A651	0,250	6,108	24,175	160	8,700
A611	0,300	6,543	28,000	400	12,600
A721	0,300	7,223	29,550	340	12,600
A731	0,300	8,957	37,600	280	12,600
A741	0,300	9,243	37,100	220	12,600
A751	0,300	9,238	37,375	160	12,600

unesp

ANEXO 3

Perfil da Superfície Gerada com a Ferramenta "A"

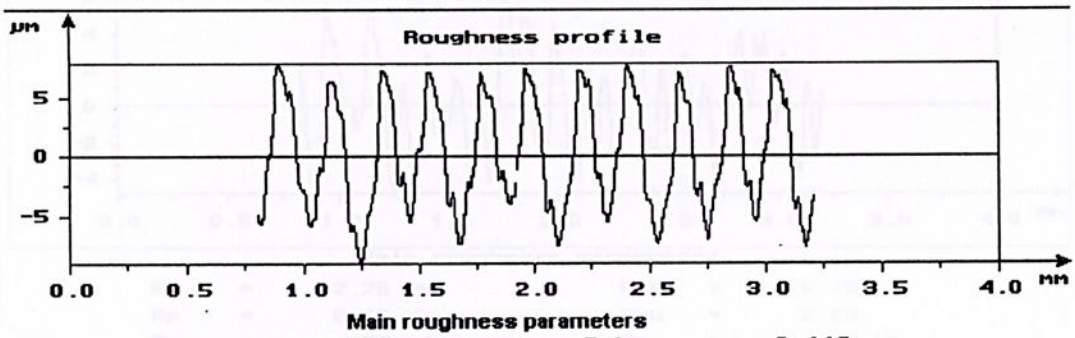
TORNEAMENTO "A" Vc = 400 f = 0,025 A111



Main roughness parameters

Ra	=	1.87 µm	Rsk	=	-0.133
Rp	=	4.17 µm	Rku	=	2.01
Rq	=	2.18 µm	Rz	=	9.01 µm
Rv	=	4.84 µm	Ry	=	9.01 µm
Rt	=	9.01 µm	RSm	=	142 µm
RS	=	68.9 µm			

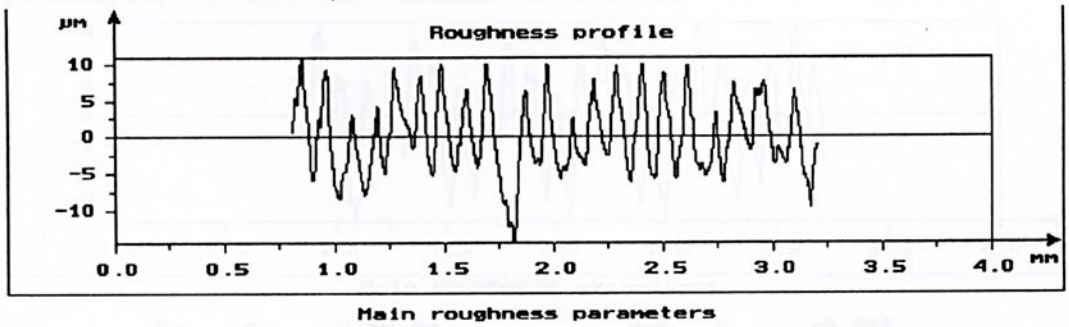
FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,025 A121



Main roughness parameters

Ra	=	4.15 µm	Rsk	=	0.116
Rp	=	7.84 µm	Rku	=	1.68
Rq	=	4.68 µm	Rz	=	16.9 µm
Rv	=	9.04 µm	Ry	=	16.9 µm
Rt	=	16.9 µm	RSm	=	213 µm
RS	=	72.3 µm			

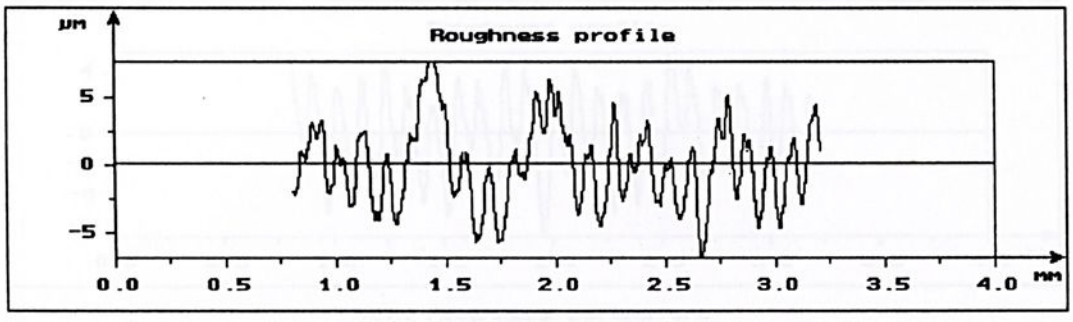
FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,025 A131



Main roughness parameters

Ra	=	4.11 µm	Rsk	=	0.00463
Rp	=	10.9 µm	Rku	=	2.54
Rq	=	4.94 µm	Rz	=	25.4 µm
Rv	=	14.5 µm	Ry	=	25.4 µm
Rt	=	25.4 µm	RSm	=	114 µm
RS	=	73.2 µm			

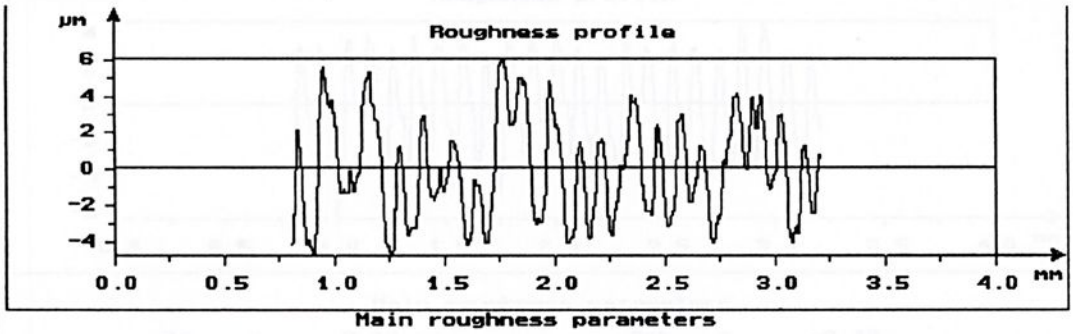
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,025 A141



Main roughness parameters

Ra	=	2.38 µm	Rsk	=	0.24
Rp	=	7.59 µm	Rku	=	2.68
Rq	=	2.96 µm	Rz	=	14.4 µm
Rv	=	6.82 µm	Ry	=	14.4 µm
Rt	=	14.4 µm	RSm	=	128 µm
RS	=	57.8 µm			

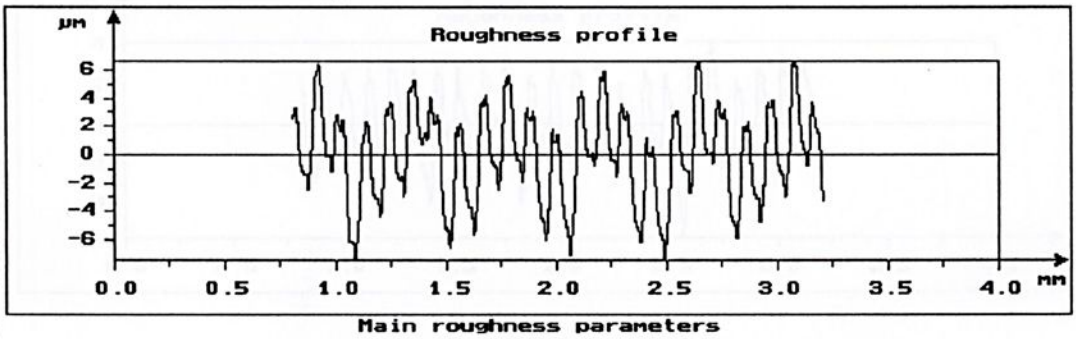
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,025 A151



Main roughness parameters

Ra	=	2.26 µm	Rsk	=	0.261
Rp	=	6.13 µm	Rku	=	2.09
Rq	=	2.67 µm	Rz	=	10.8 µm
Rv	=	4.64 µm	Ry	=	10.8 µm
Rt	=	10.8 µm	RSm	=	132 µm
RS	=	71.7 µm			

FERRAMENTA "A" Vc = 400 f = 0,05 A211

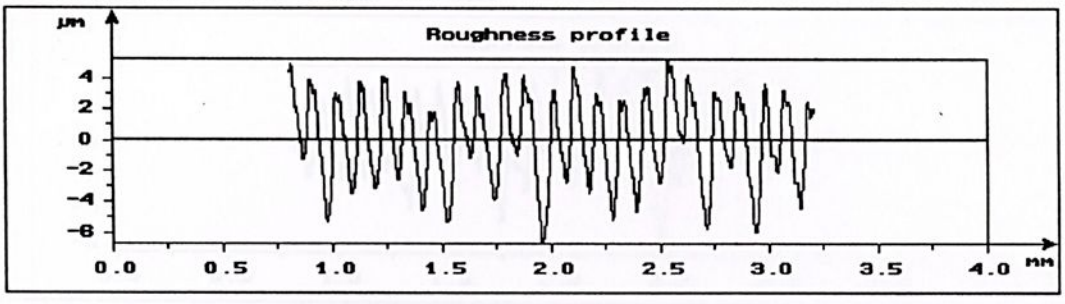


Main roughness parameters

Ra	=	2.66 µm	Rsk	=	-0.222
Rp	=	6.69 µm	Rku	=	2.32
Rq	=	3.24 µm	Rz	=	14.1 µm
Rv	=	7.46 µm	Ry	=	14.1 µm
Rt	=	14.1 µm	RSm	=	102 µm
RS	=	52.8 µm			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

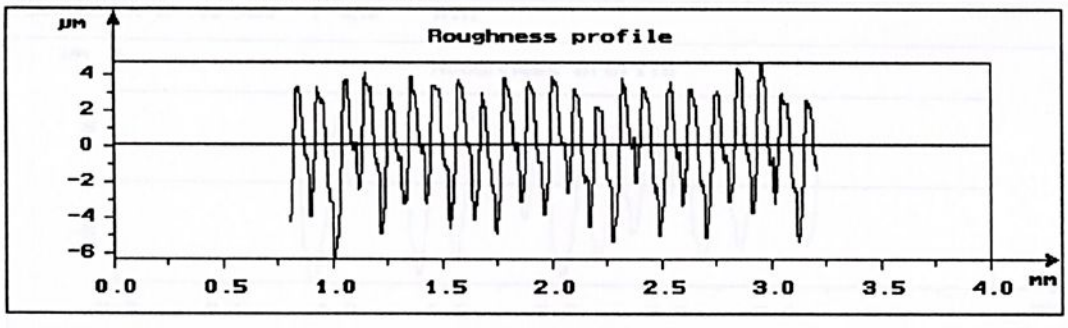
FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,05 A221



Main roughness parameters

Ra	=	2.29 µm	Rsk	=	-0.265
Rp	=	5.31 µm	Rku	=	2.14
Rq	=	2.69 µm	Rz	=	12 µm
Rv	=	6.7 µm	Ry	=	12 µm
Rt	=	12 µm	RSm	=	107 µm
RS	=	61.1 µm			

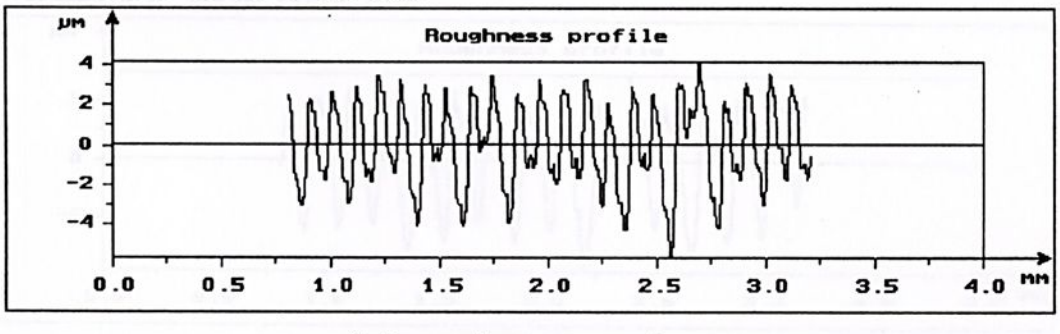
FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,05 A231



Main roughness parameters

Ra	=	2.16 µm	Rsk	=	-0.19
Rp	=	4.71 µm	Rku	=	1.98
Rq	=	2.54 µm	Rz	=	11.1 µm
Rv	=	6.34 µm	Ry	=	11.1 µm
Rt	=	11.1 µm	RSm	=	93.1 µm
RS	=	63.9 µm			

FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,05 A241

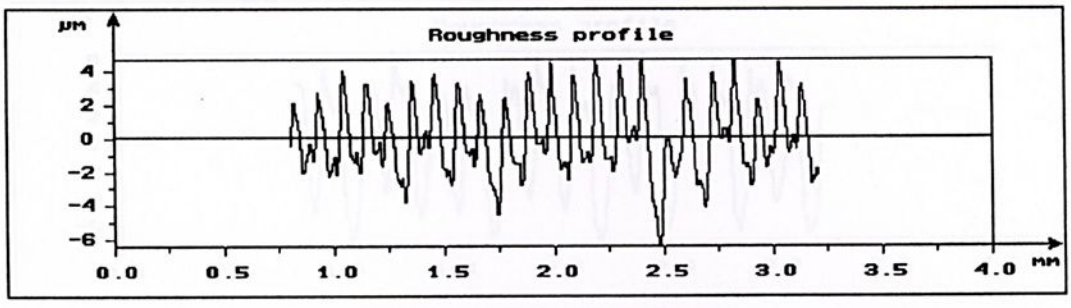


Main roughness parameters

Ra	=	1.78 µm	Rsk	=	-0.195
Rp	=	4.17 µm	Rku	=	2.13
Rq	=	2.08 µm	Rz	=	9.84 µm
Rv	=	5.67 µm	Ry	=	9.84 µm
Rt	=	9.84 µm	RSm	=	110 µm
RS	=	65.9 µm			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

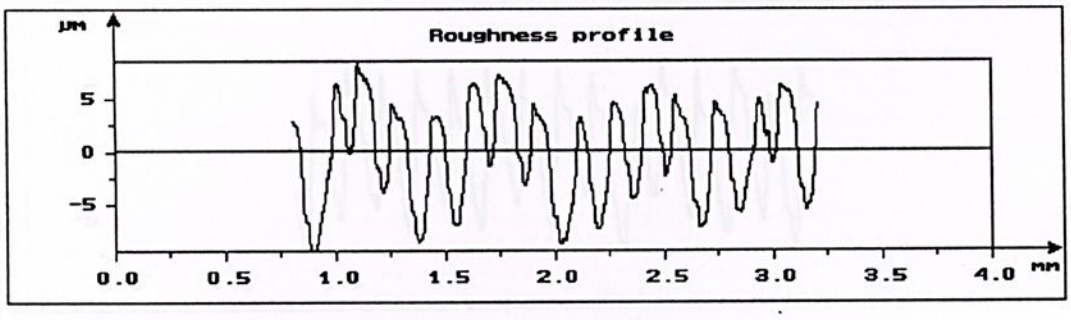
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,05 A251



Main roughness parameters

Ra	=	1.71 µm	Rsk	=	0.0414
Rp	=	4.75 µm	Rku	=	2.71
Rq	=	2.1 µm	Rz	=	11.1 µm
Rv	=	6.39 µm	Ry	=	11.1 µm
Rt	=	11.1 µm	RSm	=	96.1 µm
RS	=	59.8 µm			

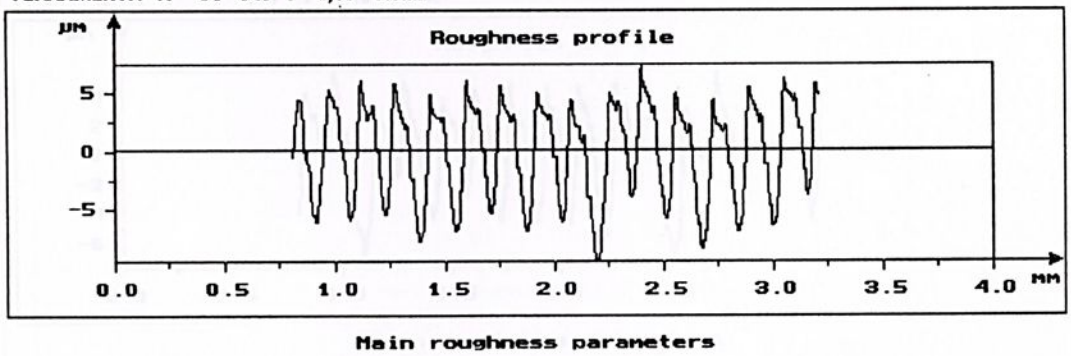
FERRAMENTA "A" Vc = 480 f = 0,10 A312



Main roughness parameters

Ra	=	3.91 µm	Rsk	=	-0.223
Rp	=	8.66 µm	Rku	=	1.93
Rq	=	4.53 µm	Rz	=	18 µm
Rv	=	9.36 µm	Ry	=	18 µm
Rt	=	18 µm	RSm	=	159 µm
RS	=	103 µm			

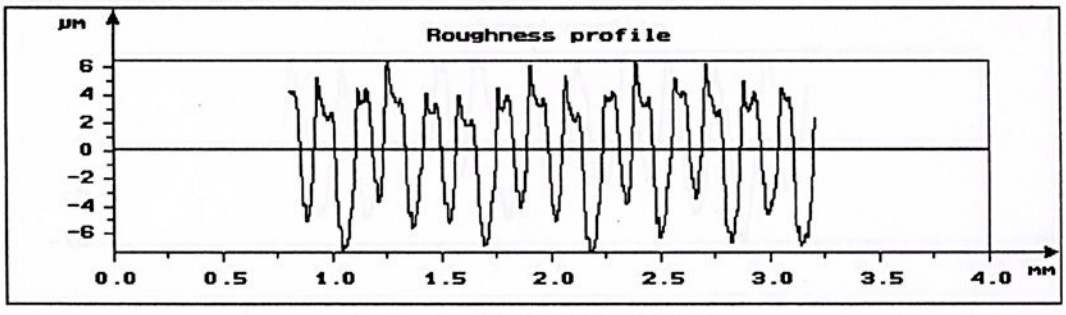
FERRAMENTA "A" Vc= 340 f = 0,10 A322



Main roughness parameters

Ra	=	3.48 µm	Rsk	=	-0.408
Rp	=	7.43 µm	Rku	=	1.94
Rq	=	3.98 µm	Rz	=	16.8 µm
Rv	=	9.39 µm	Ry	=	16.8 µm
Rt	=	16.8 µm	RSm	=	158 µm
RS	=	69.6 µm			

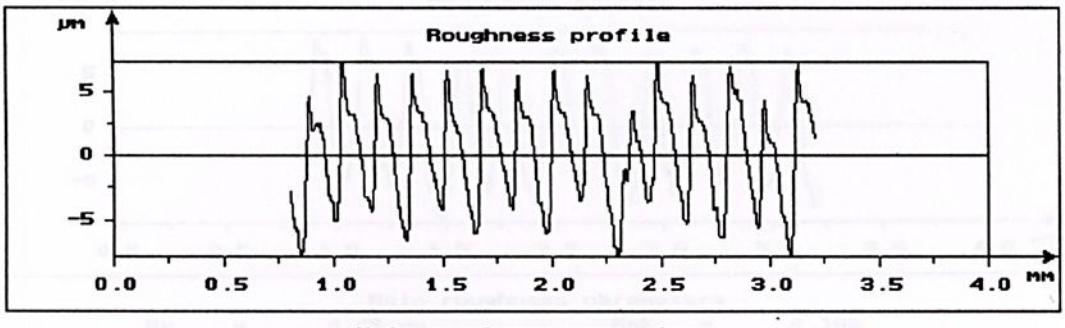
FERRAMENTA "A" Vc=280 f=0,10 A332



Main roughness parameters

Ra	=	3.43 µm	Rsk	=	-0.309
Rp	=	8.54 µm	Rku	=	1.67
Rq	=	3.79 µm	Rz	=	13.9 µm
Rv	=	7.33 µm	Ry	=	13.9 µm
Rt	=	13.9 µm	RSm	=	160 µm
RS	=	68.8 µm			

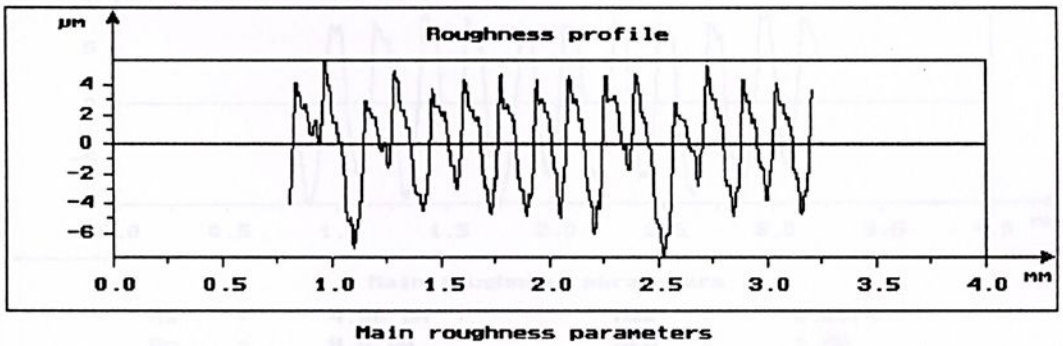
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,10 A342



Main roughness parameters

Ra	=	3.38 µm	Rsk	=	-0.197
Rp	=	7.37 µm	Rku	=	1.88
Rq	=	3.86 µm	Rz	=	15.2 µm
Rv	=	7.81 µm	Ry	=	15.2 µm
Rt	=	15.2 µm	RSm	=	160 µm
RS	=	96.9 µm			

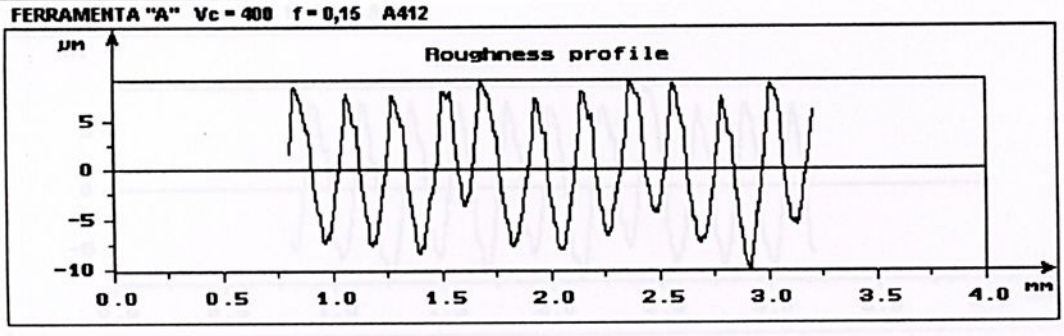
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,10 A352



Main roughness parameters

Ra	=	2.51 µm	Rsk	=	-0.434
Rp	=	5.72 µm	Rku	=	2.21
Rq	=	2.93 µm	Rz	=	13.3 µm
Rv	=	7.57 µm	Ry	=	13.3 µm
Rt	=	13.3 µm	RSm	=	158 µm
RS	=	70.7 µm			

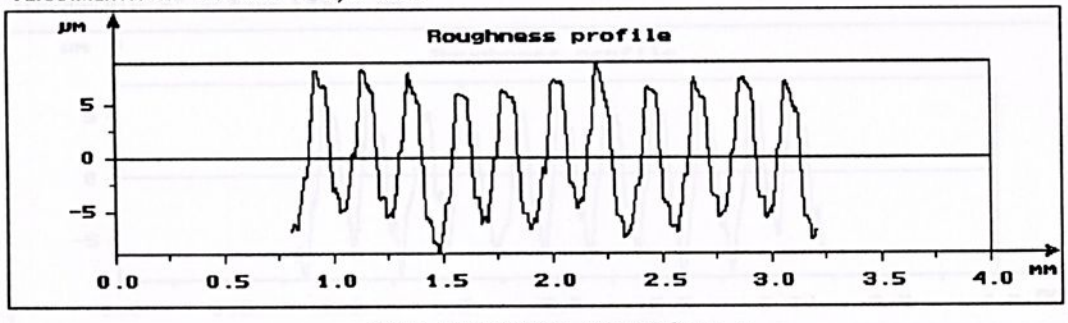
FERRAMENTA "A" Vc = 400 f = 0,15 A412



Main roughness parameters

Ra	=	4.64 µm	Rsk	=	0.0844
Rp	=	9.15 µm	Rku	=	1.7
Rq	=	5.26 µm	Rz	=	19.2 µm
Rv	=	10.1 µm	Ry	=	19.2 µm
Rt	=	19.2 µm	RSm	=	215 µm
RS	=	104 µm			

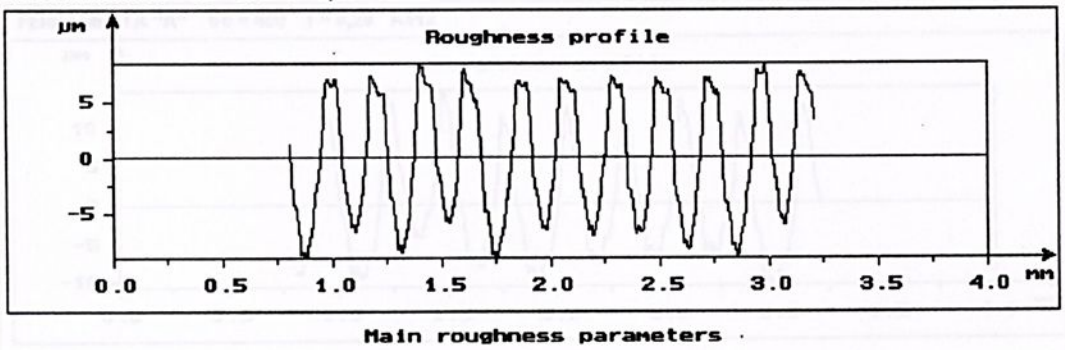
FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,15 A422



Main roughness parameters

Ra	=	4.48 µm	Rsk	=	0.165
Rp	=	8.87 µm	Rku	=	1.56
Rq	=	4.98 µm	Rz	=	17.7 µm
Rv	=	8.87 µm	Ry	=	17.7 µm
Rt	=	17.7 µm	RSm	=	214 µm
RS	=	78.7 µm			

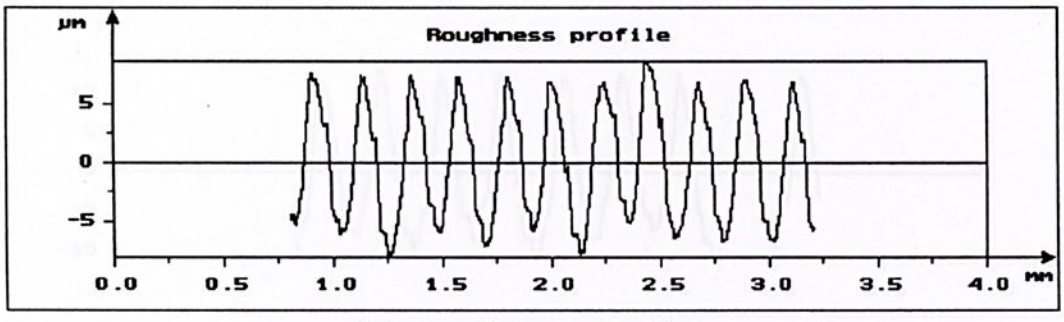
FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,15 A432



Main roughness parameters

Ra	=	4.98 µm	Rsk	=	0.0574
Rp	=	8.6 µm	Rku	=	1.49
Rq	=	5.49 µm	Rz	=	17.6 µm
Rv	=	9.02 µm	Ry	=	17.6 µm
Rt	=	17.6 µm	RSm	=	209 µm
RS	=	70.5 µm			

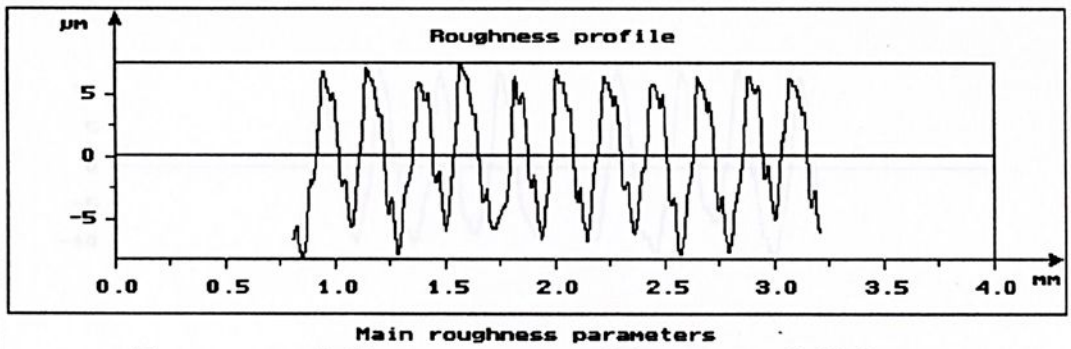
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,15 A441



Main roughness parameters

Ra	=	4.36 µm	Rsk	=	0.0699
Rp	=	8.63 µm	Rku	=	1.54
Rq	=	4.81 µm	Rz	=	16.6 µm
Rv	=	7.95 µm	Ry	=	16.6 µm
Rt	=	16.6 µm	RSm	=	220 µm
RS	=	91.4 µm			

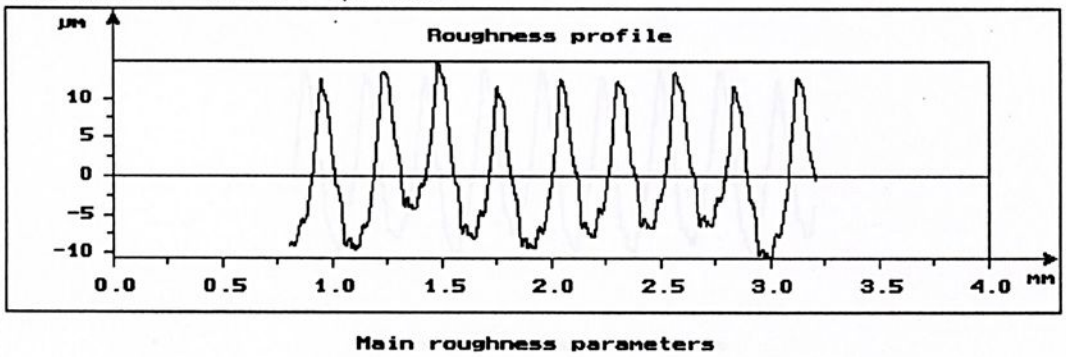
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,15 A462



Main roughness parameters

Ra	=	3.98 µm	Rsk	=	0.0354
Rp	=	7.64 µm	Rku	=	1.64
Rq	=	4.45 µm	Rz	=	15.9 µm
Rv	=	8.22 µm	Ry	=	15.9 µm
Rt	=	15.9 µm	RSm	=	212 µm
RS	=	72 µm			

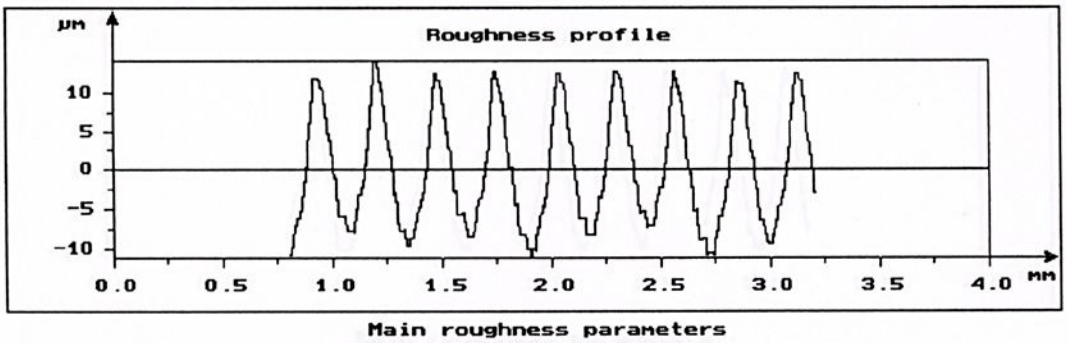
FERRAMENTA "A" Vc = 400 f = 0,20 A512



Main roughness parameters

Ra	=	6.08 µm	Rsk	=	0.44
Rp	=	14.8 µm	Rku	=	1.92
Rq	=	7.07 µm	Rz	=	25.4 µm
Rv	=	10.6 µm	Ry	=	25.4 µm
Rt	=	25.4 µm	RSm	=	272 µm
RS	=	70.1 µm			

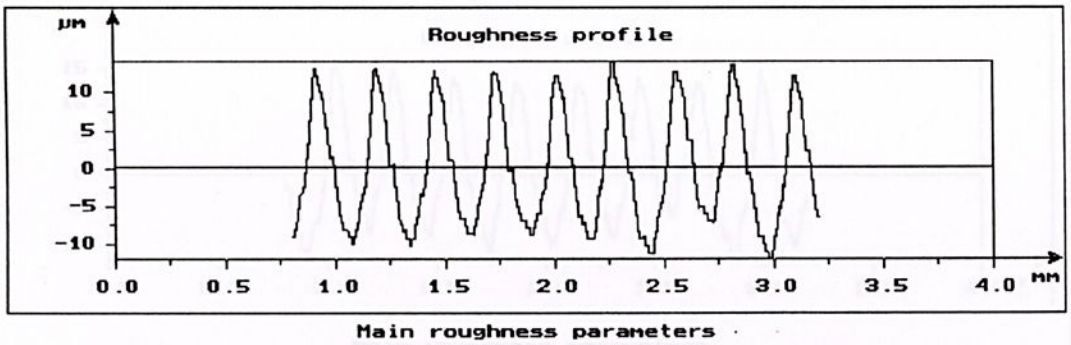
FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,20 A522



Main roughness parameters

Ra	=	6.43 µm	Rsk	=	0.346
Rp	=	14.3 µm	Rku	=	1.77
Rq	=	7.33 µm	Rz	=	25.5 µm
Rv	=	11.3 µm	Ry	=	25.5 µm
Rt	=	25.5 µm	RSm	=	274 µm
RS	=	238 µm			

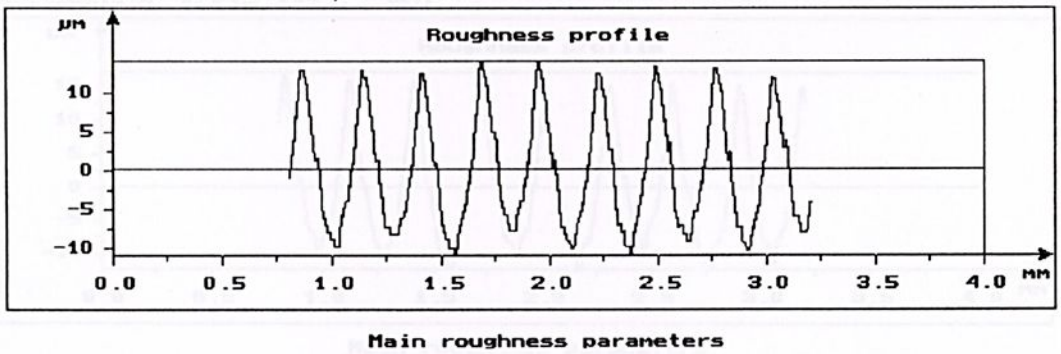
FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,20 A533



Main roughness parameters

Ra	=	6.44 µm	Rsk	=	0.343
Rp	=	14.1 µm	Rku	=	1.81
Rq	=	7.44 µm	Rz	=	25.9 µm
Rv	=	11.8 µm	Ry	=	25.9 µm
Rt	=	25.9 µm	RSm	=	274 µm
RS	=	238 µm			

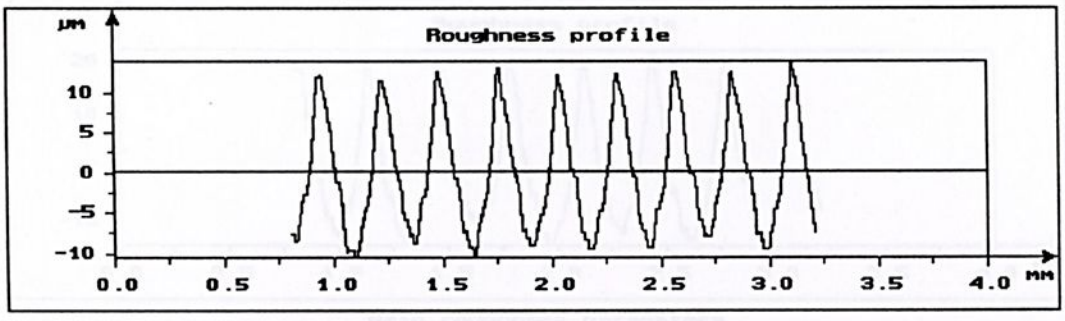
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,20 A542



Main roughness parameters

Ra	=	6.38 µm	Rsk	=	0.348
Rp	=	14 µm	Rku	=	1.79
Rq	=	7.3 µm	Rz	=	24.8 µm
Rv	=	10.9 µm	Ry	=	24.8 µm
Rt	=	24.8 µm	RSm	=	272 µm
RS	=	176 µm			

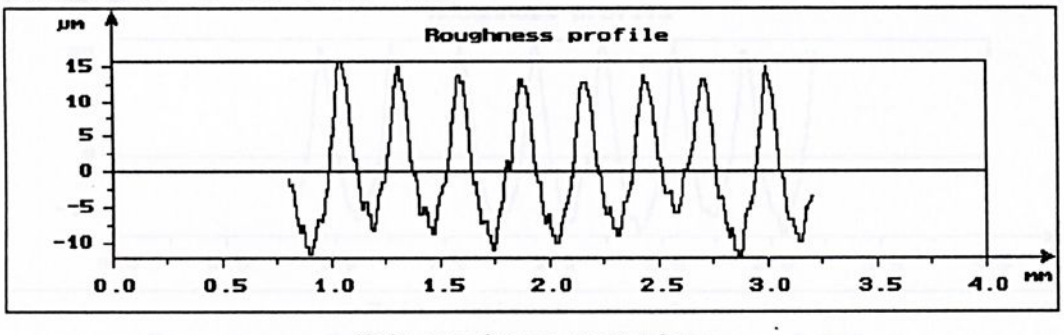
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,20 A662



Main roughness parameters

Ra	=	6.02 µm	Rsk	=	0.354
Rp	=	14 µm	Rku	=	1.85
Rq	=	7.03 µm	Rz	=	24.6 µm
Rv	=	10.6 µm	Ry	=	24.6 µm
Rt	=	24.8 µm	RSm	=	271 µm
RS	=	236 µm			

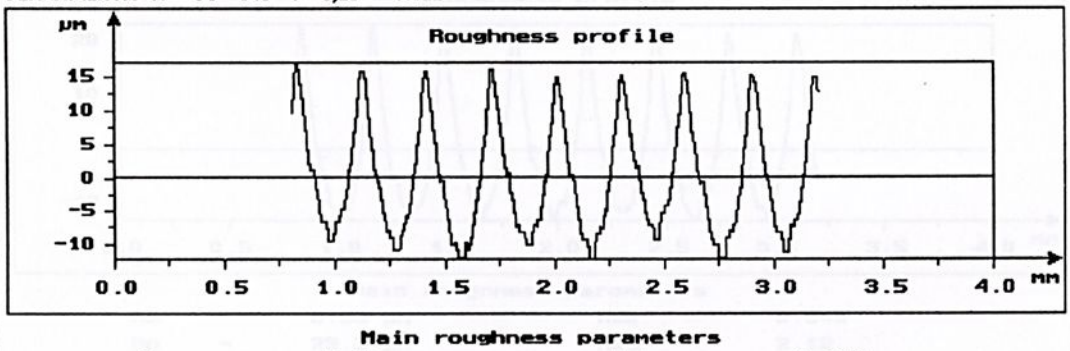
FERRAMENTA "A" Vc = 400 f = 0,25 A612



Main roughness parameters

Ra	=	6.55 µm	Rsk	=	0.472
Rp	=	15.7 µm	Rku	=	1.96
Rq	=	7.68 µm	Rz	=	27.8 µm
Rv	=	12.1 µm	Ry	=	27.8 µm
Rt	=	27.8 µm	RSm	=	279 µm
RS	=	141 µm			

FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,25 A622

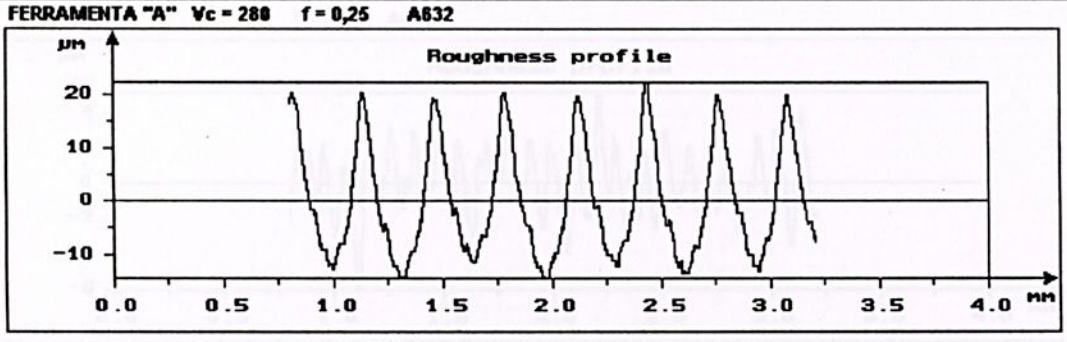


Main roughness parameters

Ra	=	7.23 µm	Rsk	=	0.464
Rp	=	17.1 µm	Rku	=	1.95
Rq	=	8.43 µm	Rz	=	29.2 µm
Rv	=	12.1 µm	Ry	=	29.2 µm
Rt	=	29.2 µm	RSm	=	291 µm
RS	=	218 µm			

unesp

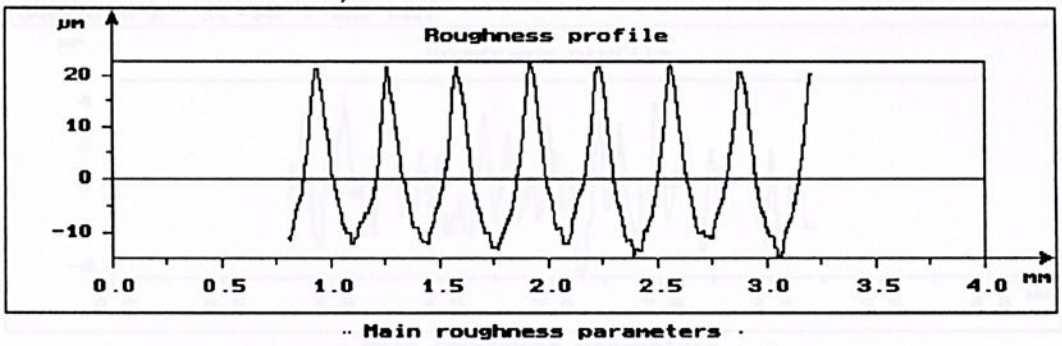
FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,25 A832



Main roughness parameters

Ra	=	8.97 µm	Rsk	=	0.557
Rp	=	22.3 µm	Rku	=	2.02
Rq	=	10.4 µm	Rz	=	36.5 µm
Rv	=	14.2 µm	Ry	=	36.5 µm
Rt	=	36.5 µm	RSm	=	317 µm
RS	=	171 µm			

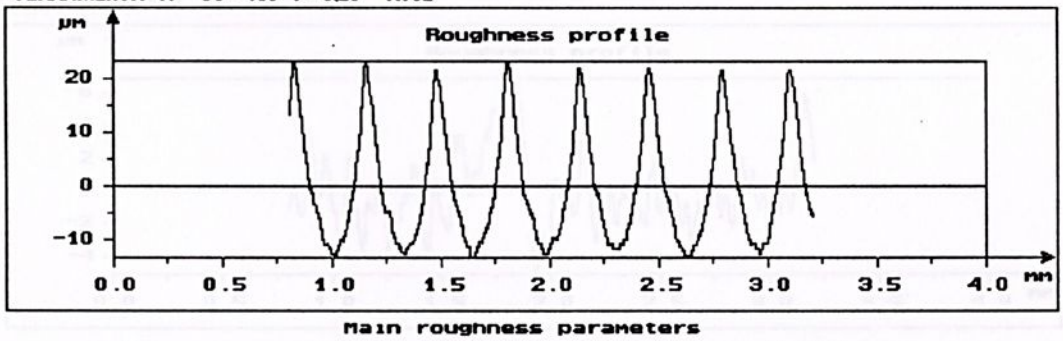
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,25 A742



Main roughness parameters

Ra	=	9.24 µm	Rsk	=	0.619
Rp	=	22.7 µm	Rku	=	2.09
Rq	=	10.8 µm	Rz	=	37.5 µm
Rv	=	14.9 µm	Ry	=	37.5 µm
Rt	=	37.5 µm	RSm	=	325 µm
RS	=	296 µm			

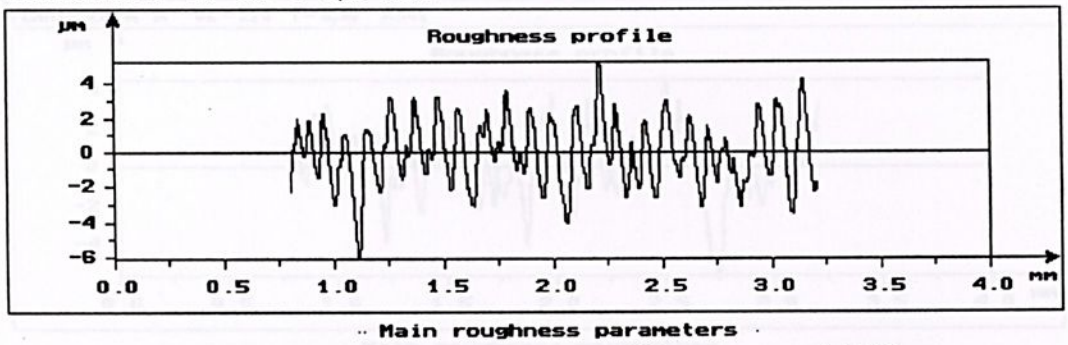
FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,25 A752



Main roughness parameters

Ra	=	9.33 µm	Rsk	=	0.646
Rp	=	23.3 µm	Rku	=	2.12
Rq	=	10.9 µm	Rz	=	36.5 µm
Rv	=	13.2 µm	Ry	=	36.5 µm
Rt	=	36.5 µm	RSm	=	320 µm
RS	=	266 µm			

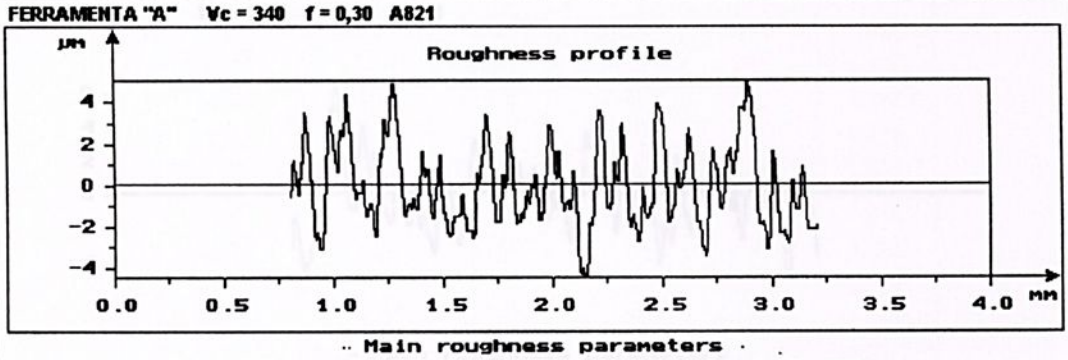
FERRAMENTA "A" Vc = 400 f = 0,30 A811



Main roughness parameters

Ra	=	1.51 µm	Rsk	=	-0.0991
Rp	=	5.28 µm	Rku	=	2.9
Rq	=	1.87 µm	Rz	=	11.4 µm
Rv	=	6.1 µm	Ry	=	11.4 µm
Rt	=	11.4 µm	RSm	=	88.4 µm
RS	=	67.7 µm			

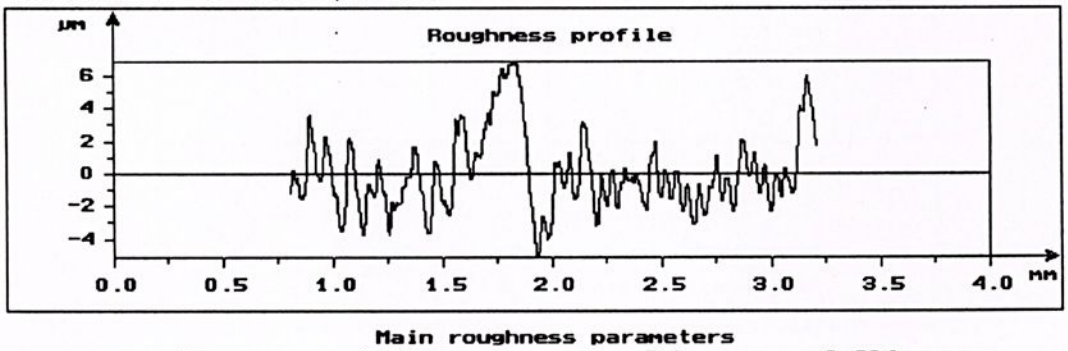
FERRAMENTA "A" Vc = 340 f = 0,30 A821



Main roughness parameters

Ra	=	1.6 µm	Rsk	=	0.419
Rp	=	5.05 µm	Rku	=	2.57
Rq	=	1.94 µm	Rz	=	9.44 µm
Rv	=	4.39 µm	Ry	=	9.44 µm
Rt	=	9.44 µm	RSm	=	101 µm
RS	=	50.5 µm			

FERRAMENTA "A" Vc = 280 f = 0,30 A831

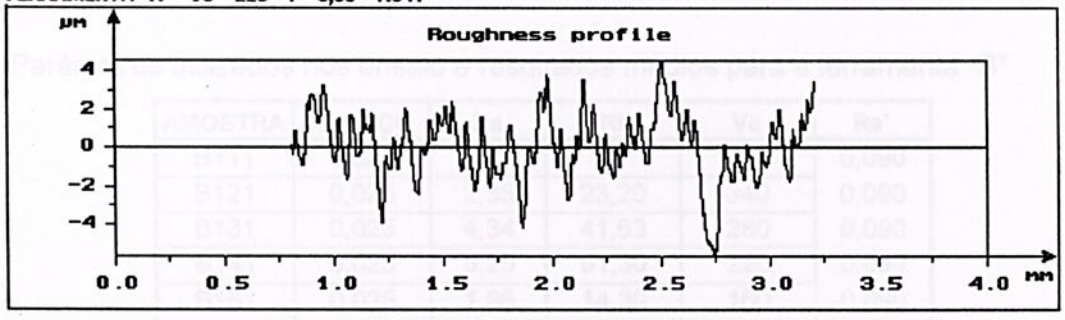


Main roughness parameters

Ra	=	1.78 µm	Rsk	=	0.904
Rp	=	6.88 µm	Rku	=	3.69
Rq	=	2.36 µm	Rz	=	12 µm
Rv	=	5.13 µm	Ry	=	12 µm
Rt	=	12 µm	RSm	=	104 µm
RS	=	57.2 µm			

unesp

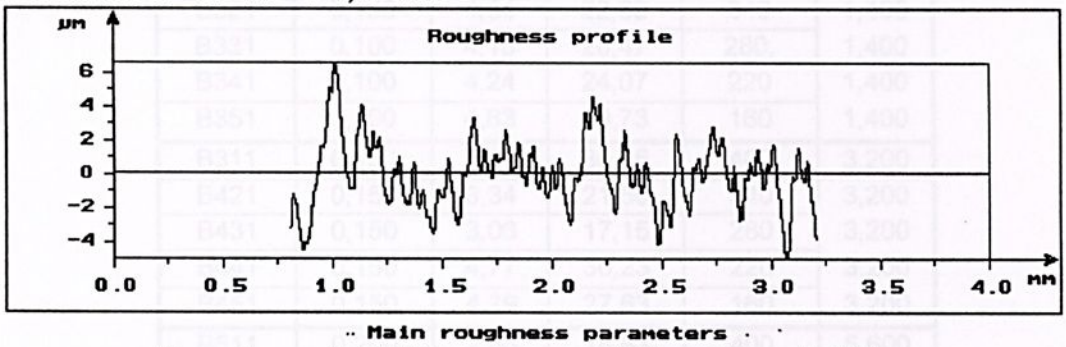
FERRAMENTA "A" Vc = 220 f = 0,30 A841



Main roughness parameters

Ra	=	1.31 µm	Rsk	=	-0.421
Rp	=	4.55 µm	Rku	=	3.92
Rq	=	1.71 µm	Rz	=	10.2 µm
Rv	=	5.63 µm	Ry	=	10.2 µm
Rt	=	10.2 µm	RSm	=	99.9 µm
RS	=	52.2 µm			

FERRAMENTA "A" Vc = 160 f = 0,30 A851



Main roughness parameters

Ra	=	1.55 µm	Rsk	=	0.282
Rp	=	6.66 µm	Rku	=	3.39
Rq	=	2.01 µm	Rz	=	11.6 µm
Rv	=	4.97 µm	Ry	=	11.6 µm
Rt	=	11.6 µm	RSm	=	101 µm
RS	=	50 µm			

ANEXO 4

Parâmetros utilizados nos ensaio e resultados médios para a ferramenta "B"

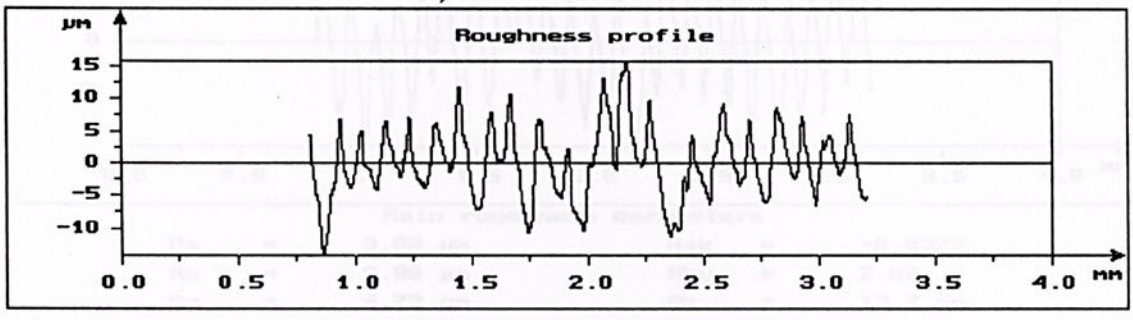
AMOSTRA	AVANÇO	Ra	Rt	Vc	Ra`
B111	0,025	-	-	400	0,090
B121	0,025	2,35	23,20	340	0,090
B131	0,025	4,34	41,63	280	0,090
B141	0,025	5,25	61,30	220	0,090
B151	0,025	1,86	14,30	160	0,090
B211	0,050	4,02	25,70	400	0,350
B221	0,050	4,17	30,67	340	0,350
B231	0,050	3,94	22,47	280	0,350
B241	0,050	4,14	25,20	220	0,350
B251	0,050	3,60	22,70	160	0,350
B311	0,100	4,81	28,20	400	1,400
B321	0,100	4,54	22,83	340	1,400
B331	0,100	4,15	20,47	280,	1,400
B341	0,100	4,24	24,07	220	1,400
B351	0,100	4,63	29,73	160	1,400
B311	0,150	4,94	30,05	400	3,200
B421	0,150	3,34	21,60	340	3,200
B431	0,150	3,06	17,15	280	3,200
B441	0,150	4,77	30,23	220	3,200
B451	0,150	4,79	27,63	160	3,200
B511	0,200	2,66	18,83	400	5,600
B521	0,200	3,06	19,13	340	5,600
B531	0,200	2,16	16,00	280	5,600
B541	0,200	2,25	15,87	220	5,600
B551	0,200	2,62	19,33	160	5,600
B611	0,250	3,77	18,83	400	8,700
B621	0,250	4,63	24,23	340	8,700
B631	0,250	5,80	24,13	280	8,700
B641	0,250	3,79	19,67	220	8,700
B651	0,250	4,68	21,40	160	8,700
B611	0,300	8,99	42,97	400	12,600
B721	0,300	-	-	340	12,600
B731	0,300	-	-	280	12,600
B741	0,300	-	-	220	12,600
B751	0,300	-	-	160	12,600



ANEXO 5

Perfil da Superfície Gerada com a Ferramenta "B"

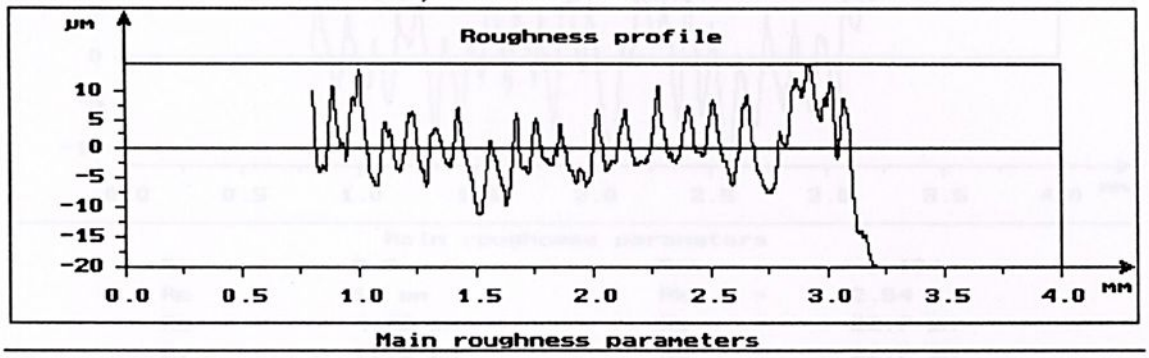
FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,025 m/min B11



Main roughness parameters

Ra	=	4.2 µm	Rsk	=	0.113
Rp	=	15.8 µm	Rku	=	3.06
Rq	=	5.38 µm	Rz	=	29.9 µm
Rv	=	14.1 µm	Ry	=	29.9 µm
Rt	=	29.9 µm	RSm	=	121 µm
RS	=	89.2 µm			

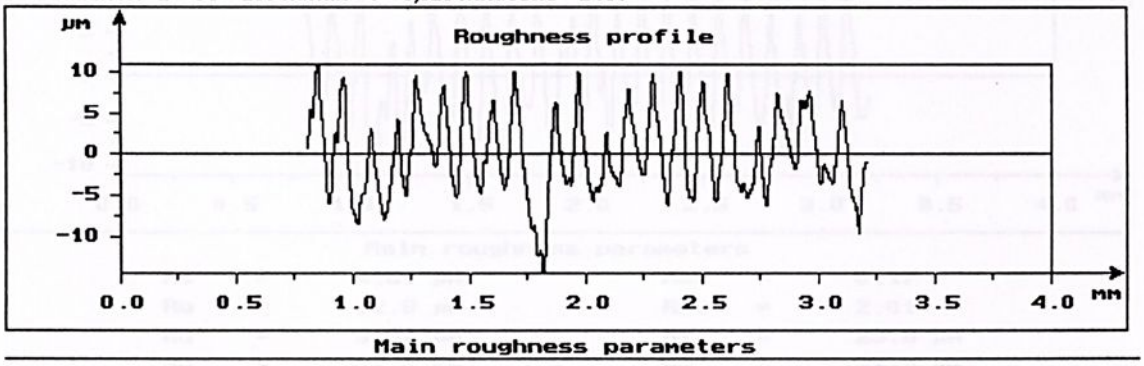
FERRAMENTA "B" Vc = 340 m/min f=0,025 mm/volta B121



Main roughness parameters

Ra	=	4.69 µm	Rsk	=	-0.313
Rp	=	14.7 µm	Rku	=	3.73
Rq	=	6.04 µm	Rz	=	34.9 µm
Rv	=	20.1 µm	Ry	=	34.9 µm
Rt	=	34.9 µm	RSm	=	125 µm
RS	=	64.6 µm			

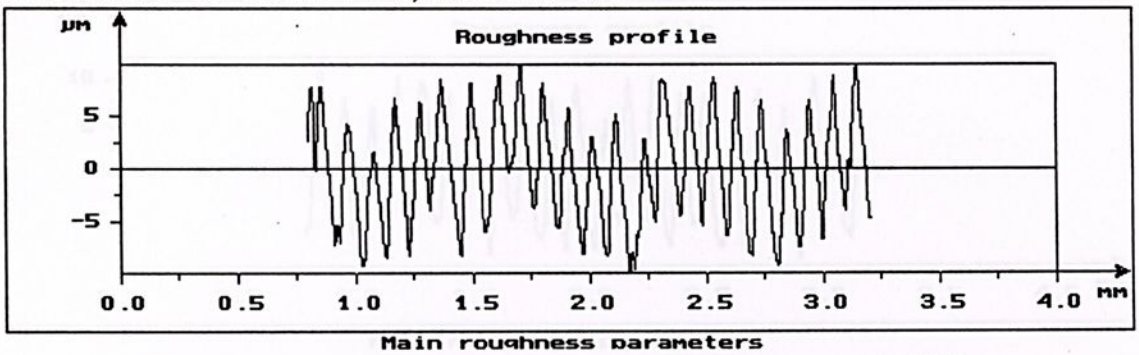
FERRAMENTA "B" Vc = 280 m/min f = 0,025 mm/volta B131



Main roughness parameters

Ra	=	4.11 µm	Rsk	=	0.00463
Rp	=	10.9 µm	Rku	=	2.54
Rq	=	4.94 µm	Rz	=	25.4 µm
Rv	=	14.5 µm	Ry	=	25.4 µm
Rt	=	25.4 µm	RSm	=	114 µm
RS	=	73.2 µm			

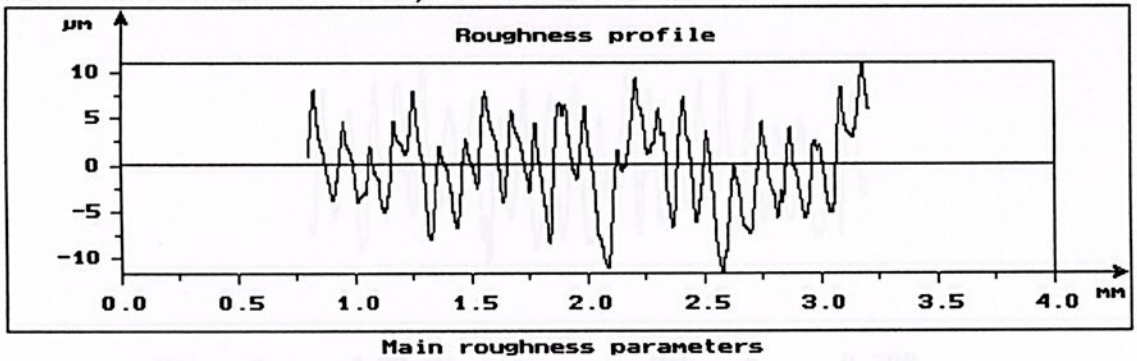
FERRAMENTA "B" Vc = 220 m/min f = 0,025 mm/volta B141



Main roughness parameters

Ra	=	3.96 µm	Rsk	=	-0.0322
Rp	=	9.88 µm	Rku	=	2.08
Rq	=	4.72 µm	Rz	=	19.7 µm
Rv	=	9.78 µm	Ry	=	19.7 µm
Rt	=	19.7 µm	RSm	=	100 µm
RS	=	83.2 µm			

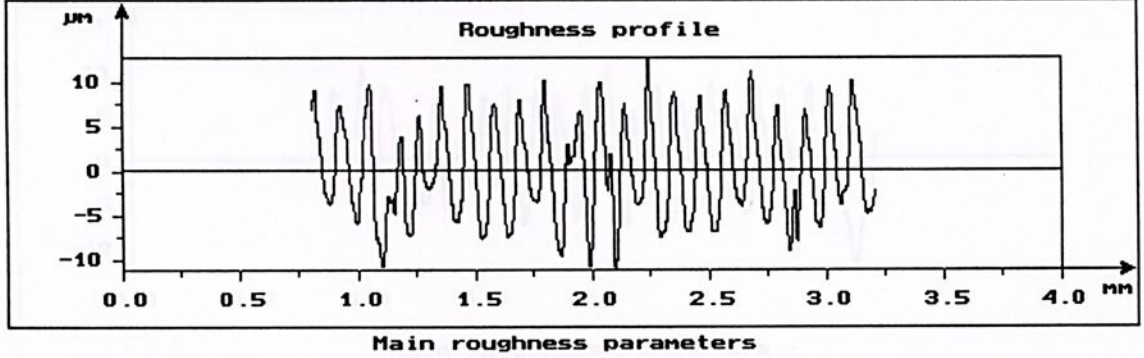
FERRAMENTA "B" Vc = 160 m/min f = 0,025 mm/volta B151



Main roughness parameters

Ra	=	3.6 µm	Rsk	=	-0.194
Rp	=	11 µm	Rku	=	2.64
Rq	=	4.42 µm	Rz	=	22.7 µm
Rv	=	11.6 µm	Ry	=	22.7 µm
Rt	=	22.7 µm	RSm	=	125 µm
RS	=	93.9 µm			

FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,050 mm/volta B211

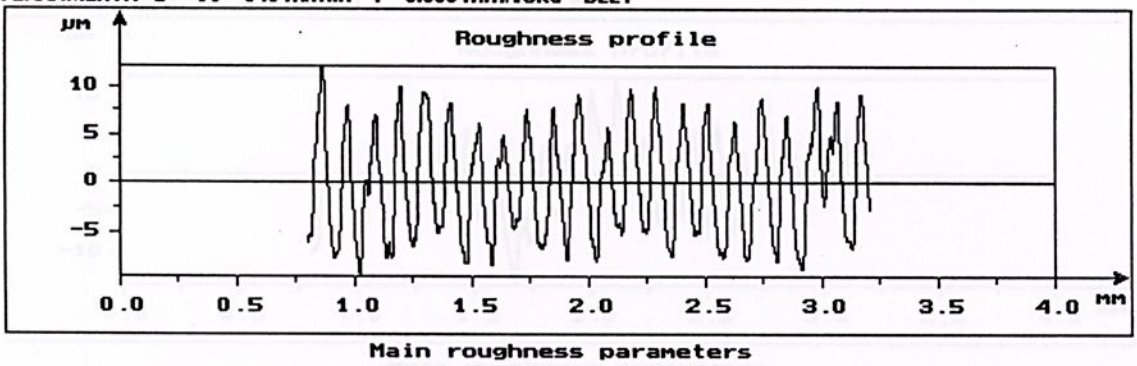


Main roughness parameters

Ra	=	4.61 µm	Rsk	=	0.17
Rp	=	12.8 µm	Rku	=	2.01
Rq	=	5.37 µm	Rz	=	23.9 µm
Rv	=	11.1 µm	Ry	=	23.9 µm
Rt	=	23.9 µm	RSm	=	104 µm
RS	=	85 µm			

unesp

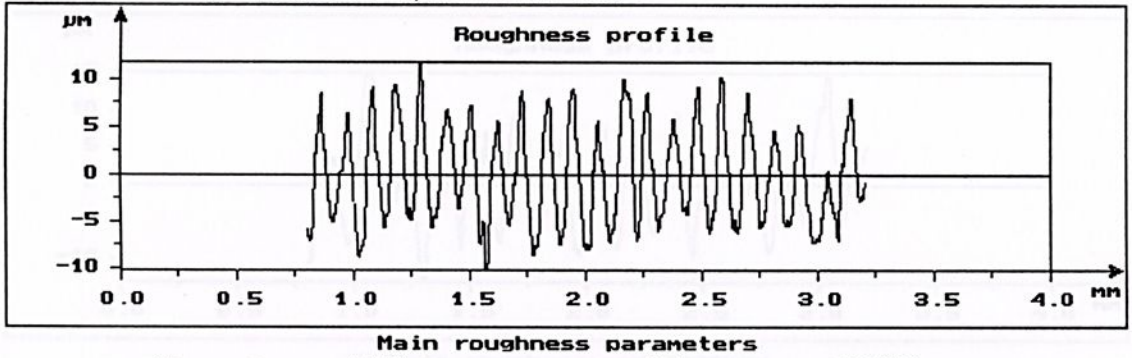
FERRAMENTA "B" Vc = 340 m/min f = 0.050 mm/volta B221



Main roughness parameters

Ra	=	4.69 µm	Rsk	=	0.111
Rp	=	12.2 µm	Rku	=	1.78
Rq	=	5.34 µm	Rz	=	21.8 µm
Rv	=	9.62 µm	Ry	=	21.8 µm
Rt	=	21.8 µm	RSm	=	105 µm
RS	=	73.7 µm			

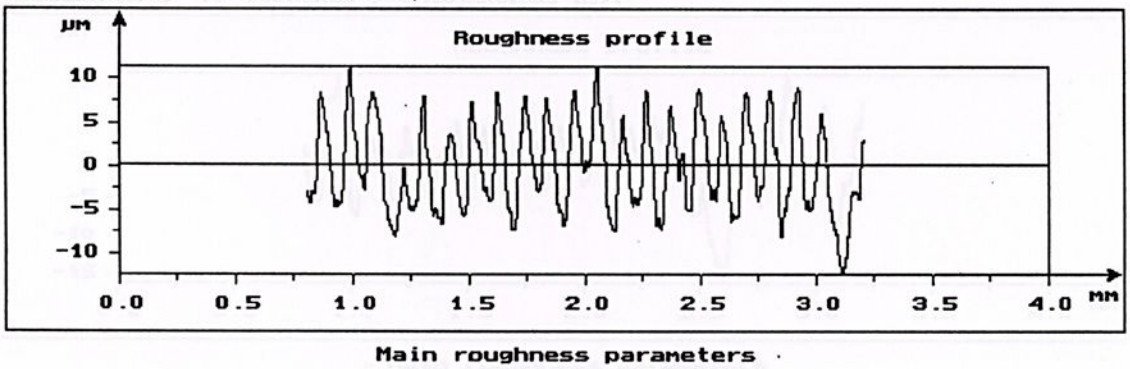
FERRAMENTA "B" Vc = 280 m/min f = 0,050 mm/volta B231



Main roughness parameters

Ra	=	4.28 µm	Rsk	=	0.208
Rp	=	11.7 µm	Rku	=	1.97
Rq	=	4.96 µm	Rz	=	21.8 µm
Rv	=	10.1 µm	Ry	=	21.8 µm
Rt	=	21.8 µm	RSm	=	108 µm
RS	=	75.9 µm			

FERRAMENTA "B" Vc = 220 m/min f = 0,050 mm/volta B241

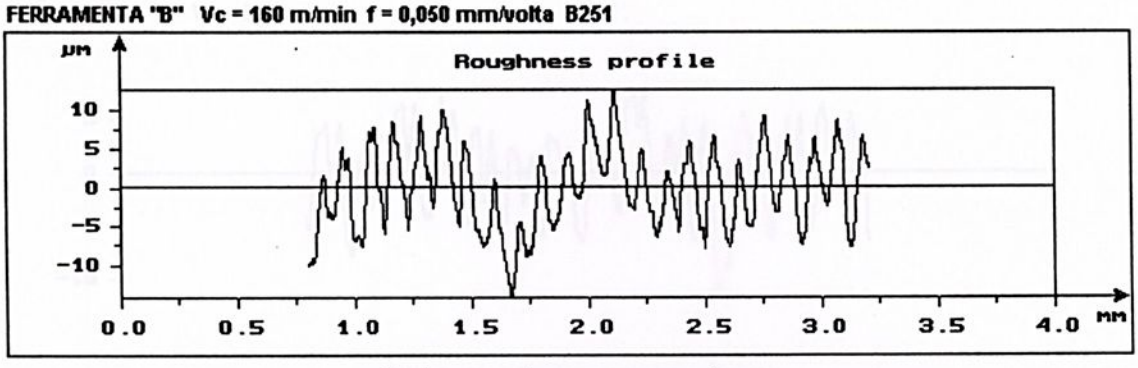


Main roughness parameters

Ra	=	4.22 µm	Rsk	=	0.136
Rp	=	11.4 µm	Rku	=	2.12
Rq	=	4.93 µm	Rz	=	23.6 µm
Rv	=	12.3 µm	Ry	=	23.6 µm
Rt	=	23.6 µm	RSm	=	112 µm
RS	=	68.5 µm			

unesp

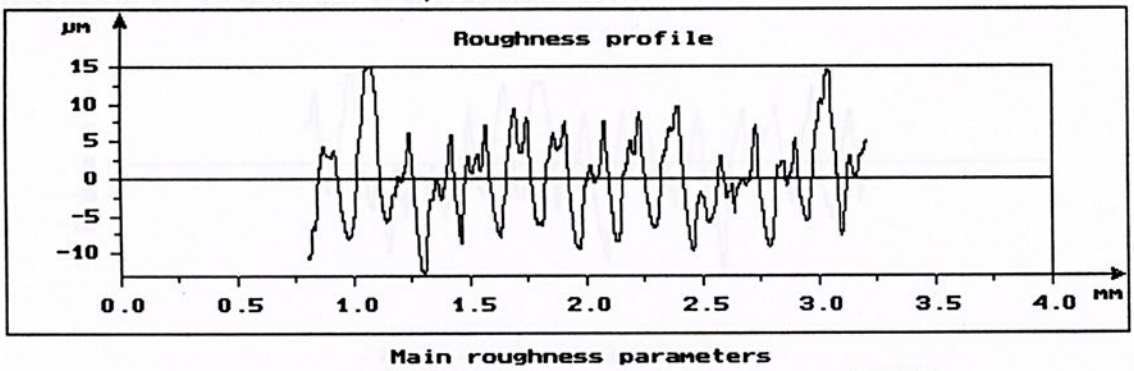
FERRAMENTA "B" Vc = 160 m/min f = 0,050 mm/volta B251



Main roughness parameters

Ra	=	4.25 µm	Rsk	=	-0.0979
Rp	=	12.6 µm	Rku	=	2.41
Rq	=	5.08 µm	Rz	=	26.8 µm
Rv	=	14.1 µm	Ry	=	26.8 µm
Rt	=	26.8 µm	RSm	=	115 µm
RS	=	70 µm			

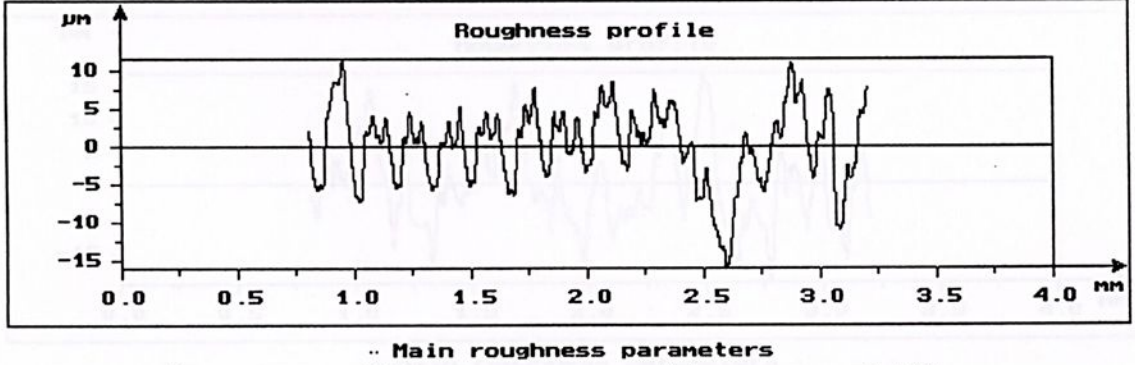
FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,100 mm/volta B311



Main roughness parameters

Ra	=	4.49 µm	Rsk	=	0.288
Rp	=	15.1 µm	Rku	=	2.88
Rq	=	5.61 µm	Rz	=	28.1 µm
Rv	=	13.1 µm	Ry	=	28.1 µm
Rt	=	28.1 µm	RSm	=	134 µm
RS	=	76.9 µm			

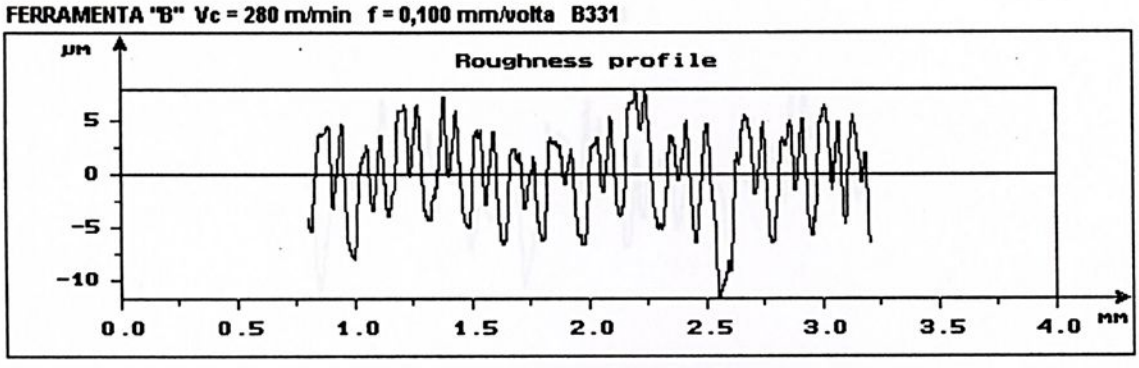
FERRAMENTA "B" Vc = 340 m/min f = 0,100 mm/volta B321



Main roughness parameters

Ra	=	4.01 µm	Rsk	=	-0.523
Rp	=	11.6 µm	Rku	=	3.3
Rq	=	5.05 µm	Rz	=	27.5 µm
Rv	=	16 µm	Ry	=	27.5 µm
Rt	=	27.5 µm	RSm	=	147 µm
RS	=	55.4 µm			

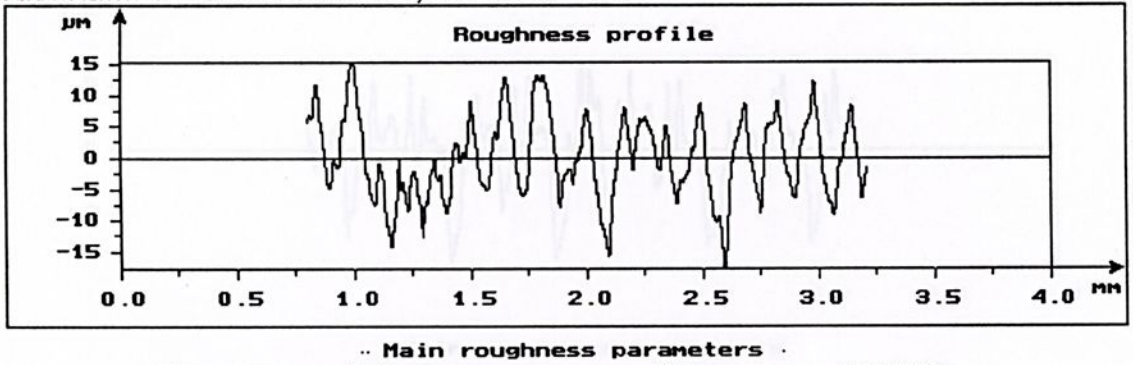
FERRAMENTA "B" Vc = 280 m/min f = 0,100 mm/volta B331



Main roughness parameters

Ra	=	3.32 µm	Rsk	=	-0.429
Rp	=	7.95 µm	Rku	=	2.56
Rq	=	3.99 µm	Rz	=	19.7 µm
Rv	=	11.7 µm	Ry	=	19.7 µm
Rt	=	19.7 µm	RSm	=	90 µm
RS	=	56.9 µm			

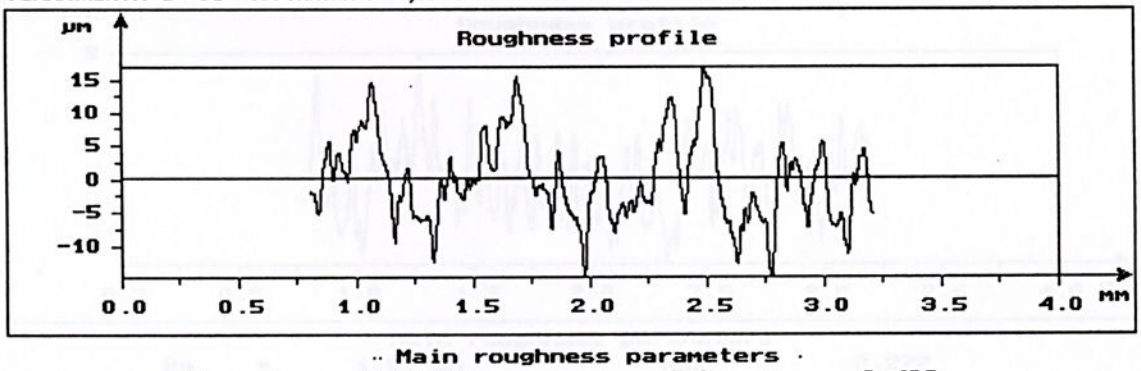
FERRAMENTA "B" Vc = 220 m/min f = 0,100 mm/volta B341



Main roughness parameters

Ra	=	5.3 µm	Rsk	=	0.0166
Rp	=	15.3 µm	Rku	=	2.57
Rq	=	6.42 µm	Rz	=	33 µm
Rv	=	17.6 µm	Ry	=	33 µm
Rt	=	33 µm	RSm	=	164 µm
RS	=	80.4 µm			

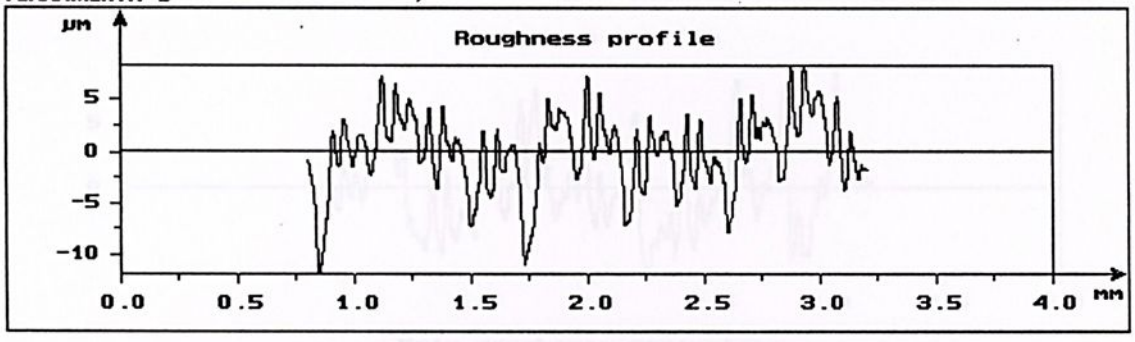
FERRAMENTA "B" vC = 160 m/min f = 0,100 mm/volta B351



Main roughness parameters

Ra	=	4.99 µm	Rsk	=	0.409
Rp	=	16.9 µm	Rku	=	2.87
Rq	=	6.25 µm	Rz	=	31.6 µm
Rv	=	14.7 µm	Ry	=	31.6 µm
Rt	=	31.6 µm	RSm	=	163 µm
RS	=	58.8 µm			

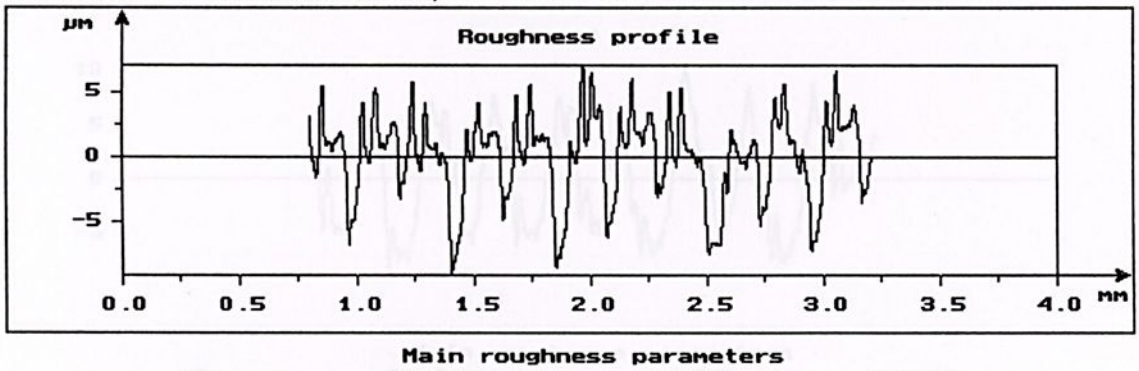
FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,150 mm/volta B411



·· Main roughness parameters ·

Ra	=	2.82 µm	Rsk	=	-0.596
Rp	=	8.4 µm	Rku	=	3.53
Rq	=	3.63 µm	Rz	=	20.3 µm
Rv	=	11.9 µm	Ry	=	20.3 µm
Rt	=	20.3 µm	RSm	=	96.7 µm
RS	=	63.8 µm			

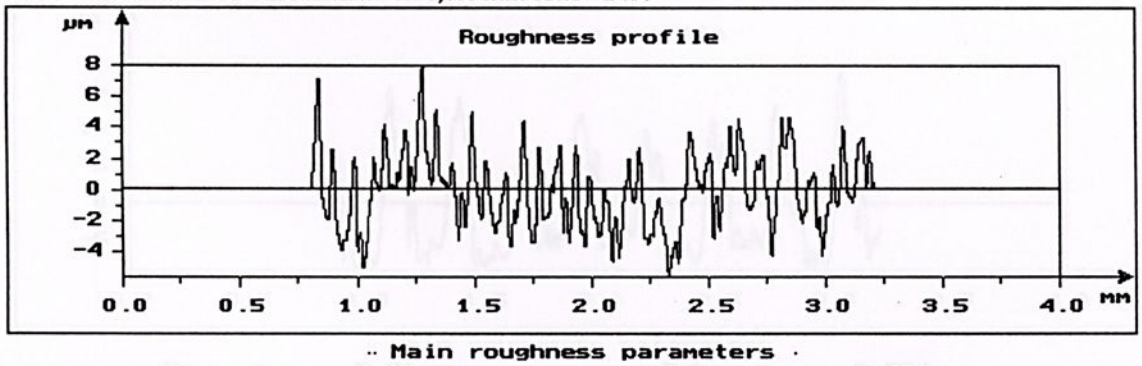
FERRAMENTA "B" Vc = 340 m/min f = 0,150 mm/volta B421



Main roughness parameters

Ra	=	2.45 µm	Rsk	=	-0.66
Rp	=	7.06 µm	Rku	=	3.08
Rq	=	3.18 µm	Rz	=	16.1 µm
Rv	=	9.04 µm	Ry	=	16.1 µm
Rt	=	16.1 µm	RSm	=	110 µm
RS	=	42.9 µm			

FERRAMENTA "B" Vc = 280 m/min f = 0,150 mm/volta B431

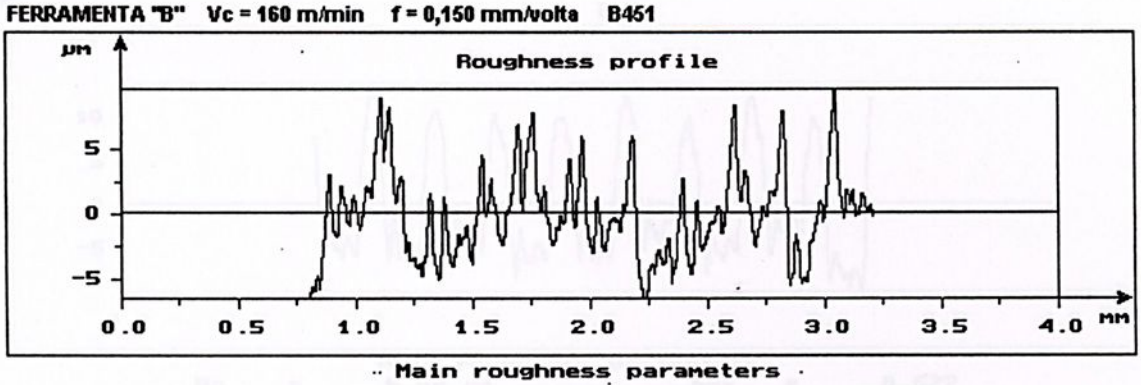


·· Main roughness parameters ·

Ra	=	1.91 µm	Rsk	=	0.277
Rp	=	8.01 µm	Rku	=	2.88
Rq	=	2.36 µm	Rz	=	13.6 µm
Rv	=	5.61 µm	Ry	=	13.6 µm
Rt	=	13.6 µm	RSm	=	96.6 µm
RS	=	46.1 µm			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

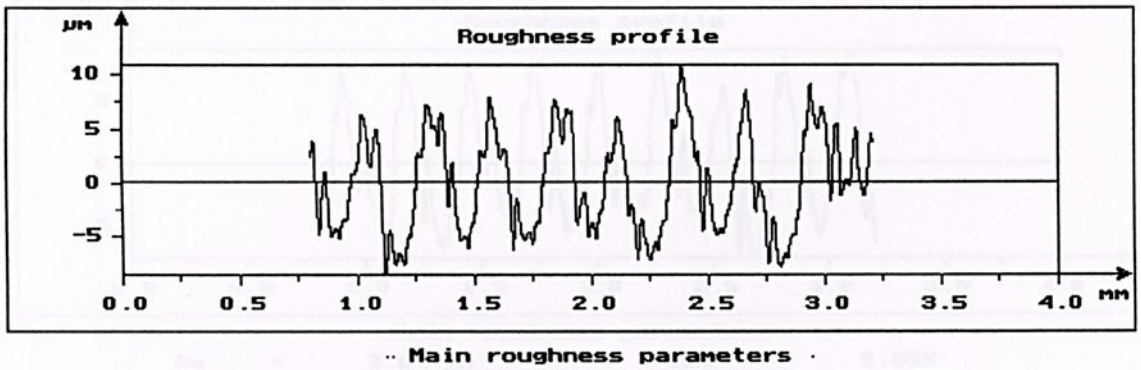
FERRAMENTA "B" Vc = 160 m/min f = 0,150 mm/volta B451



· Main roughness parameters ·

Ra	=	2.55 µm	Rsk	=	0.526
Rp	=	9.76 µm	Rku	=	3.06
Rq	=	3.28 µm	Rz	=	16.3 µm
Rv	=	6.55 µm	Ry	=	16.3 µm
Rt	=	16.3 µm	RSm	=	105 µm
RS	=	45.8 µm			

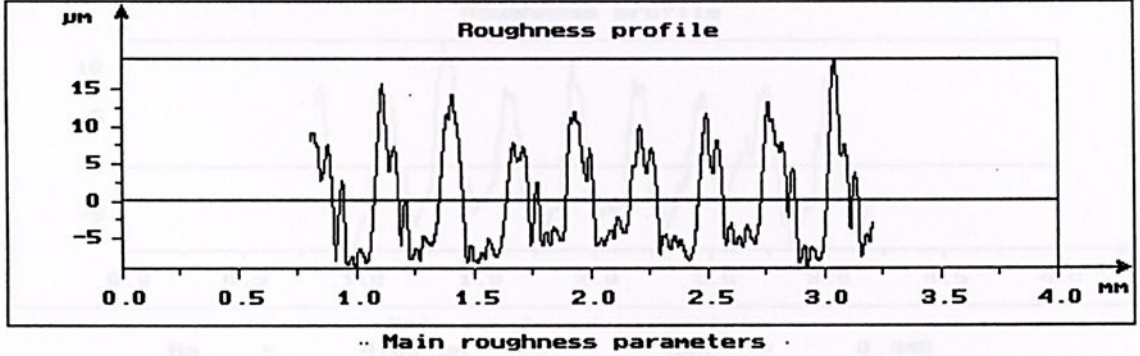
FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,200 mm/volta B511



· Main roughness parameters ·

Ra	=	3.98 µm	Rsk	=	0.155
Rp	=	10.9 µm	Rku	=	1.86
Rq	=	4.56 µm	Rz	=	19.5 µm
Rv	=	8.56 µm	Ry	=	19.5 µm
Rt	=	19.5 µm	RSm	=	158 µm
RS	=	51.8 µm			

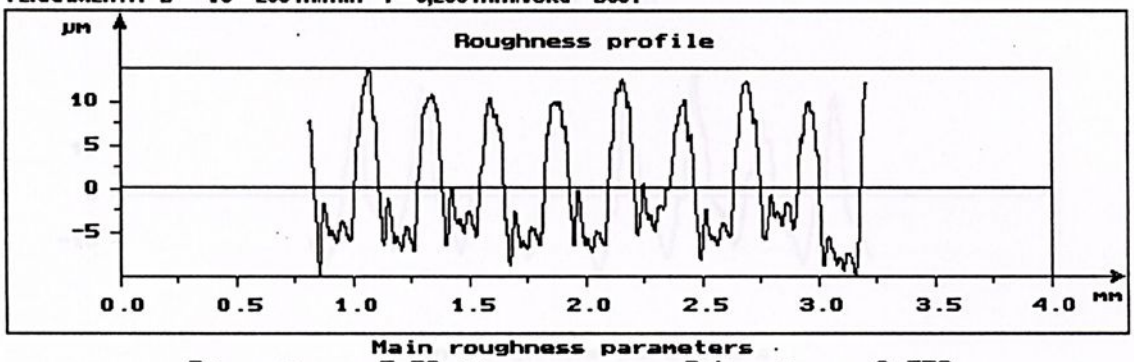
FERRAMENTA "B" Vc = 340 m/min f = 0,200 mm/volta B521



· Main roughness parameters ·

Ra	=	5.91 µm	Rsk	=	0.586
Rp	=	19.1 µm	Rku	=	2.19
Rq	=	6.66 µm	Rz	=	28.1 µm
Rv	=	9.05 µm	Ry	=	28.1 µm
Rt	=	28.1 µm	RSm	=	178 µm
RS	=	52.6 µm			

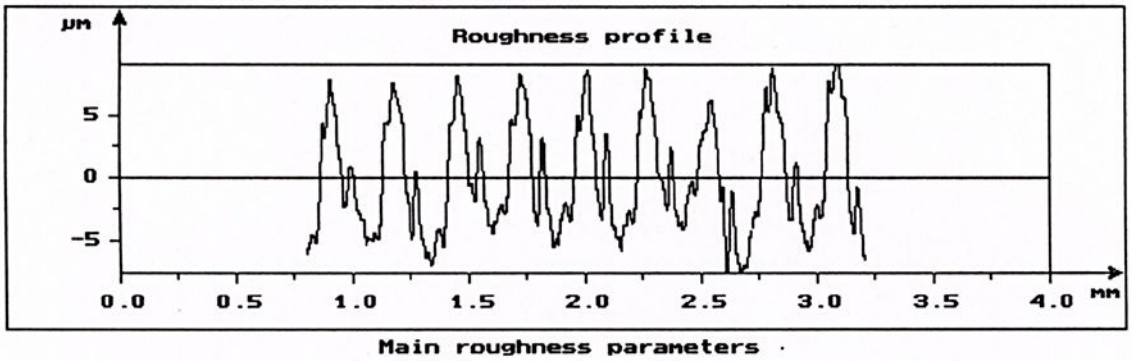
FERRAMENTA "B" Vc = 280 m/min f = 0,200 mm/volta B531



Main roughness parameters

Ra	=	5.58 µm	Rsk	=	0.572
Rp	=	13.8 µm	Rku	=	1.9
Rq	=	6.33 µm	Rz	=	23.8 µm
Rv	=	9.98 µm	Ry	=	23.8 µm
Rt	=	23.8 µm	RSm	=	216 µm
RS	=	54.9 µm			

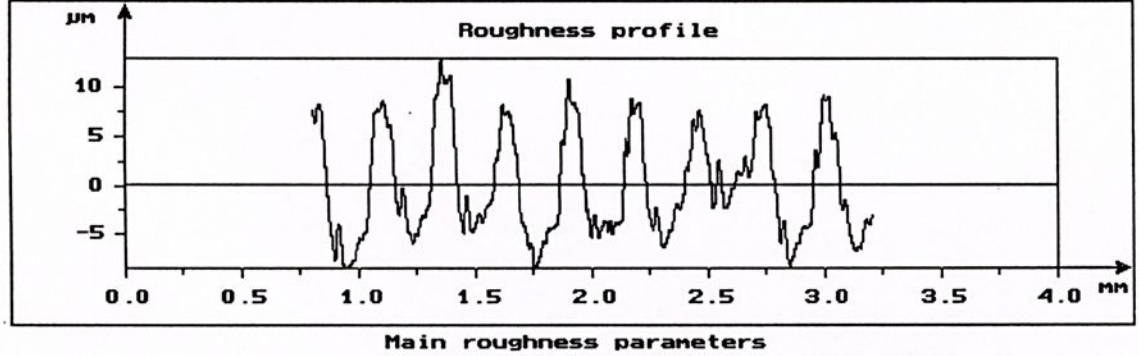
FERRAMENTA "B" Vc = 220 m/min f = 0,200 mm/volta B541



Main roughness parameters

Ra	=	3.84 µm	Rsk	=	0.395
Rp	=	9.1 µm	Rku	=	1.92
Rq	=	4.41 µm	Rz	=	16.7 µm
Rv	=	7.57 µm	Ry	=	16.7 µm
Rt	=	16.7 µm	RSm	=	145 µm
RS	=	54.5 µm			

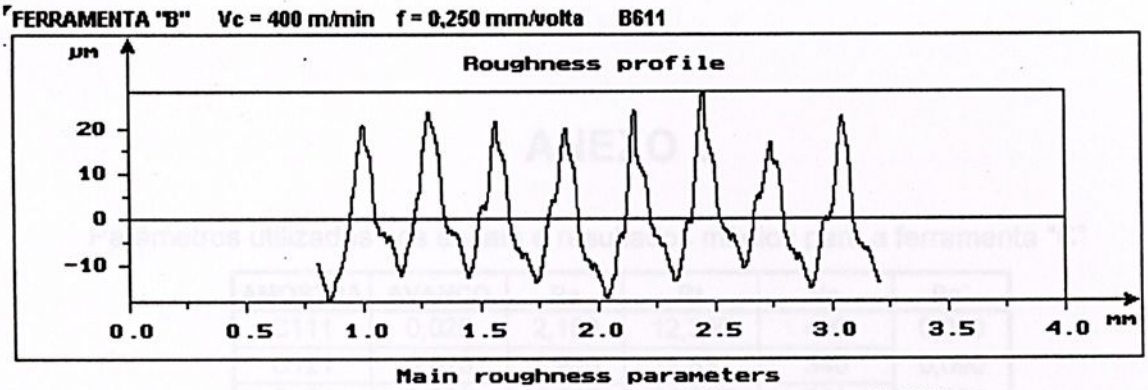
FERRAMENTA "B" Vc = 160 m/min f = 0,200 mm/volta B551



Main roughness parameters

Ra	=	4.68 µm	Rsk	=	0.449
Rp	=	13 µm	Rku	=	1.95
Rq	=	5.35 µm	Rz	=	21.4 µm
Rv	=	8.45 µm	Ry	=	21.4 µm
Rt	=	21.4 µm	RSm	=	239 µm
RS	=	55.8 µm			

FERRAMENTA "B" Vc = 400 m/min f = 0,250 mm/volta B611



Main roughness parameters

Ra	=	9.15 µm	Rsk	=	0.565
Rp	=	28.2 µm	Rku	=	2.25
Rq	=	10.9 µm	Rz	=	46.2 µm
Rv	=	18 µm	Ry	=	46.2 µm
Rt	=	46.2 µm	RSm	=	292 µm
RS	=	114 µm			

ANEXO 6

Parâmetros utilizados nos ensaio e resultados médios para a ferramenta "C"

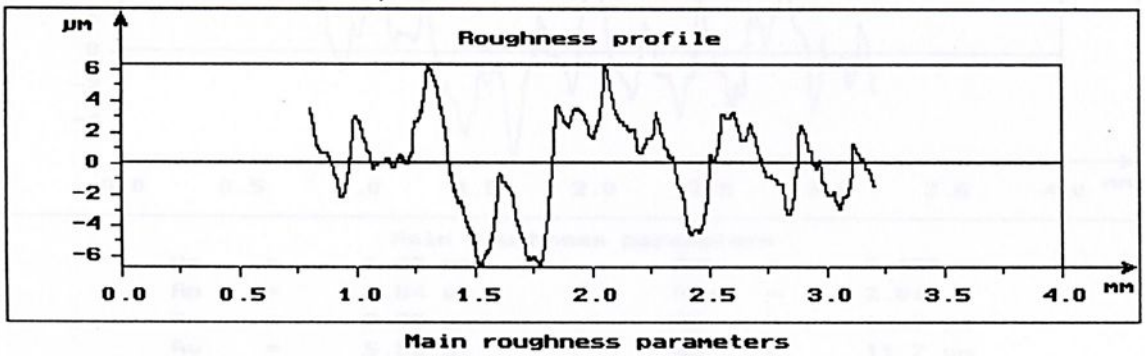
AMOSTRA	AVANÇO	Ra	Rt	Vc	Ra`
C111	0,025	2,100	12,300	400	0,090
C121	0,025	1,940	11,833	340	0,090
C131	0,025	1,847	11,967	280	0,090
C141	0,025	1,603	9,930	220	0,090
C151	0,025	2,100	12,333	160	0,090
C211	0,050	2,360	12,333	400	0,350
C221	0,050	1,923	10,950	340	0,350
C231	0,050	1,663	9,730	280	0,350
C241	0,050	1,660	9,637	220	0,350
C251	0,050	1,967	11,230	160	0,350
C311	0,100	2,267	11,900	400	1,400
C321	0,100	1,907	10,300	340	1,400
C331	0,100	1,937	11,197	280,	1,400
C341	0,100	1,427	8,570	220	1,400
C351	0,100	2,277	13,200	160	1,400
C311	0,150	2,153	11,117	400	3,200
C421	0,150	1,920	9,483	340	3,200
C431	0,150	1,770	7,473	280	3,200
C441	0,150	1,920	9,900	220	3,200
C451	0,150	2,180	9,803	160	3,200
C511	0,200	2,677	13,433	400	5,600
C521	0,200	2,147	9,430	340	5,600
C531	0,200	2,260	9,800	280	5,600
C541	0,200	2,007	11,200	220	5,600
C551	0,200	2,653	14,600	160	5,600
C611	0,250	2,710	13,000	400	8,700
C621	0,250	2,513	11,733	340	8,700
C631	0,250	2,810	12,233	280	8,700
C641	0,250	2,883	12,233	220	8,700
C651	0,250	2,930	12,267	160	8,700
C611	0,300	2,130	13,933	400	12,600
C721	0,300	2,083	12,267	340	12,600
C731	0,300	2,067	12,400	280	12,600
C741	0,300	1,980	13,100	220	12,600
C751	0,300	3,200	20,367	160	12,600

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

ANEXO 7

Perfil da Superfície Gerada com a Ferramenta "C"

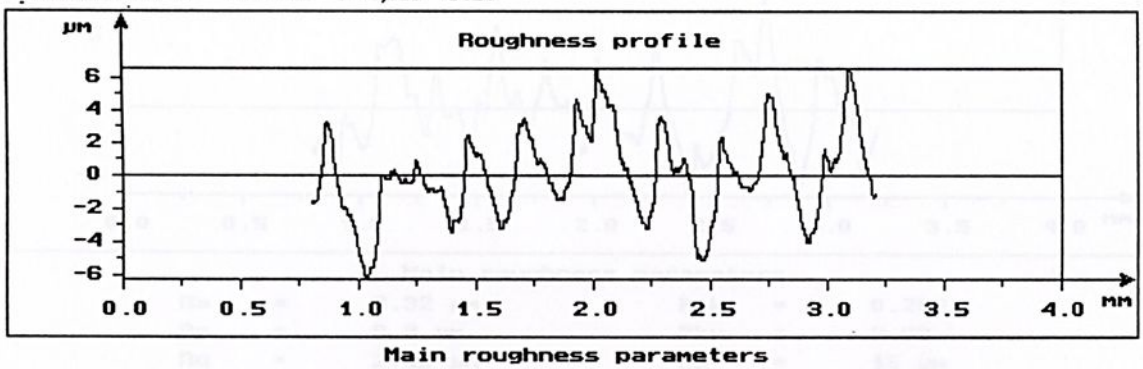
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f - 0,025 C111



Main roughness parameters

Ra	=	2.31 µm	Rsk	=	-0.352
Rp	=	6.33 µm	Rku	=	2.61
Rq	=	2.87 µm	Rz	=	13 µm
Rv	=	6.66 µm	Ry	=	13 µm
Rt	=	13 µm	RSm	=	288 µm
RS	=	88.3 µm			

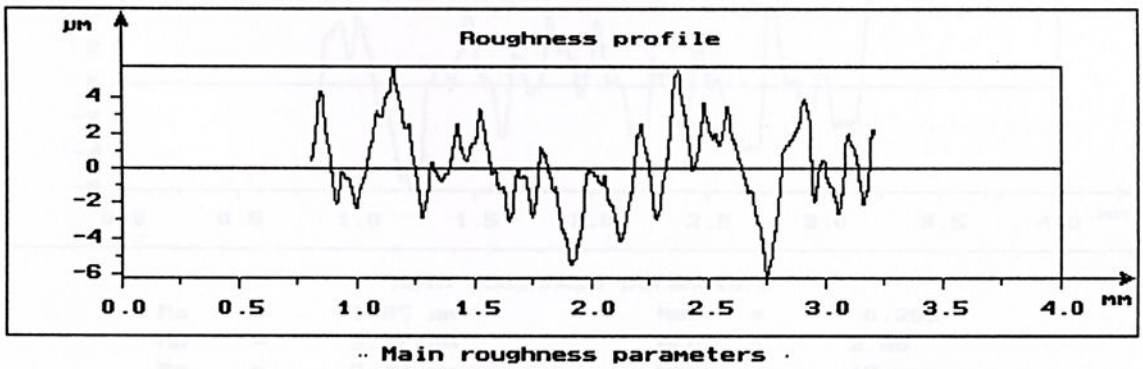
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,025 C121



Main roughness parameters

Ra	=	2.03 µm	Rsk	=	0.0806
Rp	=	6.55 µm	Rku	=	2.78
Rq	=	2.6 µm	Rz	=	12.8 µm
Rv	=	6.22 µm	Ry	=	12.8 µm
Rt	=	12.8 µm	RSm	=	238 µm
RS	=	77.4 µm			

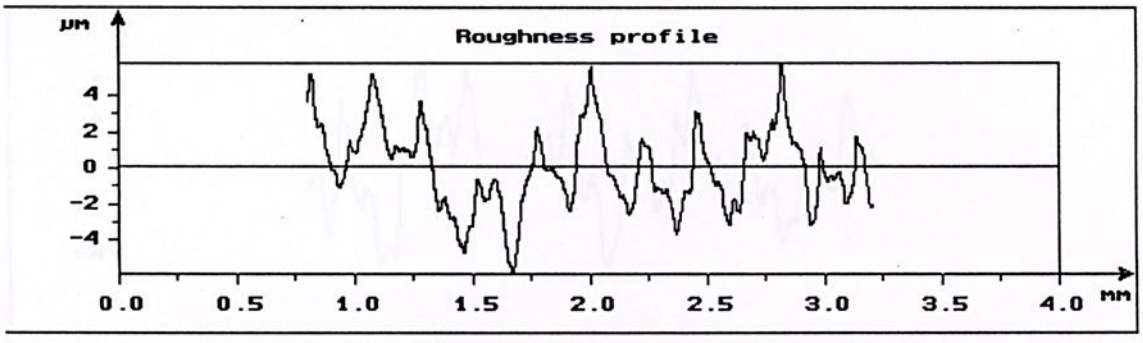
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,025 C131



Main roughness parameters

Ra	=	1.88 µm	Rsk	=	-0.0652
Rp	=	5.77 µm	Rku	=	2.75
Rq	=	2.34 µm	Rz	=	12 µm
Rv	=	6.19 µm	Ry	=	12 µm
Rt	=	12 µm	RSm	=	217 µm
RS	=	92 µm			

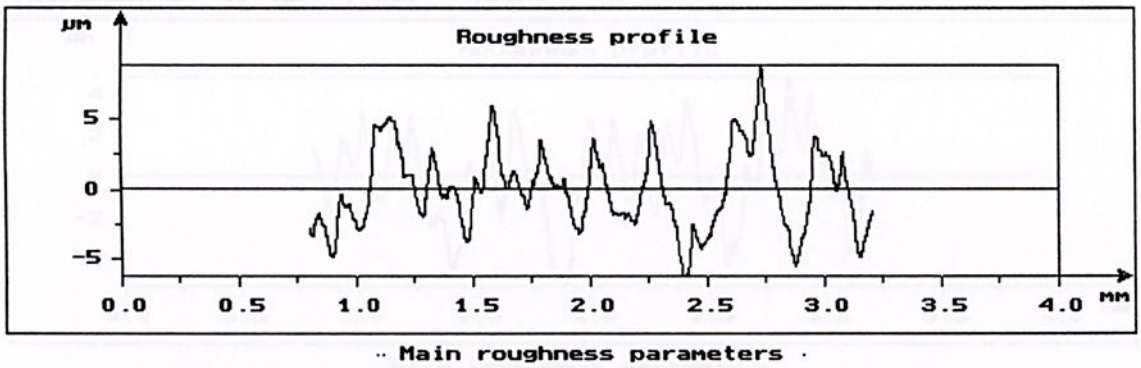
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,025 C141



Main roughness parameters

Ra	=	1.82 µm	Rsk	=	0.139
Rp	=	5.84 µm	Rku	=	2.81
Rq	=	2.23 µm	Rz	=	11.7 µm
Rv	=	5.88 µm	Ry	=	11.7 µm
Rt	=	11.7 µm	RSm	=	291 µm
RS	=	80.1 µm			

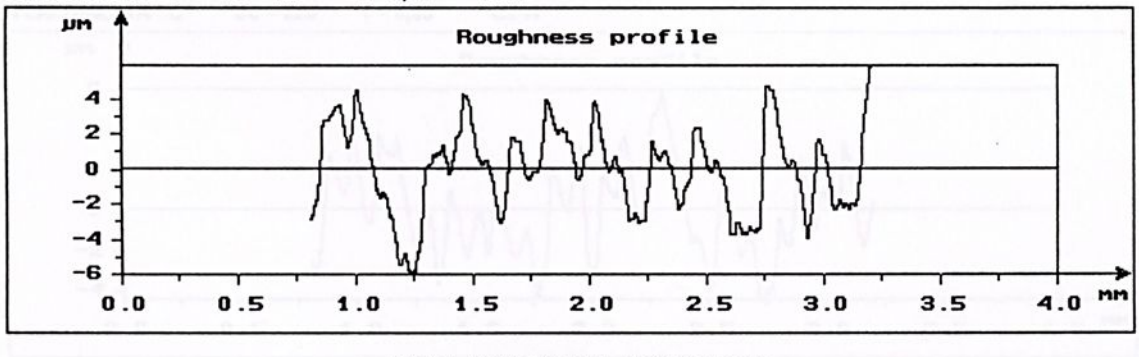
FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,025 C151



Main roughness parameters

Ra	=	2.32 µm	Rsk	=	0.296
Rp	=	8.8 µm	Rku	=	2.63
Rq	=	2.85 µm	Rz	=	15 µm
Rv	=	6.2 µm	Ry	=	15 µm
Rt	=	15 µm	RSm	=	209 µm
RS	=	89.5 µm			

FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,05 C211

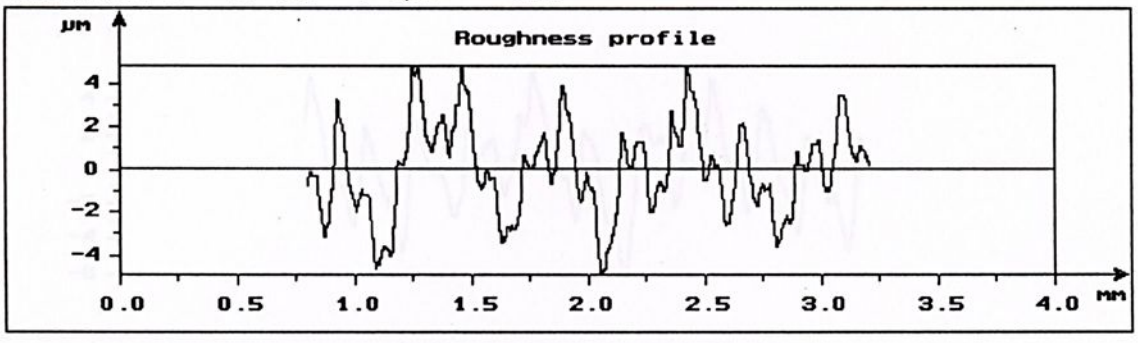


Main roughness parameters

Ra	=	1.95 µm	Rsk	=	-0.203
Rp	=	5.97 µm	Rku	=	2.56
Rq	=	2.43 µm	Rz	=	12 µm
Rv	=	6 µm	Ry	=	12 µm
Rt	=	12 µm	RSm	=	210 µm
RS	=	95.4 µm			

unesp

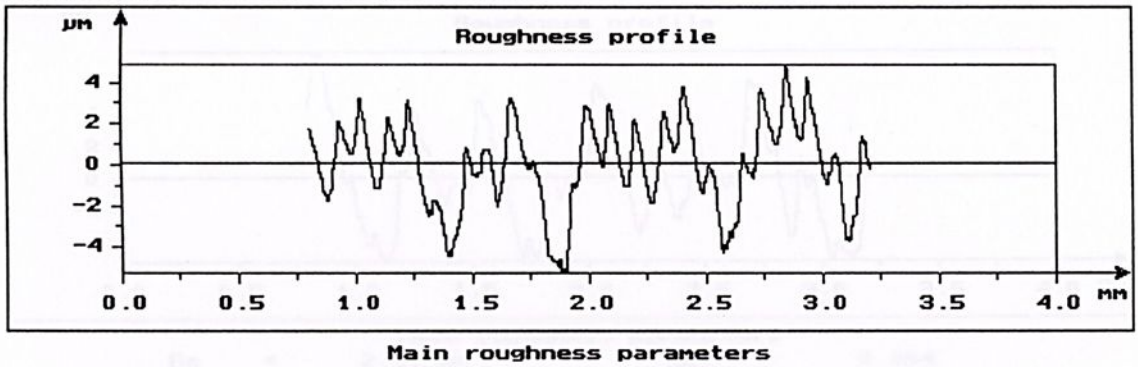
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,05 C221



Main roughness parameters

Ra	=	1.68 µm	Rsk	=	-0.00421
Rp	=	4.86 µm	Rku	=	2.6
Rq	=	2.1 µm	Rz	=	9.75 µm
Rv	=	4.89 µm	Ry	=	9.75 µm
Rt	=	9.75 µm	RSm	=	213 µm
RS	=	64.3 µm			

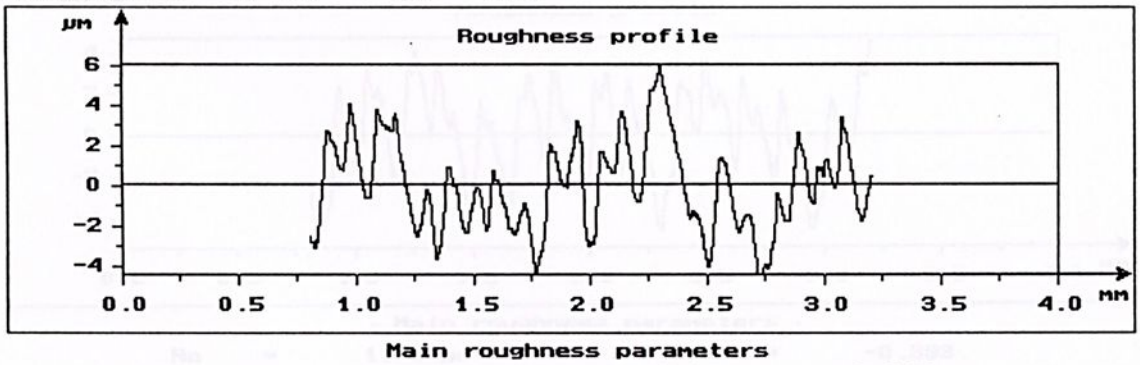
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,05 C231



Main roughness parameters

Ra	=	1.66 µm	Rsk	=	-0.428
Rp	=	4.89 µm	Rku	=	2.75
Rq	=	2.08 µm	Rz	=	10.2 µm
Rv	=	5.27 µm	Ry	=	10.2 µm
Rt	=	10.2 µm	RSm	=	168 µm
RS	=	79.7 µm			

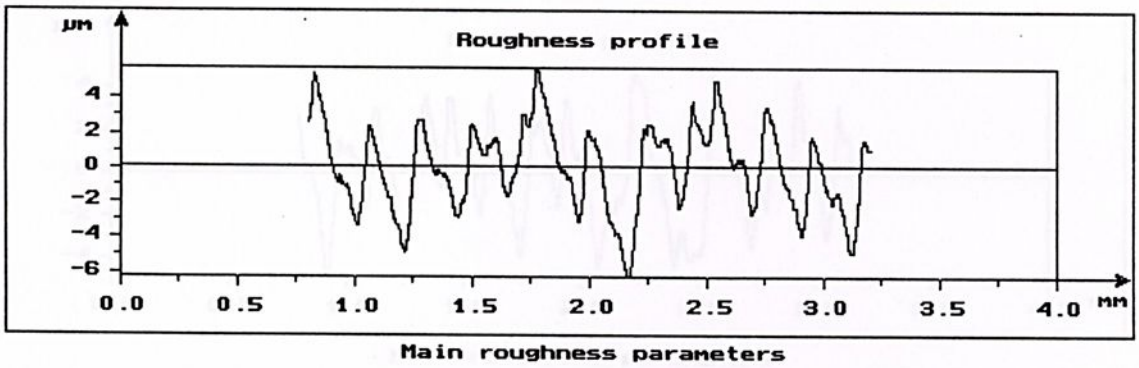
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,05 C241



Main roughness parameters

Ra	=	1.81 µm	Rsk	=	0.255
Rp	=	6.12 µm	Rku	=	2.56
Rq	=	2.21 µm	Rz	=	10.6 µm
Rv	=	4.43 µm	Ry	=	10.6 µm
Rt	=	10.6 µm	RSm	=	213 µm
RS	=	90.1 µm			

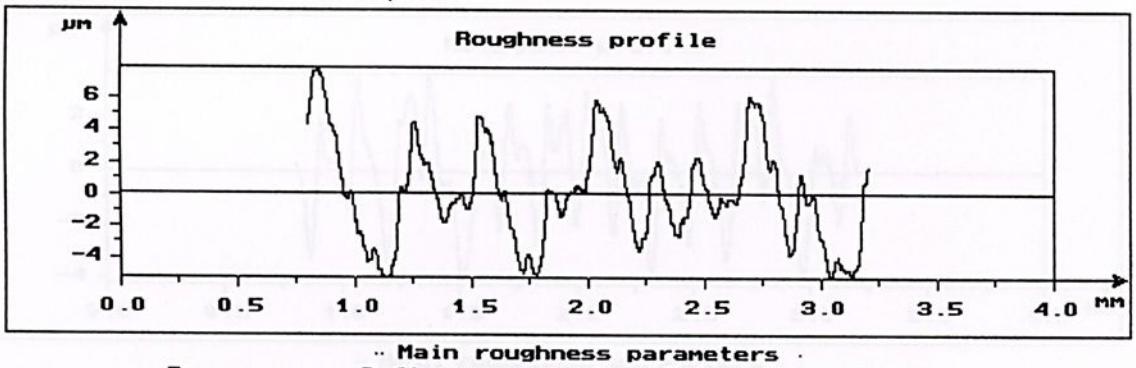
FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,0E C251



Main roughness parameters

Ra	=	2 µm	Rsk	=	-0.126
Rp	=	5.8 µm	Rku	=	2.56
Rq	=	2.42 µm	Rz	=	12.1 µm
Rv	=	6.26 µm	Ry	=	12.1 µm
Rt	=	12.1 µm	RSm	=	236 µm
RS	=	103 µm			

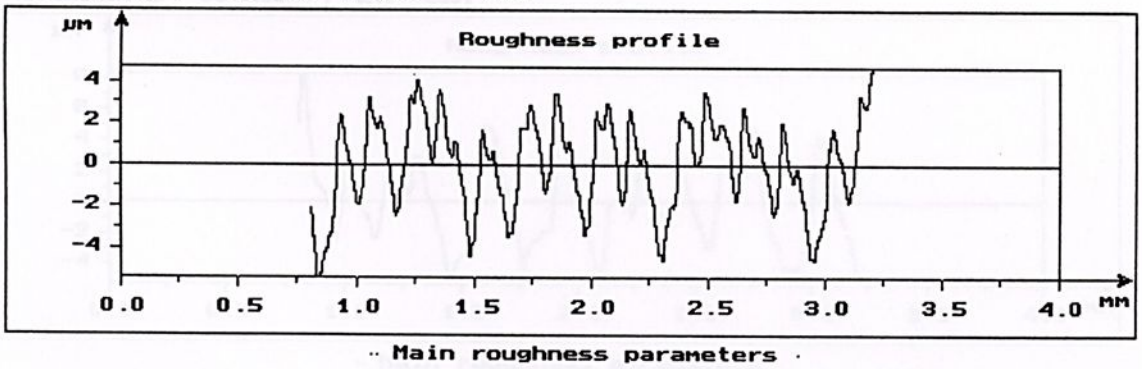
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,10 C311



Main roughness parameters

Ra	=	2.41 µm	Rsk	=	0.364
Rp	=	7.97 µm	Rku	=	2.63
Rq	=	3.1 µm	Rz	=	13.1 µm
Rv	=	5.17 µm	Ry	=	13.1 µm
Rt	=	13.1 µm	RSm	=	216 µm
RS	=	78.3 µm			

FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,10 C321

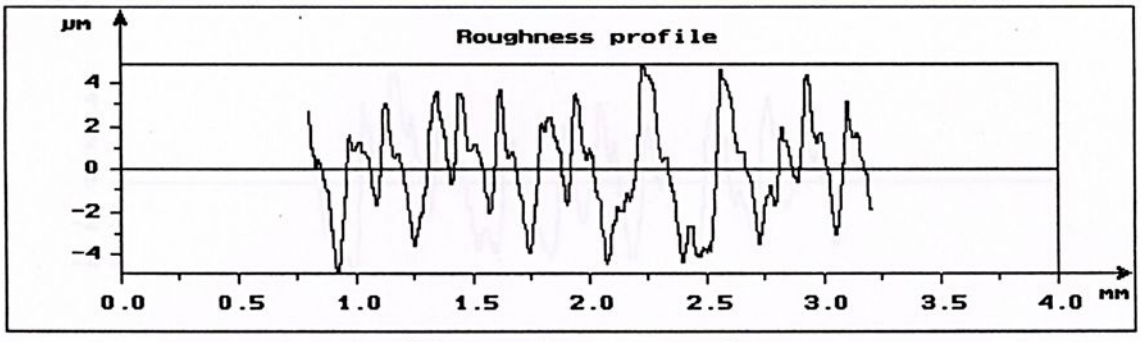


Main roughness parameters

Ra	=	1.79 µm	Rsk	=	-0.393
Rp	=	4.69 µm	Rku	=	2.39
Rq	=	2.16 µm	Rz	=	10.1 µm
Rv	=	5.41 µm	Ry	=	10.1 µm
Rt	=	10.1 µm	RSm	=	185 µm
RS	=	88 µm			

unesp

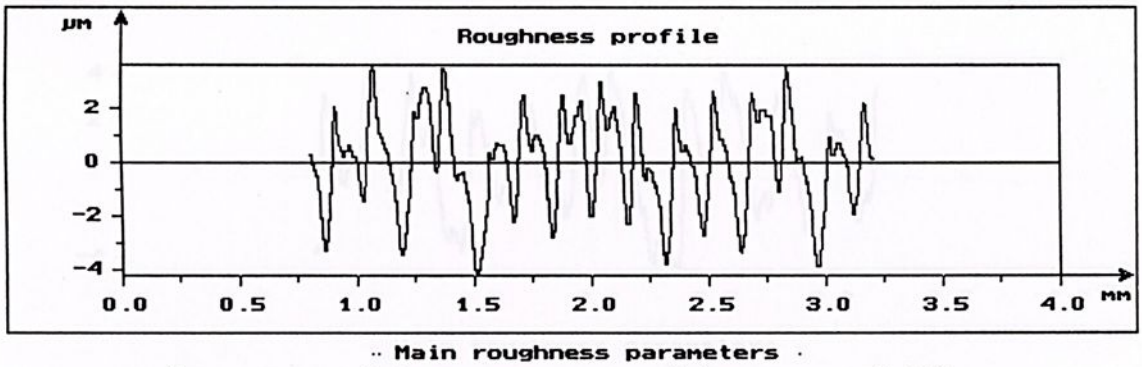
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,10 C331



· Main roughness parameters ·

Ra	=	1.82 µm	Rsk	=	-0.0641
Rp	=	4.91 µm	Rku	=	2.35
Rq	=	2.21 µm	Rz	=	9.79 µm
Rv	=	4.88 µm	Ry	=	9.79 µm
Rt	=	9.79 µm	RSm	=	190 µm
RS	=	85.3 µm			

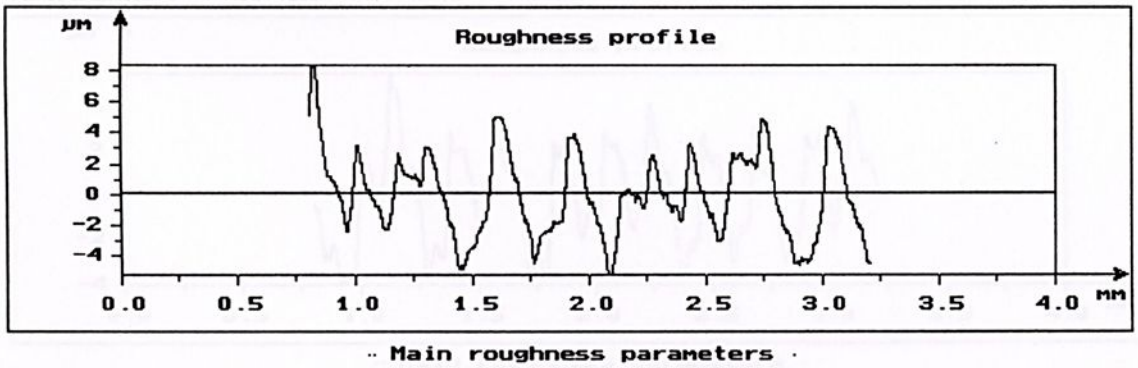
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,10 C341



· Main roughness parameters ·

Ra	=	1.4 µm	Rsk	=	-0.348
Rp	=	3.69 µm	Rku	=	2.52
Rq	=	1.73 µm	Rz	=	7.92 µm
Rv	=	4.23 µm	Ry	=	7.92 µm
Rt	=	7.92 µm	RSm	=	156 µm
RS	=	84.9 µm			

FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,10 C351

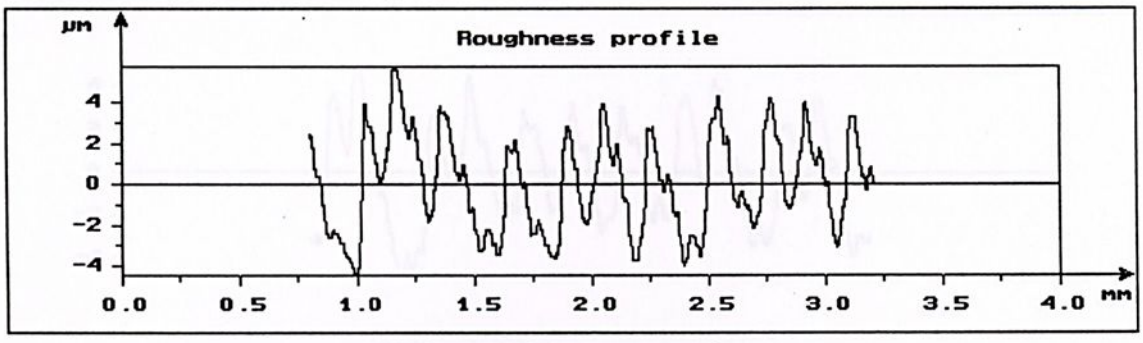


· Main roughness parameters ·

Ra	=	2.2 µm	Rsk	=	0.3
Rp	=	8.42 µm	Rku	=	2.76
Rq	=	2.69 µm	Rz	=	13.7 µm
Rv	=	5.29 µm	Ry	=	13.7 µm
Rt	=	13.7 µm	RSm	=	245 µm
RS	=	108 µm			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

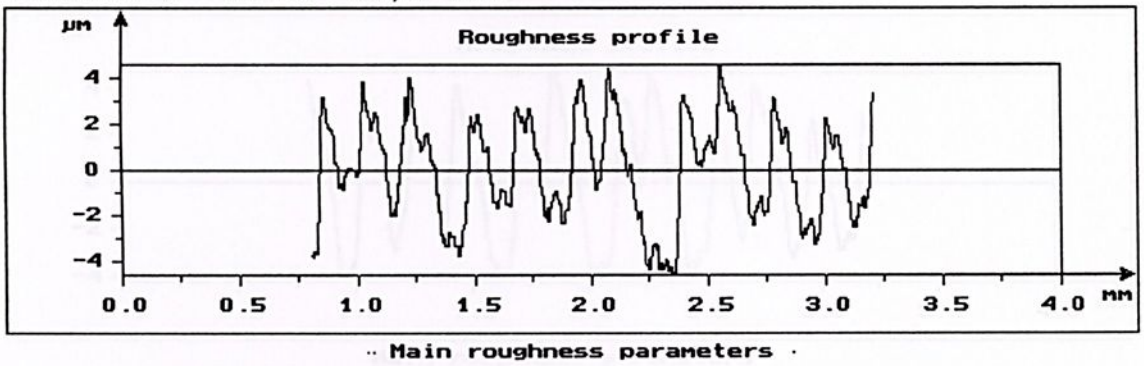
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,15 C411



Main roughness parameters

Ra	=	1.99 µm	Rsk	=	0.121
Rp	=	5.81 µm	Rku	=	2.07
Rq	=	2.34 µm	Rz	=	10.3 µm
Rv	=	4.44 µm	Ry	=	10.3 µm
Rt	=	10.3 µm	RSm	=	183 µm
RS	=	79.8 µm			

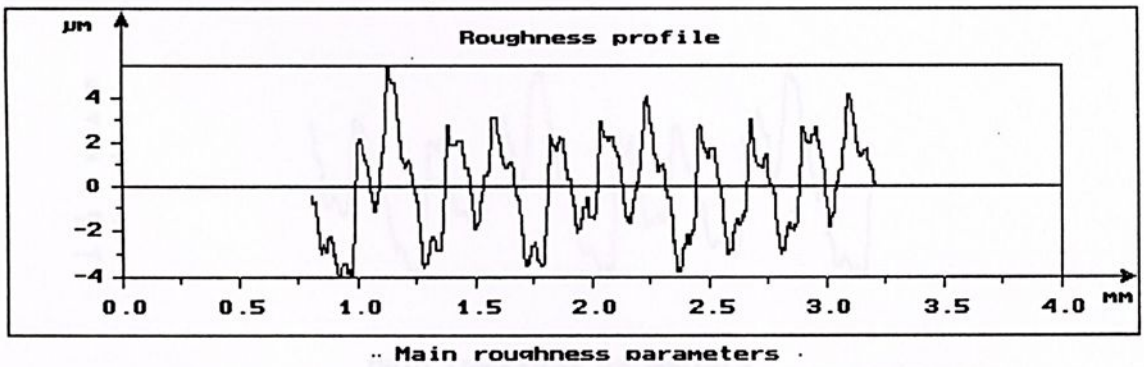
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,15 C421



Main roughness parameters

Ra	=	1.86 µm	Rsk	=	-0.156
Rp	=	4.61 µm	Rku	=	2.07
Rq	=	2.18 µm	Rz	=	9.18 µm
Rv	=	4.57 µm	Ry	=	9.18 µm
Rt	=	9.18 µm	RSm	=	196 µm
RS	=	50.9 µm			

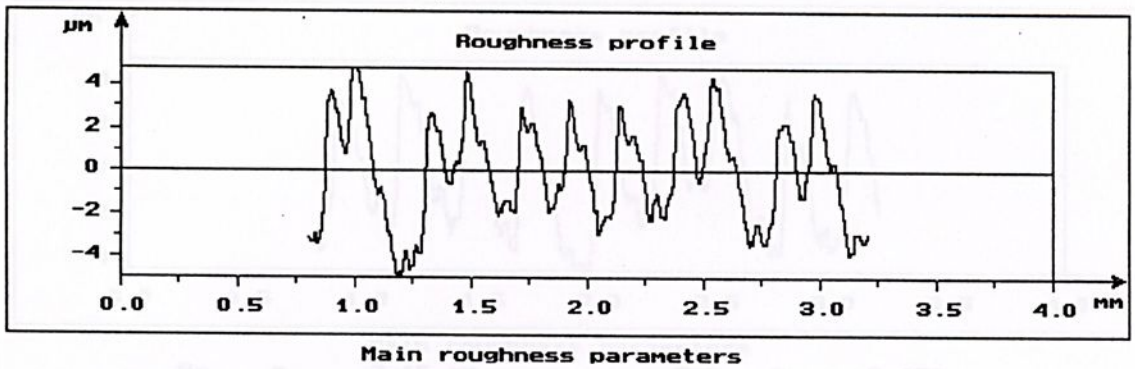
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,15 C431



Main roughness parameters

Ra	=	1.81 µm	Rsk	=	-0.0337
Rp	=	5.42 µm	Rku	=	2.12
Rq	=	2.1 µm	Rz	=	9.45 µm
Rv	=	4.03 µm	Ry	=	9.45 µm
Rt	=	9.45 µm	RSm	=	206 µm
RS	=	69 µm			

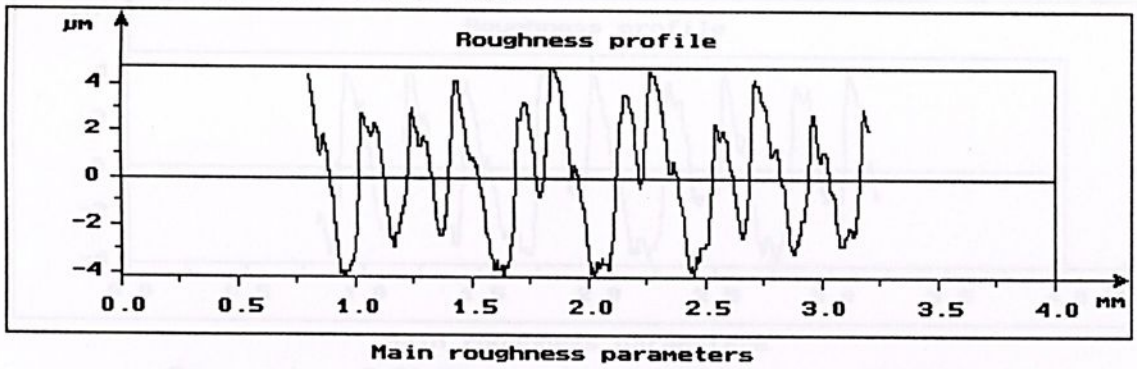
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,15 C441



Main roughness parameters

Ra	=	2.04 µm	Rsk	=	-0.0425
Rp	=	4.83 µm	Rku	=	2.03
Rq	=	2.38 µm	Rz	=	9.8 µm
Rv	=	4.97 µm	Ry	=	9.8 µm
Rt	=	9.8 µm	RSm	=	230 µm
RS	=	73.3 µm			

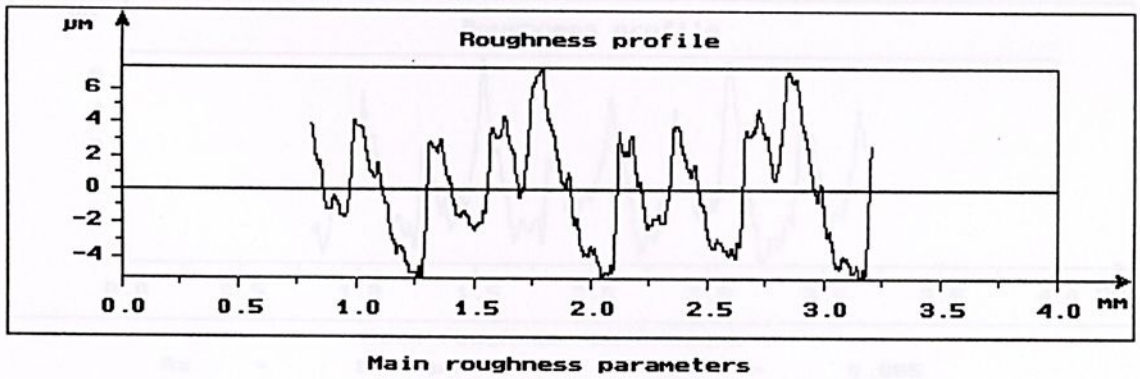
FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,15 C451



Main roughness parameters

Ra	=	2.12 µm	Rsk	=	-0.0389
Rp	=	4.71 µm	Rku	=	1.85
Rq	=	2.45 µm	Rz	=	8.91 µm
Rv	=	4.2 µm	Ry	=	8.91 µm
Rt	=	8.91 µm	RSm	=	215 µm
RS	=	85.6 µm			

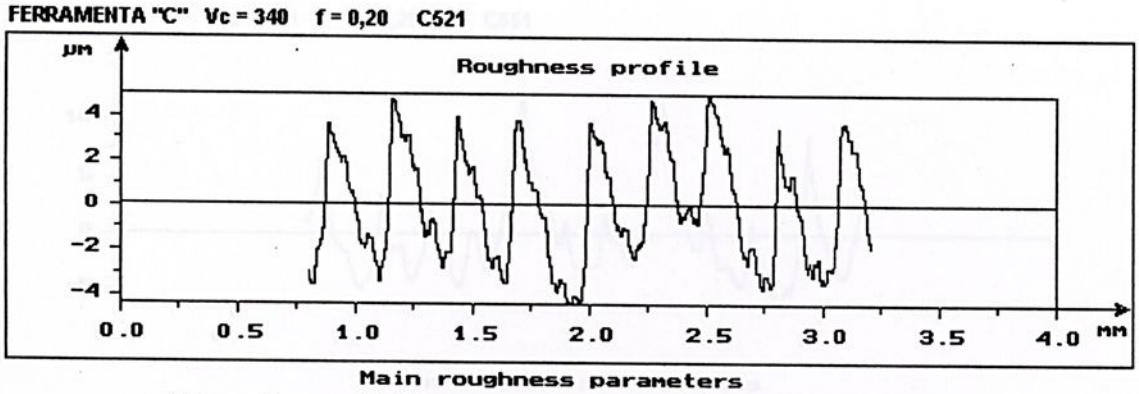
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,20 C511



Main roughness parameters

Ra	=	2.73 µm	Rsk	=	0.19
Rp	=	7.39 µm	Rku	=	2.14
Rq	=	3.2 µm	Rz	=	12.7 µm
Rv	=	5.29 µm	Ry	=	12.7 µm
Rt	=	12.7 µm	RSm	=	266 µm
RS	=	59.6 µm			

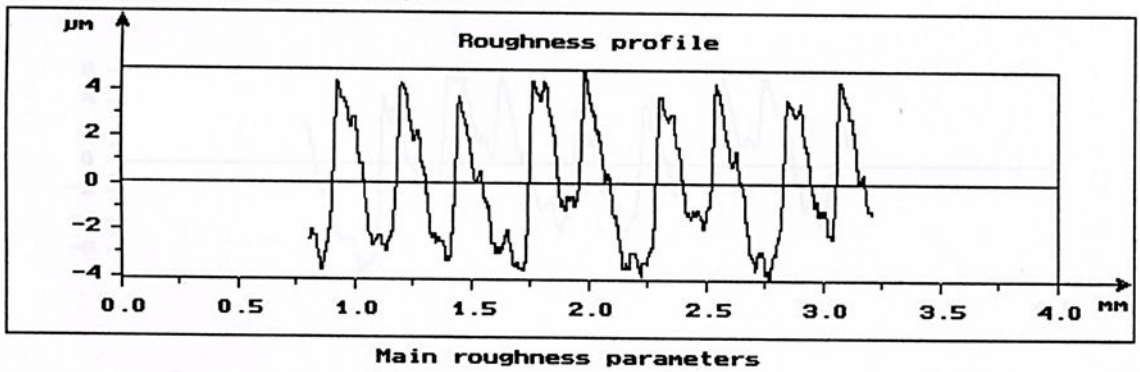
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,20 C521



Main roughness parameters

Ra	=	2.15 µm	Rsk	=	0.158
Rp	=	5.02 µm	Rku	=	1.84
Rq	=	2.47 µm	Rz	=	9.38 µm
Rv	=	4.36 µm	Ry	=	9.38 µm
Rt	=	9.38 µm	RSm	=	244 µm
RS	=	68.4 µm			

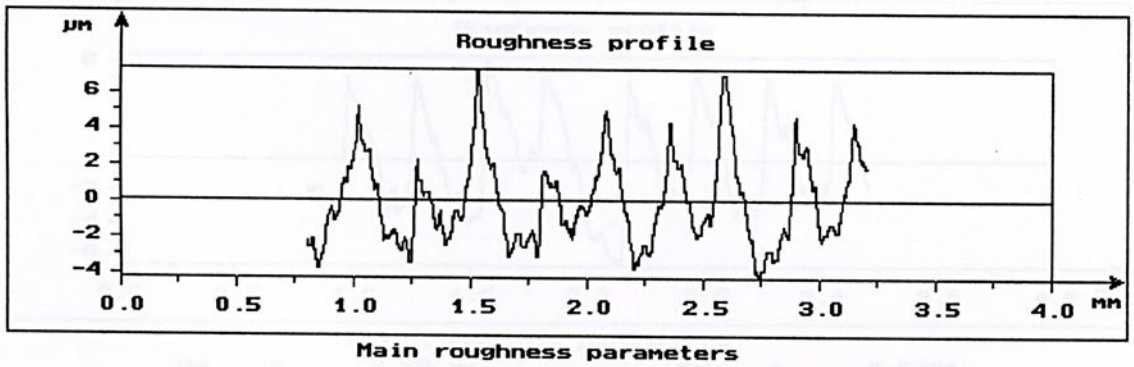
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,20 C531



Main roughness parameters

Ra	=	2.21 µm	Rsk	=	0.214
Rp	=	4.9 µm	Rku	=	1.71
Rq	=	2.51 µm	Rz	=	9 µm
Rv	=	4.1 µm	Ry	=	9 µm
Rt	=	9 µm	RSm	=	269 µm
RS	=	59.6 µm			

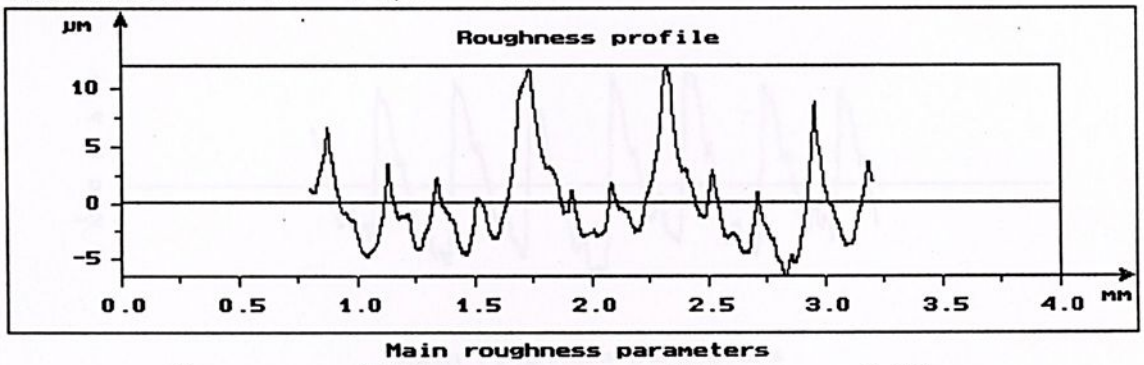
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,20 C541



Main roughness parameters

Ra	=	1.97 µm	Rsk	=	0.665
Rp	=	7.32 µm	Rku	=	2.94
Rq	=	2.38 µm	Rz	=	11.5 µm
Rv	=	4.2 µm	Ry	=	11.5 µm
Rt	=	11.5 µm	RSm	=	270 µm
RS	=	60.7 µm			

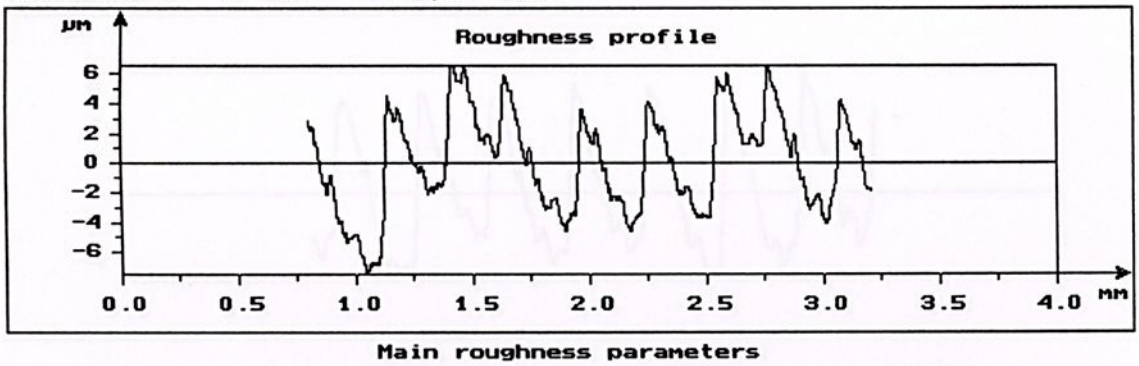
FERRAMENTE "C" Vc = 160 f = 0,20 C551



Main roughness parameters

Ra	=	2.81 µm	Rsk	=	1.17
Rp	=	12 µm	Rku	=	4.31
Rq	=	3.7 µm	Rz	=	18.4 µm
Rv	=	6.43 µm	Ry	=	18.4 µm
Rt	=	18.4 µm	RSm	=	214 µm
RS	=	131 µm			

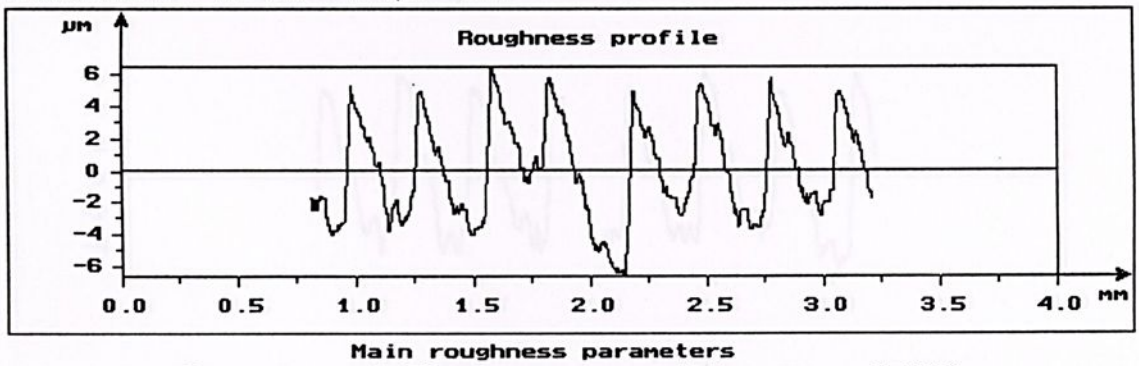
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,25 C611



Main roughness parameters

Ra	=	2.8 µm	Rsk	=	-0.0325
Rp	=	6.57 µm	Rku	=	2.2
Rq	=	3.29 µm	Rz	=	14.1 µm
Rv	=	7.49 µm	Ry	=	14.1 µm
Rt	=	14.1 µm	RSm	=	323 µm
RS	=	56.6 µm			

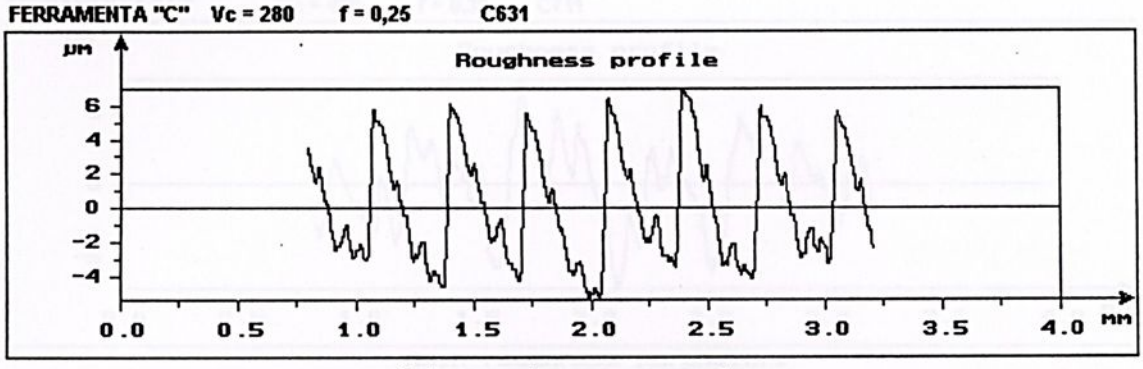
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,25 C621



Main roughness parameters

Ra	=	2.59 µm	Rsk	=	0.0881
Rp	=	6.47 µm	Rku	=	2.07
Rq	=	3.01 µm	Rz	=	13 µm
Rv	=	6.57 µm	Ry	=	13 µm
Rt	=	13 µm	RSm	=	298 µm
RS	=	64.2 µm			

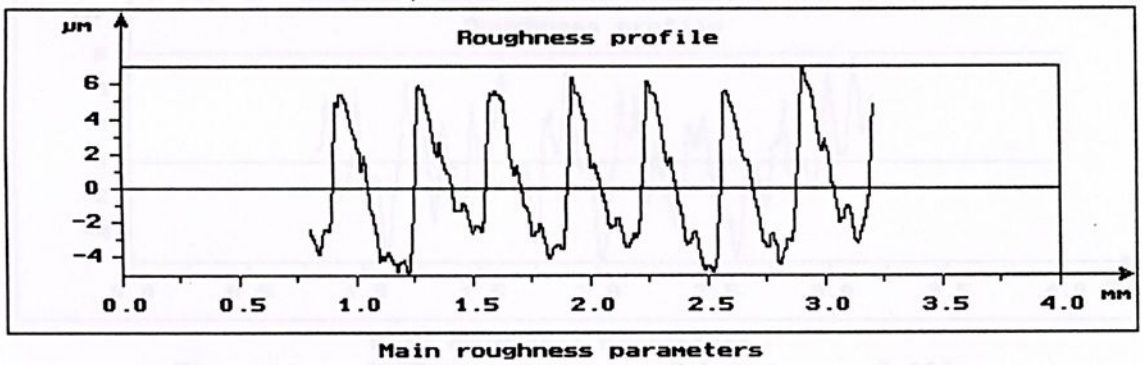
FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,25 C631



Main roughness parameters

Ra	=	2.73 µm	Rsk	=	0.403
Rp	=	7.01 µm	Rku	=	2.03
Rq	=	3.17 µm	Rz	=	12.4 µm
Rv	=	5.4 µm	Ry	=	12.4 µm
Rt	=	12.4 µm	RSm	=	319 µm
RS	=	73.2 µm			

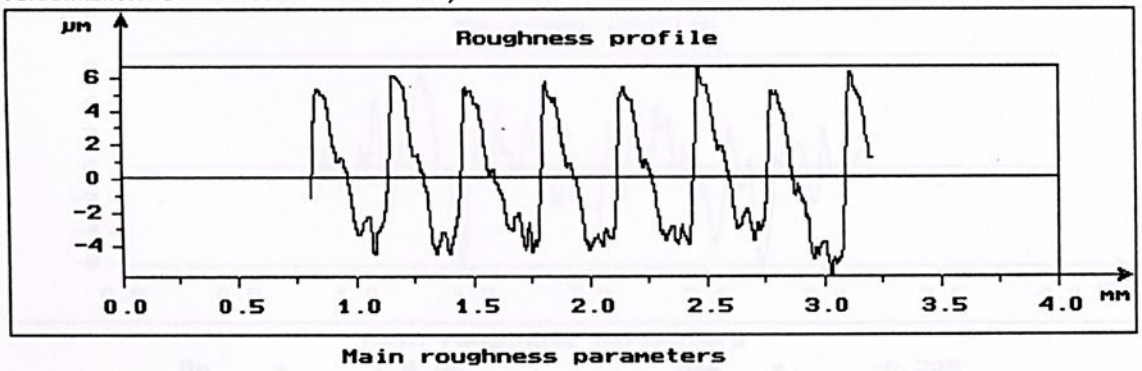
FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,25 C641



Main roughness parameters

Ra	=	2.89 µm	Rsk	=	0.413
Rp	=	7.03 µm	Rku	=	1.87
Rq	=	3.3 µm	Rz	=	12.1 µm
Rv	=	5.05 µm	Ry	=	12.1 µm
Rt	=	12.1 µm	RSm	=	327 µm
RS	=	80.1 µm			

FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,25 C651

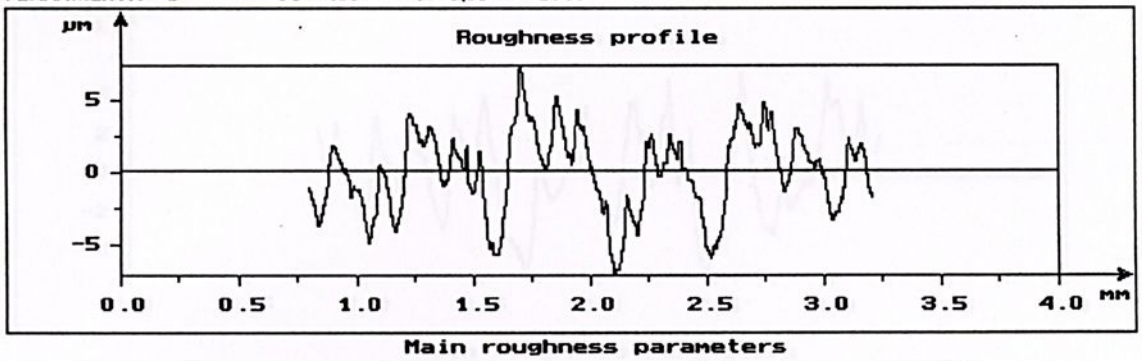


Main roughness parameters

Ra	=	3 µm	Rsk	=	0.331
Rp	=	6.68 µm	Rku	=	1.73
Rq	=	3.4 µm	Rz	=	12.5 µm
Rv	=	5.79 µm	Ry	=	12.5 µm
Rt	=	12.5 µm	RSm	=	326 µm
RS	=	71.3 µm			

unesp

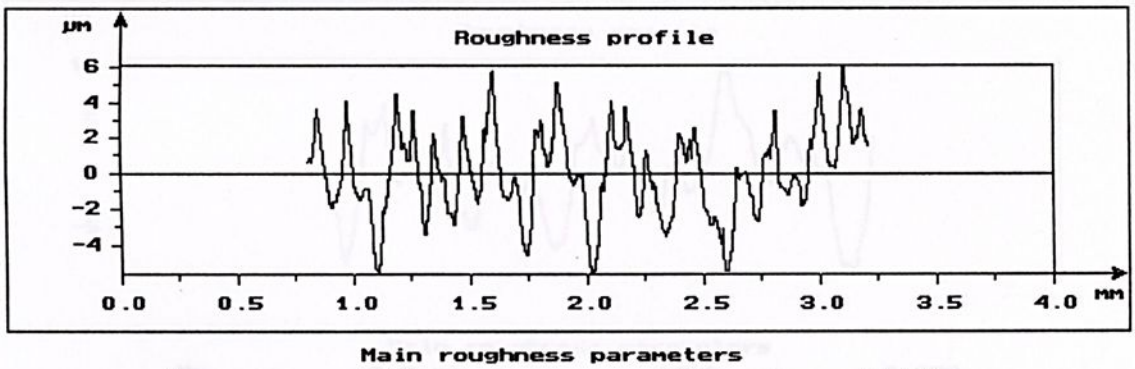
FERRAMENTA "C" Vc = 400 f = 0,30 C711



Main roughness parameters

Ra	=	2.33 µm	Rsk	=	-0.302
Rp	=	7.36 µm	Rku	=	2.53
Rq	=	2.83 µm	Rz	=	14.5 µm
Rv	=	7.15 µm	Ry	=	14.5 µm
Rt	=	14.5 µm	RSm	=	221 µm
RS	=	65.1 µm			

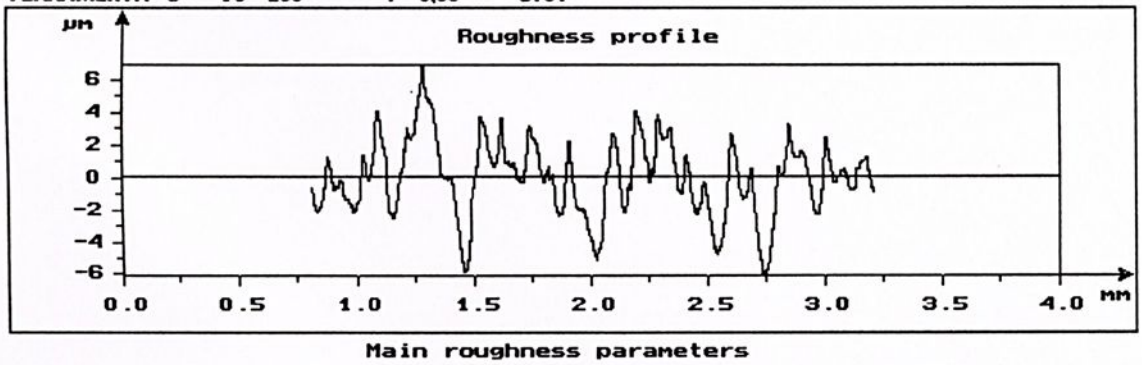
FERRAMENTA "C" Vc = 340 f = 0,30 C721



Main roughness parameters

Ra	=	1.92 µm	Rsk	=	-0.111
Rp	=	6.1 µm	Rku	=	2.69
Rq	=	2.37 µm	Rz	=	11.7 µm
Rv	=	5.64 µm	Ry	=	11.7 µm
Rt	=	11.7 µm	RSm	=	165 µm
RS	=	61.3 µm			

FERRAMENTA "C" Vc = 280 f = 0,30 C731

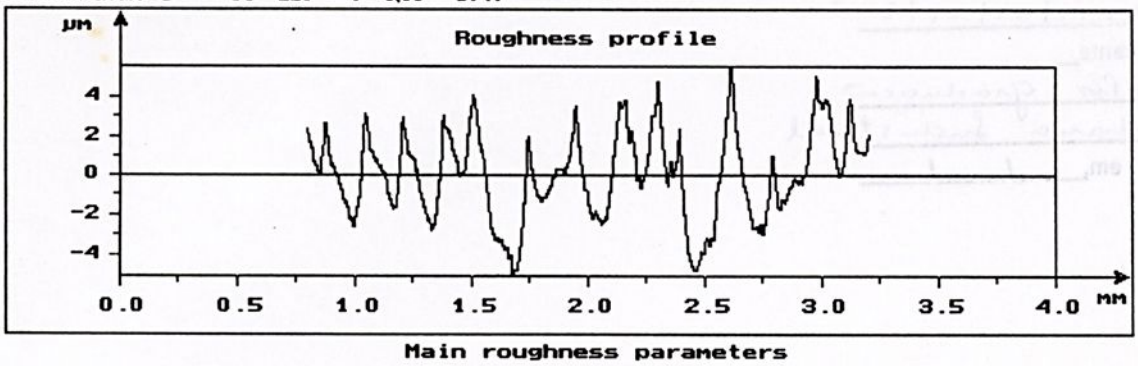


Main roughness parameters

Ra	=	1.8 µm	Rsk	=	-0.206
Rp	=	6.91 µm	Rku	=	3.14
Rq	=	2.32 µm	Rz	=	13 µm
Rv	=	6.06 µm	Ry	=	13 µm
Rt	=	13 µm	RSm	=	126 µm
RS	=	69.4 µm			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

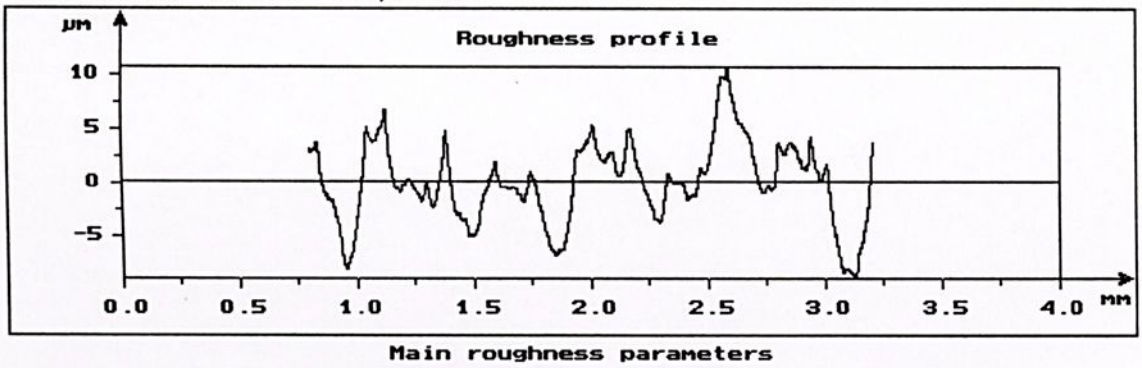
'FERRAMENTA "C" Vc = 220 f = 0,30 C741



Main roughness parameters

Ra	=	1.76 µm	Rsk	=	-0.11
Rp	=	5.58 µm	Rku	=	2.56
Rq	=	2.2 µm	Rz	=	10.7 µm
Rv	=	5.11 µm	Ry	=	10.7 µm
Rt	=	10.7 µm	RSm	=	163 µm
RS	=	72.1 µm			

'FERRAMENTA "C" Vc = 160 f = 0,30 C751



Main roughness parameters

Ra	=	2.9 µm	Rsk	=	-0.072
Rp	=	10.7 µm	Rku	=	3.1
Rq	=	3.77 µm	Rz	=	19.6 µm
Rv	=	8.95 µm	Ry	=	19.6 µm
Rt	=	19.6 µm	RSm	=	217 µm
RS	=	98.9 µm			

0810000991