

FELIPE AYRES NASCIMENTO

AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO AISI 410

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica na área
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2008

N244a Nascimento, Felipe Ayres
Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável martensítico
AISI 410 / Felipe Ayres Nascimento . – Guaratinguetá :
[s.n.], 2008
134 f. : il.
Bibliografia: f. 121-127

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2. Aço inoxidável I. Título

CDU 621.9

DADOS CURRICULARES

FELIPE AYRES NASCIMENTO

NASCIMENTO	08.12.1977 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Luiz Fernando Costa Nascimento Rosa Maria Ayres Nascimento
1996/2001	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá

Dedico este trabalho a minha esposa, que tanto me apoiou durante todo o tempo, e a meus pais pela minha formação educacional e moral.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, pelo suporte e incentivo.

Aos meus pais pela valiosa formação e carinho.

À Alstom pelo investimento em tempo e materiais.

Ao meu orientador, por toda a ajuda e conhecimento.

Ao pessoal do Laboratório de Usinagem.

NASCIMENTO, F. A. **Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável martensítico AISI 410**. 2008. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

RESUMO

Os aços inoxidáveis martensíticos, essencialmente ligas Fe – Cr – C, são largamente utilizados na fabricação de componentes de Turbinas Hidráulicas devido à elevada resistência ao ataque químico e a sua maior resistência mecânica, quando comparado aos outros tipos de aços inoxidáveis. A proposta deste trabalho é estudar o acabamento superficial do aço inoxidável AISI 410 sob diferentes condições de corte, visto que este requisito é de suma importância para o funcionamento de alguns componentes de Turbinas Hidráulicas. Serão avaliados também os diferentes tipos de cavacos obtidos, os desgastes nas ferramentas de corte e comparados os resultados de rugosidade obtidos experimentalmente com os valores obtidos através da utilização da equação proposta pela literatura. Durante os ensaios foram variados os parâmetros de corte, sendo eles a velocidade de corte, o avanço por volta, a profundidade de corte e o tipo de pastilha, e medida a rugosidade para cada condição. Com os valores de rugosidade obtidos experimentalmente foi possível, através de uma regressão linear, propor uma equação para o seu cálculo e comparar estatisticamente os erros encontrados da utilização de ambas as equações. Os resultados mostraram que as condições de acabamento não são severas a ponto de desgastar as pastilhas, que a formação da APC influencia diretamente na rugosidade, que a pastilha com geometria Wiper fornece baixos valores de rugosidade quando empregados altas taxas de avanço e que são observadas grandes variações quando comparados os resultados de rugosidade obtidos nos ensaios com os calculados pela equação teórica da rugosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem, torneamento, rugosidade, AISI 410, usinagem a seco.

NASCIMENTO, F. A. **Machinability evaluation of the martensitic stainless steel AISI 410**. 2008. 134 p. Dissertation (MSc in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, São Paulo State University, 2008.

ABSTRACT

The martensitic stainless steel, essentially alloys Fe – Cr – C, are widely used for the manufacture of Hydraulic Turbines components due to its high resistance to chemical attack and its greater mechanical resistance, when compared to other stainless steels. The proposal of this work is to study surface roughness on the AISI 410 stainless steel under different cutting conditions, since this requirement is very important to the correct functioning of some components of Hydraulic Turbines, the different types of chips, the wears on the cutting tools and to compare the results of roughness obtained experimentally and calculated by using the equation proposed by the literature. During the tests was varied the cutting parameters, witch were the cutting speed, the feed rate, the depth of cut and the tool, measuring the superficial roughness for each condition. With the values of roughness obtained experimentally was possible, using a linear regression, to purpose an equation to calculate the surface roughness and the comparison between the errors when used both equation. The results has shown that the finishing conditions are not severe enough to initiate the wear on cutting tools, the BUE influences the roughness, the Wiper geometry results in low values of roughness when using high feed rates and it is observed great variations when compared roughness results obtained experimentally and the results from the theoretical equation for roughness calculation.

KEY-WORDS: Machining, turning, roughness, AISI 410, dry machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Operação de Torneamento.....	18
Figura 2: Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo	19
Figura 3: Geometria da ferramenta de corte.....	21
Figura 4: Ângulos das ferramentas de corte medidos (a) no plano de referência da pastilha e (b) no plano ortogonal.....	21
Figura 5: Sistema de referência da pastilha.....	22
Figura 6: Exemplo de Corte Ortogonal	23
Figura 7: Diagrama esquemático da cunha de corte.....	24
Figura 8: Principais áreas de interesse na formação do cavaco	26
Figura 9: Classificação dos cavacos, conforme norma ISO 3685.....	29
Figura 10: Variação do coeficiente volumétrico de acordo com o tipo de cavaco	30
Figura 11: Variação da forma do cavaco em função das variáveis de processo	31
Figura 12: Influência da Porcentagem de Cobalto e da Temperatura na Dureza do Metal Duro.....	37
Figura 13: Tendência de Crescimento de Características das Classes de Metal Duro.....	39
Figura 14: Desgaste de Flanco	45
Figura 15: Comportamento da abrasão durante a usinagem	46
Figura 16: Desgaste de Cratera.....	47
Figura 17: Deformações Plásticas	47
Figura 18: Desgaste de Entalhe	48
Figura 19: Trincas Térmicas.....	49
Figura 20: Trincas por Fadiga Mecânica.....	49
Figura 21: Lascamento da Aresta de Corte	50
Figura 22: Fratura	51
Figura 23: Termos da Textura Superficial.....	52
Figura 24: Rugosidade Média x Coeficiente de Transmissão de Calor	54
Figura 25: Rugosidade Média Ra	55
Figura 26: Média da Raiz Quadrática Rq.....	56
Figura 27: Rugosidade Máxima Ry.....	57

Figura 28: Rugosidade em função do Processo de Fabricação	58
Figura 29: Relação entre Velocidade de Corte e Rugosidade Máxima.....	59
Figura 30: Contribuição Geométrica do avanço e raio de ponta da pastilha na rugosidade.....	60
Figura 31: Taxa de corrosão de aços ao cromo expostos por 10 anos a uma atmosfera industrial	64
Figura 32: Aço Inoxidável CA15	66
Figura 33: Sugestão de geometria para a usinagem do aço inoxidável martensítico	71
Figura 34: Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento.	72
Figura 35: Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo	73
Figura 36: Torno CNC Romi CENTUR 30S	75
Figura 37: Comparação entre pastilha Wiper e com raio de ponta convencional.....	75
Figura 38: Aspecto metalográfico da Classe 4225	76
Figura 39: Rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301	77
Figura 40: Microscópio óptico, Epiphot 200, Nikon	78
Figura 41: Avaliação da Rugosidade em função da Utilização de Fluido de Corte.....	83
Figura 42: Imagens dos cavacos obtidos através das condições de corte $V_c = 70$ m/min, $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,4$ mm/volta (a) com fluido de corte e (b) a seco	84
Figura 43: Imagens dos cavacos obtidos através das condições de corte $V_c = 70$ m/min, $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,3$ mm/volta (a) com fluido de corte e (b) a seco	84
Figura 44: Análise dos desgastes e da formação da APC na ferramenta CNMG 120408 PM Classe 4025 (ISO P25).....	86
Figura 45: Avaliação da Rugosidade (R_a) em função do Comprimento de Corte.....	87
Figura 46: Avaliação da Rugosidade (R_y) em função do Comprimento de Corte	88
Figura 47: Rugosidade média R_a e máxima R_y em função de V_c e da pastilha, com $f = 0,1$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.	89
Figura 48: Rugosidade média R_a e máxima R_y em função de V_c e da pastilha, com $f = 0,2$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.	90
Figura 49: Rugosidade média R_a e máxima R_y em função de V_c e da pastilha, com $f = 0,3$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.	90

Figura 50: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,4 mm/volta e ap = 0,05 mm.	91
Figura 51: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	93
Figura 52: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	93
Figura 53: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	94
Figura 54: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	94
Figura 55: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,1 mm/volta e ap = 0,1 mm.	96
Figura 56: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,2 mm/volta e ap = 0,1 mm.	96
Figura 57: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,3 mm/volta e ap = 0,1 mm.	96
Figura 58: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,4 mm/volta e ap = 0,1 mm.	97
Figura 59: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	98
Figura 60: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	98
Figura 61: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	98
Figura 62: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	99
Figura 63: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,1 mm/volta e ap = 0,2 mm.	100
Figura 64: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,2 mm/volta e ap = 0,2 mm.	100

Figura 65: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,3 mm/volta e ap = 0,2 mm.	101
Figura 66: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com f = 0,4 mm/volta e ap = 0,2 mm.	101
Figura 67: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	102
Figura 68: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	102
Figura 69: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	102
Figura 70: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.	103
Figura 71: Pastilha CNMG 120408 PM Classe 4225 (ISO P25) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga.	104
Figura 72: Pastilha CNMG 120412 MM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga.	104
Figura 73: Pastilha CNMG 120412 WM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga.	105
Figura 74: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,05 mm e r _ε = 0,8 mm.	106
Figura 75: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,05 mm e r _ε = 1,2 mm.	107
Figura 76: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,1 mm e r _ε = 0,8 mm.	107
Figura 77: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,1 mm e r _ε = 1,2 mm.	108
Figura 78: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,2 mm e r _ε = 0,8 mm.	108
Figura 79: Comparação entre Ra teórico e real para ap = 0,2 mm e r _ε = 1,2 mm.	109
Figura 80: Análise dos fatores principais utilizados no cálculo de Ra.	111
Figura 81: Interações entre os fatores utilizados no cálculo de Ra.	112
Figura 82: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e ap = 0,05 mm.	113
Figura 83: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e ap = 0,05 mm. ..	114
Figura 84: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e ap = 0,1 mm.	115
Figura 85: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e ap = 0,1 mm.	115
Figura 86: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e ap = 0,2 mm.	116

Figura 87: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e $a_p = 0,2$ mm.117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química e Características dos Metais Duros.....	38
Tabela 2: Relação entre Rugosidade, Tolerância e Custo de Fabricação.....	53
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410)	72
Tabela 4: Valores dos parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.	79
Tabela 5: Parâmetros de corte para a avaliação da influência da utilização de fluido.....	82
Tabela 6: Parâmetros de Corte para a avaliação da Influência do Comprimento de Corte	87
Tabela 7: Avaliação dos variáveis da regressão linear.....	110
Tabela 8: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $a_p = 0,05$	127
Tabela 9: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $a_p = 0,05$	127
Tabela 10: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,05$	128
Tabela 11: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $a_p = 0,1$	128
Tabela 12: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $a_p = 0,1$	129
Tabela 13: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,1$	129
Tabela 14: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $a_p = 0,2$	130
Tabela 15: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $a_p = 0,2$	130
Tabela 16: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,2$	131
Tabela 17: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $a_p = 0,05$ mm	132
Tabela 18: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $a_p = 0,1$ mm	133
Tabela 19: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $a_p = 0,1$ mm	134

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	taxa de remoção do material	m ³ /min
V _c	velocidade de corte	m/min
f	taxa de avanço	mm/volta
a _p	profundidade de corte	mm
I.U.	índice de usinabilidade	[1]
V _{c20}	velocidade de corte para tempo de vida da pastilha de 20 minutos	m/min
l	percurso de medição	mm
R _a	rugosidade média	μm
R _q	rugosidade média da raiz quadrática	μm
R _y	rugosidade máxima	μm
r _ε	raio da ponta da pastilha	mm
VB	desgaste de flanco	mm
L _c	comprimento de corte	m
L _f	comprimento de avanço	mm
D	diâmetro	mm

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO	18
2.1.1 Mecanismo de formação do cavaco	22
2.1.2 Características dos cavacos	27
2.2 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS	32
2.2.1 Introdução	32
2.2.2 Metal Duro.....	35
2.2.3 Metal Duro com Cobertura.....	40
2.3 Desgaste e Vida das Pastilhas.....	43
2.3.1 Introdução	43
2.3.2 Mecanismos de Desgaste.....	43
2.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	51
2.4.1 Parâmetros de rugosidade.....	55
2.5 AÇO INOXIDÁVEL E SUA USIMABILIDADE	61
2.5.1 Características dos aços inoxidáveis	62
2.5.2 Classificação dos aços inoxidáveis.....	64
2.5.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis.....	66
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	72
3.1. MATERIAL.....	72
3.2. CORPOS DE PROVA.....	72
3.3. ENSAIOS DE USINAGEM.....	73
3.4 EQUIPAMENTOS ADICIONAIS.....	77
3.5. METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS	78
3.5.1 Análise da superfície usinada	79
3.5.2 Análise do desgaste da pastilha	80
3.5.2 Análise estatística dos resultados	80
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
4.1 PRÉ-TESTES	82
4.2 ENSAIOS definitivos	89
4.3 COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE OBTIDA COM A TEÓRICA	105
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ERROS OBTIDOS	110
4.4.1 Análise dos principais fatores e a interação entre eles	110
4.4.2 Análise estatística para $a_p = 0,05$ mm	112
4.4.2 Análise estatística para $a_p = 0,1$ mm	114
4.4.3 Análise estatística para $a_p = 0,2$ mm	116
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	118
REFERÊNCIAS	120
APÊNDICES	127

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis martensíticos, essencialmente ligas Fe – Cr – C contendo de 11,5 a 18% de cromo, e de 0,09 a 0,15% de carbono, são largamente utilizados na fabricação de componentes de Turbinas Hidráulicas devido à elevada resistência ao ataque químico por diferentes meios e sua maior resistência mecânica, quando comparado aos outros tipos de aços inoxidáveis. São empregados na fabricação de rotores de turbinas, palhetas diretrizes, elementos de fixação, entre outros. Todos estes componentes apresentam requisitos de projeto no que tange a rugosidade superficial, e alguns deles apresentam dificuldades de serem usinados em acabamento por características como desbalanceamento de massa, necessidade de execução de ensaios não destrutivos, tolerâncias geométricas e dimensionais, entre outros.

A rugosidade obtida da usinagem deste material está diretamente relacionada com a confiabilidade do componente durante o seu funcionamento, pois tem influência direta na nucleação e propagação de trincas, na obtenção de tolerâncias de fabricação, no escoamento de fluídos, na transferência de calor, resistência à corrosão, resistência à fadiga, entre outros requisitos.

Comumente, a rugosidade é medida em termos de Ra e Ry, sendo que a primeira fornece o valor da média aritmética dos valores absolutos, e a segunda o seu valor máximo. Devido à facilidade de medição, a rugosidade média é bastante empregada em controles continuados em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies de pouca responsabilidade e que apresentam sulcos bem definidos, sendo peças torneadas exemplos clássicos. (Amorin, 2002)

Sendo assim, a avaliação dos fatores que influenciam a rugosidade obtida após a usinagem deste material devem ser definidos e controlados durante o processo de fabricação, para que se tenha como resultados superfícies usinadas que atendam aos requisitos dos projetos. Esta avaliação também foi conduzida nestes moldes por outros autores, como Bordinassi (2006), que avaliou os efeitos principais no processo de torneamento do aço inoxidável super-duplex, quando foram consideradas como variáveis de entrada a classe do inserto de metal duro, avanço, profundidade de corte, velocidade de corte e utilização de fluido. Em outro estudo conduzido dentro desta

mesma linha, Javidi (2007) descreveu como o avanço e o raio de ponta afetaram a integridade superficial e a resistência à fadiga, e concluiu que o efeito da tensão residual causada pela usinagem tem maior impacto na resistência à fadiga do que a rugosidade obtida.

Assim sendo, para o presente trabalho serão utilizadas barras de aço inoxidável martensítico AISI 410, e variados os parâmetros e ferramentas de corte. Os parâmetros de corte que serão investigados são a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço, e também serão avaliadas pastilhas com diferentes geometrias e classes, além da influencia da utilização de fluido de corte durante os ensaios. A classe da pastilha será investigada porque, apesar da classe M ser indicada para a usinagem de aços inoxidáveis, para algumas aplicações onde se tem massa desbalanceada, pode ser necessário a utilização de uma ferramenta com maior tenacidade, como a, por exemplo, a classe P.

Além disso, sabe-se que atualmente a aplicação de fluidos de corte está sendo questionada, já que causa riscos aos operadores pela exposição a alergias e contato com produtos químicos, e custos para as empresas, sendo que vários autores, como Dunlap (1997), Sreejith et al. (2000), DSouza (2004), conduziram estudos sobre este tema.

Para cada combinação de parâmetros de corte, e pastilhas, foram medidas as rugosidades resultantes em termos de R_a e R_y . Com estes resultados experimentais, foi possível compará-los com os obtidos através da utilização da equação de cálculo da rugosidade, proposta pela literatura, e definir através de uma regressão linear, uma equação que melhor represente a realidade. Com os resultados também foi possível também otimizar as condições de corte para o processo de acabamento, reduzindo tempos e custos de fabricação.

Durante o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica, foi observado um grande número de trabalhos envolvendo aços inoxidáveis austeníticos e uma escassez de temas com os martensíticos. Assim sendo, o presente trabalho também visa disponibilizar novas informações e conclusões envolvendo a usinagem de um material com inúmeras aplicações práticas e poucas referências bibliográficas.

O presente trabalho está dividido como segue:

1 – Revisão Bibliográfica: onde serão apresentados conceitos envolvidos na usinagem em acabamento de aços inoxidáveis, como a descrição do processo de torneamento, as ferramentas de corte, os tipos de desgastes envolvidos no processo e os critérios de avaliação de rugosidades das superfícies;

2 – Materiais e Métodos: onde estão descritos os detalhes do material empregado durante os ensaios, sua composição, dureza, etc., equipamentos utilizado nos ensaios, bem como o procedimento experimental para a aquisição e análise dos resultados;

3 – Resultados e Discussões: traz a análise dos resultados de rugosidade e desgaste obtidos experimentalmente para cada profundidade de corte, as comparações entre eles, e com o apresentado pela literatura, além do tratamento estatístico dos resultados, empregando principalmente a regressão linear e o sumário estatístico para a comparação dos erros obtidos da utilização da equação para cálculo de Ra encontrada na literatura e a proposta neste trabalho;

4 – Conclusões: trazendo as análises dos fatores que influenciam nas rugosidades obtidas, as avaliações das melhores condições de corte e as comparações entre os resultados reais e os previstos pela literatura.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Segundo Trent (2000), o torneamento, conforme Figura 1, é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno e rotacionado, enquanto a pastilha, presa firmemente em um porta-pastilha, move-se em plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça.

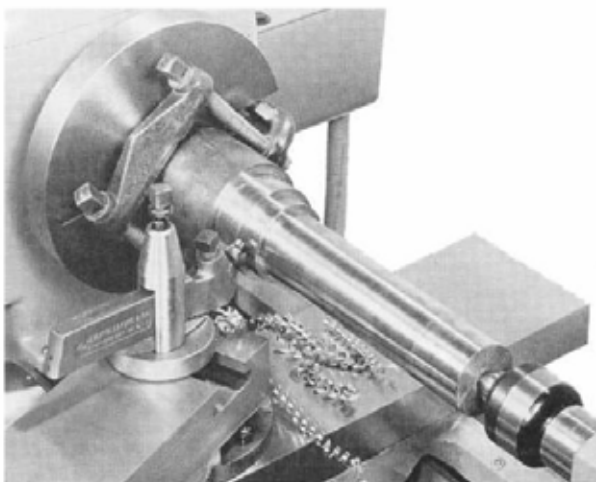


Figura 1: Operação de Torneamento (Trent, 2000).

Podem-se destacar três características do torneamento que não ocorrem em muitos outros processos de usinagem:

- O corte é normalmente contínuo;
- O corte pode ser descrito em coordenadas cilíndricas (coordenadas polares para a seção reta da peça em rotação e mais uma coordenada de profundidade para designar o movimento da pastilha);
- Ocorrem, simultaneamente, movimentos da peça e da pastilha (rotação da peça e translação da pastilha).

Ainda segundo Trent (2000) existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independente do material da peça e pastilha) determina o resultado final do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

Entre os parâmetros de corte, conforme ilustrado na Figura 2, a velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela pastilha, expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela pastilha por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da pastilha medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e V_c da pastilha. A partir destes três parâmetros é possível determinar a taxa de remoção do material (equação 1), parâmetro utilizado para a medição da eficiência da operação.

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (1)$$

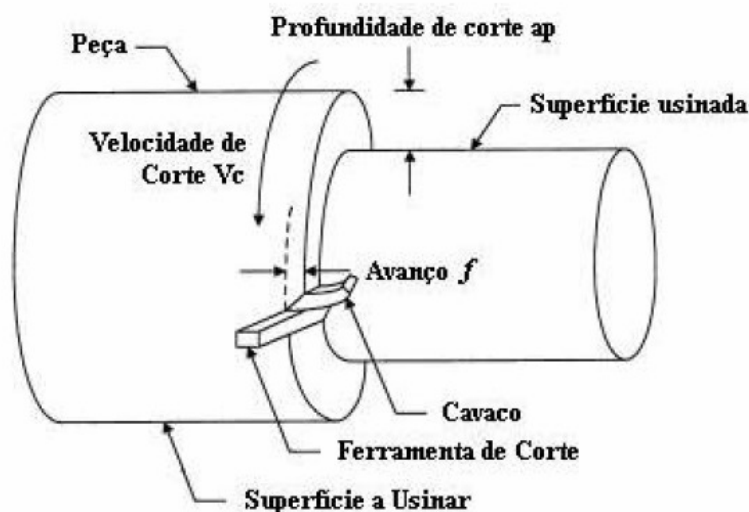


Figura 2: Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo (Amorin, 2002)

As superfícies definidas sobre a peça são:

- Superfície a usinar;
- Superfície em usinagem, divide-se em superfície em usinagem principal e secundária, de acordo com a aresta de corte com a qual está em contato;
- Superfície usinada.

Segundo Machado e Silva (1999), a geometria da pastilha, conforme ilustrada na Figura 3, é um dos fatores de maior influência no torneamento. A ferramenta de corte para torneamento é definida em:

- Superfície de saída ($A\gamma$): é a superfície da pastilha sobre a qual o cavaco desliza após o corte;
- Superfície de folga ($A\alpha$): é a superfície que determina a folga entre a pastilha e a superfície em usinagem principal;
- Superfície secundária de folga ($A'\alpha$): é a superfície que determina a folga entre a pastilha e a superfície em usinagem secundária;
- Cunha de corte: é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga, sobre a qual ocorre o corte do metal;
- Arestas de corte: são as arestas da cunha de corte, nas quais ocorre a interface pastilha-peça, e distingue-se como:
 - Aresta principal de corte (S): formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga;
 - Aresta secundária de corte (S'): formada pela intersecção das superfícies de saída e secundária de folga;
- Ponta de corte: local da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e a aresta secundária de corte;

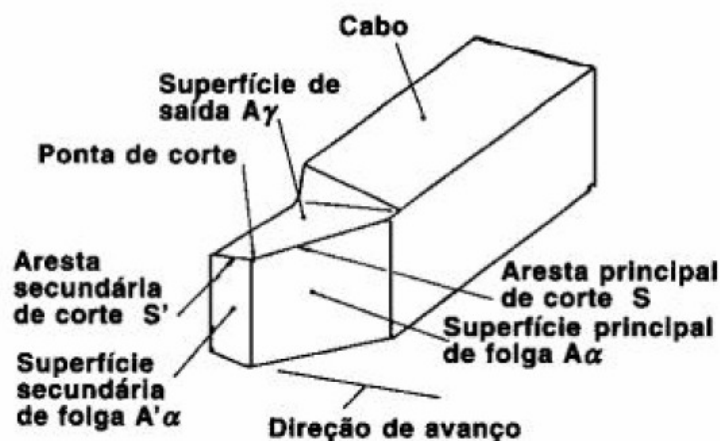


Figura 3: Geometria da ferramenta de corte (Machado e Silva, 1999)

Os ângulos referentes à pastilha e à posição desta, conforme Figura 4, são medidos em diferentes planos de referência, conforme a Figura 5, com diferentes representações para cada operação de usinagem. Para a operação de torneamento, os ângulos mais influentes são: o ângulo de posição da pastilha (χ_r), o ângulo de posição secundário (χ'_r), e o ângulo de ponta da pastilha (ϵ_r), medidos no plano de referência (P_r), o ângulo de inclinação da pastilha (λ_s) no plano de corte (P_s), o ângulo de saída da pastilha (γ_o) e o ângulo de folga (α_o) medidos no plano ortogonal (P_o).

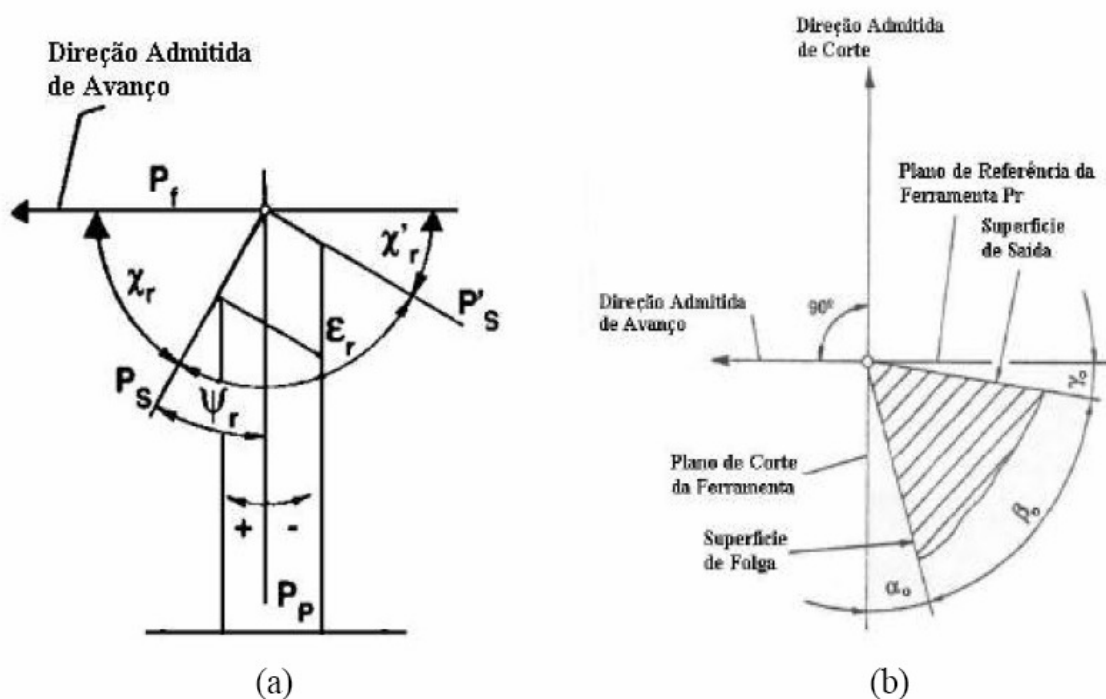


Figura 4: Ângulos das ferramentas de corte medidos (a) no plano de referência da pastilha e (b) no plano ortogonal (Diniz et al., 2000).

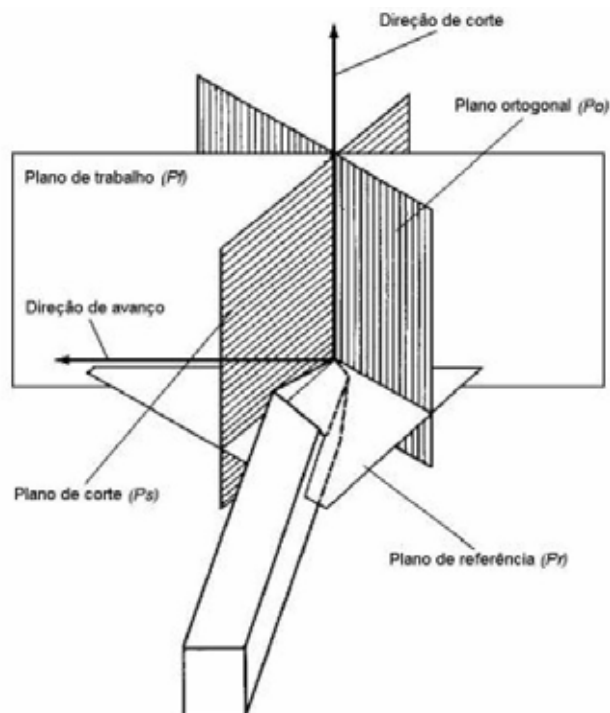


Figura 5: Sistema de referência da pastilha (Ferraresi, 1977)

Quanto à finalidade, as operações de torneamento podem ser classificadas ainda em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Entende-se por acabamento a operação de usinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. O desbaste é a operação de usinagem anterior a de acabamento, visando a obter na peça a forma e dimensões próximas às finais (Ferraresi, 1977).

2.1.1 Mecanismo de formação do cavaco

De acordo com Diniz et al. (2000), a formação do cavaco é influenciada por diversos fatores ligados à usinagem, tais como desgaste da pastilha, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc.. Assim, estão envolvidos com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização da máquina ferramenta, etc.

Nos processos de remoção de material por usinagem, o excesso de material é separado da superfície através do auxílio de uma pastilha que tem, principalmente no

início do corte, a geometria da aresta de corte definida. Assim, a ferramenta avança sobre a peça promovendo deformações elásticas e plásticas até a ruptura do material.

O corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de um plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento). O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é chamado ângulo de cisalhamento (ϕ). Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores os esforços de corte. Esta influência é marcante na usinagem de materiais dúcteis, muito suscetíveis à deformação.

O meio mais simples de visualizar os mecanismos de geração de cavaco é através do corte ortogonal, o qual pode ser exemplificado através do corte de um cilindro com um anel usinado ao seu redor, conforme mostrado na Figura 6.

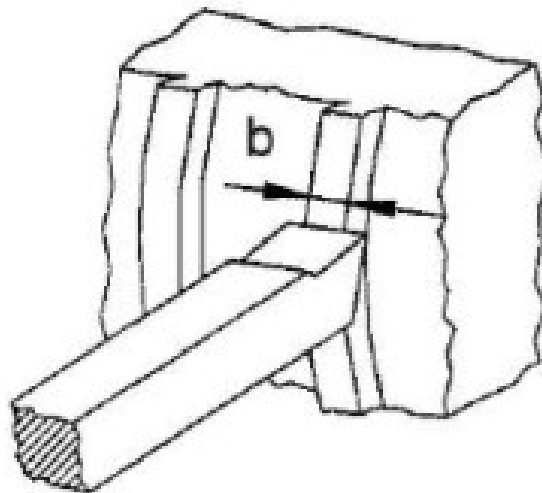


Figura 6: Exemplo de Corte Ortogonal (Machado e Silva, 1999)

Vários autores (Trent, 1988a; Wright, 1981; Doyle, Horne & Tabor, 1979; Merchant, 1945) aplicaram o conceito do corte ortogonal para facilitar a análise dos resultados e reduzir as variáveis. As simplificações assumidas são:

- Cavaco contínuo, sem aresta postiça de corte;
- Superfície de folga da pastilha sem contato com a peça;
- Avanço menor que a espessura de corte;
- Espessura de corte igual à espessura do cavaco.

Em seu trabalho sobre a usinagem a seco do aço ABNT 1045, Oliveira (2003) mostra que esta configuração é preferida para investigações experimentais devido ao fato de que o processo poder ser idealizado como bi-dimensional, isto é, a força de usinagem pode ser decomposta em somente duas componentes.

Um diagrama esquemático envolvendo peça, pastilha e cavaco é demonstrado na Figura 7.

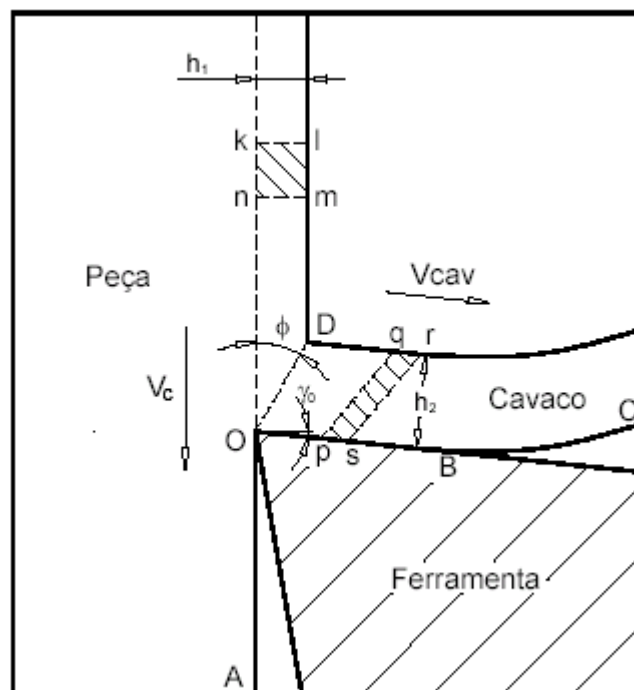


Figura 7: Diagrama esquemático da cunha de corte (Trent, 1991)

De acordo com Trent (1991), considere-se agora o volume representa *klmn* na Figura 7. Este volume é deformado elasticamente, conforme vai ocorrendo a sua aproximação da aresta de corte. Próximo à aresta o material escoar, deformando-se plasticamente até que as tensões não permitem ao material manter o regime, causando a ruptura. Estas deformações plásticas ocorrem na chamada zona de cisalhamento primária, definida a fins de simplificação, pelo plano *OD*, e a ruptura inicia-se pela abertura de uma trinca em “O”, que se propaga segundo o plano *OD*, e cuja extensão depende do material da peça. A extensão desta trinca é dos fatores determinantes do tipo de cavaco a resultar do corte. Uma trinca longa tende a gerar um cavaco curto (chamado cavaco descontínuo), enquanto que um trinca curta tende a gerar um cavaco longo.

Independente da extensão da trinca, o único “caminho” possível ao volume *klmn* é a passagem pelo plano de cisalhamento, durante a qual é transformado no volume *pqrs* que, a seguir, passa pela superfície de saída da pastilha tornando-se um componente do cavaco. Apesar de muitas vezes tratado na literatura (STEMMER, 1995) como um sistema de atrito simples de Coulomb, sem acarretar conseqüências importantes ao processo, o estudo da passagem do cavaco pela superfície de saída da pastilha tornou-se atualmente um dos principais objetos de estudo na área de usinagem. Isto porque, ao passar pelo plano definido pelos pontos *OB* o volume estudado sofre, além de deformações plásticas cisalhantes de elevada ordem, a ação de temperaturas elevadas, causando vários mecanismos de desgaste na pastilha.

Pode-se observar que a parte de trás do cavaco é rugosa. Este fato é explicado pela presença de pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão presente no metal que está sendo usinado, demonstrando que a deformação do cavaco durante a usinagem não é homogênea. Um plano de cisalhamento passando através de um ponto de concentração de tensão causa deformação a um valor de tensão mais baixo que aquele que deforma um ponto que não está sob concentração de tensão.

Em muitos materiais dúcteis, a dimensão h_2 , pode ser algumas vezes maior que a dimensão de corte original, h_1 , ambas indicadas na Figura 7. Esta relação (h_2/h_1), definida como grau de recalque, está geometricamente relacionada com o ângulo de

saída da pastilha e o ângulo do plano de cisalhamento, respectivamente γ_0 e ϕ na Figura 7. (Trent, 1991).

Segundo Shaw (1984), existe três áreas de interesse na formação do cavaco. A primeira área, conforme Figura 8, estende-se ao longo do plano de cisalhamento e é o limite entre o material do cavaco e da peça. A segunda região inclui a interface entre o cavaco e a superfície de saída da pastilha, enquanto a terceira região inclui a superfície usinada e a superfície de folga da pastilha.

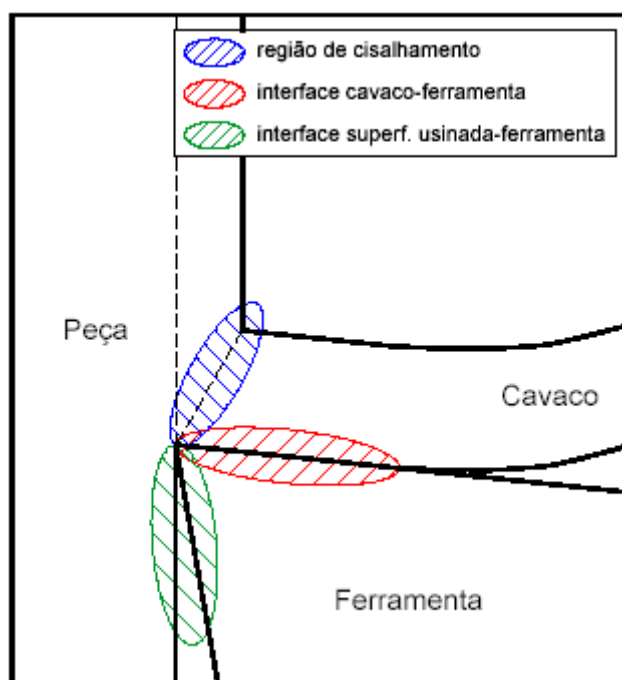


Figura 8: Principais áreas de interesse na formação do cavaco (Shaw, 1984)

Na região de cisalhamento estão relacionados os temas de comportamento elástico, plástico e ruptura do material usinado, na interface cavaco-pastilha estão relacionados os temas atrito e desgaste de pastilhas e por último, na interface superfície usinada-pastilha estão relacionados os temas atrito, desgaste de pastilhas, rugosidade e integridade superficial da peça (Shaw, 1984).

A formação do cavaco e os desgastes de pastilhas são fortemente influenciados pelas condições na interface cavaco-pastilha e as características desta região devem ser analisadas em uma escala dimensional adequada e não em condições habituais (Wright, Horne & Tabor, 1979).

2.1.2 Características dos cavacos

Diversas classificações de cavaco têm sido propostas pelos pesquisadores. Uma das mais comuns é aquela que os classifica em Tipos e Formas.

2.1.2.1 Tipos de cavaco

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode ser ao mesmo tempo evidência de causa de problemas na usinagem, ou seja, ao mesmo tempo em que determinado tipo de cavaco pode causar algum problema, como danos à superfície da peça ou estar ocupando volume excessivo, a sua forma e tamanho podem ser indicativos de problemas, relativos tanto a qualidade do material usinado quanto às condições da ferramenta de corte utilizada.

Os tipos de cavaco são basicamente três:

1. Cavaco contínuo: caracteriza-se pelo grande comprimento, independente da forma. Ocorre principalmente na usinagem de metais dúcteis, sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída da pastilha. É formado quando o material é recalcado ao chegar à aresta de corte, sem que ocorra o rompimento deste, deslizando, assim, pela superfície de saída da pastilha.
2. Cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo: ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final não costuma ser nem ininterrupto e uniforme nem fragmentado conforme o cavaco descontínuo, constituindo um meio termo entre os dois.
3. Cavaco em lascas ou descontínuo: muito comum na usinagem de metais frágeis, como o ferro fundido cinzento. Este tipo de cavaco ocorre também na usinagem de alguns metais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída pequeno.

Além destes tipos, alguns autores como Shaw (1984) e Machado e Silva (1999) mencionam o cavaco segmentado, que ocorre mais frequentemente na usinagem de materiais com baixa condutividade térmica, como os aços inoxidáveis, em um processo referenciado como “cisalhamento termoplástico catastrófico”. Este tipo de cavaco pode ocorrer inclusive na usinagem de materiais com boa condutividade térmica, a partir de uma velocidade de corte, chamada de velocidade de corte crítica, característica do material.

O controle do tipo de cavaco produzido é muito importante. O cavaco contínuo, além de oferecer risco ao operador, pode emaranhar-se ao redor da peça ou pastilha, dificultando a operação e tornando a superfície usinada menos atrativa. Além disso, há o alto coeficiente volumétrico do cavaco contínuo em relação aos outros tipos.

O cavaco parcialmente contínuo também pode apresentar problemas, como a geração de vibrações, que podem acarretar danos como ondulações na superfície usinada, desgaste excessivo da pastilha, e até mesmo efeitos nocivos como desbalanceamento rotativo nos principais mancais do torno.

A ocorrência do cavaco contínuo pode ser evitada, ou ao menos minimizada adotando-se alterações nos parâmetros de corte, dentre as quais são:

- Diminuição do ângulo de saída e de inclinação da pastilha, ou ainda o uso destes com valores negativos;
- Aumento do avanço e da profundidade de corte;
- Diminuição da velocidade de corte;
- Uso de quebra cavaco.

Destas opções, a mais comumente adotada em processos cujos parâmetros de corte propiciem a formação do cavaco contínuo, é o uso de quebra-cavacos na superfície de saída da pastilha, pois, além de proporcionar uma solução simples e rápida para o problema, o uso de quebra-cavaco dispensa alterações nos parâmetros de corte.

2.1.2.2 Formas do cavaco

Além dos três tipos de cavaco, pode-se diferenciá-lo quanto a sua forma. Certas formas de cavaco dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e desgastam mais ou menos a pastilha.

As formas de cavaco são:

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

A norma ISO 3685 (1993) faz uma classificação mais detalhada das formas de cavaco possíveis, conforme mostrado na Figura 9:




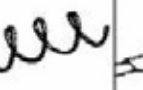
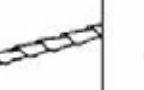
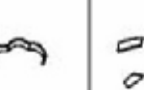
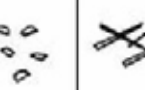




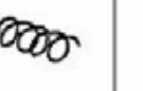
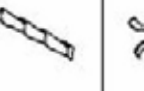
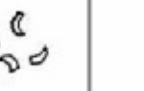




1 – Cavaco em fita	2 – Cavaco tubular	3 – Cavaco espiral	4 – Cavaco hel. tipo arruela	5 – Cavaco hel. cônico	6 – Cavaco em arco	7 – Cavaco fragmentado	8 – Cavaco tipo agulha
							
1 – 1 – Longo	2 – 1 – Longo	3 – 1 – Plano	4 – 1 – Longo	5 – 1 – Longo	6 – 1 – Conect.		
							
1 – 2 – Curto	2 – 2 – Curto	3 – 2 – Cônico	4 – 2 – Curto	5 – 2 – Curto	6 – 2 – Solto		
							
1 – 3 – Emaranhado	2 – 3 – Emaranhado		4 – 3 – Emaranhado	5 – 3 – Emaranhado			

Figura 9: Classificação dos cavacos, conforme norma ISO 3685

Segundo Ferraresi (1970), a forma mais conveniente é a helicoidal, sendo o cavaco em lascas preferido em casos onde o cavaco deve ser removido pelo fluido de corte ou quando há pouco espaço disponível para o cavaco. O cavaco em fita é o mais

problemático, pode gerar acidentes e ocupa muito espaço. A Figura 10 mostra a variação do coeficiente volumétrico de acordo com a forma do cavaco.

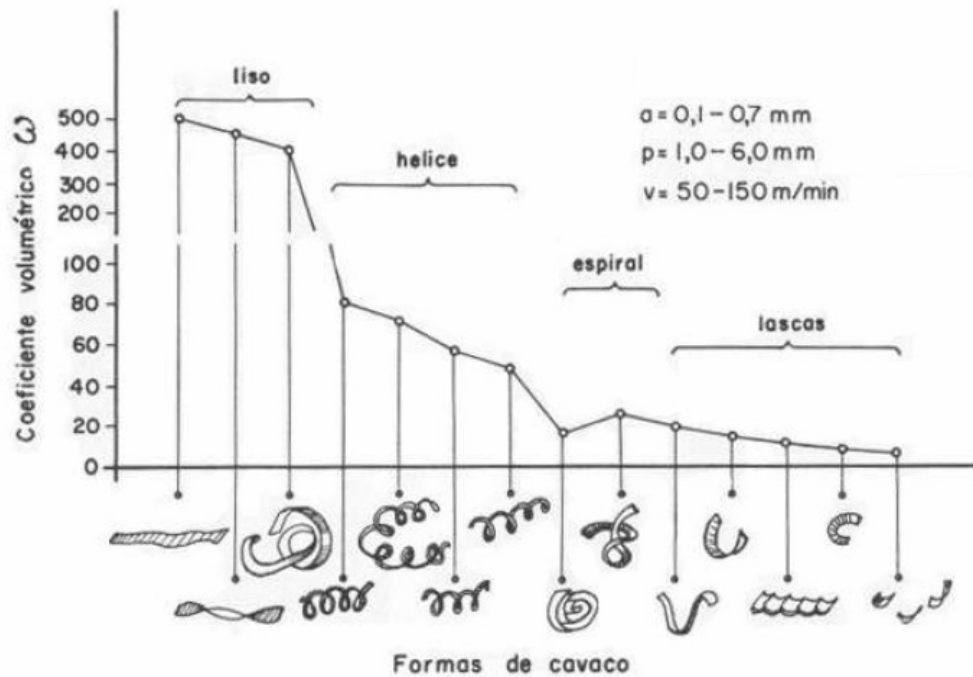


Figura 10: Variação do coeficiente volumétrico de acordo com o tipo de cavaco (Ferraresi, 1970)

A forma do cavaco pode ser alterada das seguintes formas:

- Alterando os parâmetros de corte;
- Alterando a superfície de saída da pastilha;
- Usando elementos especiais (quebra-cavaco) na superfície de saída.

Geralmente, o aumento da velocidade de corte e do ângulo de saída tendem a mover a forma do cavaco para a esquerda da Figura 11, enquanto o aumento do avanço move a forma do cavaco para a direita da mesma Figura. Na Figura 11 é mostrada a variação da forma do cavaco em função do avanço e da profundidade de corte.

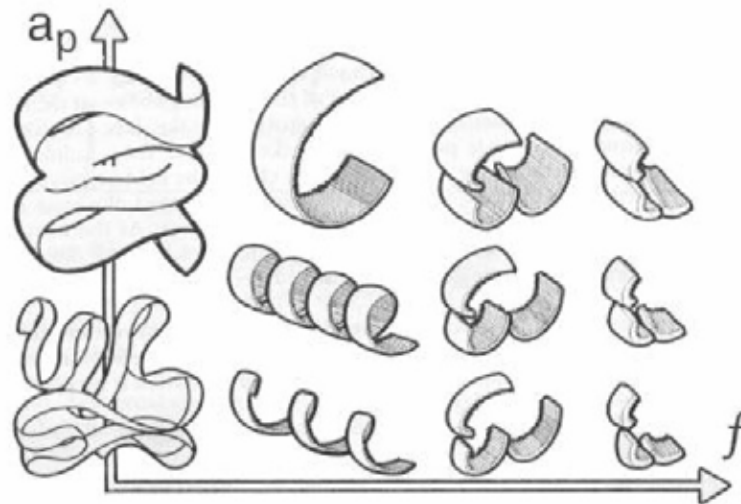


Figura 11: Variação da forma do cavaco em função das variáveis de processo
(Machado e Silva, 1999)

2.1.2.3 Aresta postiça de corte

Sob determinadas condições de corte, o atrito entre o cavaco e a ferramenta é tão grande que o material do cavaco é soldado à pastilha. Em baixas velocidades de corte e taxas de avanço, a formação da Aresta Postiça de Corte (APC) é o principal mecanismo de deformação plástica do cavaco nas proximidades da aresta de corte. No fenômeno de formação da APC uma primeira quantidade de material adere à superfície de saída da pastilha e, devido ao aumento de sua dureza pelas elevadas tensões de compressão, tem seu limite de escoamento aumentado. Entretanto, a tensão de cisalhamento é insuficiente para quebrar a ligação entre o material encruado e a pastilha. Deformações continuam a aderir material em regiões adjacentes ao material encruado, até que estas porções tornem-se tão resistentes quanto às anteriores. (Trent, 1988b)

Com seu crescimento, a APC torna-se instável e uma parte quebra. Ao se romper, a aresta postiça remove partículas da superfície de folga da pastilha, gerando desgaste frontal grande, mesmo em baixas velocidades de corte. Depois do ocorrido, novamente a APC começa a crescer, até tornar-se instável novamente, assim tornando o processo cíclico de formação e destruição (Diniz et al., 2000)

As variações no tamanho da APC podem afetar o acabamento superficial pela efetiva mudança do raio de ponta e , dependendo do tamanho e forma da APC pode-se ter alterações na profundidade de corte e geração de calor. Assim, aumentando a velocidade de corte, a temperatura de corte também cresce e, quando a temperatura de recristalização do material do cavaco é ultrapassada, não há mais formação de APC, pois com a formação de novos grãos não existe mais a possibilidade de encruamento do mesmo, fator fundamental na formação da APC. Assim, existe um valor de velocidade de corte acima do qual não ocorre mais a formação da APC, chamada de velocidade crítica. (Diniz et al., 2000)

Em estudo conduzido com a usinagem de um aço inoxidável austenítico, Ciftici (2006), observou que os altos valores obtidos para as rugosidades, quando utilizadas baixas velocidades de corte, foram atribuídos à alta tendência de formação da APC, já que o material possui alta ductilidade.

Foi observado por Tekiner e Yesilyurt (2003) que durante experimentos para avaliar a formação da aresta postiça de corte durante a usinagem de um aço inoxidável constatou-se que à medida que a velocidade de corte aumenta a formação da aresta postiça diminui, porém à medida que o avanço aumenta a formação da aresta postiça também aumenta. Materiais com altas taxas de encruamento têm a aresta postiça de corte formada com mais facilidade, como no caso dos aços inoxidáveis austeníticos, segundo Kopac e Bahor (1999).

2.2 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS

2.2.1 Introdução

A ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizado pelo homem, desde eras pré-históricas. Fossem feitas de pedra ou de madeira, constituíam para o ser humano uma espécie de suplemento à força de suas mãos e de seus braços, de modo a permitir-lhe a realização de tarefas pacíficas de modo mais eficiente e conferir-lhe maior segurança para defender-se contra o meio ambiente que lhe era, de modo geral, adverso. Com o tempo, foi aperfeiçoando a qualidade dos materiais

utilizados na fabricação desses instrumentos, pela utilização de madeiras cada vez mais duras, pedras mais rígidas e melhor afiadas, até atingir-se a idade dos metais, quando utilizou pela primeira vez o cobre e aprendeu, quase que instintivamente, a torná-lo mais duro pelo martelamento a frio.

Com o passar do tempo muitos novos materiais de pastilhas foram desenvolvidos para uma enorme gama de aplicações, e para a usinagem de diversos tipos de ligas. Segundo Diniz (2000), para a seleção criteriosa do material da pastilha, uma série de fatores devem ser ponderados, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes:

1. Material a ser usinado: a dureza e o tipo de cavaco formado são duas das características do material da peça que devem ser levadas em conta na escolha do material da pastilha;
2. Processo de usinagem: alguns tipos de processo que utilizam pastilhas rotativas de pequeno diâmetro, ainda exigem materiais de ferramentas mais antigos, como o aço rápido, devido às altas rotações necessárias para se conseguir as velocidades de corte compatíveis com materiais mais nobres de pastilhas;
3. Condição da máquina operatriz (potência, gama de velocidade, estado de conservação, etc.): máquinas-ferramenta antigas, com folgas, baixa potência e rotação exigem materiais de pastilhas mais tenazes e que não requeiram altas velocidades de corte;
4. Forma e dimensão da pastilha: pastilhas de formas não padronizadas, muitas vezes são feitas de aço rápido ou de um tipo de metal duro que possa ser soldado ao cabo (metal duro que suporte choques térmicos);
5. Custo do material da pastilha: alguns materiais de pastilha, apesar de conseguirem maior vida da pastilha e/ou maior produtividade, muitas vezes não apresentam uma relação custo/benefício razoável;
6. Condições de usinagem: condições de usinagem típicas de acabamento (alta velocidade de corte, baixos avanços e profundidade de usinagem) exigem pastilhas mais resistentes ao desgaste. Em operações de desbaste (baixa

velocidade de corte, alto avanço e profundidade) a ferramenta deve apresentar maior tenacidade.

7. Condições de operação: se o corte for do tipo interrompido e/ou o sistema máquina-pastilha-dispositivo de fixação-peça for pouco rígido, exige-se uma pastilha mais tenaz.

Qualquer que seja o material da ferramenta em consideração é necessário que ele apresente uma série de requisitos de menor ou maior importância, dependendo dos diversos fatores citados acima. Quatro das principais características são:

1. Dureza a quente: dependendo do tipo de operação, a temperatura da ferramenta pode ultrapassar 1000 °C. Então, cada vez mais se procura materiais de ferramentas que possam atingir esta temperatura com dureza suficiente para suportar as tensões de corte;
2. Resistência ao desgaste: significa principalmente resistência ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito. Esta propriedade está muito ligada à dureza a quente do material;
3. Tenacidade: que representa a quantidade de energia necessária para romper o material. Uma pastilha tenaz resiste bem aos choques inerentes ao processo;
4. Estabilidade química: para evitar o desgaste por difusão que é bastante importante em altas velocidades de corte.

Não existe uma classificação geral de materiais para pastilhas. Entretanto, com base nas suas características químicas, eles podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Metal cerâmico;
- Cermet

- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

Os materiais citados acima estão em ordem crescente de dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão. Em geral, quando se aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste por abrasão, cai a tenacidade do material.

Segundo Peckner (1977), atualmente as pastilhas mais recomendadas para a usinagem de aços inoxidáveis são as de metal duro, e metal duro com cobertura. Assim sendo, a seguir serão descritas suas principais características.

2.2.2 Metal Duro

O metal duro tem sido o mais importante material utilizado para pastilhas na indústria, devido a combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza à quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação esta possível de obter-se pela variação de sua composição. Segundo Diniz et al. (2000), atualmente o metal duro recoberto tem ocupado grande fatia do mercado.

Este material de pastilha é um produto da metalurgia do pó, feito de partículas duras finamente divididas de carbeto de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são de carbeto de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbeto, como os de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC). O tamanho destas partículas varia entre 1 a 10 μm e ocupam de 60 a 95% do volume do material. O metal aglomerante é, na grande maioria das vezes, o cobalto.

Além da dureza em altas temperaturas e da tenacidade outras características que normalmente são controladas, pois afetam a capacidade de corte do metal duro, são a porosidade e a microestrutura, pois quanto mais denso o material, melhores serão suas características mecânicas. Admite-se que, quanto menor o teor de cobalto, menor deve ser o rigor em relação à porosidade, pois se torna difícil obter um material praticamente isento de poros.

A temperatura de corte pode atingir 1500 °C durante a usinagem do aço inoxidável martensítico, o que deve ser ponto de preocupação, pois afeta diretamente a integridade superficial da peça, causa desgaste por difusão e reduz a dureza da pastilha, podendo levar a sua quebra. (Liew, 2004)

Devido a esta exigência, atualmente o metal duro recoberto tem ocupado grande parte da fatia de mercado do metal duro sem cobertura, sendo que este último tem sido utilizado somente para a usinagem do alumínio e para operações especiais.

Na Figura 12 é apresentada a variação de dureza em função da temperatura, mostrando duas curvas para metal duro com teores diferentes de cobalto, e uma terceira relativa ao aço rápido como padrão de comparação. Vê-se que, à medida que a quantidade de cobalto diminui e, portanto, aumenta a porcentagem de carbeto, a dureza a quente aumenta.

Outra característica que deve ser levada em conta quando da aplicação do metal duro é o seu coeficiente de dilatação térmica. O valor deste coeficiente para o metal duro é de cerca da metade do valor do aço, em temperaturas desde a ambiente até 675°C. A importância desta diferença reside no fato de que a aplicação de metal duro em ferramentas de corte é feita em forma de pastilhas presas ao suporte porta-pastilha, geralmente de aço, através de solda ou fixadas mecanicamente. Se a fixação se der por intermédio de solda, ocasionam-se tensões em ambas as peças, assim, o calor desenvolvido na usinagem faz com que a temperatura da pastilha e do porta-pastilha cresça, tornando-se necessário tomar alguns cuidados durante o processo de soldagem, para proporcionar espaço para a dilatação térmica do aço e do metal duro.

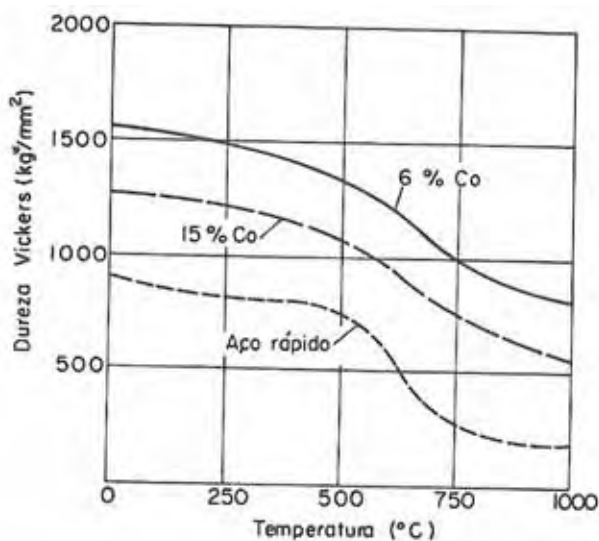


Figura 12: Influência da Porcentagem de Cobalto e da Temperatura na Dureza do Metal Duro (Ferraresi, 1977)

Na Tabela 1 são apresentadas a composição química e algumas características correspondentes a diversas classes de metal duro. Pode-se ver nessa tabela que à medida que a quantidade de TiC + TaC sobe, a densidade cai e a dureza aumenta. Quando se introduz TaC, com ou sem nióbio, melhora a tenacidade em relação às composições isentas destes carbeto. A substituição do TiC pelo TaC aparentemente não traz vantagens apreciáveis sob o ponto de vista de melhora da capacidade de corte. Entretanto é certo que o aumento simultâneo dos dois carbeto produz melhores resultados na usinagem, provavelmente devido à dureza a quente dessas composições. Pode ser verificado nesta tabela que à medida que o volume de cobalto cresce a tenacidade aumenta (Ferraresi, 1977).

Outra característica importante no metal duro é o tamanho de grão das partículas duras. Partículas grandes produzem maior tenacidade, enquanto que partículas pequenas aumentam a dureza e a resistência do metal duro.

Tabela 1: Composição Química e Características dos Metais Duros (Ferraresi, 1977)

Designação ISO	Composição Aproximada [%]			Características Principais		
	% WC	% TiC + TaC	% Co	Densidade (g/cm ³)	Dureza HV	Resistência a Ruptura Transversal (kgf/mm ²)
P01	30	64,0	6	7,2	1800	75
P10	55	36,0	9	10,4	1600	140
P20	76	14,0	10	11,9	1500	150
P30	82	8,0	10	13,0	1450	170
P40	77	12,0	11	13,1	1400	180
P50	70	14,0	16	12,9	1300	200
M10	84	10,0	6	13,1	1650	140
M20	82	10,0	8	13,4	1550	160
M30	81	10,0	9	14,4	1450	180
M40	78	7,0	15	13,5	1300	200
K10	92	2,0	6	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170
K30	89	2,0	9	14,5	1450	190

2.2.2.1 Classes e Critérios de Seleção do Metal Duro

Os diversos tipos de metal duro são classificados pela norma ISO em seis grupos designados pelas letras P, M, K, N, S e H. A classe P é designada para a usinagem de aços, aços fundido e ferros maleáveis de cavacos longos, a classe M para aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos e ferríticos, aços fundidos, aços-manganês, ligas de ferros fundidos, ferros maleáveis e aços de corte livre. Já a classe K deve ser utilizada na usinagem de ferros fundidos, ferros fundidos coquilhados e ferros maleáveis de cavacos curtos, a classe N para materiais não ferrosos, a classe S para super ligas e ligas resistentes ao calor, e a classe H para materiais endurecidos.

O grupo K foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido. São compostos de carbeto de tungstênio aglomerados ao cobalto. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste em cratera e, assim, são indicados para a usinagem de materiais frágeis que formam cavacos curtos (ferro fundidos e latões) que não atritam muito com a superfície de saída da pastilha.

O grupo P é constituído de metais duros de elevado teor de TiC + TaC, que lhes confere uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. É indicado para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos que, por formarem uma área de atrito bastante grande com a superfície de saída da pastilha, desenvolvem uma alta

temperatura de corte e tendem a desgastar bastante a pastilha. Esta classe de metal duro resiste mais ao mecanismo de geração do desgaste de cratera do que as classes M e K, pois exigem temperaturas mais altas para reagirem com o ferro dos aços.

O grupo M é um grupo com propriedades intermediárias, sendo destinado a pastilhas de aplicações múltiplas, com grande utilização na usinagem de aços inoxidáveis. A usinagem deste material é caracterizada pela alta geração de calor durante o processo, devido à elevada quantidade de elementos de liga, exigindo assim que o material das pastilhas resista a deformações plásticas e à formação da aresta postiça de corte.

Na Figura 13 é apresentada a subdivisão dos referidos grupos citados acima, mostrando a tendência de variação das características de dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. Pode-se ver nesta Figura que a pastilha P40 é mais tenaz que uma P10, mas menos resistente ao desgaste. Assim, a pastilha com metal duro P40 é recomendada para desbaste de aços (operação onde se exige mais tenacidade) e a pastilha de metal duro P10 é recomendada para acabamento dos aços (onde se exige mais resistência ao desgaste). O mesmo pode ser dito em relação às classes M e K.

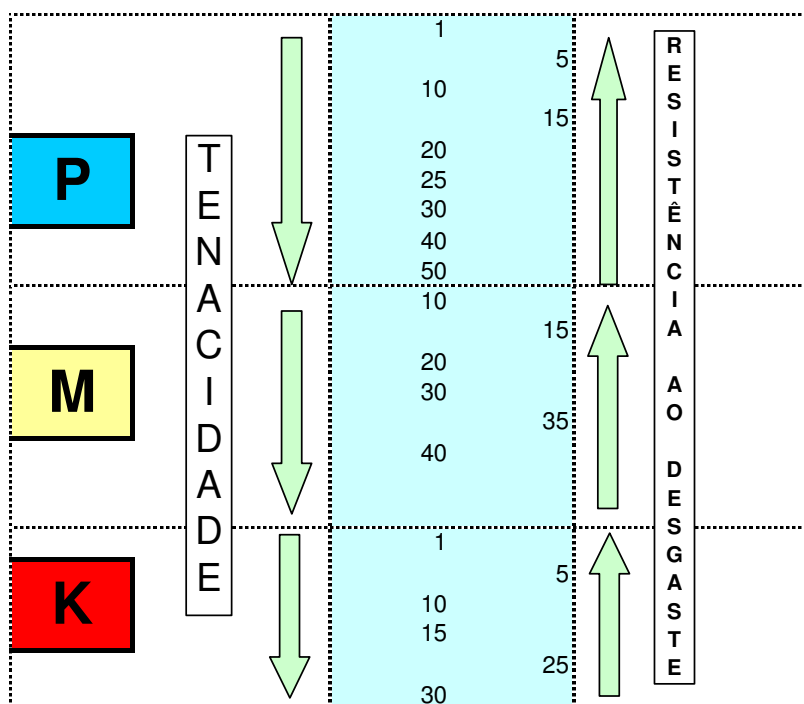


Figura 13: Tendência de Crescimento de Características das Classes de Metal Duro

2.2.3 Metal Duro com Cobertura

Ultimamente vêm sendo bastante utilizadas pastilhas de metal duro com cobertura de carbeto de titânio e / ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. A finalidade principal destas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade do metal duro mais simples (WC + Co). Assim, consegue-se em muitos casos, aumentar bastante a vida da pastilha e diminuírem-se os esforços de corte e, com isto, consegue-se conjugar tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente. Porém, dependendo do material a ser usinado os esforços de corte podem ser maiores utilizando pastilhas com cobertura, como foi observado por Agrawal (1993) durante a usinagem do aço inoxidável austenítico, devido à presença de desgaste por difusão, que faz com que a pressão específica de corte aumente devido ao crescimento do atrito peça-pastilha.

Existem pastilhas com uma, duas ou até três camadas de cobertura. Embora outros materiais possam também ser usados para este fim (carbeto e nitreto de háfnio, por exemplo) os materiais mais usados são os carbetos de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e o nitreto de titânio (TiN). Geralmente a primeira camada, logo acima do núcleo é o carbeto de titânio ou carbonitreto de titânio (TiCN), que algumas vezes é a única camada de cobertura. As pastilhas com duas camadas de cobertura têm, em geral, uma camada de óxido de alumínio ou de nitreto de titânio por cima de uma camada de TiC. As pastilhas com três camadas têm, em geral, uma camada de TiN recobrindo uma camada intermediária de Al_2O_3 que, por sua vez, recobre uma camada de TiC que está por cima do núcleo de metal duro. Estas camadas são, em geral, aplicadas utilizando-se o processo de CVD (deposição química a vapor), podendo-se também aplicar estas camadas através do processo de PVD (deposição física a vapor).

As principais características de cada uma destas camadas são:

1. Carbeto de titânio (TiC): possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionar como o elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro, já que o óxido de alumínio (camada que

normalmente está por cima do TiC) não possui alta afinidade físico-química com o metal duro afim de conseguir uma forte adesão com o núcleo. Por isso, em geral, ou é a única camada de cobertura, ou é a camada que está por debaixo das outras. Além disso, o TiC tem baixa tendência a soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão, a formação da aresta postiça de corte, e possui baixo coeficiente de dilatação térmica. A espessura da camada é de 4 a 8 μm . O carbonitreto de titânio (TiCN), também usado como cobertura do metal, tem propriedades similares ao TiC, com exceção do coeficiente de atrito, que é mais baixo que o do TiC, sendo o mesmo indicado para a usinagem de materiais com elevada tenacidade. Segundo Yuhara (2000), com o objetivo de conciliar uma boa aderência com uma alta dureza superficial, a relação entre os teores de C e N, na camada de TiCN, é variada de forma crescente durante o processo de revestimento gerando desta forma de 5 a 10 camadas com composições diferentes.

2. Óxido de alumínio (Al_2O_3): garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas devido ao fato de ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência à ataques químicos e à oxidação. É a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das pastilhas de metal duro recobertas. Por outro lado apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos. Na usinagem dos aços inoxidáveis martensíticos, a principal função desta camada é de reduzir a deformação plástica e o desgaste de flanco (Sandvik, 2004).
3. Nitreto de titânio (TiN): reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência a difusão com aços. A espessura é entre 5 e 7 μm . Além disso, o TiN apresenta um bom desempenho na usinagem de uma grande variedade de materiais, característica que o torna recomendado para situações onde vários materiais são usinados com a mesma pastilha.

Outra cobertura usada, com propriedades notáveis de resistência ao desgaste é o nitreto de titânio/alumínio (TiAlN). Esta cobertura pode ser usada combinada com outras coberturas, como, por exemplo, Al_2O_3 , conferindo à pastilha uma elevada resistência ao desgaste a quente. Em seu estudo, Cselle (1995), observou que este revestimento com dupla camada tem melhor rendimento em pastilhas de metal duro do que em pastilhas de aço rápido, devido a esta última sofrer deformações durante o processo de usinagem. Esta deformação tende a trincar as coberturas, comprometendo assim a sua performance.

Os revestimentos de carbetto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio são fundamentais para suprir as deficiências de lubrificação na região de corte. (Scandiffio, 2000)

Os revestimentos reduzem o atrito e a adesão, funcionando como um “lubrificante sólido”; além disso, a carga térmica no substrato é diminuída pela baixa condutividade térmica da camada de cobertura, no caso o Al_2O_3 . O nível reduzido de dissipação de calor pela pastilha muda o fluxo de calor entre a pastilha e o cavaco, fazendo com que o cavaco dissipe mais calor do que o normal. Além de o revestimento diminuir o desgaste de flanco e aumentar o tempo de corte, ele também protege o substrato dos efeitos químico e térmico (Dunlap, 1997)

A alta temperatura gerada durante a usinagem do aço inoxidável é o primeiro item levado em consideração, já que afeta a integridade da superfície da peça, propicia o aparecimento do desgaste por difusão e reduz a resistência da pastilha, podendo levá-la à quebra. (Liew, 2004).

A espessura total das camadas que recobrem o metal duro varia de 2 a 12 μm . Quando se aumenta a espessura da cobertura, a resistência ao desgaste aumenta, porém a tenacidade diminui e começa a aumentar a tendência ao lascamento das arestas.

2.3 DESGASTE E VIDA DAS PASTILHAS

2.3.1 Introdução

Diniz et al. (2000), explicam que a vida da ferramenta é uma das mais importantes considerações econômicas da usinagem. Nas operações de desbaste, os vários ângulos de corte, velocidades de corte e avanços são escolhidos para proporcionar uma vida econômica da pastilha. Condições de corte que proporcionam um tempo de vida da pastilha muito baixo não serão econômicas, pois serão necessárias várias pastilhas e altos tempos de troca. Por outro lado, o uso de baixas velocidades de corte e avanço, o que proporcionará alto tempo de vida da pastilha, também não será econômico devido à baixa produtividade. É evidente que qualquer melhoria nas pastilhas ou nos materiais são benéficos para a vida da pastilha. Com o objetivo de formar bases para estas melhorias, muitos esforços estão sendo tomados no sentido de entender a natureza dos desgastes das pastilhas e outras formas de falhas durante a usinagem.

A vida da ferramenta pode ser levada ao seu final de várias maneiras, mas estas podem ser separadas em dois grandes grupos:

1. O desgaste gradual ou progressivo de determinadas regiões da pastilha;
2. Quebras, que levam a vida da pastilha a um final prematuro.

2.3.2 Mecanismos de Desgaste

Segundo Pires (1997), os desgastes ocorrem nas pastilhas como resultado da ação de vários fatores de carga sobre a aresta de corte durante a usinagem. Estas cargas são, principalmente, de natureza mecânica, térmica, química e abrasiva (Sandvik, 1994 e Kramer, 1986).

1. **Mecânicas** - além das componentes estáticas de cargas mecânicas que agem sobre a aresta de corte, existem outras componentes dinâmicas resultantes do

processo de formação do cavaco, que além de possuírem uma variação cíclica inerente ao próprio processo, também variam ciclicamente devido às variações de profundidade de usinagem, cortes interrompidos e outros.

2. **Térmicas** - aparecem principalmente na superfície de saída e na superfície de folga da pastilha, devido à alta geração de calor inerente ao processo de corte dos metais. Este tipo de carga pode também ser dinâmico, como em operações de corte interrompido como, por exemplo, durante o fresamento, onde a aresta passa por um aquecimento durante o corte e resfriamento durante o período que passa fora da peça.
3. **Químicas** - o processo de formação do cavaco permite que uma nova interface de metal seja produzida continuamente e forçada em altas pressões, e temperaturas, contra as superfícies das pastilhas. Estas novas superfícies produzidas tornam-se um ambiente propício para a difusão e reações químicas dos metais.
4. **Abrasivas** - na maioria dos materiais das peças existem vários tipos de partículas duras, cuja dureza pode ser comparada à dureza do material da pastilha. Estes então atuam como abrasivos sobre a pastilha. Ainda que estas inclusões existam em pequenas quantidades no material da peça, considerando a quantidade de material que passa sobre a aresta de corte durante a usinagem, sempre existirá uma quantidade variável de abrasão na aresta.

A classificação dos tipos de desgaste constitui um importante auxílio para a estimativa e otimização da usinagem através da correta especificação das pastilhas e dados de usinagem para um dado tipo de usinagem e material. Pela inspeção da aresta de corte ampliada e agindo sobre o tipo de desgaste apresentado, a vida da aresta de corte pode ser controlada e aumentada. Existe sempre um tipo de desgaste ideal a ser desenvolvido para uma operação. A pastilha certa, bons valores iniciais dos dados de corte, suporte de especialistas, experiência própria, boa qualidade do material da peça

e máquinas em boas condições são fatores importantes para se conseguir o desenvolvimento do desgaste ideal (Sandvik, 1994).

Os desgastes e avarias da pastilha são classificados nos seguintes tipos (Sandvik, 1990; Sandvik, 1994 e Ferraresi, 1977):

Desgaste de Flanco - se localiza na superfície de folga da pastilha e é decorrente principalmente da natureza de desgaste abrasiva. A formação da aresta postiça de corte também contribui para o crescimento do desgaste de flanco a baixas velocidades de corte. As superfícies de folga principal e secundária estão expostas ao atrito com a superfície usinada da peça durante, e após, a formação do cavaco e por isso se desgastam. O desgaste de flanco excessivo dificultará a obtenção de baixos valores de rugosidade, proporcionará desvios dimensionais e o aumento do atrito pela mudança na forma da aresta e diminuição do ângulo de folga. Toda operação de usinagem gera a formação de desgaste de flanco. As condições de abrasão na interface do cavaco têm grande influência nos tipos de desgaste da pastilha, formação da aresta postiça de corte e acabamento superficial da peça. (Grzesik, 1999)

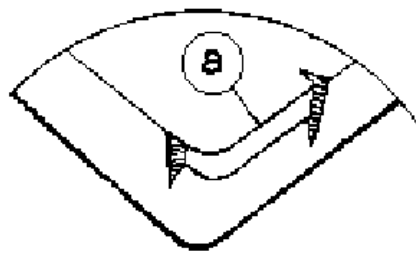


Figura 14: Desgaste de Flanco (Diniz et al., 2000)

Na Figura 15 é ilustrado o comportamento da abrasão durante a usinagem. Na zona A é mostrada região de adesão na pastilha, a zona B a região de abrasão e a zona C a região de separação do cavaco.

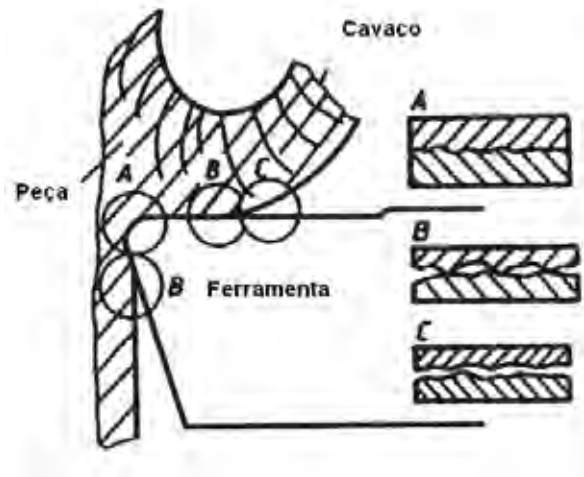


Figura 15: Comportamento da abrasão durante a usinagem (Grzesik, 1999)

Desgaste de Cratera - ocorre na superfície de saída da pastilha (na região de contato cavaco-pastilha) e pode ocorrer devido à natureza abrasiva ou química. Dureza a temperatura ambiente e a quente e pouca afinidade entre os materiais da peça e da pastilha minimizam a tendência ao desgaste de cratera. Ele altera a geometria da superfície de saída, causando modificações no direcionamento original do cavaco, nas direções das forças de corte e também, se muito grande, pode provocar a quebra da aresta. Nas pastilhas de metal duro recobertas com óxido de alumínio, o desenvolvimento deste tipo de desgaste é minimizado devido à passividade química desta camada com relação à maioria dos materiais das peças. Em alguns casos, a difusão pode ser benéfica para a usinagem, como foi concluído por Fang e Zang (1996). Durante a usinagem de um aço inoxidável com Ca e S em sua composição, a difusão formou uma camada protetora que aumentou significativamente a vida da pastilha.

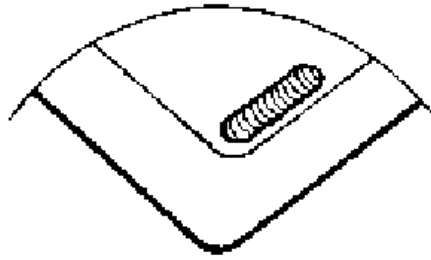


Figura 16: Desgaste de Cratera (Diniz et al., 2000)

Deformação Plástica - é uma avaria da pastilha. Aparece como um resultado da combinação das altas temperaturas e altas pressões agindo sobre a aresta de corte quando se tem altas velocidades de corte, altos avanços e altas durezas dos materiais da peça. A principal propriedade necessária à pastilha para que resista a esta deformação é a dureza a quente. As alterações típicas na forma da aresta e superfícies da pastilha após o início de uma deformação plástica, levará a maiores temperaturas, erros dimensionais e geométricos na peça e mudanças no fluxo de cavacos.

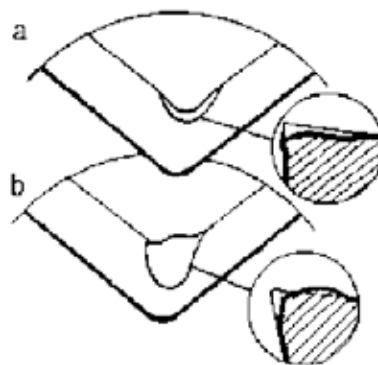


Figura 17: Deformações Plásticas (Diniz et al., 2000)

Desgaste de Entalhe - pode ocorrer tanto na aresta principal como na aresta secundária de corte da pastilha sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da pastilha e a peça. Na aresta principal é o resultado de cargas mecânicas e aparece freqüentemente na usinagem de materiais endurecidos. Na aresta secundária é um típico desgaste de adesão, mas pode até certo ponto também ser resultado do mecanismo de oxidação. Este desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, porque modifica totalmente a forma da aresta de corte original faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte

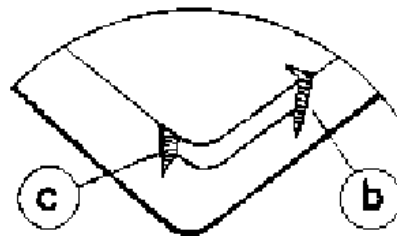


Figura 18: Desgaste de Entalhe (Diniz et al., 2000)

Trincas Térmicas - ocorrem principalmente devido à variação térmica inerente ao processo de formação do cavaco. Estas trincas são perpendiculares à aresta de corte, e fragmentos da pastilha entre as trincas podem ser arrancados da aresta conduzindo à rápida quebra e falha da mesma. O aparecimento desta avaria é mais comum onde as variações de temperaturas são mais críticas. As variações de temperaturas são aumentadas principalmente pelas variações na espessura do cavaco e cortes intermitentes, como por exemplo no fresamento. A aplicação inadequada de fluido de corte é outra causa da formação de trincas térmicas, o que também é crítico na operação de fresamento, pois freqüentemente amplifica as variações de temperaturas já existentes, devido ao corte interrompido presente neste processo. Houssein (2008) estudou a utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 e concluiu que, para baixas velocidades de corte, a utilização de fluido de corte se mostrou eficiente e que, com o aumento da velocidade de corte, o efeito do

refrigerante no aumento da vida da pastilha se mostrou menos eficaz. O surgimento da APC e o desgaste na ponta da pastilha são os mecanismos de falhas dominantes durante a usinagem a seco, e o desgaste por difusão e entalhe são os dominantes durante a usinagem com aplicação de fluido refrigerante. Porém, conforme relatado por Stanford e Lister (2005), apesar do importante papel do fluido refrigerante na usinagem, sua utilização promove impactos ambientais consideráveis. Isto porque, além dos custos envolvidos na aquisição dos refrigerantes, gases inertes são gerados durante a usinagem e afetam negativamente no ambiente de trabalho do operador.

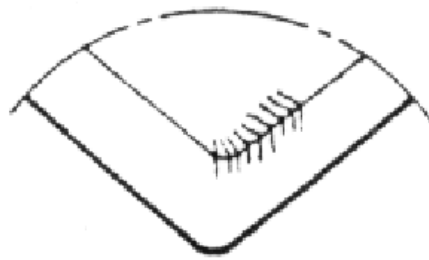


Figura 19: Trincas Térmicas (Diniz et al., 2000)

Trincas por Fadiga Mecânica - são principalmente paralelas à aresta de corte e podem aparecer quando os choques devido ao corte interrompido são excessivos. A variação contínua da carga, onde estas não são grandes o suficiente para causar a fratura e as variações na intensidade e direção das forças de usinagem também conduzem a este tipo de desgaste.

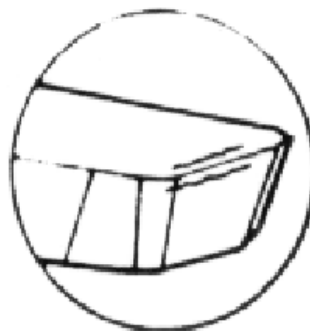


Figura 20: Trincas por Fadiga Mecânica (Diniz et al., 2000)

Lascamento da Aresta de Corte - é uma avaria da pastilha, isto é, ao invés de se ter um arrancamento contínuo de partículas microscópicas da pastilha, como nos desgastes, partículas maiores são arrancadas de uma maneira discreta. Usualmente é decorrente dos ciclos de carga inerente ao processo de formação do cavaco. Cortes interrompidos são uma causa freqüente para este tipo de avaria. Ocorrem principalmente em pastilhas com material frágil e / ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento superficial da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da pastilha.



Figura 21: Lascamento da Aresta de Corte (Diniz et al., 2000)

Fratura - todos os desgastes e avarias da pastilha, ao crescerem podem gerar a quebra da pastilha. Algumas vezes, porém, a fratura pode acontecer inesperadamente devido a alguns fatores como: pastilha muito dura (em geral, quanto mais resistente ao desgaste é a pastilha, menos tenaz e menos resistente ao choque), carga excessiva sobre a pastilha, raio de ponta, ângulo de ponta e ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos, etc.. A quebra da pastilha ocasiona não somente estrago na pastilha (às vezes não somente a aresta quebrada é danificada, mas toda a pastilha), mas também no porta-pastilha (se o corte não for interrompido imediatamente após a quebra) e na própria peça.

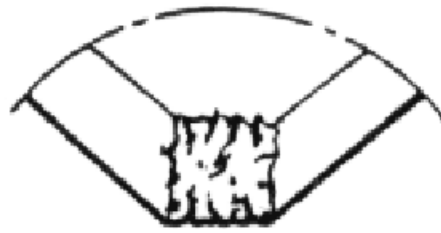


Figura 22: Fratura (Diniz et al., 2000)

2.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Geralmente especificado em projetos mecânicos, o acabamento superficial, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície. A textura superficial é definida em termos de rugosidade, ondulação, aspecto visual e imperfeições, as quais estão descritas abaixo:

- **Rugosidade:** consiste de finas irregularidades na textura superficial, normalmente resultante da ação inerente do processo de fabricação utilizado, como marcas causadas pelo avanço nos processos de usinagem;
- **Ondulação:** componentes da textura superficial mais espaçados que podem ser resultantes de fatores como máquina, deflexões durante o processo de fabricação, vibração, etc.
- **Aspecto Visual:** é a direção predominante do padrão superficial;
- **Imperfeições:** são não intencionais, inesperadas e indesejáveis interrupções na superfície, como trincas, entalhes, arranhões, etc.

A rugosidade e a ondulação podem ser medidas através de uma variedade de instrumentos, incluindo os instrumentos de contato e sem contato com a peça. A técnica mais utilizada para a medição da rugosidade é através dos rugosímetros, os quais são instrumentos de contato, que fornecem um valor numérico para a rugosidade.

Estes instrumentos podem fornecer a rugosidade em termos da média aritmética R_a , raiz da média quadrática (rms) R_q ou rugosidade máxima R_y .

Na Figura 23 são ilustrados os termos da textura superficial.

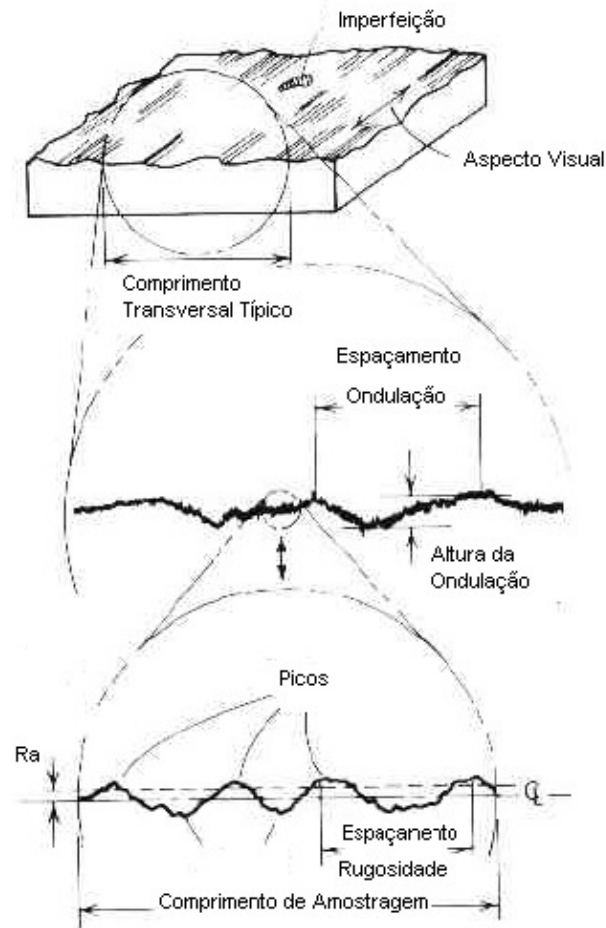


Figura 23: Termos da Textura Superficial (ASM Metals Hand Book, 1989)

A importância da rugosidade justifica-se pela sua relação, entre outros, com fatores como:

- Precisão e tolerância: muito importante, em especial em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo. Neste caso, superfícies com rugosidades mais pronunciadas estarão expostas a desgastes mais intensos do que os que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento. Na Tabela 2 é mostrada a relação entre a rugosidade e a tolerância, bem como a

relação de custo, já que superfícies com menor rugosidade demandam um maior custo para serem fabricadas;

Tabela 2: Relação entre Rugosidade, Tolerância e Custo de Fabricação (ASM Metals Hand Book, 1989)

Classe	Rugosidade Ra [μm]	Tolerância [mm]	Custo de Produção Relativo
Super Polida	0,1	0,0125	40
Polida	0,2	0,0125	35
Esmerilhada	0,4	0,025	25
Suavizada	0,8	0,050	18
Acabamento Fino	1,6	0,075	13
Acabamento Semi-Fino	3,2	0,100	9
Acabamento Médio	6,3	0,175	6
Acabamento de Semi- Desbaste	12,5	0,330	4
Acabamento de Desbaste	25	0,635	2
Limpeza Superficial	50	1,250	1

- Resistência à corrosão: superfícies com acabamentos superficiais mais pobres tendem a reter maior quantidade de líquidos e vapores do que superfícies melhor acabadas. Desse modo, tornam-se mais vulneráveis a corrosão. Fredj (2005) avaliou a presença de pontos de corrosão no aço inoxidável austenítico AISI 304, e observou que o material apresentou maior resistência a corrosão após ter sua superfície retificada sob resfriamento criogênico, quando comparado o com o processo de retificação convencional, pois foi obtida uma menor rugosidade no processo sob resfriamento criogênico.
- Resistência à fadiga: peças que trabalham sob cargas dinâmicas necessitam de melhor acabamento superficial, pois superfícies com alta rugosidade

apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas à concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas por fadiga. Javidi (2008) comprovou este fato ao estudar a relação entre a qualidade superficial obtida pelo processo de torneamento, os parâmetros de corte e a comportamento da fadiga superficial. Após a usinagem do material 34CrNiMo6, as trincas geralmente se iniciaram na superfície do material quando o mesmo apresentou maiores valores de Ra, já que esta camada está sujeita às maiores cargas e às condições ambientais.

- Escoamento de fluidos: superfícies com melhores acabamentos permitem escoamentos laminares a faixas mais amplas de velocidades, reduzindo a turbulência. No caso de pistões ou elementos que atuem como retentor, superfícies com melhor acabamento garantem uma vedação mais eficiente, evitando a fuga do elemento sob pressão.
- Transferência de calor: à medida que a rugosidade do elemento diminui, aumenta a área de contato entre este componente e a superfície, aumento o coeficiente de transmissão de calor (Figura 24).

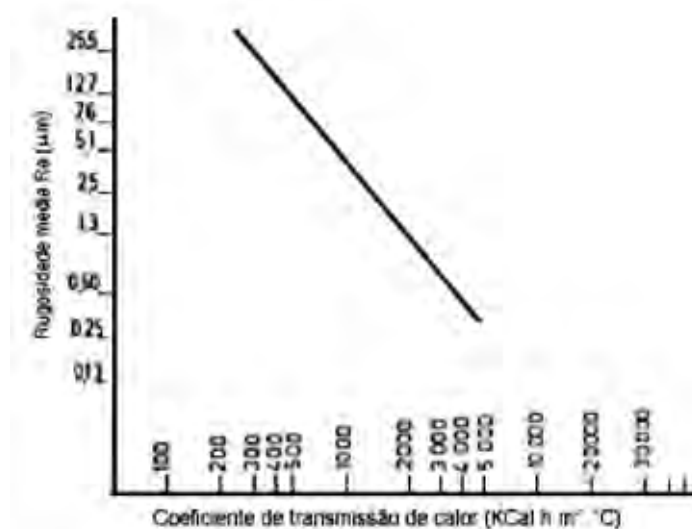


Figura 24: Rugosidade Média x Coeficiente de Transmissão de Calor (Amorim, 2002)

2.4.1 Parâmetros de rugosidade

Parâmetros de rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente. Dentre todos os parâmetros, o mais amplamente utilizado é a rugosidade média. Este parâmetro de rugosidade consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (Equação 2) em relação à linha média (Figura 25).

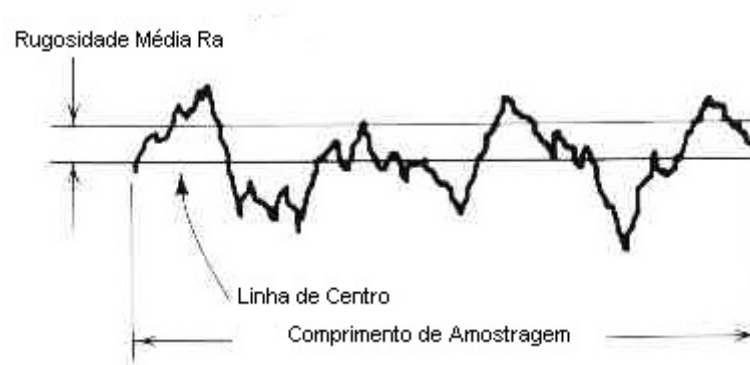


Figura 25: Rugosidade Média Ra

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2)$$

onde l é o percurso de medição.

O valor de Ra é geralmente expresso em μm no sistema métrico ou μin no sistema inglês, com os rugosímetros possuindo geralmente resoluções que vão de 0,1 a 0,001 μm .

Devido à facilidade de sua medição, a rugosidade média é bastante empregada em controles continuados em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies de pouca responsabilidade e que apresentem sulcos bem definidos, sendo peças torneadas exemplos clássicos.

Além das medições em termos de Ra também são utilizadas a média da raiz quadrática Rq (Equação 3) e a rugosidade máxima Ry (Equação 4), sendo esta a distância entre duas linhas paralelas à linha média e em contato com o ponto extremo superior e inferior do perfil no qual consta o percurso de medição da rugosidade. Nas Figuras 26 e 27 são ilustradas esquematicamente as definições destes parâmetros de rugosidade.

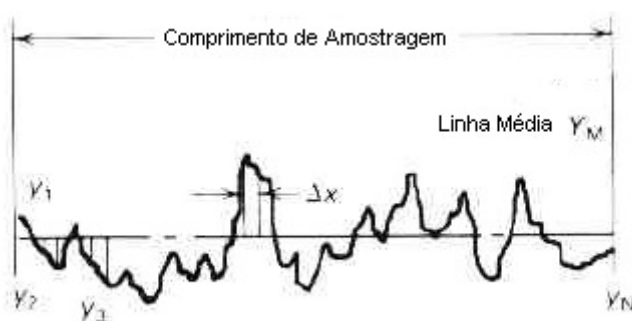


Figura 26: Média da Raiz Quadrática Rq

$$Rq = \left(\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right) \quad (3)$$

A qual pode ser aproximada para:

$$Rq = \sqrt{\frac{(y_1 - Y_M)^2 + (y_2 - Y_M)^2 + \dots + (y_N - Y_M)^2}{N}} \quad (4)$$

onde l é o percurso de medição.

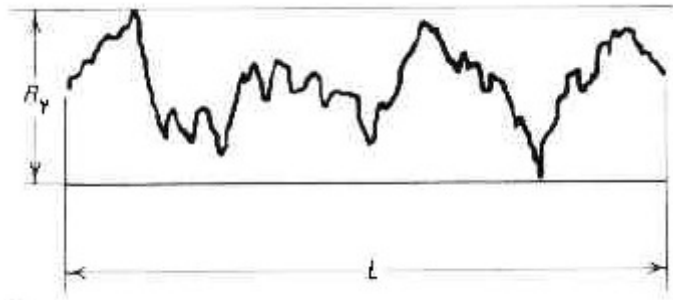


Figura 27: Rugosidade Máxima R_y

A rugosidade da peça manufaturada é influenciada por diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da pastilha, passando pelos parâmetros de corte. Dentre as variáveis que influem sobre a rugosidade, as mais importantes são:

- Processo de fabricação: o método predominante na fabricação de peças e, conseqüentemente na geração de superfícies, é através de processos de usinagem, embora algumas superfícies acabadas resultem de processos primários como fundição, extrusão ou forjamento. Cada método de produção apresenta um intervalo de valores de rugosidades obtido, como mostrado na Figura 28, sendo que as menores rugosidades geralmente são obtidas através de processos de usinagem. Os processos tradicionais de usinagem, incluem os processos que removem cavaco, como torneamento, fresamento, processos abrasivos, etc.

		RUGOSIDADE SUPERFICIAL															
Ra	microns (μm)	0,02	0,025	0,05	0,10	0,20	0,40	0,80	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100		
	micro polegadas (μin)	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16	32	63	125	250	500	1000	2000	4000		
Método de produção	Campo de aplicação 1)																
Fundição em areia																	
Corte por maçarico																	
Laminação a quente																	
Jato de areia																	
Serramento																	
Forjamento																	
Aplainamento																	
Fundição em coquilha																	
Furação																	
Extrusão																	
Fresamento																	
Torneamento																	
Fundição de precisão																	
Mandrilamento																	
Laminação a frio																	
Fundição sob pressão																	
Alarg., brochamento																	
Retificação																	
Tamboramento																	
Rodagem																	
Êspelhamento																	
Lapidação																	
Polimento																	
Supercabamento																	



1) Código:  Campo usual de aplicação
 Aplicação menos comum
Valores maiores ou menores que os indicados podem ser obtidos em condições especiais

Figura 28: Rugosidade em função do Processo de Fabricação (Ferraresi, 1970)

- Parâmetros de corte: em relação aos parâmetros de corte, Diniz et al. (2000) citam o mais importante como sendo o avanço, sendo este utilizado na determinação teórica da rugosidade média segundo Machado e Silva (1999) juntamente com o raio da ponta da pastilha. Em relação à profundidade de corte, esta não apresenta grande influência na rugosidade, exceto que, para profundidades de corte superiores a 1 mm, ocorre um pequeno decréscimo na rugosidade.

$$Ra = \frac{f^2}{32.r_e} \cdot 1000 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (5)$$

- A velocidade de corte (V_c) apresenta, para valores baixos, forte relação com a rugosidade devido à formação da aresta postiça de corte (Figura 29). Para velocidades superiores a 100 m/min a rugosidade torna-se praticamente estável em relação à velocidade de corte (Ferraresi, 1970).

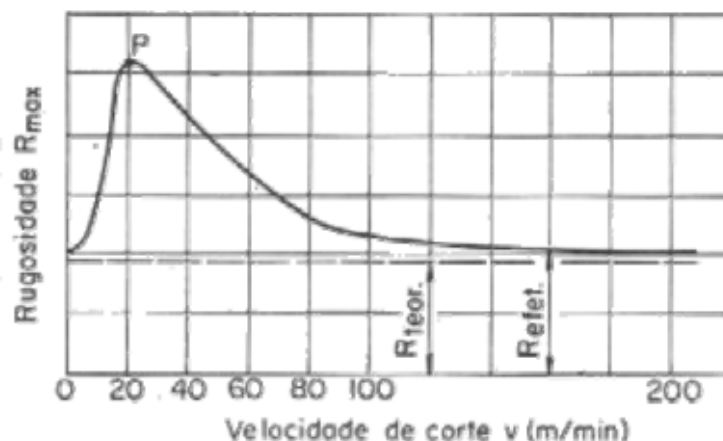


Figura 29: Relação entre Velocidade de Corte e Rugosidade Máxima (Ferraresi, 1970)

Korkut (2004) observou que durante a usinagem do aço inoxidável austenítico AISI 304 houve um decréscimo na rugosidade com aumento da Velocidade de Corte devido à formação da aresta postiça de corte a baixas velocidades. A distribuição não homogênea da espessura do cavaco a baixas Velocidades de Corte pode indicar uma variação das forças de corte influenciando negativamente no acabamento superficial. Tekiner et al. (2004) obteve a menor rugosidade média, usinando AISI 304, utilizando 150 m/min de Velocidade de Corte.

- Geometria de corte: em relação à geometria de corte, os componentes que mais afetam a rugosidade são:
 - Ângulo de saída (γ): quanto maior, menores as forças de usinagem e vibrações, e menores os danos causados por estas no acabamento superficial;

- Ângulo de folga (α): quando menor que 5° , acarreta em aumento nas forças de corte, cujo efeito é negativo no acabamento superficial. Além disso, o atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga tende a imprimir na peça o perfil do desgaste da ferramenta de corte, além de dificultar a saída de fragmentos da aresta postiça de corte (quando houver), que tendem a aderir à peça.
- Raio de ponta da pastilha (r_e): junto com o avanço é o parâmetro mais influente na determinação da rugosidade. Na Figura 30 é mostrada a influência do raio da ponta da pastilha, bem como do avanço, na rugosidade máxima do material, sendo facilmente visíveis às relações presentes na Equação 6.

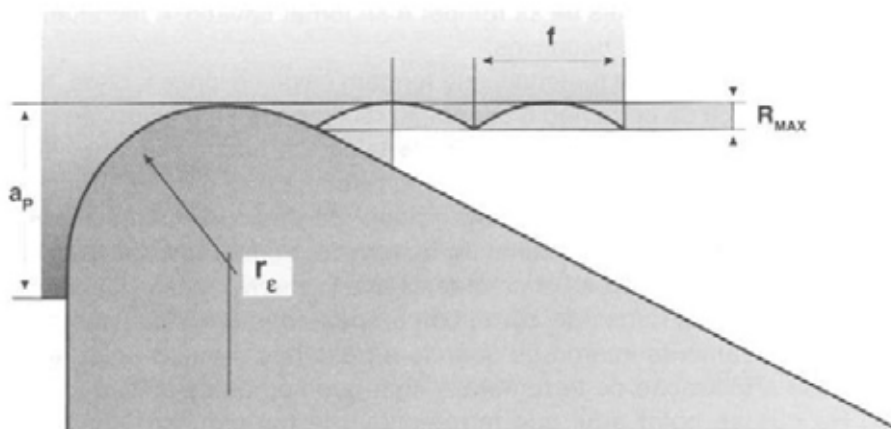


Figura 30: Contribuição Geométrica do avanço e raio de ponta da pastilha na rugosidade (Diniz et al., 2000)

A Equação 5 constitui uma tentativa de prever a menor R_a possível de ser obtida em um processo de torneamento, pois considera apenas os benefícios do aumento do raio de ponta da pastilha, não reservando atenção aos problemas causados por este ao acabamento superficial (o aumento de r_e a partir de um determinado ponto crítico acarreta o aumento das forças de usinagem e vibrações, afetando de forma negativa a rugosidade). A superfície real obtida pode ter uma maior rugosidade devido

à degradação causada pela aresta postiça de corte formada. Sob algumas condições menos usuais, uma rugosidade menor que a teórica pode ser produzida através da evolução do desgaste da pastilha, já que uma pastilha desgastada pode prover uma ação de anulação, tendendo a suavizar as irregularidades superficiais através do aumento do raio de ponta da pastilha. Uma aproximação do valor da rugosidade máxima pode ser dada pela equação 6, segundo Diniz et al. (2000), em função do esquema da Figura 33.

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \cdot 1000 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (6)$$

2.5 AÇO INOXIDÁVEL E SUA USIMABILIDADE

O termo “aço inoxidável” é usado para um grupo de ligas ferrosas que têm as seguintes características principais:

- Resistência à corrosão em meios aquosos na presença de inúmeros agentes orgânicos e minerais agressivos (a alta resistência destes aços à corrosão atmosférica é um caso particular desta);
- Resistência à corrosão a altas temperaturas.

Uma lista mais detalhada das características importantes dos aços inoxidáveis é apresentada pela ACESITA (<http://www.acesita.com.br>):

- Alta resistência à corrosão;
- Resistência mecânica elevada;
- Facilidade de limpeza;
- Baixa rugosidade;
- Aparência higiênica;
- Material inerte;
- Facilidade de conformação;

- Facilidade de união;
- Mantém as suas propriedades mecânicas mesmo quando submetido a elevadas, e a baixas temperaturas (criogênicos);
- Acabamentos superficiais e formas variadas;
- Forte apelo visual (modernidade, leveza e prestígio);
- Relação custo/benefício favorável;
- Baixo custo de manutenção;
- Material reciclável;

Baseado nestas características pode-se concluir facilmente que os aços inoxidáveis são utilizados, em geral, em aplicações cuja exigência básica é uma elevada resistência ao ataque químico por diferentes meios. Existem ainda, inúmeras aplicações para estes materiais que se baseiam em suas características mecânicas, tanto a temperatura ambiente, como a baixa ou elevada temperatura, sua aparência, propriedades magnéticas e muitas outras. Aços inoxidáveis são encontrados principalmente na indústria metalúrgica, química, alimentícia, na fabricação de bens duráveis, de móveis, peças de cutelaria e de instrumentos de precisão e em muitas outras aplicações.

2.5.1 Características dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contém cromo, comumente, níquel e, em vários casos, outros elementos de liga. O cromo é o principal responsável pela resistência à corrosão destes aços. Este elemento é um metal menos nobre que o ferro nas séries eletroquímicas, isto é, ele é, em princípio, menos resistente a corrosão que o ferro. Assim, uma liga de Fe e Cr deveria ser mais facilmente corroída do que o ferro puro, o que, de fato, pode ocorrer em situações em que a liga esteja “ativa”. Entretanto, em contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante, existe a tendência de se formar rapidamente uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas. Esta camada de óxido se torna uma barreira invisível, contínua, aderente, impermeável e praticamente insolúvel em numerosos reagentes. Nestas condições, a liga é

considerada como “passiva”, pois o metal sob a camada de óxido está protegido contra o ataque de diversos meios corrosivos, particularmente aqueles oxidantes

São uma classe de material relativamente recente que surgiu no início do século XX, quase que simultaneamente em vários países:

- Na Inglaterra (1913), Bearley, trabalhando no desenvolvimento de materiais para armamentos, reconheceu a melhor resistência à corrosão de um aço com 13% de cromo. Esta liga foi lançada no mercado por volta de 1915.
- Nos Estados Unidos (1915), Haynes, trabalhando com ligas do sistema Fe-Cr-Co, menciona a notável resistência à corrosão destas quando contém pelo menos 10% de Cr e 5% Co. A sua patente não foi, contudo, explorada até 1919.
- Na Alemanha (1912), Strauss e Mainer relatam a grande resistência à corrosão de uma liga de ferro e cromo com cerca de 9% de níquel, a qual havia resistido durante meses, em laboratório, ao ataque de vapores ácidos. Estes aços foram lançados no mercado depois de 1920.
- Na França, existem patentes de 1917 e 1918 devidas a Chevenard sobre aços com 10 a 15% de cromo e 20 a 40% de níquel.

A camada protetora, ou filme passivo, é formado espontaneamente pela exposição do metal ao ar ou, mais rapidamente, pelo uso de um tratamento de passivação. Este tratamento consiste na imersão do material, por poucos minutos, em uma solução oxidante (por exemplo, uma solução de ácido nítrico com concentração de 10 a 50%). Quando esta camada é destruída, e as condições são tais que se opõem à sua regeneração espontânea (por exemplo, em presença de ácido redutor), um aço inoxidável se torna muito pouco resistente à corrosão.

O efeito favorável do cromo é aparente mesmo quando uma pequena quantidade deste elemento está presente na liga. Assim, aços com apenas 5% de cromo são muito mais resistentes à oxidação do que os aços comuns. Contudo, convencionalmente, o nome “aço inoxidável” é reservado para ligas de Fe – Cr ou Fe – Cr – Ni contendo pelo menos de 10 a 12% Cr. Esta concentração corresponde ao

mínimo que é geralmente considerado como necessário para garantir a resistência à corrosão atmosférica razoável (Figura 31).

Os aços inoxidáveis não constituem um simples e único material, mas incluem várias ligas, cada uma tendo suas características microestruturais, elementos de liga e range de propriedades. As diferentes composições de cada família podem também produzir uma variedade de ligas destinadas a uma larga gama de aplicações.

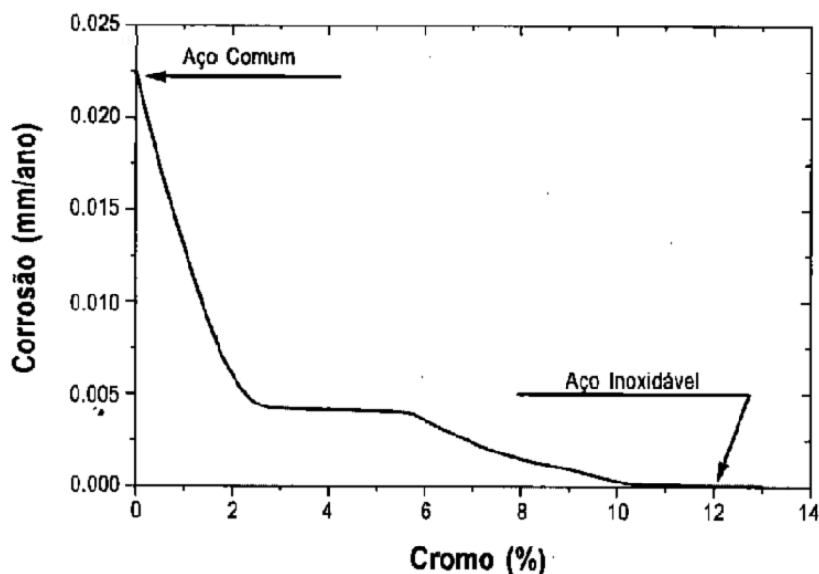


Figura 31: Taxa de corrosão de aços ao cromo expostos por 10 anos a uma atmosfera industrial (Modenesi, 2001)

2.5.2 Classificação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco famílias, sendo quatro delas baseadas nas características microestruturais: ferrítico, martensítico, austenítico ou duplex. A quinta família, as ligas com precipitados endurecidos, é baseada no tipo de tratamento térmico utilizado, ao invés da microestrutura.

2.5.2.1 Aço Inoxidável Martensítico

Os aços inoxidáveis martensíticos têm estrutura cúbica/tetragonal de corpo centrado e são magnéticos. No estado recozido, eles têm a tensão de escoamento

próxima a 275 MPa e podem ser moderadamente endurecidos por encruamento. Entretanto, ligas martensíticas são normalmente tratadas termicamente por têmpera para elevar a tensão de escoamento para 1900 MPa, dependendo principalmente do teor de carbono. Estas ligas têm boa ductilidade e resistência, as quais decrescem com o aumento da dureza.

A martensita é uma fase metaestável, resultante da transformação da austenita. É uma solução sólida supersaturada de carbono, de estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é uma forma distorcida do ferro α (ferrita). No entanto, aços com teores de carbono menores que 0,2% C, que é o caso do aço AISI 410 em estudo ($< 0,1\%C$), não obedece à relação de que quanto maior o teor de carbono, maior é a tetragonalidade da martensita, tendo este aço uma estrutura cristalina CCC (KRAUSS, 1999).

As ligas mais comumente utilizadas são da família AISI 410, as quais contêm aproximadamente 12% de cromo e 0,1% de carbono para possibilitar o endurecimento. A quantidade de carbono, e conseqüentemente, a capacidade de endurecimento, aumentam nas ligas das séries AISI 420, AISI 440A, AISI 440B e AISI 440C. A quantidade de cromo é maior, principalmente nas últimas três ligas, para manter a resistência à corrosão, já que aumentando o teor de carbono ocorre a remoção de cromo da solução formando os carbeto de cromo. Molibdênio pode ser adicionado para melhorar as propriedades mecânicas ou a resistência à corrosão. Níquel também pode ser adicionado pelas mesmas razões, como nas ligas AISI 414 e AISI 431, servindo também para manter a microestrutura desejada, impedindo a ferrita livre em excesso, quando altos teores de cromo são usados para aumentar a resistência à corrosão. As limitações nos teores dos elementos de liga são necessários para manter a estrutura totalmente martensítica, e limitam para níveis moderados a resistência à corrosão. Assim sendo, são particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão, ou erosão, em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbinas a gás, a vapor ou hidráulicas, mancais e peças de cutelaria.

Como visto acima, após o processo de solidificação os aços inoxidáveis martensíticos são temperados para melhorar as propriedades mecânicas, porém, uma

alta temperabilidade pode acarretar dificuldades em aplicações que requerem usinabilidade e soldabilidade, vindo a prejudicar o desempenho desses materiais. Dessa forma, o controle dos ciclos térmicos utilizados nos tratamentos térmicos de têmpera, alívio de tensão e de revenimento, são de grande importância. Além disso, sabe-se que com o decréscimo da velocidade de resfriamento há um maior tempo para a ferrita se decompor, transformando-se em austenita e, por conseguinte, em martensita. Assim sendo, depois que a solidificação foi completada, a microestrutura desse aço será constituída principalmente de martensita macia com pequenas quantidades de ferrita. Na Figura 32 é mostrada a microestrutura de um aço inoxidável martensítico CA15.

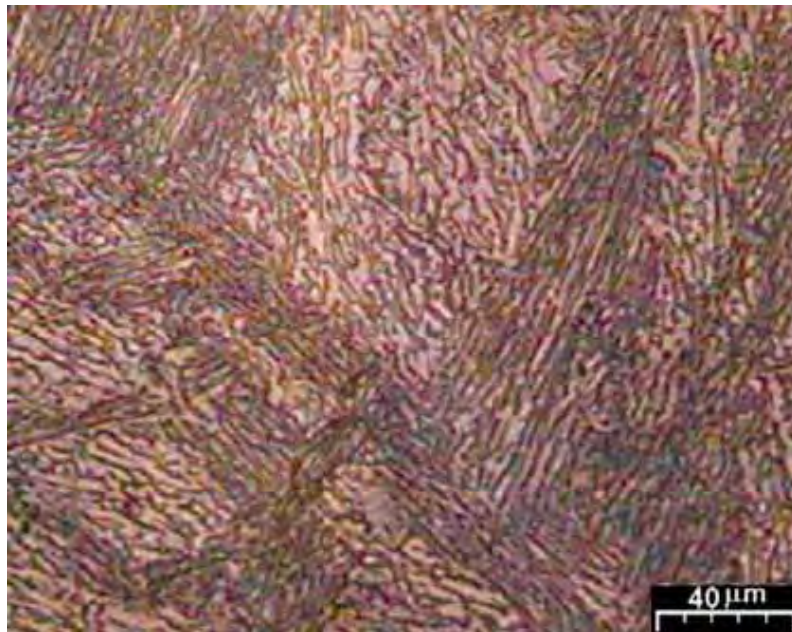


Figura 32: Aço Inoxidável CA15 (Lima, 2007)

2.5.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

O termo usinabilidade é normalmente utilizado para descrever as propriedades de um material durante a usinagem. Quando é dito que um material A tem maior usinabilidade que um material B, isto pode significar que durante a usinagem do material A atingiu-se menores valores de desgastes, ou melhores condições do acabamento superficial, ou menor potência requerida para usinagem.

Assim sendo, usinabilidade expressa através de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade) um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a um outro tomado como padrão. Este valor expressa o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Usinabilidade refere-se uma grande gama de aspectos específicos da usinagem do material, e a sua definição deve ser feita para uma aplicação muito bem definida. Alguns critérios para definição da usinabilidade incluem:

- Vida e desgaste da ferramenta;
- Qualidade superficial;
- Remoção do cavaco;
- Taxa de usinagem;
- Produtividade.

A importância relativa destes critérios varia, e estes podem apresentar interdependência de várias maneiras. A usinabilidade também depende de muitas variáveis de usinagem. Por esta razão, devido aos diferentes critérios de usinagem e às muitas variáveis envolvidas nos processos, o ranking ou extrapolação da usinabilidade deve ser analisado com muito cuidado. Algumas das variáveis de usinagem que podem afetar a avaliação da usinabilidade são:

- Fixação e rigidez da ferramenta;
- Material e geometria da ferramenta;
- Tipo de fluido de corte;
- Tipo de operação de usinagem.

Geralmente, quanto maior a dureza do material, maior a dificuldade de ser usinado. Entretanto, a usinabilidade é mais influenciada pela microestrutura do que pela dureza. A usinabilidade de muitas classes de ligas pode ser aumentada se a microestrutura apresentar duas fases constituídas de um material frágil, ou por uma segunda fase facilmente separável dispersa em uma matriz dúctil. Os aços inoxidáveis têm um alto

teor de elementos de liga que reduzem a usinabilidade, mas alguns aços inoxidáveis de usinagem melhorada estão disponíveis no mercado.

Por causa da grande variedade de aços inoxidáveis disponíveis, uma simples caracterização da sua usinabilidade pode levar a conclusões equivocadas. A usinabilidade dos aços inoxidáveis varia de muito baixa a muito alta, dependendo da escolha das ligas. Em geral, os aços inoxidáveis são considerados mais difíceis de usinar que outros metais, como alumínio e aços de baixa liga, pois aderem à pastilha durante o corte, mostrando tendência de produzir cavacos longos e aderentes, formando assim a aresta postiça de corte. Isto reduz a vida da pastilha e prejudica o acabamento superficial da peça.

Assim, enquanto os austeníticos formam cavacos longos que têm a tendência de empastar sobre a superfície de saída da pastilha (tem alta taxa de encruamento e grande zona plástica), podendo resultar na formação da aresta postiça de corte, os aços inoxidáveis martensíticos com altos teores de carbono, são difíceis de usinar devido à alta dureza, que exige um maior esforço de corte devido à presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo.

Apesar destas propriedades, os aços inoxidáveis podem ser usinados sob condições apropriadas. Em geral, mais potência é requerida para usinar aços inoxidáveis que aços carbono, velocidades de corte devem geralmente ser menores e o sistema de fixação da pastilha e da peça deve ser mais rígido. Quebra de cavacos podem ser necessários nas pastilhas.

Segundo Tekiner (2003), pode-se considerar os aços austeníticos como aqueles que apresentam a maior dificuldade para serem usinados.

A usinagem dos aços inoxidáveis é principalmente caracterizada por:

- Altas taxas de encruamento, que induzem modificações mecânicas e comportamento heterogêneo nas superfícies geradas, e que levam à instável formação de cavacos e a vibração (Saoubi et al., 2004);
- Baixa condutividade térmica (Korkut et al., 2004). A condução do calor corresponde a aproximadamente $\frac{1}{4}$ do valor encontrado na usinagem de aço comum (Neves et al., 2003). Desta forma o calor se propaga menos para o

material de trabalho ou cavacos e se concentra mais nas arestas de corte da pastilha;

- Alta resistência à fratura, resultando em altas temperaturas, difícil quebra de cavacos e conseqüentemente baixa qualidade superficial (Jang et al., 1996);
- Elevados valores de resistência mecânica e ductilidade (Chang; Tsai, 2003);
- Elevado desgaste das pastilhas, devido às altas forças de corte, e, freqüentemente, pequenos pedaços de material são removidos da pastilha, devido à alta adesão na superfície de saída, levando consigo fragmentos da pastilha. (Korkut et al., 2004);
- Alto coeficiente de dilatação térmica, o que torna difícil a manutenção de tolerâncias apertadas, e alto coeficiente de atrito, que tem como conseqüência o aumento do esforço e do calor gerado. (Diniz et al., 2000).
- Aresta postiça de corte que, de forma diferente dos aços convencionais, pode aparecer em velocidades de corte mais altas, devido à alta resistência à fratura, e altas taxas de encruamento. (Jiang et al., 1996);

Korkut, Mustafa Kasap, Ibrahim Ciftci and Ulvi Seker (2003), demonstraram que, para velocidades de corte acima de 180 m/min, houve uma significativa redução no desgaste de flanco, e que os valores da rugosidade (R_a) também foram reduzidos com o aumento da velocidade de corte, o que mostra a grande influência da formação da APC no desgaste da pastilha e na rugosidade.

Durante os estudos conduzidos por Sullivan (2002) com a usinagem de um aço inoxidável austenítico serie 300, foi demonstrado que o encruamento deste aço ocorreu devido à formação da martensita em sua microestrutura. A martensita pode ser formada durante a deformação plástica do material ou devido a efeitos da temperatura, e seu aparecimento dificulta a usinagem do material.

Os aços inoxidáveis podem ter sua usinabilidade melhorada através de adição de elementos de liga. Os elementos de liga mais importantes são aqueles que formam inclusões no metal, sendo o enxofre, selênio, telúrio, chumbo, bismuto e alguns óxidos os mais utilizados. As inclusões formadas pela adição destes elementos aumentam a

vida da pastilha, permitem a utilização de velocidades de corte maiores, e podem também influenciar a formação do cavaco e a qualidade superficial obtida.

A melhora da usinabilidade dos aços inoxidáveis geralmente está acompanhada de uma queda na resistência à corrosão. Nos últimos anos, tem-se utilizado a técnica de controle das inclusões óxidas para melhorar a usinabilidade, sem deterioração das outras propriedades. Isto é alcançado através de tratamento especial durante a fabricação do aço líquido. Além disso, a melhoria na usinabilidade tem apresentado ainda algumas interferências nas propriedades mecânicas do aço. (Tessler e Barbosa, 2002)

Operações de torneamento envolvem muitas variáveis, o que torna impossível fazer recomendações específicas que podem ser aplicadas em todas as condições. Sugestões para geometrias de pastilhas, velocidades de corte e avanços são principalmente pontos de partida para cada trabalho específico.

Ferramentas para torneamento são utilizadas com frequência na usinagem de aços inoxidáveis. A Figura 33 ilustra sugestão de geometria de corte para pastilhas de torneamento.

Pastilhas com ângulo de saída entre 5 e 10° irão gerar menos calor e cortar de forma mais dinâmica. É também benéfico selecionar pastilhas o mais largas possível para promover uma maior perda de calor, assim como um sistema de fixação mais rígido.

A maioria das ferramentas de corte utilizadas são recobertas, com o objetivo de aumentar sua vida a performance. Estes revestimentos são todos baseados na premissa de que o revestimento é muito mais duro que o material da peça. Em operações de torneamento, a temperatura do inserto chega a ultrapassar 900 °C. A idéia conceitual é que alguns problemas podem ser reduzidos com a redução da geração de calor, a qual pode ser obtida através da diminuição do atrito e mantendo boa a resistência ao desgaste.

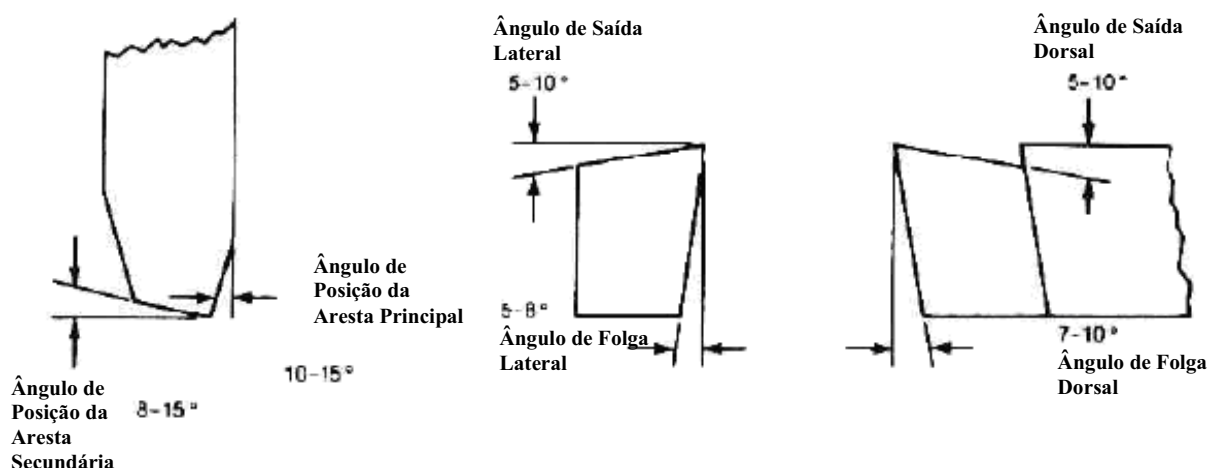


Figura 33: Sugestão de geometria para a usinagem do aço inoxidável martensítico (ASM Metal Handbook, 1989)

Para garantir um suporte adequado para a aresta de corte, o ângulo de folga dorsal da pastilha deve ser mantido entre 7 e 10° , como mostrado na Figura 25. Aços inoxidáveis austeníticos, por causa sua alta taxa de encruamento, requerem pastilhas com ângulos de saída entre 5 e 10° para controlar a formação de cavaco e pode ser necessário aumentar os ângulos de folga laterais para evitar o atrito e o encruamento do material.

A usinagem dos aços inoxidáveis pode produzir cavacos longos e fibrosos, os quais se tornam um incômodo. A dificuldade pode ser reduzida utilizando pastilhas com quebra-cavacos que, além de controlar o comprimento do cavaco, diminuem o atrito entre a superfície de saída e o cavaco. Os quebra-cavacos para aços inoxidáveis com usinabilidade melhorada, os quais possuem enxofre e, algumas vezes, selênio, chumbo, telúrio e bismuto como elementos de liga, não precisam ser tão profundos quanto para os aços inoxidáveis convencionais. Por outro lado, a profundidade de corte e a taxa de avanço normalmente ditam a largura e altura do quebra-cavaco. Cavacos mais pesados necessitam de quebra-cavacos mais profundos, mas eles precisam ter a superfície de saída sem fragilidade.

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas barras de aço inoxidável martensítico AISI 410. Sua composição química está especificada na Tabela 3. A dureza média do material antes da usinagem foi de 24 HRc.

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410 (Lima, 2007)

C	Cr	S	Mo	Si	Cu	Sn	Mn	Ni	Al	N	P
0,12	12,8	0,006	0,02	0,33	0,04	0,01	0,44	0,12	0,01	0,031	0,023

3.2. CORPOS DE PROVA

Os ensaios de usinagem foram realizados em corpos de prova de aço inoxidável. Para a fixação na placa de três castanhas no torno CNC, foi necessário, inicialmente, a usinagem de um rebaixo conforme pode ser observado na Figura 34.

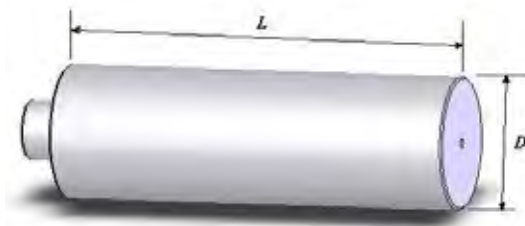


Figura 34: Representação do corpo de prova para uso nas operações de torneamento.

3.3. ENSAIOS DE USINAGEM

Os ensaios de torneamento cilíndrico externo foram realizados considerando os parâmetros de usinagem para operação de acabamento. Inicialmente, esses parâmetros foram escolhidos de acordo com os valores normalmente utilizados pela indústria em processos de acabamento de componentes, fabricados a partir deste material. Na Figura 35, pode-se observar o esquema empregado.

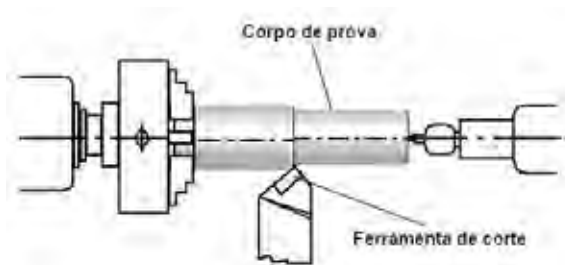


Figura 35: Representação do ensaio de torneamento cilíndrico externo

Os ensaios foram realizados em um torno CNC-MACH 9-CENTUR 30S, 25 a 3500 rpm, com potência de 7,5 CV, marca ROMI (Figura 36), pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP.

Foram utilizadas, durante os ensaios, pastilhas de metal de duro com recobrimento, conforme descrito abaixo:

- CNMG 120408 PM Classe 4025 (ISO P25), utilizada durante os pré-testes
- CNMG 120408 PM Classe 4225 (ISO P25), denominada pastilha **PM**;
- CNMG 120412 MM Classe 2015 (ISO M15), denominada pastilha **MM**;
- CNMG 120412 WM Classe 2015 (ISO M15), denominada pastilha **WM**.

Devido a característica construtiva de alguns componentes de turbinas hidráulicas, que possuem desbalanceamento de massa, em algumas situações é

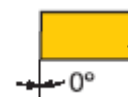
necessário a utilização de ferramentas com maior tenacidade, por isso a inclusão da ferramenta classe P. A primeira escolha para usinagem de aços inoxidáveis é a classe M, porém esta é menos tenaz que a classe P.

A chave de código CNMG 120408 PM é detalhada abaixo:

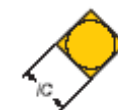
- C: formato da pastilha



- N: ângulo de folga da pastilha



- M: tolerâncias \pm para IC, neste caso de $\pm 0,05$ a $\pm 0,15$ mm



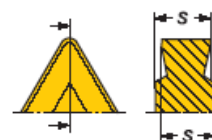
- G: tipo da seção da pastilha



- 12: dimensão da aresta de corte, que neste caso é de 12 mm



- 04: espessura da pastilha, que neste caso é de 4,76 mm



- 08: raio de ponta r_ϵ , que neste caso é de 0,8 mm



- PM: tipo de quebra cavaco da pastilha, onde P é o código ISO para usinagem de aços carbono e pastilhas M são utilizadas para operações médias de usinagem. O código ISO M é utilizado para designar pastilhas desenvolvidas para a usinagem de aços inoxidáveis e o W para pastilhas Wiper.



Figura 36: Torno CNC Romi CENTUR 30S

As pastilhas Wiper foram desenvolvidas para aumentar a produtividade em processos de acabamento através do aumento do avanço, sendo que, através do seu uso, é possível ser obtido um excelente acabamento superficial e, muitas vezes, eliminar o processo de retificação. A principal influência sobre o tempo que se leva para realizar a operação de torneamento é o avanço. Se o avanço for dobrado, o tempo de corte é reduzido pela metade e quase o dobro das peças pode ser feito no mesmo tempo.

Graças a uma mudança sutil no raio de canto da pastilha, as faixas de avanço podem ser dobradas sem alterações no acabamento superficial.

A geometria da pastilha, assim como a comparação da rugosidade obtida para um dado avanço são mostrados na Figura 37.



Figura 37: Comparação entre pastilha Wiper e com raio de ponta convencional

Já em relação às classes de inserto utilizadas tem-se que a Classe 4225 é um metal duro com cobertura CVD para acabamento a desbaste de aços e aços fundidos, sendo estas ferramentas recobertas com TiCN sobre o substrato, para o aumento da resistência ao desgaste mecânico, e Al_2O_3 para resistência ao desgaste químico. Um substrato com gradiente, além de dureza otimizada e tenacidade para torneamento de aços em combinação com uma cobertura espessa, resistente ao desgaste. Essa classe pode ser usada em cortes contínuos bem como em cortes interrompidos com altas taxas de remoção de metal. É uma classe para uma ampla área de aplicação. Na Figura 38 é mostrado o aspecto metalográfico da Classe 4225 com seu substrato e as camadas de cobertura.

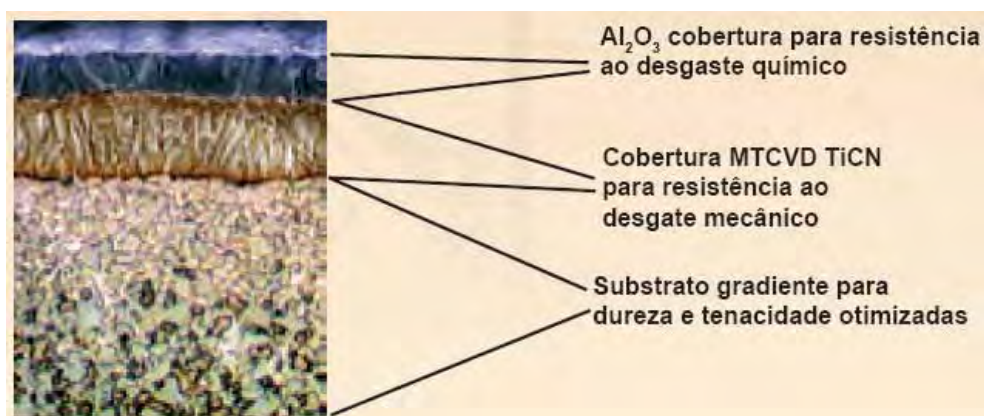


Figura 38: Aspecto metalográfico da Classe 4225 (Giovanetti, 2006)

A Classe 2015 por sua vez é um metal duro com cobertura CVD para acabamento e desbaste leve de aços inoxidáveis. Um substrato que pode suportar altas temperaturas, combinado com uma cobertura resistente ao desgaste faz dessa classe a primeira escolha para cortes contínuos com velocidades moderadas a altas (Sandvik, 2008). Esta classe possui recobrimento de TiCN, Al_2O_3 e TiN.

Os ensaios foram executados a seco, ou seja, sem a utilização de fluidos de corte, pelas razões que serão expostas pela análise dos resultados dos pré-testes.

3.4 EQUIPAMENTOS ADICIONAIS

A rugosidade da peça foi avaliada após cada etapa do processo empregando-se um rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301 (Figura 39).



Figura 39: Rugosímetro Mitutoyo SURFTEST-301

Por meio de microscopia óptica (microscópio Epiphot 200, Nikon) foi possível observar os aspectos da ferramenta de corte para cada condição avaliada (Figura 40). Quanto às fotografias digitais dos cavacos, estas foram feitas por meio da câmera digital Samsung S630 com 6.0 MP resolução e lentes Samsung SHD.

Todos os equipamentos adicionais, como os suportes para os insertos e paquímetro, empregados pertencem ao Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Guaratinguetá.



Figura 40: Microscópio óptico, Epiphot 200, Nikon

3.5. METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS

A rugosidade obtida, e o desempenho da ferramenta de corte, foram considerados em termos de: V_c , f e a_p . O critério escolhido de fim de vida da ferramenta, foi o desgaste de flanco ($VB_{max.}$) igual a 0,35mm, ou seja, foi definido que o uso da ferramenta cessará quando o seu desgaste de flanco for de 0,35mm.

A metodologia empregada nos ensaios possibilitou a análise da rugosidade obtida em relação aos parâmetros de corte e, quando observado, o desgaste da pastilha. As rugosidades foram avaliadas através dos valores de rugosidade média (R_a) e máxima (R_y) e, a progressão do desgaste de flanco (VB), e as rugosidades, foram correlacionados com o comprimento de corte (L_c), o qual é obtido através da fórmula abaixo:

$$L_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot D}{f \cdot 1000} \text{ (m)} \quad (7)$$

A Tabela 4 mostra os parâmetros de corte e pastilhas utilizados durante a execução dos ensaios.

Tabela 4: Valores dos parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.

Pastilhas	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
PM	70, 120, 170 e 220	0,1; 0,2;	0,05; 0,1 e
MM		0,3 e 0,4	0,2
WM			

As combinações dos parâmetros de corte serão mostradas nas discussões respeitando a seqüência pastilha; Vc; f; ap. Por exemplo, para um ensaio realizado com a pastilha CNMG120408-PM Classe 4225, Vc = 70 m/min, f = 0,1 mm/volta e ap = 0,05 mm será mostrada a designação PM; 70; 01; 005.

Foram determinadas as velocidades de corte de 70, 120, 170 e 220 para ser possível avaliar a influência da APC na rugosidade, já que a faixa de amplitude se inicia com um valor abaixo da velocidade crítica e termina em um valor superior. Os valores de ap foram escolhidos baseados nos valores utilizados durante a usinagem de alguns componentes de turbinas hidráulicas. Por apresentarem desbalanceamento de massa, requisitos de tolerâncias dimensionais e geométricas, e a necessidade de execução de ensaios não-destrutivos com pequenos valores de sobremetal, não é possível a utilização de grandes profundidades de corte durante a usinagem. Os valores de avanço foram escolhidos levando em conta o utilizado normalmente pela indústria mecânica pesada em processos de acabamento.

3.5.1 Análise da superfície usinada

A superfície usinada foi avaliada através da medição da rugosidade, a qual depende diretamente da definição do valor de *cut-off*. O valor de *cut-off* depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço (f) da pastilha no processo de usinagem, sendo que, para os avanços de 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mm/volta, aplicados nos ensaios de torneamento (perfil periódico), foi utilizado um *cut-off* de 0,8mm. A norma NBR 6405/1988 recomenda este valor para distância entre sulcos de 0,1mm a 0,32mm.

Como apenas o valor do avanço de 0,4 mm/volta excedeu este limite, foi mantido o *cutt-off* de 0,8 mm para possibilitar a comparação dos resultados obtidos

dentro de uma mesma condição de análise. Além disso, foi assumido que a diferença de 0,08 mm entre o valor máximo do avanço e a máxima distância entre sulcos não é grande o suficiente para influenciar na medida.

A cada passe de usinagem realizado sobre o corpo de prova, mediu-se a rugosidade da superfície para o comprimento de avanço alcançado durante o mesmo. Foram feitas três medidas em torno do corpo de prova, dispostas a um ângulo de 120° ao final do passe de usinagem executado.

3.5.2 Análise do desgaste da pastilha

Para este trabalho, a princípio, o desgaste da pastilha foi medido com o auxílio de uma lupa (ampliação 8x), obtendo-se assim a indicação da sua progressão em relação ao comprimento de corte. A utilização da lupa na primeira avaliação tem como objetivo a observação da evolução do desgaste da pastilha, sendo que a caracterização final do mesmo será feita através da utilização do microscópio ótico.

3.5.2 Análise estatística dos resultados

Serão comparadas as rugosidades obtidas experimentalmente com as calculadas através da formulação teórica, através da utilização de regressão linear obtida com a utilização do programa Minitab versão demo.

Inicialmente, nesta regressão será considerada a fórmula clássica da rugosidade, que tem como fatores o raio de ponta r_e e o avanço f , sendo incluídas a velocidade de corte V_c e a profundidade de corte a_p como novos fatores.

Com a determinação da equação proposta para o cálculo de R_a , é necessário analisar os erros oriundos da utilização de ambas para tornar possível a conclusão de qual delas se aproxima mais dos resultados obtidos experimentalmente.

A análise será feita para cada profundidade utilizada durante os ensaios, para as pastilhas PM e MM, e serão estudados os erros obtidos quando comparado o resultado de R_a com a fórmula teórica e proposta. Será aplicados o teste para análise dos principais fatores, a interação entre eles, e o Sumário Estatístico, já que o mesmo traz

as informações de média, mediana, máximo e mínimo valor e os intervalos de confiança.

Os erros foram calculados utilizando a equação 8, mostrada abaixo.

$$Erro = \frac{Ra_{REAL} - Ra_{TEÓRICA}}{Ra_{REAL}} \quad (8)$$

A análise estatística é amplamente utilizada para compreender os resultados de processos de fabricação, como feito por Mohammadi (2008), que no estudo da usinagem através de descargas elétricas em eletrodos (WEDM), aplicou o teste de normalidade, ANOVA, que determina quais fatores são significantes, a análise de resíduos e por fim a regressão de linear para cálculo da taxa de remoção de material. Ebrahimi (2008), também utilizou algumas ferramentas de análise estatística, neste caso a ferramenta ANOVA, do aço-liga 30MnVS6 e dos aços AISI 1045 e AISI 5140 sob diferentes condições de corte e Pawade (2007) utilizou a análise da média (AOM) e a análise da variância (ANOVA) no estudo da usinagem do Inconel 718.

Para a análise dos resultados deste estudo será utilizado a mediana, ao invés da média, já que esta define a metade do range de dados, estando metade deles abaixo e metade acima. Comparada à média, a mediana não é sensível aos valores extremos, e sim informa onde estão mais concentrados os resultados.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRÉ-TESTES

A primeira etapa de testes foi conduzida com o objetivo de avaliar as condições de corte que influenciam diretamente na rugosidade obtida em processos de acabamento. Foi avaliada a influência da velocidade de corte, do avanço, do comprimento de corte, do desgaste da pastilha e do corte a seco durante a operação de usinagem. A pastilha utilizada foi a CNMG 120408 PM Classe 4025 (ISO P25) e a profundidade de usinagem utilizada foi de 0,25 mm.

Inicialmente foi avaliada a influência da utilização do fluido de corte durante a usinagem. Na Tabela 5 são mostrados os parâmetros de corte utilizados.

Tabela 5: Parâmetros de corte para a avaliação da influência da utilização de fluido

Ensaio	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/volta)	Fluido de Corte
1	70	0,25	0,4	Com Fluido
2	70	0,25	0,4	A Seco
3	70	0,25	0,3	Com Fluido
4	70	0,25	0,3	A Seco

É mostrado na Figura 41 o resultado obtido após a execução destes ensaios. É possível observar que a utilização do fluido de corte influencia na rugosidade obtida. Quando comparadas às rugosidades obtidas com a utilização de fluido de corte, e a seco, obteve-se uma redução de aproximadamente 12% no seu valor, quando utilizado avanço de 0,4 mm/volta, e de 25% quando utilizado avanço de 0,3 mm/volta.

Esta variação ocorre devido ao aço inoxidável ter sua dureza superficial reduzida com o aumento da temperatura e, além disso, devido ao teor de carbono presente em sua composição, o material tem sua camada superficial temperada quando da utilização de fluido de corte, o que impõe dificuldades à usinagem.

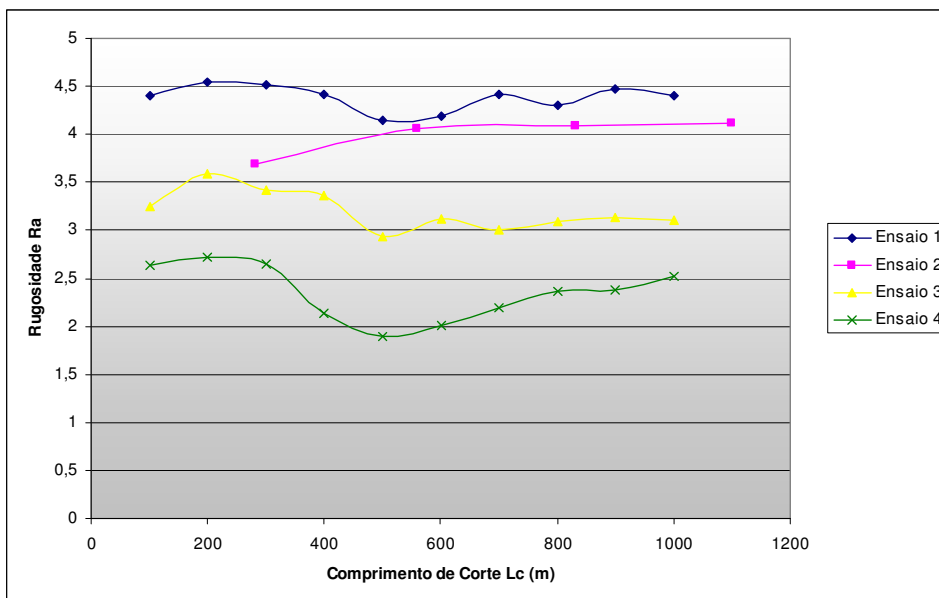


Figura 41: Avaliação da Rugosidade em função da Utilização de Fluido de Corte

Diniz (2000) confirma o exposto acima escrevendo que, a utilização de fluido refrigerante tem um pequeno efeito nos esforços de corte e pode aumentar o desgaste na pastilha, e seu uso reduz a geração de calor, tornando mais difícil a usinagem do material devido a não diminuição da dureza do material, que conforme informado anteriormente é de 24 HRc.

Além disso, a eliminação da utilização de fluidos de corte em processos de usinagem é ecologicamente desejável, e será considerada uma necessidade para as empresas de manufatura em um futuro muito próximo. (Sreejith et al., 2000)

Em seu estudo, DSouza (2004), declarou que a utilização do fluido de corte na indústria metal-mecânica é prejudicial, já que isto pode trazer desvantagens econômicas, pelo aumento dos custos de fabricação, e ambientais, tema este tratado com muita importância nos dias atuais. Além disso, os custos incorridos da utilização de fluidos de corte durante a usinagem indicam que a aquisição e disposição de refrigerantes nos países industrializados superaram a casa dos bilhões de dólares. Como custo adicional, as substâncias químicas presentes nos refrigerantes são muito danosas ao meio ambiente e têm efeitos adversos na saúde dos operadores de máquinas.

Foram avaliados também os cavacos obtidos através dos ensaios realizados. As Figuras 42 (a) e (b) e 43 (a) e (b) mostram os cavacos obtidos nos ensaios 1, 2, 3 e 4 respectivamente.



(a)

(b)

Figura 42: Imagens dos cavacos obtidos através das condições de corte $V_c = 70$ m/min, $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,4$ mm/volta (a) com fluido de corte e (b) a seco



(a)

(b)

Figura 43: Imagens dos cavacos obtidos através das condições de corte $V_c = 70$ m/min, $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,3$ mm/volta (a) com fluido de corte e (b) a seco

É possível observar que os cavacos mais longos foram obtidos através da usinagem a seco, ou seja, o material destes cavacos apresentou uma maior ductilidade que os obtidos através dos ensaios utilizando fluido de corte, resultando assim em menores valores de rugosidade. Isto comprova o fato de que o material sofreu endurecimento superficial quando empregado o fluido de corte durante a usinagem.

Empregando valor de $f = 0,3$ mm/volta os cavacos se diferenciaram apenas pelo comprimento, sendo ambos os cavacos contínuos e com forma helicoidal. Já os cavacos obtidos com $f = 0,4$ mm/volta já apresentaram diferenciação tanto no comprimento, quanto na forma, sendo que os cavacos longos e helicoidais foram resultantes da usinagem a seco, enquanto que os cavacos curtos e em forma de espiral foram obtidos com emprego de refrigerante. Mantendo-se a condição de usinagem, com fluido ou a seco, o aumento do avanço causou uma diminuição no comprimento do cavaco devido principalmente ao aumento nos esforços de corte, pelo acréscimo na área da seção de corte.

A variação da forma dos cavacos para os avanços de $f = 0,3$ mm/volta e $f = 0,4$ mm/volta deveu-se principalmente devido à alteração na dinâmica da formação da APC, a qual também é influenciada pela utilização, ou não, de fluido de corte. O aumento do avanço, e a não utilização de fluido de corte fazem com que a temperatura de corte aumente, o que tende a diminuir a velocidade crítica, reduzindo assim a formação da APC para uma dada velocidade de corte. Isto explica também a menor rugosidade obtida na usinagem a seco, isto porque, com a utilização de fluido, há mais formação de APC, alterando principalmente o valor do raio da ponta e o ângulo de saída da pastilha.

A ferramenta CNMG 120408 PM Classe 4025 (ISO P25) foi avaliada no microscópio ótico para a avaliação do desgaste e da formação da APC. Na Figura 44 é mostrado que não houve evolução dos desgastes e que é possível observar a formação da APC durante a usinagem. A imagem 3D foi construída através da utilização do software ImageJ.



Figura 44: Análise dos desgstes e da formação da APC na ferrmanta CNMG 120408
PM Classe 4025 (ISO P25)

A redução na temperatura da pastilha e da peça, quando utilizado fluido de corte, também é exposto por DSouza (2004) em seu estudo. Isto faz com que o coeficiente de atrito entre o cavaco e a pastilha seja reduzido, o que causa a diminuição das forças de corte. A sua utilização tem como objetivo principal a redução da temperatura da pastilha e da peça, benefício este ausente quando escolhida a usinagem a seco. A usinagem a seco resulta em um aumento do atrito entre pastilha, peça e cavaco o que produz a geração de temperaturas maiores que quando utilizados refrigerantes, reduzindo assim a formação da APC.

Porém, devido à baixa severidade dos parâmetros de corte, as dificuldades de se usinar a seco não foram sensíveis, não sobrepondo o fato de que a redução na dureza do material facilita a usinagem.

Devido às razões listadas acima, não foram empregados fluidos de corte durante a execução da segunda etapa de ensaios.

O próximo passo foi à avaliação da influência do comprimento de corte na rugosidade final obtida na usinagem a seco. Na Tabela 6 são mostrados os parâmetros utilizados durante estes ensaios, sendo que para todos os casos foi utilizada a pastilha CNMG 120408PM Classe 4025 (ISO P25).

Tabela 6: Parâmetros de Corte para a avaliação da Influência do Comprimento de Corte

Ensaio	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/volta)
1	70	0,25	0,3
2	70	0,25	0,4
3	120	0,25	0,4

São mostrados nas Figuras 45 e 46 os resultados obtidos através destes ensaios, ilustrando a variação da rugosidade média Ra e máxima Ry, respectivamente, para cada condição de corte em função do comprimento de corte Lc.

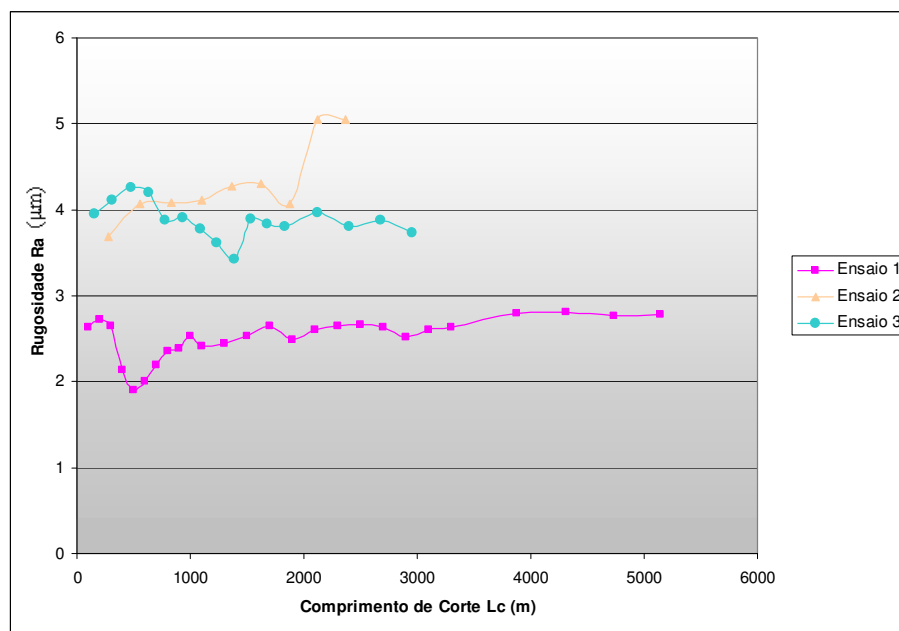


Figura 45: Avaliação da Rugosidade (Ra) em função do Comprimento de Corte

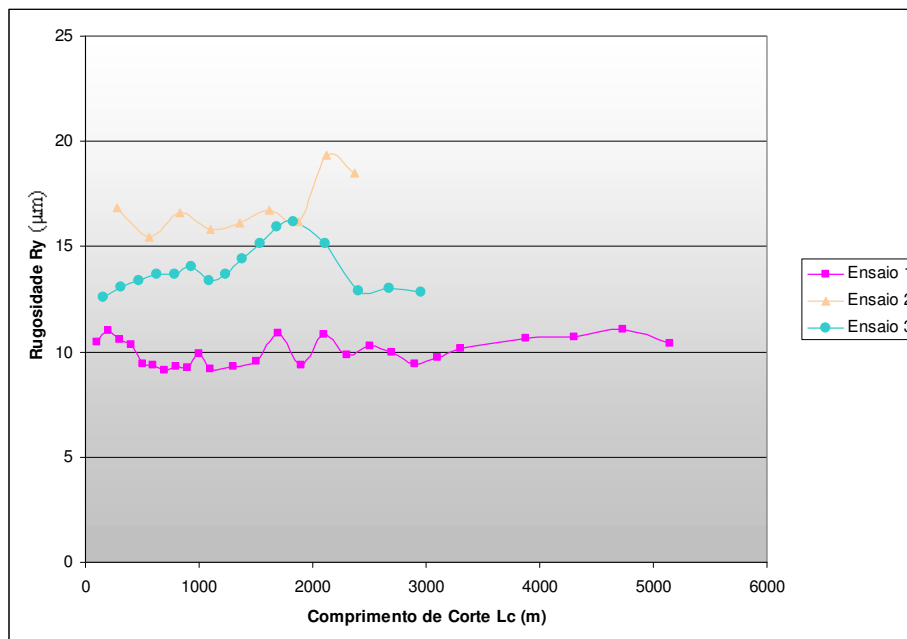


Figura 46: Avaliação da Rugosidade (R_y) em função do Comprimento de Corte

Pode-se concluir que a rugosidade não sofre significantes variações, mesmo para grandes comprimentos de corte usinados. Isto ocorre principalmente devido ao não desenvolvimento do desgaste de flanco, que não foi observado em nenhum dos ensaios realizados devido à baixa severidade dos parâmetros de corte e à formação da APC. Foi observado apenas o arredondamento da aresta de corte, o qual não evoluiu para o aparecimento do desgaste de flanco.

Em relação aos parâmetros de corte que influenciam na rugosidade obtida, é notório que o avanço e a velocidade de corte impactam diretamente no resultado final. Quando comparados os resultados dos ensaios 1 e 2, observa-se claramente que o avanço influencia diretamente na rugosidade, observando uma redução na rugosidade com a redução do avanço. Nota-se também que com o aumento da velocidade de corte a rugosidade tem seu valor sensivelmente reduzido, principalmente devido à eliminação da APC quando utilizada $V_c = 120$ m/min.

4.2 ENSAIOS DEFINITIVOS

Através das conclusões obtidas após a execução dos pré-testes, foram considerados como fatores que influenciam diretamente na rugosidade a velocidade de corte, o avanço e foram acrescentados como variáveis a profundidade de corte e a geometria da pastilha, sendo que o desgaste de flanco e o comprimento de corte não serão levados em consideração, devido às razões já mostradas anteriormente. Todos os ensaios serão executados sem a utilização de fluido de corte.

Os ensaios foram conduzidos através do emprego dos parâmetros de corte já listados na Tabela 4.

São mostradas nas Figuras 47, 48, 49 e 50 as rugosidades médias e máximas obtidas nos ensaios para $a_p = 0,05$ mm e $f = 0,1; 0,2; 0,3$ e $0,4$ mm/volta respectivamente.

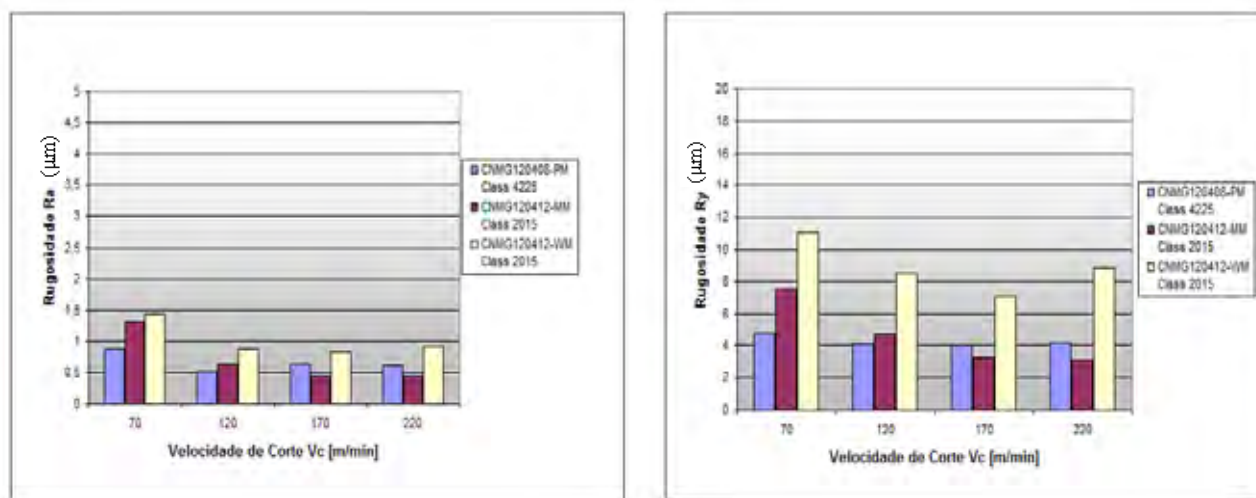


Figura 47: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,1$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.

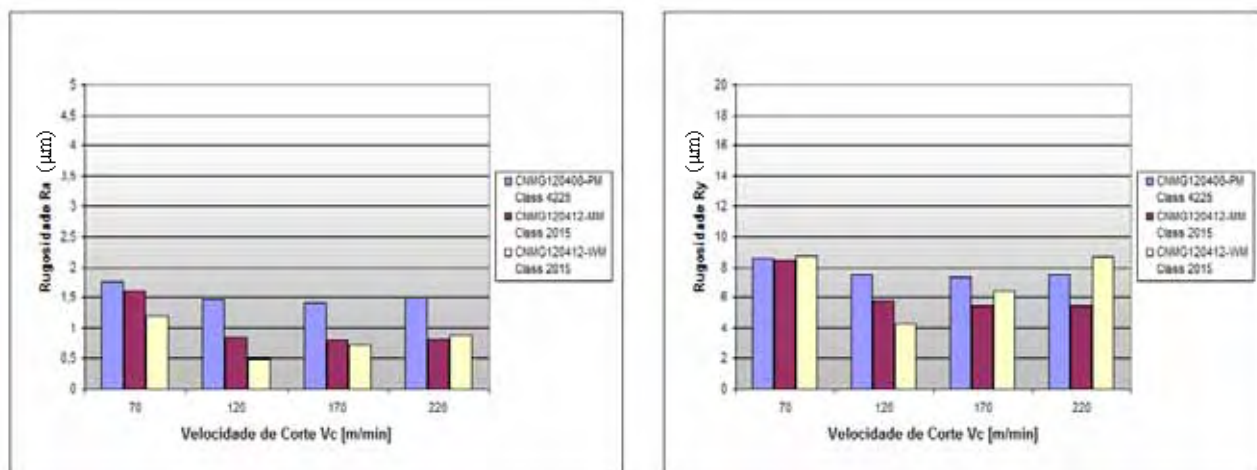


Figura 48: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,2$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.

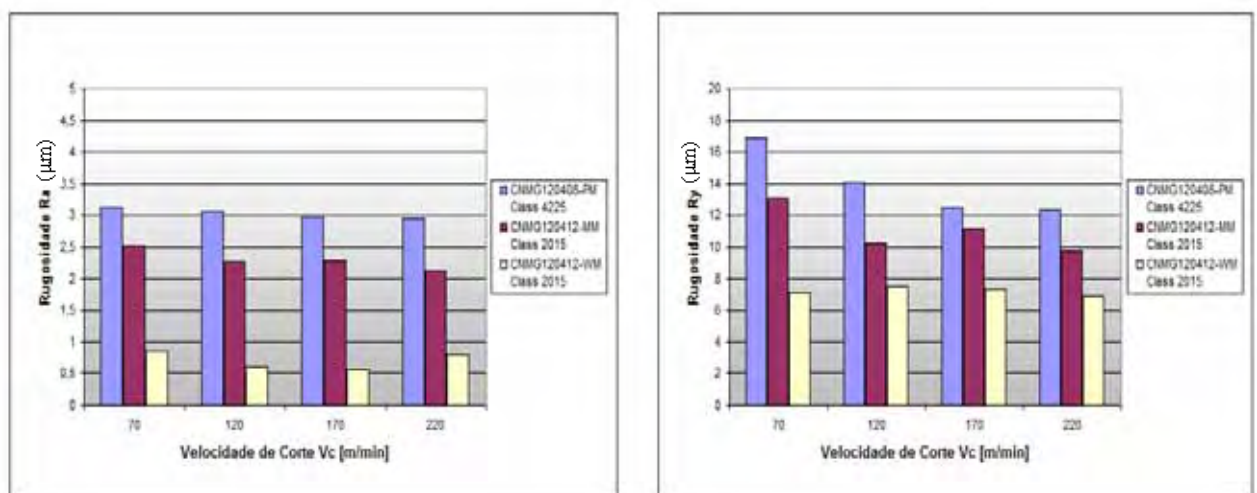


Figura 49: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,3$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.

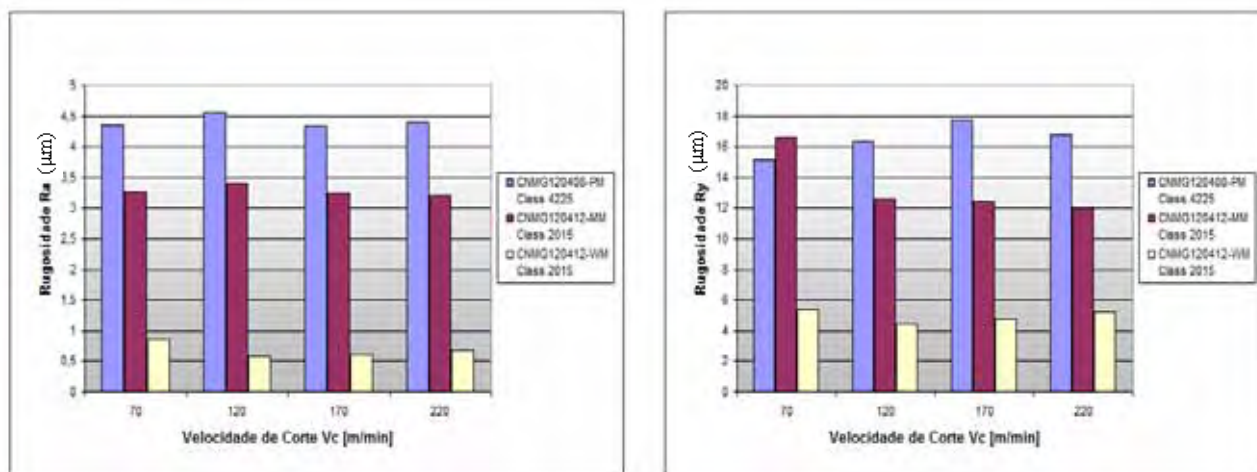


Figura 50: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,4$ mm/volta e $a_p = 0,05$ mm.

Pode ser observado na Figura 47 que o menor valor de Ra é obtido para a combinação PM; 70; 01; 005, e o maior valor é resultante da usinagem com a pastilha Wiper na combinação WM; 70; 01; 005. Isto ocorre devido à formação da APC, já que a velocidade de corte é menor que o valor limite. Com um menor raio de ponta tem-se uma menor área de contato entre a pastilha e peça, diminuído assim a formação da APC. A partir de $V_c = 170$ m/min, valor este acima da velocidade limite, a pastilha MM com raio de ponta 1,2 mm passa a apresentar o menor valor de Ra, sendo que o menor valor de Ra obtido é para a condição MM; 220; 01; 005. A regra de que para um maior valor de raio de ponta tem-se menores valores de Ra não se mostrou verdadeira para baixas velocidades de corte, devido à presença da APC que faz com que o raio de ponta e o ângulo de saída da pastilha tenham seus valores alterados.

Os valores de Ra, quando utilizada a pastilha Wiper, foram os maiores para estas condições. O avanço de 0,1 mm/volta foi o responsável por este resultado, já que estas pastilhas foram desenvolvidas para trabalhar com altos valores de taxa de avanço, aumentando assim a produtividade. Para baixos valores é possível observar muita dificuldade na formação do cavaco principalmente devido a maior área de contato entre peça e pastilha, o qual prejudica a rugosidade. Como observado por Diniz (2000), o aumento do raio de ponta torna a ponta da pastilha mais resistente, mas também aumenta a vibração da pastilha devido ao acréscimo no atrito causado pela

maior área de contato. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço e raio de ponta.

Com o valor do avanço aumentado para 0,2 mm/volta, e a profundidade de corte mantida em 0,05 mm, a pastilha Wiper passa a apresentar os menores valores de Ra, como mostrado no Figura 48. A única exceção foi encontrada para $V_c = 220$ m/min, onde a condição MM; 220; 02; 005 apresentou os menores valores de Ra. Isto ocorre porque, com o crescimento do avanço ocorre um aumento da velocidade de avanço e, conseqüentemente, uma redução no atrito tornando o processo de corte mais dinâmico. O aumento do avanço também reduz o fluxo lateral de cavaco, que influencia positivamente na rugosidade, e reduz também a formação da APC pelo aumento da temperatura de corte e redução da velocidade crítica, porém em contrapartida os baixos valores de a_p tendem a aumentar fluxo lateral de cavaco.

Para $V_c = 70$ m/min, a condição MM; 70; 02; 005 passou a apresentar o menor valor de rugosidade que a condição PM; 70; 01; 005, também devido à redução da formação da APC através do aumento do avanço.

Para os valores de $V_c = 170$ m/min e 220 m/min tem-se a completa eliminação da formação da APC, daí a explicação para o fato da pastilha MM ter seu desempenho muito próximo ao da WM nestas condições. Devido ao menor raio de ponta, a pastilha PM apresentou os maiores valores de Ra. A aresta postiça de corte se fez presente para $V_c = 70$ m/min e iniciou redução a partir de $V_c = 120$ m/min, valor aproximado da velocidade limite.

Os resultados para $a_p = 0,05$ mm e $f = 0,3$ e 0,4 mm/volta foram mostrados nos Figura 49 e 50. Para os avanços de 0,3 e 0,4 mm/volta a pastilha WM apresentou os menores resultados de rugosidade para todas as velocidades de corte. Isto vai de encontro com o proposto pelo fabricante, que é obter a mesma rugosidade que uma MM, com raio de ponta convencional, porém utilizando o dobro do avanço. Se observarmos, por exemplo, o resultado para a condição MM; 170; 02; 005 tem um Ra de aproximadamente 0,8 μm . Quando utilizada a condição WM; 170; 04; 005 tem-se um valor de Ra de 0,6 μm . Com isto é possível aumentar a produtividade em processos de acabamento, reduzindo em aproximadamente à metade o tempo efetivo de corte, sem com isso prejudicar a rugosidade final obtida.

Durante a execução destes ensaios foram coletados os cavacos para serem analisados. Os cavacos forma coletados para os avanços de 0,1 e 0,4 mm/volta, para com isso serem analisadas as condições iniciais e finais dos ensaios.

São apresentados nas Figuras 51, 52, 53 e 54 os cavacos oriundos da usinagem com as velocidades de corte de 70 m/min e 220 m/min, $a_p = 0,05$ mm, avanços de 0,1 e 0,4 mm/volta, com as pastilhas PM, MM e WM.

Os menores valores de R_a , para a primeira velocidade de corte, foram obtidos para a condição PM; 70; 01; 005, onde o cavaco se apresentou em forma de fita. Para a condição MM; 70; 01; 005 a forma do cavaco foi helicoidal, e os cavacos em fitas quebradiças foram obtidos para na condição WM; 70; 01; 005 , para a qual foram resultados os maiores valores de rugosidade.



(a)

(b)

(c)

Figura 51: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 52: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 53: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 54: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 005, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.

Quando o avanço foi aumentado para 0,4 mm/volta a diferença mais significativa foi observada para a pastilha Wiper, onde o cavaco passou a ser em fita e a rugosidade teve seu valor reduzido de 1,44 para 0,86 μm . Houve também uma pequena alteração na forma do cavaco oriundo da usinagem com a pastilha PM, que passou a se aproximar da forma helicoidal.

A velocidade de corte mostrou ter influência no comprimento do cavaco obtido para as pastilhas PM e MM, sendo que, para um aumento do valor de V_c há uma redução no comprimento do cavaco. O cavaco para $V_c = 70$ m/min tem comprimento maior devido à presença da aresta postiça de corte, já que o valor da pressão específica de corte diminui devido ao efeito de aumento do ângulo efetivo de saída que a aresta postiça de corte proporciona, diminuindo assim a força de corte. Com $V_c = 220$ m/min

não se tem a formação da APC, há um aumento na força de corte, não havendo alteração na forma do quebra cavaco presente na pastilha e mantendo o fluxo do cavaco no sentido da quebra durante o processo de corte, o que faz com que o cavaco tenha seu comprimento reduzido.

Outro fator que influencia na quebra do cavaco é a relação entre a profundidade e o raio da ponta, que neste caso é de 0,0625 para a pastilha PM ($r_e = 0,8$ mm), e de 0,042 para pastilha MM ($r_e = 1,2$ mm). Estes valores são muito baixos e faz com que o cavaco se dobre lateralmente, com grande ângulo de fluxo, fazendo com que o cavaco não se quebre com facilidade. Quando esta relação é grande, além da curvatura lateral, haverá também uma curvatura vertical do cavaco e ele se dobrará no sentido de encontrar a superfície de folga da pastilha e lá se quebrar.

Para $ap = 0,05$ mm os menores valores de rugosidade foram obtidos com o cavaco resultante em forma de fita. Esta forma de cavaco apresenta alguns inconvenientes, sendo eles:

1. Segurança do operador: um cavaco longo em forma de fita pode, ao atingir o operador e machucá-lo seriamente;
2. Possível dano à pastilha e a peça: uma cavaco em forma de fita pode se enrolar à peça, danificando seu acabamento superficial. Além do dano à peça o cavaco pode também prejudicar a pastilha, pois ao se enrolar à peça ele tenta penetrar entre a interface peça-pastilha podendo causar a quebra da mesma;
3. Manuseio e armazenagem do cavaco: logicamente um cavaco em fita é muito mais difícil de manipular e requer um volume muito maior para ser armazenado.

Serão avaliados agora os resultados para $ap = 0,1$ mm através das Figuras 55, 56, 57 e 58, os quais trazem os resultados para $f = 0,1; 0,2; 0,3$ e $0,4$ mm/volta.

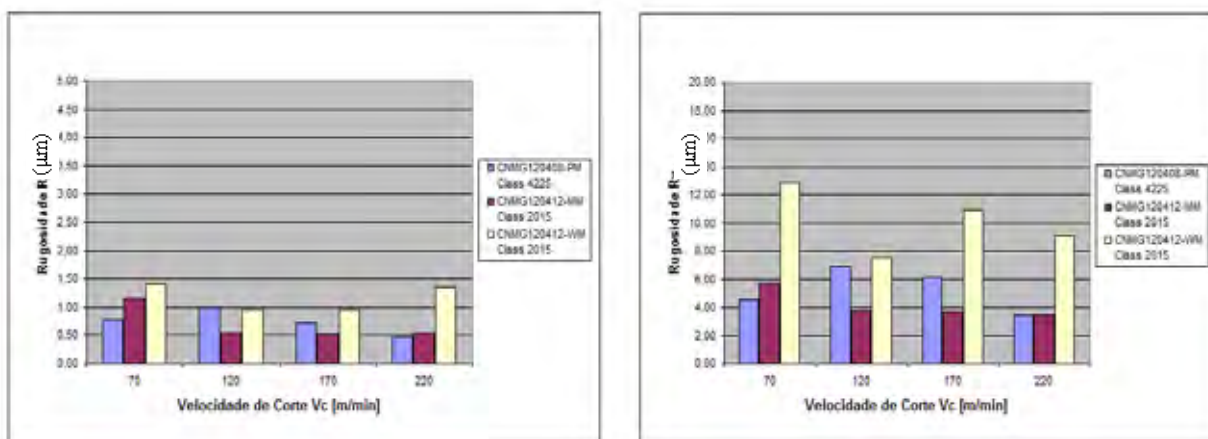


Figura 55: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,1$ mm/volta e $a_p = 0,1$ mm.

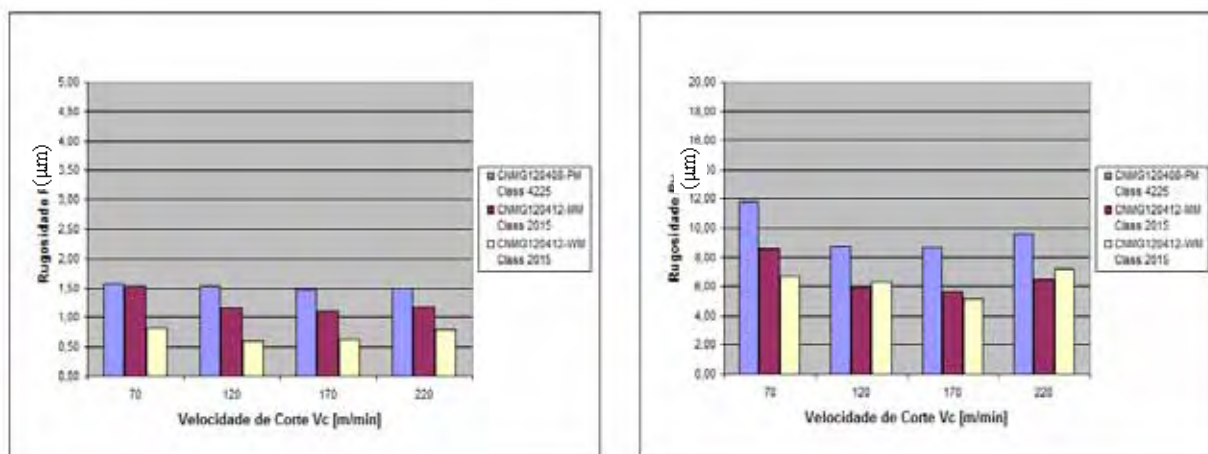


Figura 56: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,2$ mm/volta e $a_p = 0,1$ mm.

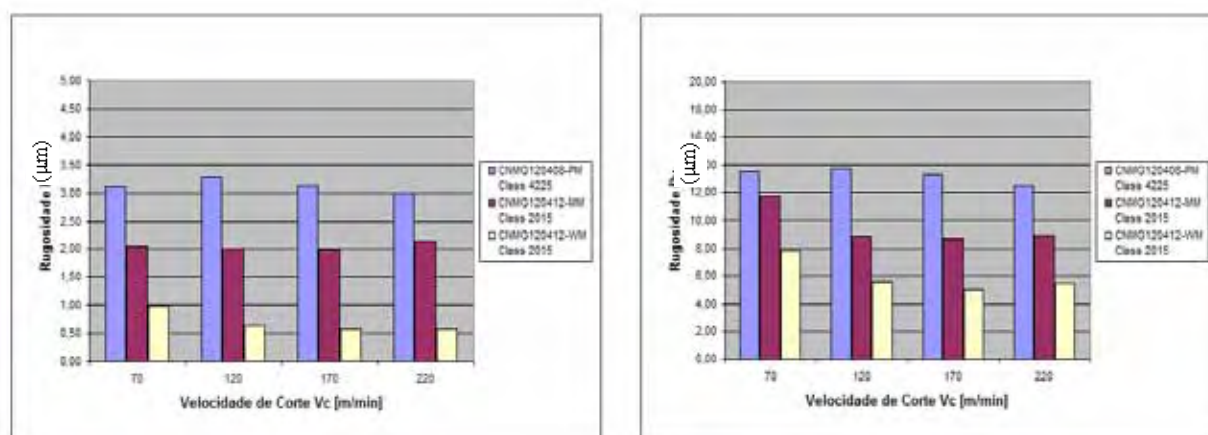


Figura 57: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,3$ mm/volta e $a_p = 0,1$ mm.

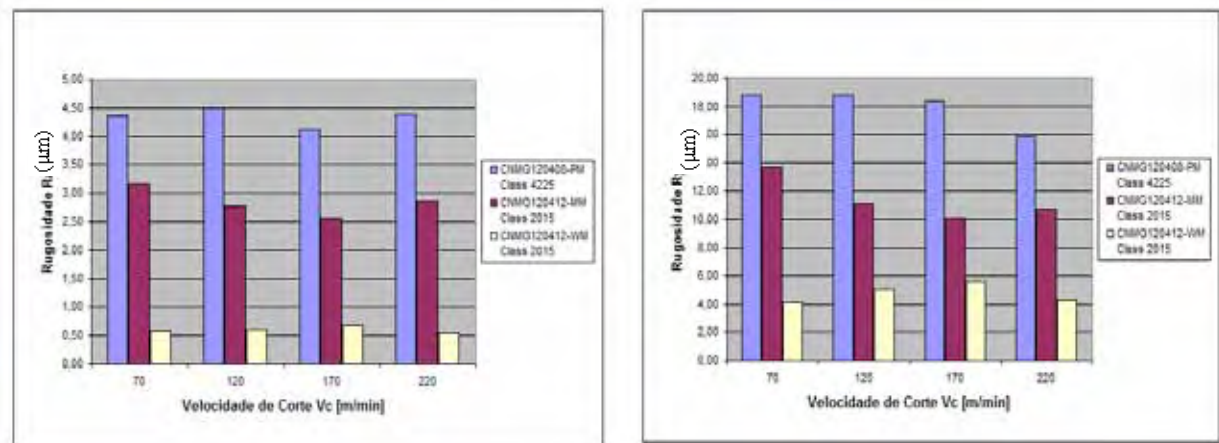


Figura 58: Rugosidade média R_a e máxima R_y em função de V_c e da pastilha, com $f = 0,4$ mm/volta e $a_p = 0,1$ mm.

As mesmas tendências encontradas para os valores de R_a e R_y para $a_p = 0,05$ mm são observadas aqui. Para o primeiro valor de velocidade de corte, a condição PM; 70; 01; 01 apresenta os menores valores de R_a e R_y devido à formação da APC ser menos intensa que para as outras pastilhas. A partir de $V_c = 120$ m/min, diferentemente do observado para $a_p = 0,05$ mm, a pastilha MM passa a apresentar os menores resultados de rugosidade, pois há redução na formação da APC. Isto se deve ao aumento da profundidade de corte, que eleva a temperatura de corte, reduzindo o valor da velocidade crítica. Para $V_c = 220$ m/min o resultado é praticamente o mesmo que para a pastilha PM, e a pastilha WM é a que apresenta os maiores valores de R_a e R_y pelos motivos já explicados anteriormente.

Para avanço de 0,2 mm/volta, assim como o observado na análise dos resultados para $a_p = 0,05$ mm, nestes a pastilha WM apresentou os menores de valores de R_a e R_y . A explicação para este fato é mesma que a descrita para o caso anterior.

À medida que o avanço aumenta, a diferença de rugosidade entre as pastilhas também aumenta. Da condição WM; 170; 02; 01 resultou um valor de R_a 48% inferior à obtida para MM; 170; 02; 01, e, com o aumento do valor do avanço, a diferença passou a ser de 72%, quando comparadas as condições WM; 170; 04; 01 e MM; 170; 04; 01, ainda em vantagem para a pastilha WM.

As Figuras 59, 60, 61 e 62 mostram os cavacos oriundos da usinagem com as velocidades de corte utilizadas, $ap = 0,1$ mm, avanços de 0,1 e 0,4 mm/volta, com as pastilhas PM, MM e WM.

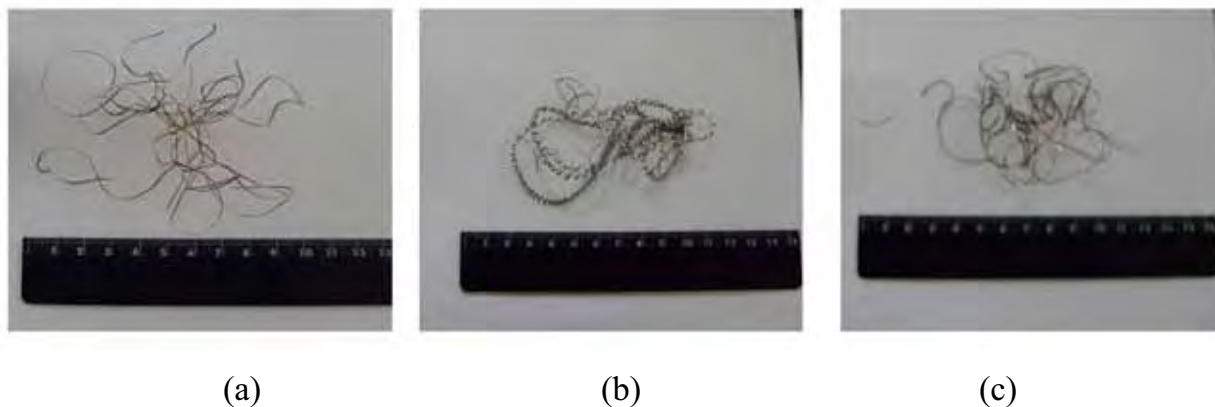


Figura 59: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.

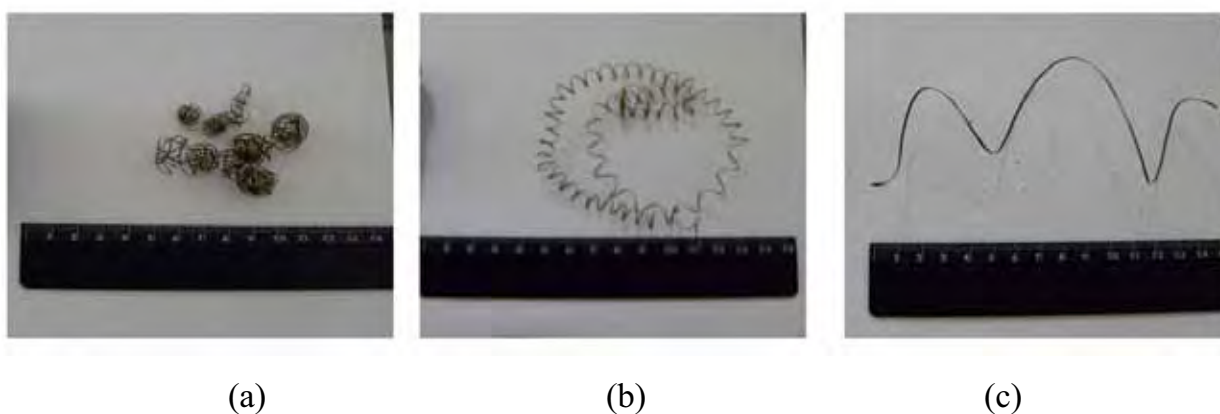


Figura 60: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.

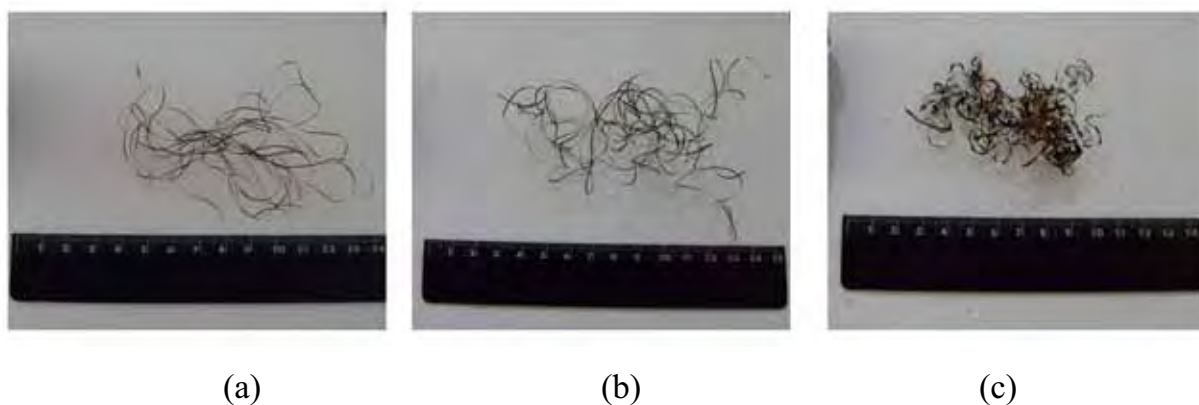


Figura 61: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 62: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 01, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.

Assim como observado para $a_p = 0,05$ mm, para $V_c = 70$ m/min e $f = 0,1$ mm/volta a menor rugosidade foi obtida para a condição PM; 70; 01; 01 para a qual o cavaco resultante teve forma de fita. Para a condição MM; 70; 01; 01 o cavaco teve forma de espiral, e para WM; 70; 01; 01 a forma resultante foi em fita com menor comprimento, pois os cavacos se apresentaram mais quebradiços.

Quando o avanço passou a ser de 0,4 mm/volta, o cavaco para a pastilha PM teve seu comprimento reduzido, porém manteve a forma de fita. Isto é explicado pela alteração da curvatura lateral do cavaco causada pelo aumento da relação profundidade de corte / avanço. Seu comprimento é reduzido pois, ao se dobrar lateralmente ocorre a quebra do mesmo ao colidir com a superfície da peça que ainda não foi usinada.

Mais uma vez a maior alteração na forma do cavaco, quando o avanço passa de 0,1 para 0,4 mm/volta, é a observada para a pastilha Wiper. O cavaco passa da forma em fitas quebradiças para fitas mais homogêneas, tendo novamente o valor da rugosidade reduzido significativamente.

Os resultados para $a_p = 0,2$ mm e $f = 0,1$ mm/volta são apresentados na Figura 63.

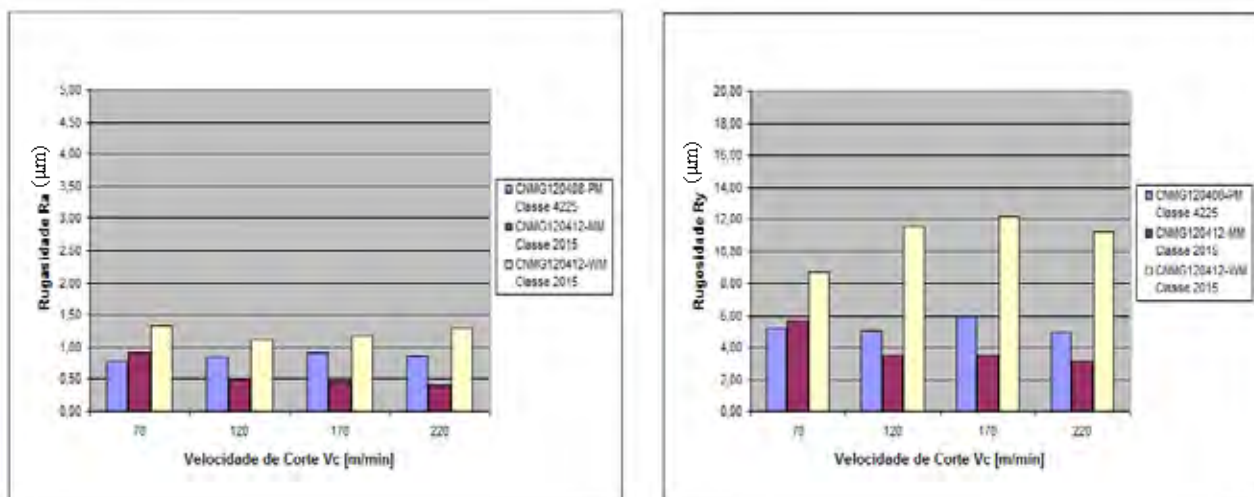


Figura 63: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,1$ mm/volta e $a_p = 0,2$ mm.

São observadas as mesmas tendências já encontradas para $a_p = 0,05$ e $0,1$ mm.

São mostrados nas Figura 64, 65 e 66 os resultados para $a_p = 0,2$ mm e $f = 0,2$, $0,3$ e $0,4$ mm/volta.

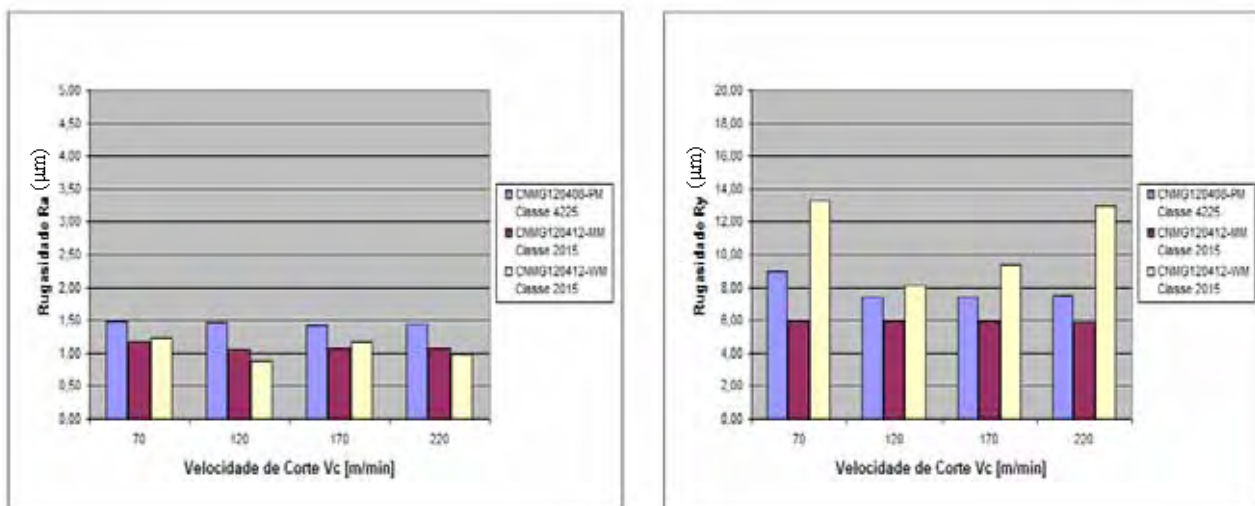


Figura 64: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,2$ mm/volta e $a_p = 0,2$ mm.

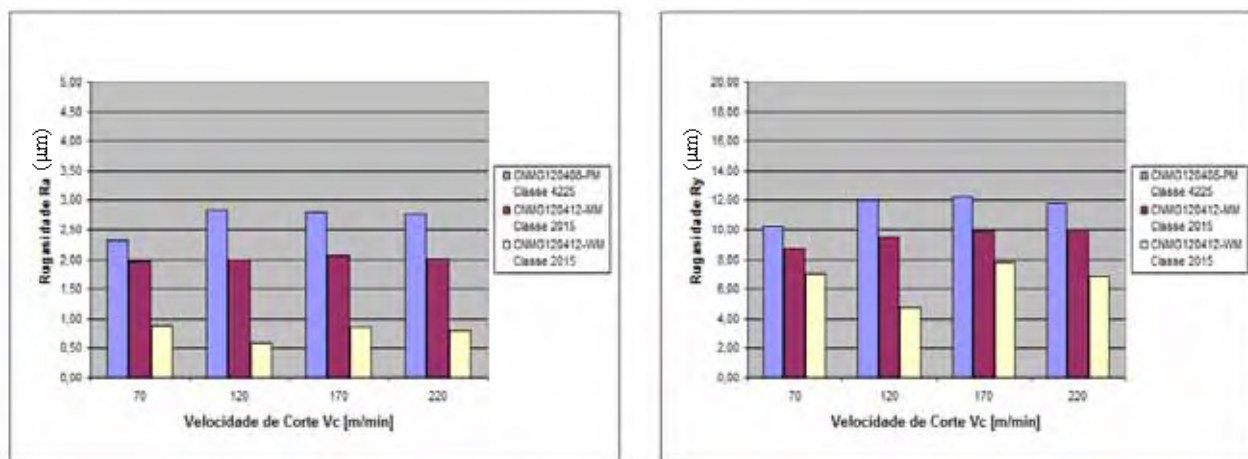


Figura 65: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,3$ mm/volta e $a_p = 0,2$ mm.

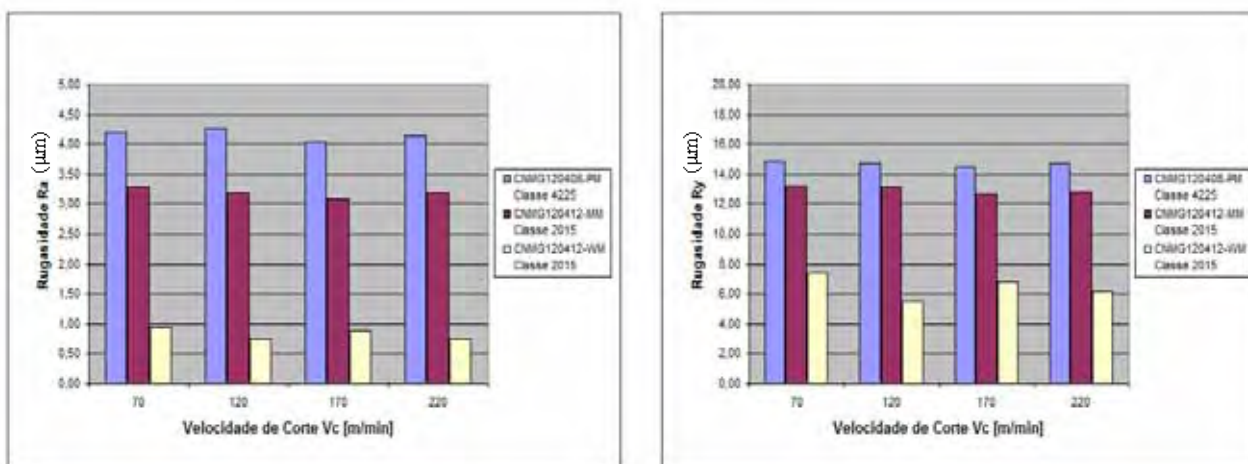


Figura 66: Rugosidade média Ra e máxima Ry em função de Vc e da pastilha, com $f = 0,4$ mm/volta e $a_p = 0,2$ mm.

Para $a_p = 0,2$ mm/volta, são observadas as mesmas tendências mostradas anteriormente. Com $V_c = 70$ m/min e $f = 0,1$ mm/volta, a pastilha PM continua sendo a melhor escolha, já que apresenta o menor valor da rugosidade. Para as velocidades de corte seguintes as rugosidades obtidas com a pastilha MM passam a ser as menores.

Com $f = 0,2$ mm/volta as pastilhas WM e a PM fornecem os menores valores de Ra, enquanto que para $f = 0,3$ e $0,4$ mm/volta a pastilha WM passa a ser a melhor escolha, como observado anteriormente.

Os cavacos oriundos da usinagem com as velocidades de corte utilizadas, $ap = 0,2$ mm, avanços de 0,1 e 0,4 mm/volta, com as pastilhas PM, MM e WM. são mostrados nas Figuras 67, 68, 69 e 70.



(a)

(b)

(c)

Figura 67: Cavaco obtido com as condições 70; 01; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 68: Cavaco obtido com as condições 70; 04; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 69: Cavaco obtido com as condições 220; 01; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.



(a)

(b)

(c)

Figura 70: Cavaco obtido com as condições 220; 04; 02, onde: (a) PM; (b) MM e (c) WM.

O cavaco em fita obtido através da utilização da condição PM; 70; 01; 02, foi resultante das condições que propiciaram o menor valor de R_a , como observado para $a_p = 0,05$ e $0,1$ mm. Aumentado o avanço para $0,4$ mm/volta, a grande alteração na forma do cavaco é observada para a pastilha de raio de ponta $0,8$ mm, principalmente porque com o crescimento de f a velocidade de avanço aumenta e o coeficiente de atrito diminui, tornando o processo de corte mais dinâmico.

Para $V_c = 220$ m/min, as alterações nas forma dos cavacos não ocorrem de maneira significativa quando o avanço passa de $0,1$ para $0,4$ mm/volta, com exceção da pastilha PM, que possui o raio de ponta de $0,8$ mm. Isto se deve a um processo de corte mais dinâmico, para o qual o cavaco passa a apresentar uma forma mais definida.

São apresentadas nas Figuras 71, 72 e 73 as pastilhas PM, MM e WM, respectivamente, utilizadas durante os ensaios com velocidade de 220 m/min, avanço de $0,4$ mm/volta e profundidade de usinagem de $0,2$ mm. As imagens foram obtidas em um microscópio óptico Epiphot 200, da marca Nikon, com aumento de 50 vezes.

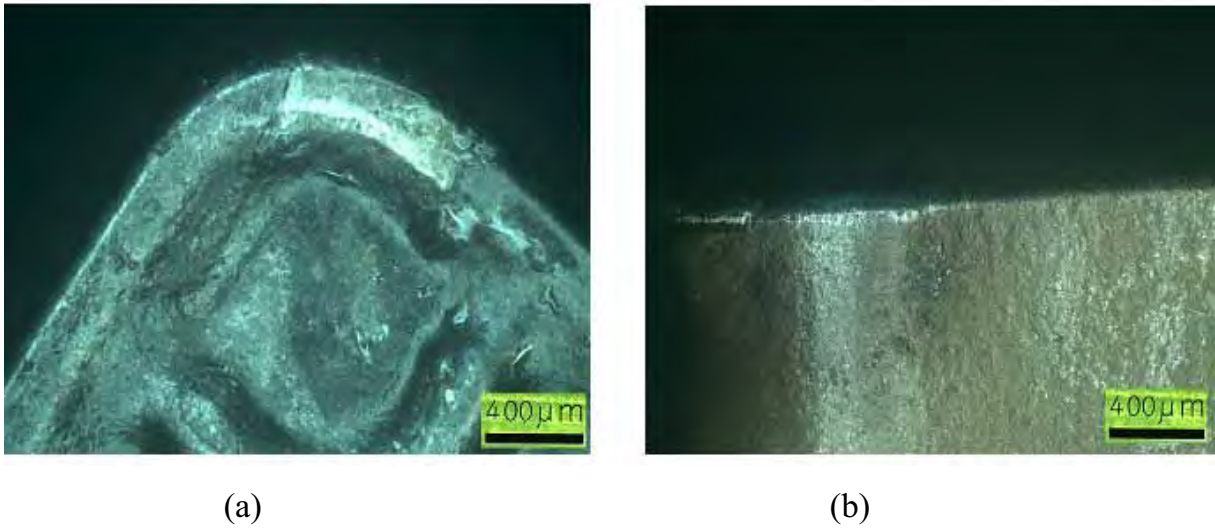


Figura 71: Pastilha CNMG 120408 PM Classe 4225 (ISO P25) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga

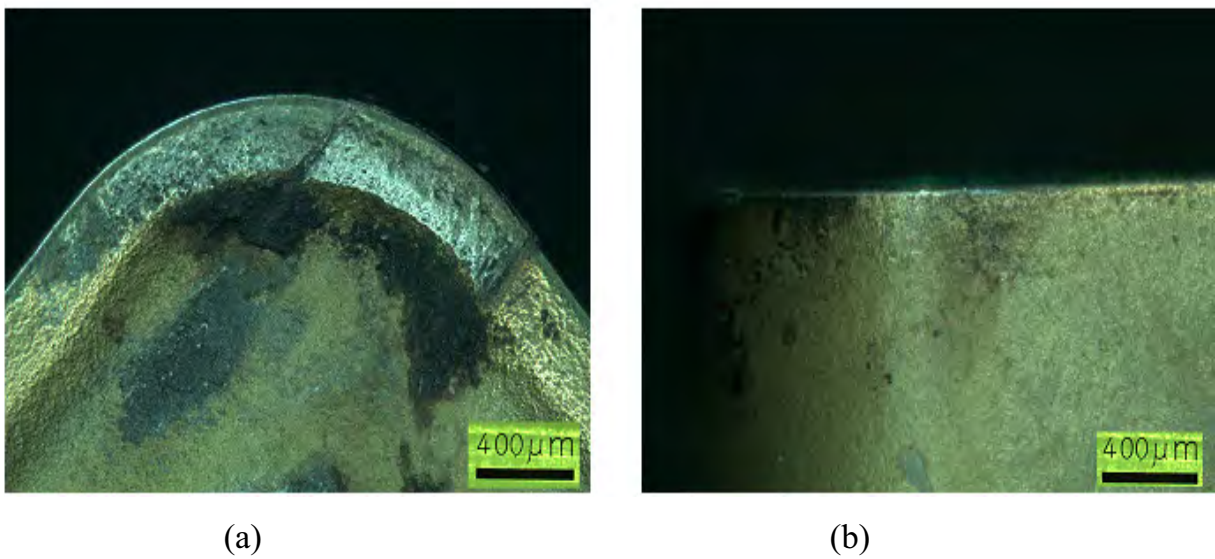


Figura 72: Pastilha CNMG 120412 MM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga

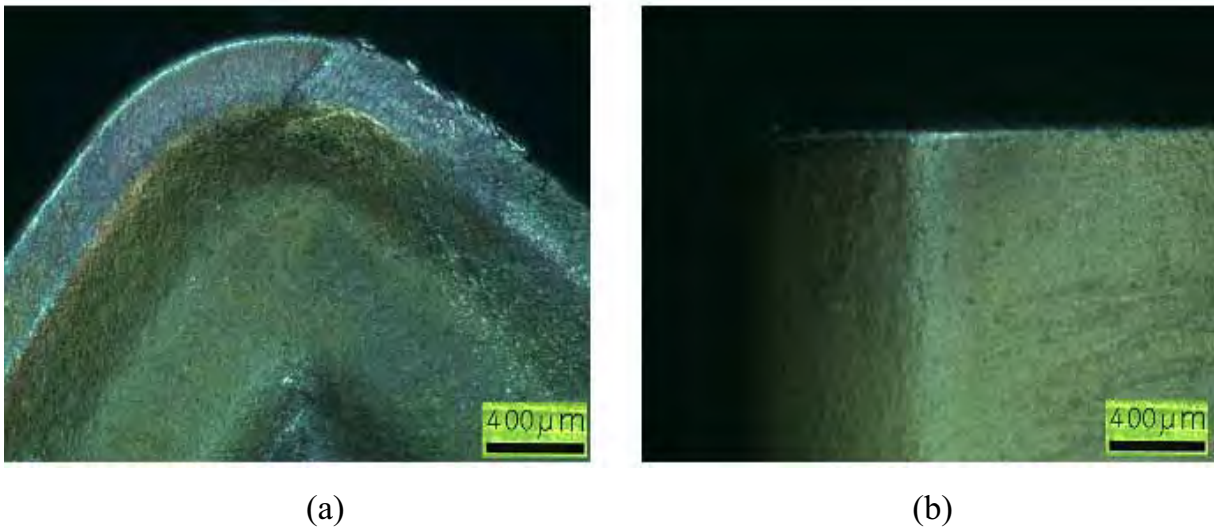


Figura 73: Pastilha CNMG 120412 WM Classe 2015 (ISO M15) (a) superfície de saída e (b) aresta de corte e superfície de folga

Nas imagens acima fica explícito que não houve evolução dos desgastes de flanco e cratera nas pastilhas utilizadas para os ensaios, ocorrendo apenas o arredondamento da aresta de corte. Fato este explicado principalmente devido à baixa severidade dos esforços de corte, já que os parâmetros de corte para acabamento são caracterizados por baixos valores de a_p e f , e por último ao aparecimento da APC, que protege a aresta da pastilha. O desgaste de cratera, que possui como principal mecanismo a difusão, não ocorreu porque não foram atingidas temperaturas suficientemente elevadas a ponto de propiciar a troca de átomos entre a pastilha e o cavaco.

4.3 COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE OBTIDA COM A TEÓRICA

A literatura recomenda que a rugosidade média R_a seja calculada utilizando a equação 8. Nota-se que são levados em consideração para o cálculo apenas o avanço e o raio de ponta da pastilha, e não se considera o efeito da velocidade de corte e da profundidade.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios apresentados no tópico anterior, será feita uma comparação entre o resultado real e o obtido através da aplicação da fórmula teórica.

$$Ra = \frac{31,2 \cdot f^2}{r_\epsilon} [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Não foram considerados na análise os resultados para a pastilha Wiper devido ao seu raio de ponta não ser uma circunferência, e sim possuir uma combinação de raios com a intenção de propiciar uma aresta alisadora durante a usinagem.

Nas Figuras 74 e 75 são ilustradas as comparações das rugosidades para $ap = 0,05 \text{ mm}$ e $r_\epsilon = 0,8$ e $1,2 \text{ mm}$ respectivamente.

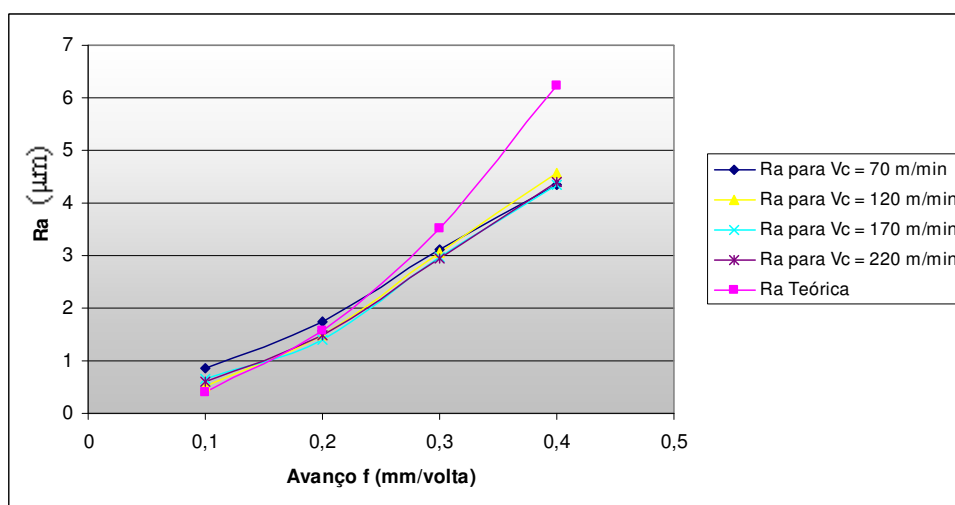


Figura 74: Comparação entre Ra teórico e real para $ap = 0,05 \text{ mm}$ e $r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$

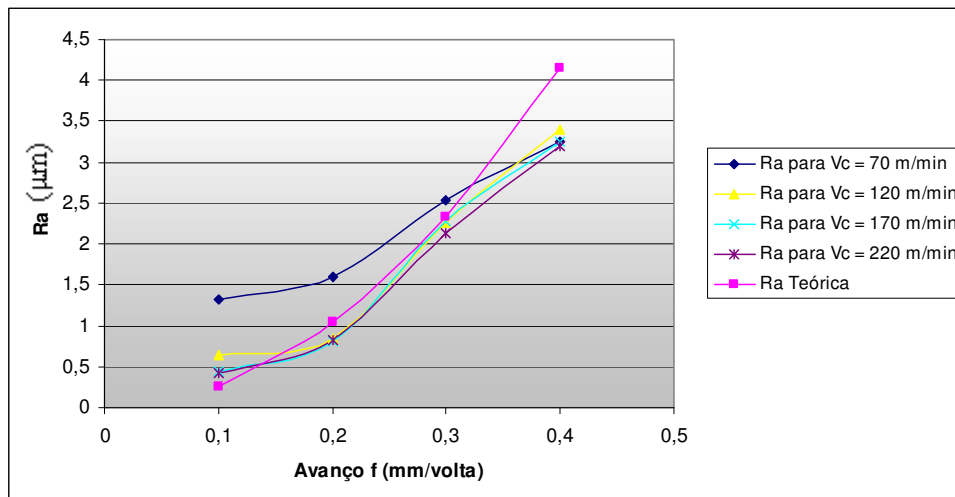


Figura 75: Comparação entre Ra teórico e real para $a_p = 0,05$ mm e $r_\epsilon = 1,2$ mm

São ilustradas nas Figuras 76 e 77 a comparação para $a_p = 0,1$ mm e $r_\epsilon = 0,8$ e 1,2 mm respectivamente.

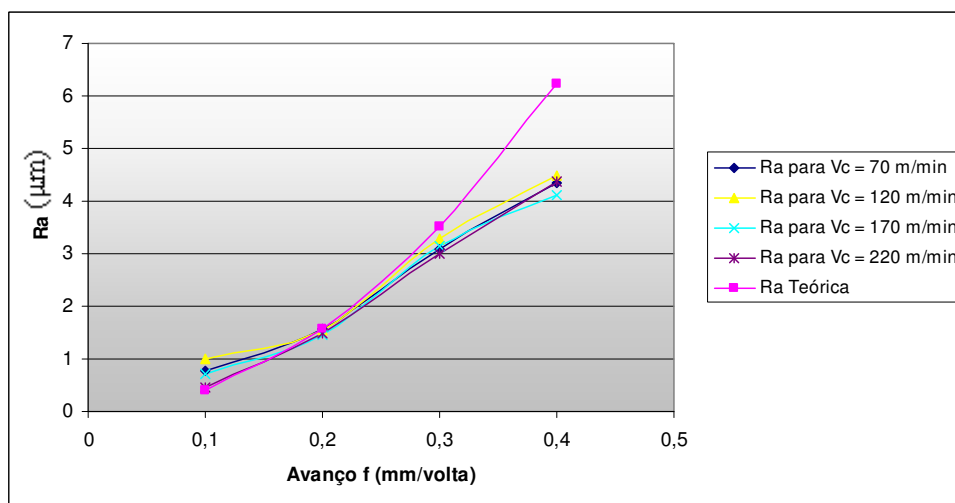


Figura 76: Comparação entre Ra teórico e real para $a_p = 0,1$ mm e $r_\epsilon = 0,8$ mm

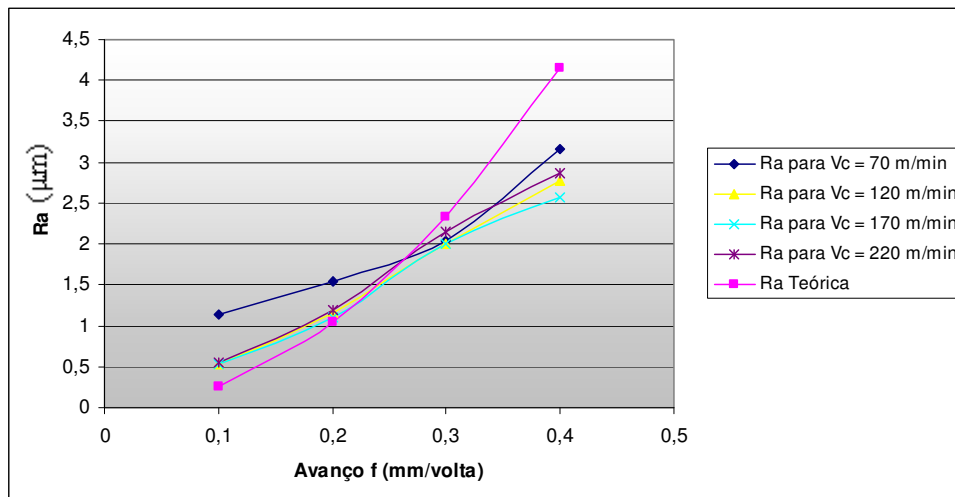


Figura 77: Comparação entre Ra teórico e real para $a_p = 0,1$ mm e $r_\epsilon = 1,2$ mm

Nas Figuras 78 e 79 são ilustradas as comparações para $a_p = 0,2$ mm e $r_\epsilon = 0,8$ e 1,2 mm respectivamente.

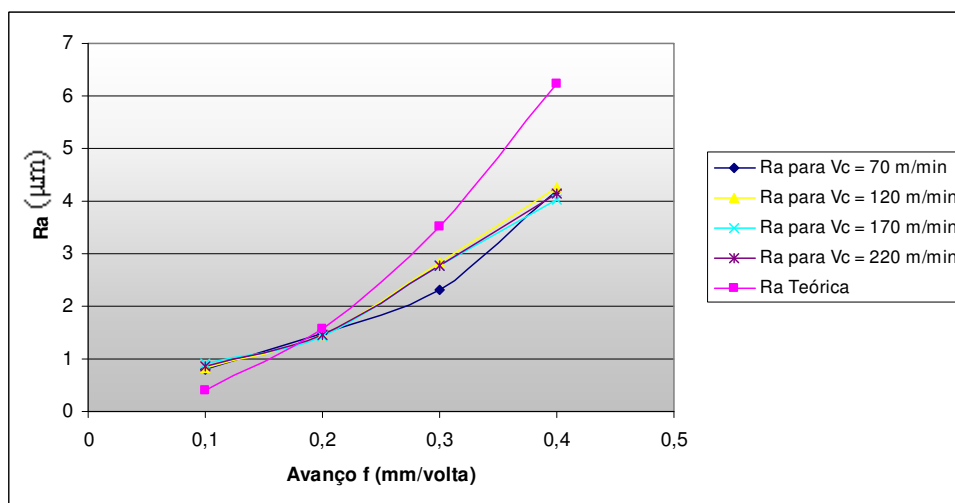


Figura 78: Comparação entre Ra teórico e real para $a_p = 0,2$ mm e $r_\epsilon = 0,8$ mm

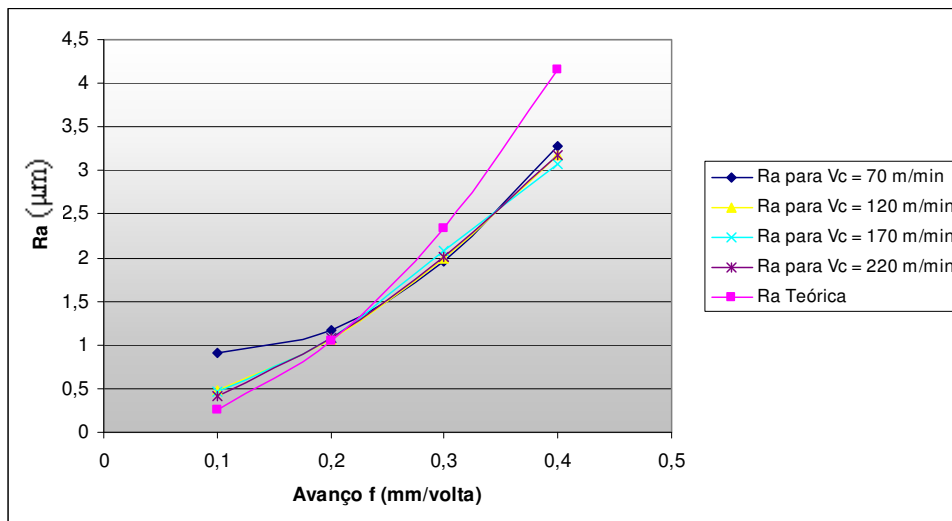


Figura 79: Comparação entre Ra teórico e real para $a_p = 0,2$ mm e $r_\epsilon = 1,2$ mm

Nota-se que, principalmente devido a não consideração da velocidade de corte no cálculo da rugosidade Ra, são observadas diferenças, em alguns casos, superiores a 300 % entre o valor teórico e o real, para baixos níveis de avanço. Para baixos valores de V_c , a formação da APC tem influência direta no resultado de Ra, já que altera o valor do raio da ponta da pastilha, devido à porção de material que se solda à pastilha, e o ângulo de saída. A alteração no ângulo de saída muda a dinâmica da formação do cavaco, alterando a sua deformação durante o processo de usinagem, e os esforços de corte, já que quando o ângulo de saída é reduzido a deformação imposta ao cavaco aumenta, causando uma elevação nos esforços de corte, o que prejudica a rugosidade final obtida.

Este fato também foi observado por Nalbant (2007), que em seu estudo da usinagem do aço AISI 1030, teve de incluir na regressão linear para cálculo da rugosidade Ra a velocidade de corte e um coeficiente relativo aos materiais utilizados na cobertura da ferramenta de corte. Cakir (2008), também acrescentou novos fatores em sua regressão linear. Ele concluiu que a rugosidade Ra, uma variável dependente, pode ser expressa através de uma combinação linear de variáveis independentes, neste caso a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. A rugosidade (Ra) também foi expressa através de uma regressão linear por Çaydas (2008), em seu estudo utilizando redes artificiais neurais (ANN).

Com $r_e = 1,2$ mm, cresce a diferença entre a curva de Ra obtida para $V_c = 70$ m/min e 220 m/min, pois tem-se a formação de uma APC maior do que a formada para $r_e = 0,8$ mm devido a maior área de contato entre pastilha e peça.

Assim sendo, torna-se necessário uma adequação na fórmula de cálculo do Ra, incluindo como fator a velocidade de corte e, eventualmente, a profundidade de corte.

A Equação 9 mostra o resultado da regressão linear e Tabela 7 os coeficientes da equação e sua significância, analisada através do resultado do p valor.

$$Ra = 0,830 + 0,621 \cdot \frac{31,2 \cdot f^2}{r_e} - 0,00132 \cdot V_c - 0,784 \cdot ap \quad (9)$$

$$R\text{-Sq (adj)} = 97\%$$

Tabela 7: Avaliação dos variáveis da regressão linear

Variáveis	Coefficiente	p valor
Constante	0,830	<0,001
$\frac{31,2 \cdot f^2}{r_e}$	0,621	<0,001
Vc	-0,00132	0,001
ap	-0,784	0,028

A regressão linear obtida com os fatores f, r_e , ap e Vc demonstrou que estas variáveis respondem por 97% da variação.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ERROS OBTIDOS

4.4.1 Análise dos principais fatores e a interação entre eles

Os fatores utilizados para o cálculo da rugosidade Ra foram analisados através da análise gráfica do comportamento do resultado em função de cada um deles, em separado ou interagindo. Na Figura 80 é mostrada a análise dos fatores em separado.

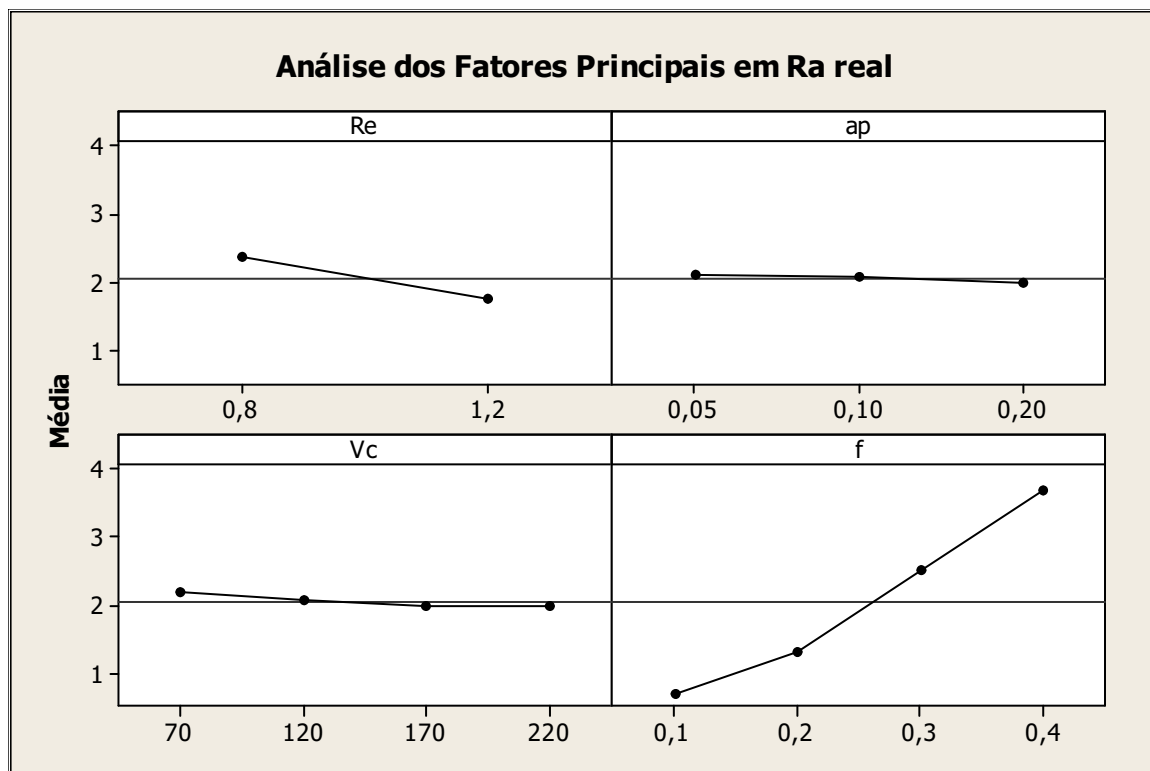


Figura 80: Análise dos fatores principais utilizados no cálculo de Ra

Nota-se que, quando considerados em separado, o avanço f e o raio de ponta da pastilha são os fatores que influenciam diretamente no resultado de Ra. Isto está condizente com a equação teórica, onde, com a redução de f e aumento de r_e tem-se a redução de Ra.

Porém os fatores podem apresentar interações entre si, causando variações nos resultados de Ra. Sendo assim, é necessário que estas possíveis interações sejam avaliadas, as quais estão expostas na Figura 81.

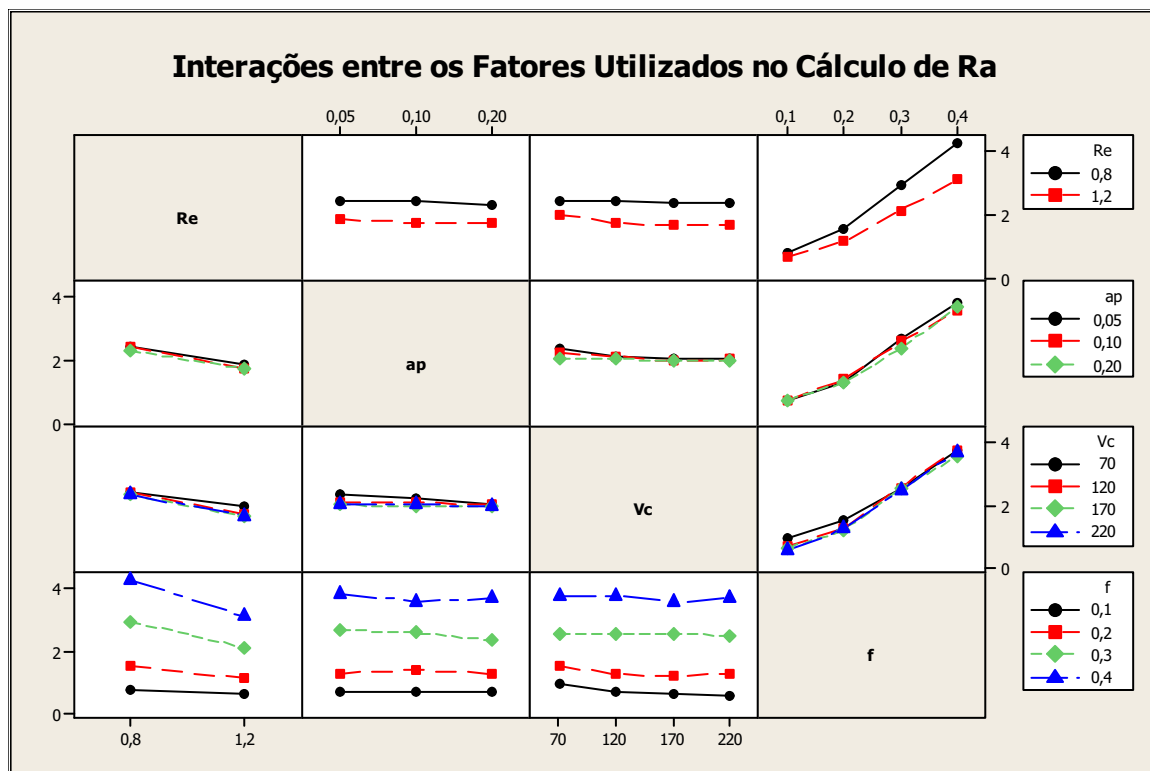


Figura 81: Interações entre os fatores utilizados no cálculo de Ra

Há uma grande interação entre f e os todos os outros fatores. A equação teórica considera interação apenas entre f e r_{ϵ} , porém a Figura 58 mostra que é necessário considerar a interação de f também com V_c e a_p , como considerado na equação proposta. As interações restantes não são significativas para os resultados de R_a , não sendo necessário considerá-las.

A seguir serão feitas as análises estatísticas para cada valor de a_p utilizado durante a execução dos ensaios.

4.4.2 Análise estatística para $a_p = 0,05$ mm

As Figuras 82 e 83 ilustram o sumário estatístico para os erros obtidos com $a_p = 0,05$ mm. A mediana dos erros entre a R_a real e R_a teórica, foi de -10,34 %, enquanto esta mesma variável calculada para o erro entre R_a real e R_a obtido através da equação 9 foi de 0,81%. Isto mostra que a equação proposta para o cálculo de R_a fornece resultados, em sua maioria, próximos aos valores obtidos experimentalmente, o que também pode ser observado pela variação da distribuição dos erros nos histogramas

que mostra uma maior quantidade de resultados próximos a zero com a utilização da equação proposta. O intervalo de confiança da mediana também foi reduzido, sendo que, através da utilização da equação teórica este foi de -22,59 % a 7,39 %, e com a equação proposta foi de - 8,68 % a 5,24 %.

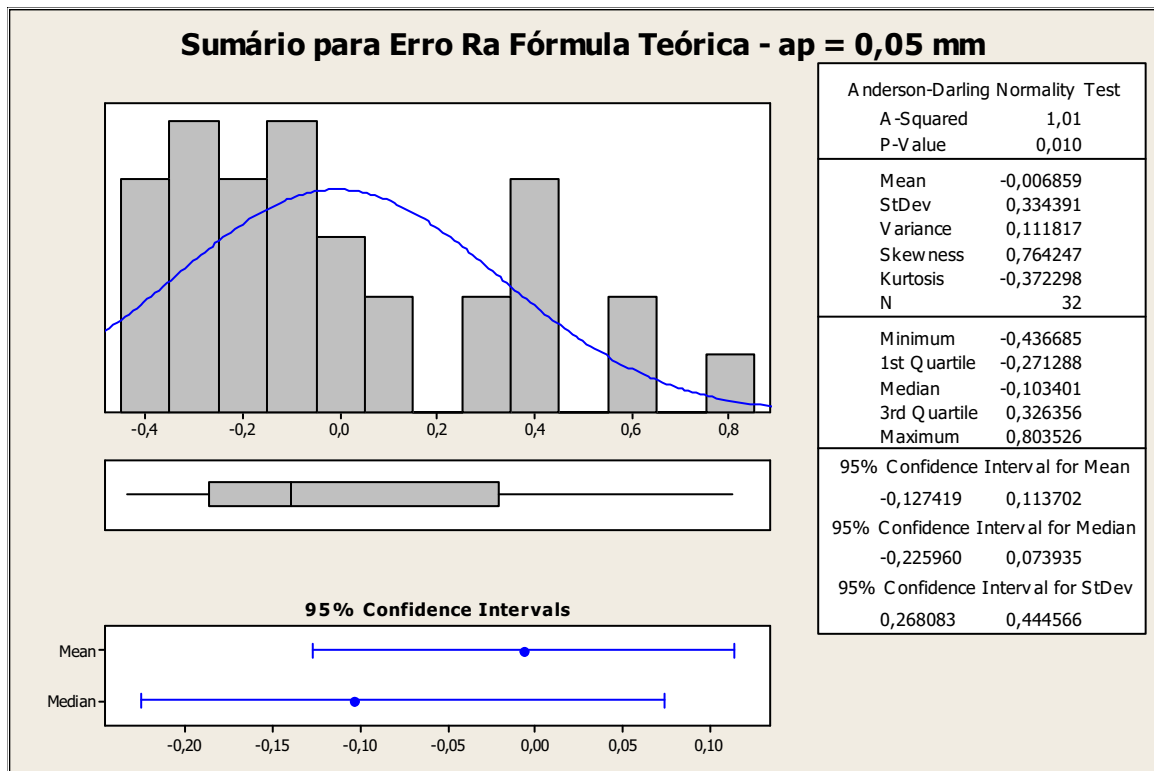


Figura 82: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e ap = 0,05 mm.

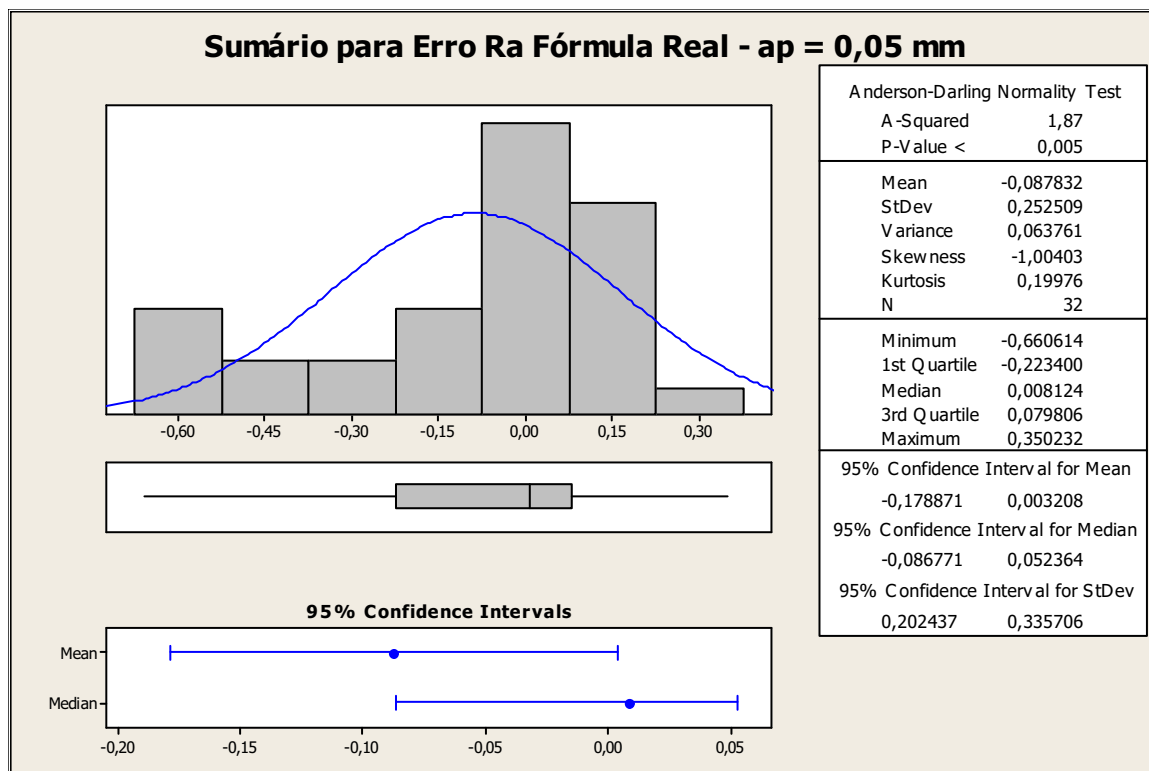


Figura 83: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e $a_p = 0,05$ mm.

4.4.2 Análise estatística para $a_p = 0,1$ mm

Nas Figuras 84 e 85 são ilustrados os sumários estatísticos para os erros obtidos com $a_p = 0,1$ mm. Para este caso, a mediana dos erros entre a Ra real e Ra teórica, foi de -6,51 %, e -2,37 % para o erro entre Ra real e Ra obtido através da equação 9, fornecendo assim melhores resultados que os obtidos através da equação teórica. A comparação entre os histogramas também leva a esta conclusão, já que, para a comparação de Ra real com a equação proposta, o maior número de resultados se encontra próximo de 0 %.

O intervalo de confiança da mediana calculado através da utilização da equação teórica este foi de -16,81 % a 10,60 %, e com a equação proposta foi de - 5,88 % a 1,08 %.

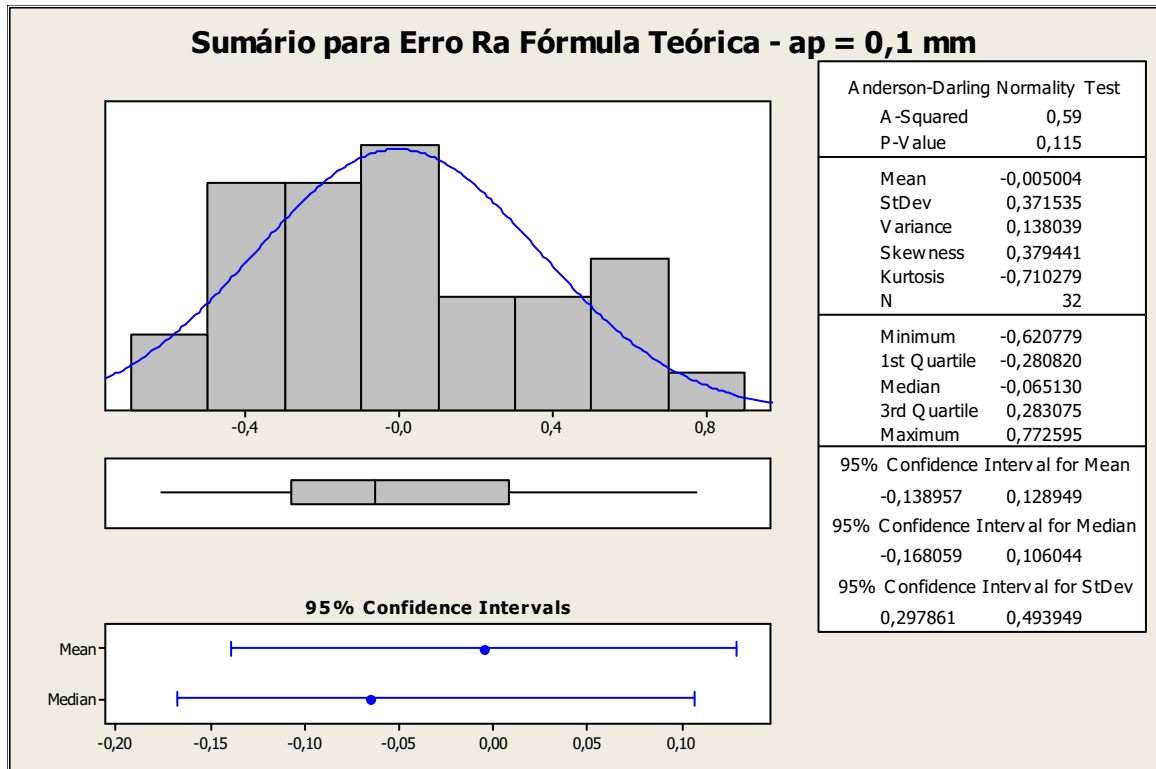


Figura 84: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e $ap = 0,1 \text{ mm}$.

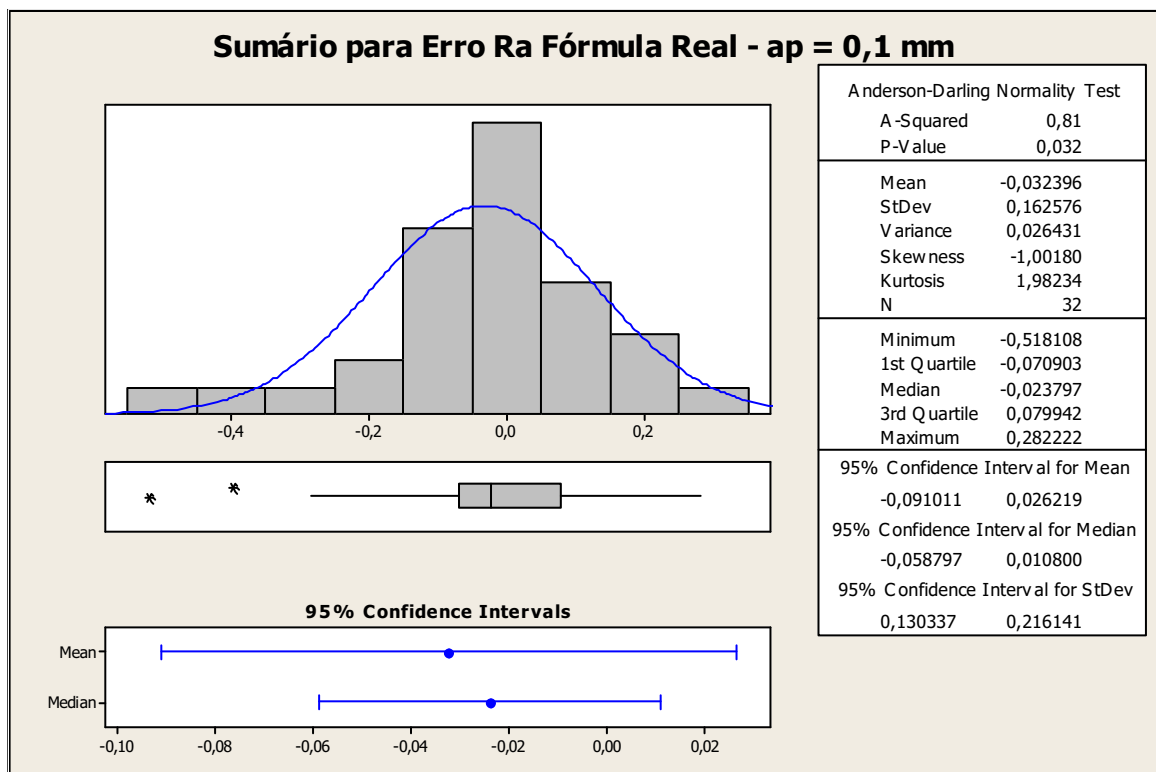


Figura 85: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e $ap = 0,1 \text{ mm}$.

4.4.3 Análise estatística para $ap = 0,2$ mm

Nas Figuras 86 e 87 são mostrados os sumários. A mediana calculada para a primeira comparação foi de $-11,23\%$ e $0,98\%$ para a segunda, e o intervalo de confiança para o primeiro caso foi de $-26,10\%$ a $3,40\%$ e $-3,60\%$ a $5,04\%$ para o segundo, mantendo a tendência observada para os outros valores de ap .

Para todos os valores de ap , os resultados das análises das distribuições oriundas da comparação entre Ra real, e a obtida da utilização da equação proposta, se aproximaram mais dos valores obtidos experimentalmente. Isto confirma o posto de que a rugosidade tem de ser calculada levando-se em consideração a velocidade de corte, devido a grande influência da formação da aresta postiça de corte da rugosidade final obtida.

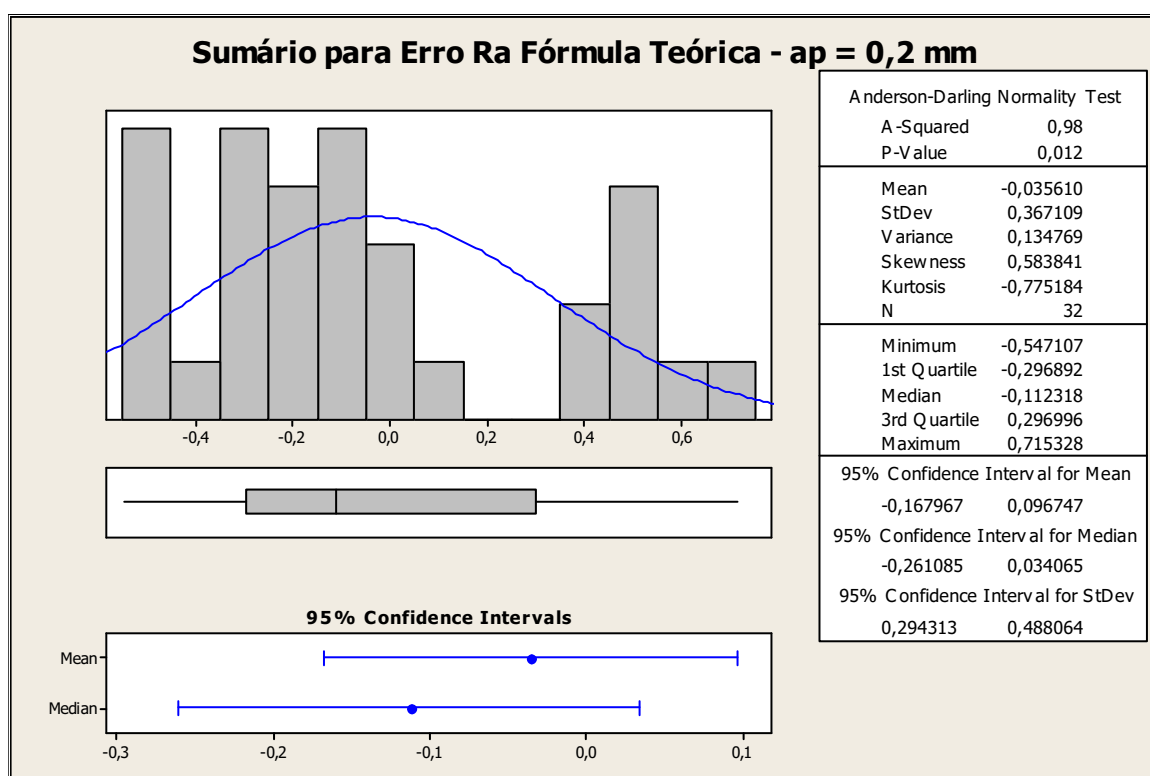


Figura 86: Sumário estatístico para os erros com a fórmula teórica e $ap = 0,2$ mm.

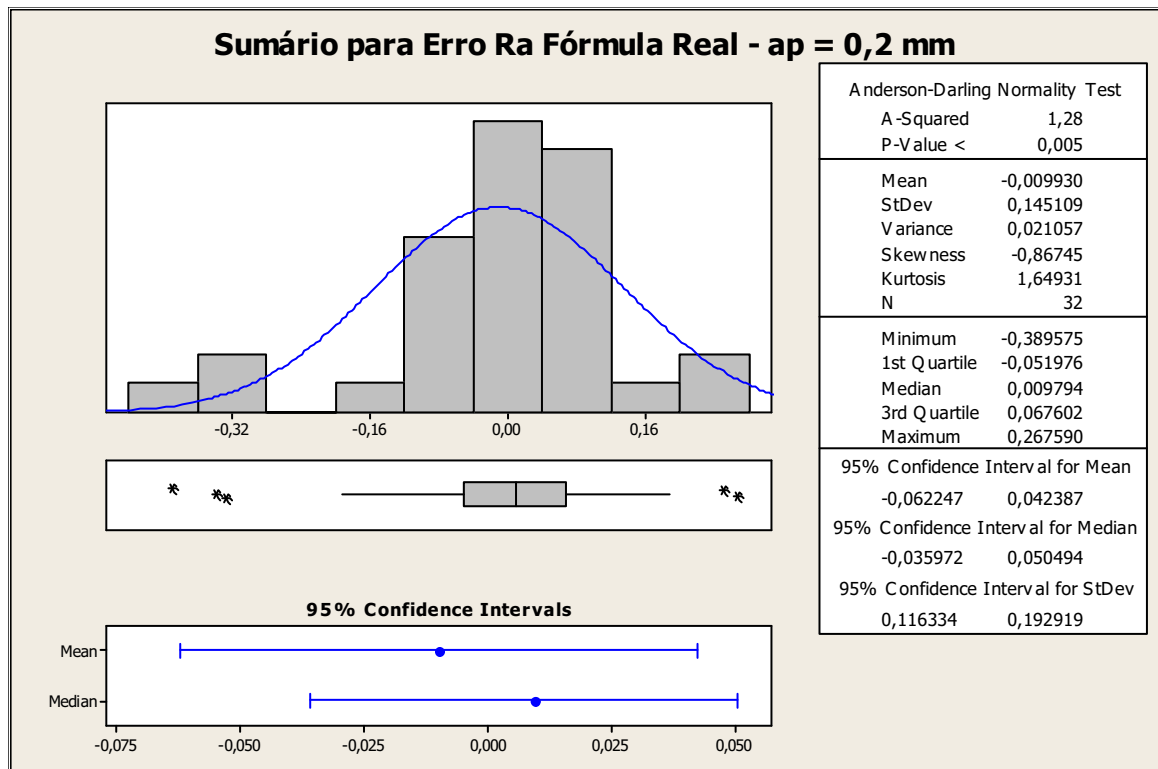


Figura 87: Sumário estatístico para os erros com a fórmula proposta e $a_p = 0,2$ mm.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Concluí-se através dos resultados obtidos que:

- Não é observado aparecimento de desgastes nas ferramentas de corte durante a usinagem em acabamento do aço inoxidável martensítico para grandes comprimentos de corte, principalmente devido à formação da APC e à baixa severidade dos esforços de corte. As pastilhas utilizadas nos ensaios foram avaliadas em um microscópio óptico e foi observado apenas o arredondamento da aresta de corte, não evoluindo os desgastes de flanco e de cratera;
- A utilização de fluido refrigerante não promove melhoria na usinagem, visto que este material supostamente sofre endurecimento superficial devido ao teor de carbono presente em sua composição, e que, com a redução da temperatura na região de corte, tem-se dificuldade durante a usinagem devido à manutenção da sua dureza;
- Não houve variação nos resultados de rugosidade R_a para grandes valores de comprimentos de corte devido, principalmente, a não evolução dos desgastes nas ferramentas de corte;
- Para baixos valores de velocidades de corte e avanço, a formação da APC influenciou diretamente no resultado de R_a . Nesta condição, a ferramenta de corte com o menor valor de raio de ponta foi a que apresentou os menores valores de R_a , já que a APC forma-se com menor intensidade;
- Tanto a velocidade de corte quanto o avanço, mostraram relação com a formação da APC, pois ambos alteram o valor da velocidade de corte crítica pela mudança na temperatura de corte;
- Com a utilização da pastilha com geometria Wiper, bons resultados foram atingidos quando utilizados altos valores de taxa de avanço, comprovando o proposto pelo fabricante. Para baixos valores de avanço é possível observar muita dificuldade na formação do cavaco principalmente devido a maior área de contato entre peça e pastilha, o qual aumenta a vibração durante a usinagem e prejudica a rugosidade;

- Para todos os casos, os cavacos em fita foram resultantes das condições de corte que resultaram nos menores valores de rugosidade;
- A fórmula teórica para cálculo de Ra, encontrada na literatura, não fornece resultados próximos aos encontrados experimentalmente devido, principalmente, a não consideração da Velocidade de Corte na equação. A análise estatística mostrou uma interação entre o avanço e a velocidade de corte, além da interação com o raio de ponta e profundidade de corte;
- A equação determinada através da regressão linear dos valores de rugosidade obtidos experimentalmente se mostrou mais precisa para o cálculo de Ra, respondendo por 97% da variação. Isto foi comprovado através da análise estatística dos erros calculados quando comparados os resultados reais com os obtidos através da utilização de ambas as equações.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, S. A Study of the Machining of Cast Austenitic Stainless Steels With Carbide Tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 52, p. 610 – 620, 1993.

AMORIN, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASM HANDBOOK. **ASM Handbook Volume 16: Machining**. ASM, 1989. 944 p.

BORDINASSI, E. C.; STIPCOVIC FILHO, M.; BATALHA, G. F. Contribuição ao estudo da integridade superficial de aço inoxidável super-duplex após torneamento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos**, 2006.

CAKIR, M. C.; ENSARIOGLU, C.; DEMIRAYAK, I. Mathematical modeling of surface roughness for evaluation the effects of cutting parameters and coating material. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 1, p. 102 – 109, 2008.

CHANG, C.; TSAI, G. A force model of turning stainless steel with worn tools having nose radius. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142, p. 112 -130, 2003

CIFTCI, I. Machining of austenitic stainless steel using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. **Tribology International**, v. 39, p. 565 – 569, 2006.

CSELLE, T. New directions in drilling. **Manufacturing Engineering**, p. 77-80, 1995.

ÇAYDAS, U.; HASÇALIK, A. A study of surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, p. 574 – 582, 2008.

DA SILVA, M. B. ; SILVA, F. J. ; FRANCO, S. D. ; SANTOS, S. C. ; SILVA JUNIOR, W. M. . Caracterização tribológica de revestimentos aplicados a ferramentas de corte. In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002, João Pessoa. Cd rom, 2002.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI , N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. 2 ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2000. 244p.

DOYLE, E. D.; HORNE, J. G.; TABOR, D. Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip formation. **Proceeding of Royal Society of London**, v. A366, p. 173 – 183, 1979.

DSOUZA, D. G. A Comparison of the Performance of Various Indexable Carbide Inserts for Machining Stainless Steel. Thesis (Master of Science – Department of Mechanical & Industrial Engineering) – The University of Texas at El Paso, 2004.

DUNLAP, C. Should you try dry?. **Cutting Tool Engineering**, v. 49, n. 1, p. 22-23, 1997.

EBRAHIMI, A.; MOSHKARSAR, M. M. Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: tool wear, statistical analysis, chip morphology. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008, doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.067.

FANG, X. D.; ZHANG, D. An investigation of adhering formation during tool wear progression in turning of free-cutting stainless steel. **Wear**, v. 197, p. 169 – 178, 1996.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 11 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.

FREDJ, N. B.; HABIB, S.; CHEDLY, B. Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling. **Surface and Coating Technology**, v. 200, p. 4846 – 4860, 2006.

GIOVANETTI, A. Nova classe estimula competição na usinagem de aços, **O Mundo da Usinagem**, 2^a Edição, 2006.

GRZESIK, W. Experimental investigation of the influence of adhesion on the frictional conditions in the cutting process. **Tribology International**, v. 32, p. 15 – 23, 1998.

HOUSSEIN, A. E. Cutting Fluid efficiency in end milling of AISI 304 stainless steel. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 60, n. 3, p. 115 – 120, 2008.

JANG, D. Y.; WATKINS, T. R.; KOZACZEK, K. J.; HUBBARD, C. R.; CAVIN, O. B. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. **Wear**, v. 194, p. 168 – 173, 1996.

JAVIDI, A.; ULFRIED, R.; WILFRIED, E. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v. 30, p. 2050 – 2055, 2008.

JIANG, L.; PARO, J.; HÄNNINEN, H.; KAUPINNEN, V.; ORASKARI, R. Comparison of grindability of IPED austenitic 316L, duplex 2205 and super duplex and as-casted 304 stainless steels using alumina wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 62, p. 1 – 9, 1996.

KOPAC, J.; BAHOR, M. Interaction of the technological history of workpiece material and machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 92 – 93, p. 381 – 387, 1999.

KORKUT, I., KASAP, M., CIFTCI, I., SEKER, U. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials and Design**, v. 25, p. 303 – 305, 2004.

KRAMER, B. M., A comprehensive Tool Wear Model, **Annals of the CIRP**, Vol. 35, pp. 67-70, 1986

KRAUSS, G. Martensite in steel: strength and structure. **Materials Science and Engineering**, A273-275, p. 40-57, 1999.

LIMA, A. P., FILHO, E. S., MARIANO, N. A. Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C. **Revista Escola de Minas**, v. 60, p. 123 – 127, 2007.

LIWE, W. Y. H. Performance of Uncoated and Coated Tools in the Ultra-Precision Machining of Stainless Steel. **Tribology Letters**, v. 17, n. 4, p. 851 – 857, 2004.

MACHADO, A.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Uberlândia: Apostila, 1999. 214p.

MERCHANT, M. E. Mechanism of the metal cutting process – orthogonal cutting and a type 2 chip. **Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 5, p. 267 – 275, 1945.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Osasco: SENAI, 2001. 100p.

MOHAMMADI, A.; TEHRANI, A. F.; EMANIAM, E.; KARIMI, D. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 283 – 289, 2008.

NALBANT, M.; GÖKKAYA, H.; TOKTAS, I.; SUR, G. The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD – and CVD – coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 1, p. 211 – 223, 2007.

NEVES, D.; CAMARGO, R.; DEONÍSIO, C. C. C.; NOVASKI, O. Evaluation of the machinability of stainless steel ABNT 304 and stainless steel Villares 304 UF with hss TiN coated twisted drills. **Proceedings of International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, 2003.

O’SULLIVAN, D., COTTERELL, M. Machinability of austenitic stainless steel SS303. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, p. 153 – 159, 2002.

OLIVEIRA, A. J. **Otimização das condições de usinagem visando o torneamento a seco do aço ABNT 1045 em operações de desbaste**. 2003. Engenharia de Fabricação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Engenharia de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. **Handbook of Stainless Steel**. 1 ed. USA: McGraw-Hill, 1977. 1120p.

SANDVIK COROMANT, **Modern Metal Cutting, A B Sandvik Coromant**, Sandviken, Sweden, 1994.

SANDVIK COROMANT, **Catálogo principal**, 2008;

SAOUBI, R. M.; OUTEIRO, J. C.; CHANGEUX, B.;LEBRUN, J. L.; DIAS, A. M. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurised AISI 316L steels. **Journal of Materials and Processing Technology**, v. 96, p. 225 – 233, 1999.

SCANDIFFIO, I. Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço. 2000. Fabricação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Fabricação) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 3 ed. Cambridge: Oxford University Press, 1984. 594p.

SREEJITH, P. S., NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 101, p. 287 – 291, 2000.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249p.

TEKINER, Z. YELSILYURT, S. Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials and Desing**, v. 25, 507 – 513, 2004.

TELLES, N. **Tubulações industriais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1989. 384p.

TESSLER, M.B.; BARBOSA C.A. A Usinabilidade dos aços inoxidáveis. **Centro de Pesquisa e Desenvolvimento**, Villares Metals, 2002.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 3. ed. Oxford: Butterworths-Heinemann, 1991. 273p.

TRENT, E.M. Metal cutting and the tribology of seizure: I Seizure in metal cutting. **Wear**, v. 128, n. 1, p. 29 – 45, 1988b;

TRENT, E.M. Metal cutting and the tribology of seizure: II Movement of material over the tool in metal cutting. **Wear**, v. 128, n. 1, p. 47 – 64, 1988a.

TRENT, M. C; WRIGHT P. K.. **Metal Cutting Principles**. 4 ed. USA: Butterworth-Heinemann, 2000. 439p.

WRIGHT, P. K. Frictional interactions in machining: comparisons between transparent sapphire and steel cutting tools. **Metal Technology**, v. 8, n. 4, p. 150 – 160, 1981;

WRIGHT, P. K.; HORNE J. G.; TABOR, D. Boundary conditions at the chip tool interface in machining: comparisons between seizure and sliding friction. **Wear**, v.54, n. 2, p. 371 – 390, 1979.

YUARA, D. A. Aplicação de Revestimentos PVD em ferramentas de corte. – **Usinagem 2000**.

APÊNDICES

Os apêndices trazem os resultados obtidos experimentalmente que foram utilizados na elaboração dos gráficos e na análise, assim como os erros calculados com os valores de rugosidade.

Tabela 8: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $ap = 0,05$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	0,88	4,6	0,86	5	0,87	4,8	0,87	4,8	0,390625	1,5625
70	0,2	1,8	8,6	1,76	8,5	1,7	8,7	1,753333	8,6	1,5625	6,25
70	0,3	3,18	19,8	3,11	16,4	3,09	14,4	3,126667	16,86667	3,515625	14,0625
70	0,4	4,5	15,6	4,34	15,1	4,2	14,7	4,346667	15,13333	6,25	25
120	0,1	0,62	4	0,5	5,2	0,46	3,2	0,526667	4,133333	0,390625	1,5625
120	0,2	1,48	7,5	1,48	7,5	1,46	7,4	1,473333	7,466667	1,5625	6,25
120	0,3	3,1	17,4	3,09	12,5	3	12,4	3,063333	14,1	3,515625	14,0625
120	0,4	4,76	16,8	4,43	15,8	4,52	16,3	4,57	16,3	6,25	25
170	0,1	0,67	4,3	0,64	3,8	0,63	4	0,646667	4,033333	0,390625	1,5625
170	0,2	1,45	7,2	1,28	7,2	1,48	7,7	1,403333	7,366667	1,5625	6,25
170	0,3	2,97	12,3	2,98	12,6	2,95	12,7	2,966667	12,53333	3,515625	14,0625
170	0,4	4,5	20,3	4,28	16,1	4,25	16,7	4,343333	17,7	6,25	25
220	0,1	0,62	4	0,62	4,2	0,6	4,4	0,613333	4,2	0,390625	1,5625
220	0,2	1,53	7,7	1,45	7	1,51	7,7	1,496667	7,466667	1,5625	6,25
220	0,3	2,98	12,2	2,97	12,5	2,92	12,3	2,956667	12,33333	3,515625	14,0625
220	0,4	4,43	16,8	4,44	16,4	4,29	17,2	4,386667	16,8	6,25	25

Tabela 9: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $ap = 0,05$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	1,35	8	1,32	7,2	1,3	7,4	1,323333	7,533333	0,260417	1,041667
70	0,2	1,58	7,9	1,59	7,9	1,62	9,4	1,596667	8,4	1,041667	4,166667
70	0,3	2,57	12,6	2,47	11,8	2,54	14,7	2,526667	13,03333	2,34375	9,375
70	0,4	3,16	16,1	3,34	17,5	3,27	16,3	3,256667	16,63333	4,166667	16,66667
120	0,1	0,62	4,5	0,62	4,8	0,7	4,8	0,646667	4,7	0,260417	1,041667
120	0,2	0,88	6	0,8	5,4	0,83	5,9	0,836667	5,766667	1,041667	4,166667
120	0,3	2,23	10,2	2,19	10,1	2,38	10,5	2,266667	10,26667	2,34375	9,375
120	0,4	3,26	12,4	3,47	12,5	3,45	12,9	3,393333	12,6	4,166667	16,66667
170	0,1	0,44	3,4	0,43	3,1	0,47	3,2	0,446667	3,233333	0,260417	1,041667
170	0,2	0,79	5,5	0,87	5,9	0,75	5,1	0,803333	5,5	1,041667	4,166667
170	0,3	2,33	11,2	2,22	10,7	2,3	11,5	2,283333	11,13333	2,34375	9,375
170	0,4	3,17	12	3,37	13,3	3,19	11,9	3,243333	12,4	4,166667	16,66667
220	0,1	0,43	3	0,43	3	0,43	3,3	0,43	3,1	0,260417	1,041667
220	0,2	0,83	5,6	0,81	5,6	0,85	5,3	0,83	5,5	1,041667	4,166667
220	0,3	2,13	9,7	2,1	9,5	2,18	10	2,136667	9,733333	2,34375	9,375
220	0,4	3,16	11,6	3,2	11,9	3,25	12,6	3,203333	12,03333	4,166667	16,66667

Tabela 10: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,05$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	1,52	9,3	1,56	12	1,24	11,9	1,44	11,06667	0,260417	1,5625
70	0,2	1,25	8,8	1,25	9,3	1,09	8,1	1,196667	8,733333	1,041667	6,25
70	0,3	0,86	7,2	0,84	6,8	0,85	7,3	0,85	7,1	2,34375	14,0625
70	0,4	0,86	5,2	0,88	5	0,85	5,9	0,863333	5,366667	4,166667	25
120	0,1	1,04	10,8	0,82	8,1	0,77	6,7	0,876667	8,533333	0,260417	1,5625
120	0,2	0,5	4,3	0,48	3,9	0,5	4,7	0,493333	4,3	1,041667	6,25
120	0,3	0,64	5,7	0,64	10	0,54	6,7	0,606667	7,466667	2,34375	14,0625
120	0,4	0,68	5,3	0,52	3,6	0,55	4,4	0,583333	4,433333	4,166667	25
170	0,1	0,95	7,9	0,74	6,4	0,81	6,8	0,833333	7,033333	0,260417	1,5625
170	0,2	0,66	6,5	0,74	6,4	0,75	6,4	0,716667	6,433333	1,041667	6,25
170	0,3	0,59	8,1	0,64	7,5	0,49	6,5	0,573333	7,366667	2,34375	14,0625
170	0,4	0,54	4,2	0,55	4,3	0,71	5,9	0,6	4,8	4,166667	25
220	0,1	0,81	9,1	1,02	9,7	0,9	7,8	0,91	8,866667	0,260417	1,5625
220	0,2	0,92	9,3	0,93	9,5	0,79	7,2	0,88	8,666667	1,041667	6,25
220	0,3	0,79	6,3	0,83	7	0,8	7,3	0,806667	6,866667	2,34375	14,0625
220	0,4	0,74	6	0,62	4,8	0,67	4,9	0,676667	5,233333	4,166667	25

Tabela 11: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $a_p = 0,1$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	0,8	4,4	0,7	4,7	0,82	4,5	0,77	4,53	0,390625	1,5625
70	0,2	1,58	11,8	1,59	11,8	1,56	11,7	1,58	11,77	1,5625	6,25
70	0,3	3,15	13,6	3	13,5	3,15	13,5	3,10	13,53	3,515625	14,0625
70	0,4	4,42	18,9	4,2	18,5	4,44	19,1	4,35	18,83	6,25	25
120	0,1	1,02	7	0,9	6,7	1,05	6,9	0,99	6,87	0,390625	1,5625
120	0,2	1,54	8,7	1,54	8,8	1,52	8,7	1,53	8,73	1,5625	6,25
120	0,3	3,3	13,9	3,2	13,7	3,35	13,7	3,28	13,77	3,515625	14,0625
120	0,4	4,44	18,7	4,6	19,1	4,42	18,6	4,49	18,80	6,25	25
170	0,1	0,73	6,1	0,72	6	0,73	6,2	0,73	6,10	0,390625	1,5625
170	0,2	1,48	8,7	1,48	8,8	1,45	8,6	1,47	8,70	1,5625	6,25
170	0,3	3,13	13,2	3,12	13,2	3,15	13,4	3,13	13,27	3,515625	14,0625
170	0,4	4,11	18,2	4,15	18,5	4,05	18,4	4,10	18,37	6,25	25
220	0,1	0,47	3,5	0,45	3,3	0,47	3,5	0,46	3,43	0,390625	1,5625
220	0,2	1,48	9,6	1,52	9,6	1,5	9,7	1,50	9,63	1,5625	6,25
220	0,3	3,02	12,3	2,98	12,5	2,97	12,6	2,99	12,47	3,515625	14,0625
220	0,4	4,4	15,8	4,35	16,2	4,4	15,6	4,38	15,87	6,25	25

Tabela 12: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $a_p = 0,1$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	1,15	5,9	1,12	5,4	1,16	5,8	1,143333	5,7	0,260417	1,041667
70	0,2	1,53	8,5	1,51	8,2	1,58	9	1,54	8,566667	1,041667	4,166667
70	0,3	1,99	11,1	2,11	12	2,04	12	2,046667	11,7	2,34375	9,375
70	0,4	3,09	13,5	3,22	14,1	3,17	13,5	3,16	13,7	4,166667	16,66667
120	0,1	0,53	3,5	0,55	3,9	0,54	3,8	0,54	3,733333	0,260417	1,041667
120	0,2	1,12	5,9	1,18	5,9	1,19	6	1,163333	5,933333	1,041667	4,166667
120	0,3	1,97	8,7	2,03	8,6	2,01	9,2	2,003333	8,833333	2,34375	9,375
120	0,4	2,72	10,5	2,79	11,4	2,83	11,3	2,78	11,06667	4,166667	16,66667
170	0,1	0,54	3,5	0,58	4	0,49	3,6	0,536667	3,7	0,260417	1,041667
170	0,2	1,12	6,1	1,09	5,3	1,12	5,4	1,11	5,6	1,041667	4,166667
170	0,3	2,03	9,1	1,94	8,2	2,02	8,7	1,996667	8,666667	2,34375	9,375
170	0,4	2,54	10,2	2,58	9,9	2,58	10,1	2,566667	10,06667	4,166667	16,66667
220	0,1	0,57	3,5	0,53	3,4	0,54	3,5	0,546667	3,466667	0,260417	1,041667
220	0,2	1,22	7	1,19	6,5	1,15	6	1,186667	6,5	1,041667	4,166667
220	0,3	2,17	8,9	2,12	8,9	2,13	8,9	2,14	8,9	2,34375	9,375
220	0,4	2,86	10,7	2,85	10,6	2,9	10,8	2,87	10,7	4,166667	16,66667

Tabela 13: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,1$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	1,57	19,2	1,43	11,6	1,2	7,8	1,4	12,86667	0,260417	1,5625
70	0,2	0,81	7	0,81	6,9	0,8	6,2	0,806667	6,7	1,041667	6,25
70	0,3	1	8,2	1	7,6	0,97	7,6	0,99	7,8	2,34375	14,0625
70	0,4	0,55	4,4	0,75	4,9	0,43	3,2	0,576667	4,166667	4,166667	25
120	0,1	0,95	6,7	0,83	7,1	1,07	8,9	0,95	7,566667	0,260417	1,5625
120	0,2	0,57	6,6	0,7	6,6	0,51	5,9	0,593333	6,366667	1,041667	6,25
120	0,3	0,59	4,5	0,59	5,1	0,75	7	0,643333	5,533333	2,34375	14,0625
120	0,4	0,56	5	0,69	5,8	0,56	4,3	0,603333	5,033333	4,166667	25
170	0,1	0,92	8,6	0,97	11,8	0,97	12,2	0,953333	10,86667	0,260417	1,5625
170	0,2	0,67	5,8	0,59	5,3	0,58	4,4	0,613333	5,166667	1,041667	6,25
170	0,3	0,64	5,4	0,67	5,4	0,45	4,2	0,586667	5	2,34375	14,0625
170	0,4	0,71	5,8	0,57	5	0,73	5,9	0,67	5,566667	4,166667	25
220	0,1	1,39	9,8	1,01	7,9	1,66	9,6	1,353333	9,1	0,260417	1,5625
220	0,2	0,87	7	0,71	8,1	0,83	6,5	0,803333	7,2	1,041667	6,25
220	0,3	0,61	5,4	0,52	5,1	0,6	5,8	0,576667	5,433333	2,34375	14,0625
220	0,4	0,56	4,5	0,52	3,9	0,53	4,4	0,536667	4,266667	4,166667	25

Tabela 14: Resultados Experimentais para ferramenta PM e $a_p = 0,2$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	0,84	6	0,75	4,8	0,78	4,7	0,79	5,17	0,390625	1,5625
70	0,2	1,48	9,1	1,5	8,9	1,47	8,9	1,48	8,97	1,5625	6,25
70	0,3	2,4	10,4	2,27	10,3	2,28	10	2,32	10,23	3,515625	14,0625
70	0,4	4,34	15,5	4,16	14,4	4,09	14,6	4,20	14,83	6,25	25
120	0,1	0,83	5	0,82	4,4	0,85	5,7	0,83	5,03	0,390625	1,5625
120	0,2	1,44	7,5	1,49	7,4	1,44	7,4	1,46	7,43	1,5625	6,25
120	0,3	2,87	11,8	2,81	12,1	2,83	12,1	2,84	12,00	3,515625	14,0625
120	0,4	4,32	14,8	4,16	14,5	4,27	14,8	4,25	14,70	6,25	25
170	0,1	0,87	5,4	1	7,2	0,9	5,3	0,92	5,97	0,390625	1,5625
170	0,2	1,42	7,5	1,43	7,6	1,42	7,2	1,42	7,43	1,5625	6,25
170	0,3	2,74	12,4	2,8	12,2	2,81	12,2	2,78	12,27	3,515625	14,0625
170	0,4	4,03	14,3	4,05	14,8	4,02	14,3	4,03	14,47	6,25	25
220	0,1	0,86	5	0,84	5,1	0,86	4,8	0,85	4,97	0,390625	1,5625
220	0,2	1,49	8,2	1,43	7,1	1,42	7,3	1,45	7,53	1,5625	6,25
220	0,3	2,76	11,6	2,77	11,7	2,78	12,1	2,77	11,80	3,515625	14,0625
220	0,4	4,21	15,5	4,12	14,4	4,1	14,2	4,14	14,70	6,25	25

Tabela 15: Resultados Experimentais para ferramenta MM e $a_p = 0,2$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	0,97	6,6	0,96	5,4	0,81	5	0,913333	5,66667	0,260417	1,041667
70	0,2	1,17	6,1	1,21	5,8	1,11	5,9	1,163333	5,933333	1,041667	4,166667
70	0,3	1,96	9	1,95	8,5	1,98	8,8	1,963333	8,766667	2,34375	9,375
70	0,4	3,36	12,8	3,3	13,7	3,2	13	3,286667	13,16667	4,166667	16,66667
120	0,1	0,45	3,2	0,46	3,4	0,55	3,9	0,486667	3,5	0,260417	1,041667
120	0,2	1,06	5,9	1,08	5,8	1,04	6	1,06	5,9	1,041667	4,166667
120	0,3	1,98	9,7	2	9,1	2,02	9,8	2	9,533333	2,34375	9,375
120	0,4	3,06	12,2	3,18	13,2	3,3	14	3,18	13,13333	4,166667	16,66667
170	0,1	0,4	2,9	0,55	3,9	0,43	3,9	0,46	3,566667	0,260417	1,041667
170	0,2	1,08	5,7	1,1	6,3	1,05	5,7	1,076667	5,9	1,041667	4,166667
170	0,3	2,08	9,8	2,07	9,8	2,07	10,2	2,073333	9,933333	2,34375	9,375
170	0,4	3,07	12,7	2,87	12,1	3,3	13,1	3,08	12,63333	4,166667	16,66667
220	0,1	0,4	3	0,38	3	0,44	3,4	0,406667	3,133333	0,260417	1,041667
220	0,2	1,14	6,3	1,08	6,1	1,03	5,2	1,083333	5,866667	1,041667	4,166667
220	0,3	2,04	10,3	2,06	9,5	1,92	10,1	2,006667	9,966667	2,34375	9,375
220	0,4	3,24	13,4	3,12	12,1	3,19	12,9	3,183333	12,8	4,166667	16,66667

Tabela 16: Resultados Experimentais para ferramenta WM e $a_p = 0,2$

Vc	f	Ra	Ry	Ra	Ry	Ra	Ry	Média Ra	Média Ry	Ra teórica	Ry teórico
70	0,1	1,23	8,6	1,41	9	1,32	8,6	1,32	8,733333	0,260417	1,5625
70	0,2	1,3	11,6	1,09	14,7	1,3	13,5	1,23	13,26667	1,041667	6,25
70	0,3	0,69	5,7	1,11	6,7	0,82	8,7	0,873333	7,033333	2,34375	14,0625
70	0,4	0,92	6,7	1,02	6,7	0,89	8,9	0,943333	7,433333	4,166667	25
120	0,1	1,18	10,9	1,28	14,4	0,9	9,2	1,12	11,5	0,260417	1,5625
120	0,2	0,97	9,4	0,77	6,8	0,87	8,2	0,87	8,133333	1,041667	6,25
120	0,3	0,52	4,8	0,62	3,9	0,62	5,7	0,586667	4,8	2,34375	14,0625
120	0,4	0,83	5,5	0,71	5,2	0,68	5,7	0,74	5,466667	4,166667	25
170	0,1	1,01	8,3	1,24	17,4	1,24	10,8	1,163333	12,16667	0,260417	1,5625
170	0,2	1,15	8,4	1,23	8,6	1,12	11,1	1,166667	9,366667	1,041667	6,25
170	0,3	0,88	7,1	0,97	7,9	0,73	8,4	0,86	7,8	2,34375	14,0625
170	0,4	0,91	7	0,84	6,7	0,86	6,8	0,87	6,833333	4,166667	25
220	0,1	1,27	10,7	1,25	11,1	1,35	11,8	1,29	11,2	0,260417	1,5625
220	0,2	0,89	11,3	0,87	8,5	1,15	19,1	0,97	12,96667	1,041667	6,25
220	0,3	0,89	7,4	0,75	7,2	0,78	6	0,806667	6,866667	2,34375	14,0625
220	0,4	0,79	7,4	0,74	5,7	0,71	5,5	0,746667	6,2	4,166667	25

Tabela 17: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $ap = 0,05 \text{ mm}$

Re	ap	Vc	f	Média Ra Real	Comparação Ra Teórico			
					Ra Teórica	Erro Ra Teórico	Fórmula Proposta	Erro Ra Proposto
0,8	0,1	70	0,1	0,87	0,39	55,17%	0,94059	-8,11%
0,8	0,1	70	0,2	1,7533	1,56	11,03%	1,66716	4,91%
0,8	0,1	70	0,3	3,1267	3,51	-12,26%	2,87811	7,95%
0,8	0,1	70	0,4	4,3467	6,24	-43,56%	4,57344	-5,22%
0,8	0,1	120	0,1	0,5267	0,39	25,95%	0,87459	-66,06%
0,8	0,1	120	0,2	1,4733	1,56	-5,88%	1,60116	-8,68%
0,8	0,1	120	0,3	3,0633	3,51	-14,58%	2,81211	8,20%
0,8	0,1	120	0,4	4,57	6,24	-36,54%	4,50744	1,37%
0,8	0,1	170	0,1	0,6467	0,39	39,69%	0,80859	-25,04%
0,8	0,1	170	0,2	1,4033	1,56	-11,16%	1,53516	-9,39%
0,8	0,1	170	0,3	2,9667	3,51	-18,31%	2,74611	7,43%
0,8	0,1	170	0,4	4,3433	6,24	-43,67%	4,44144	-2,26%
0,8	0,1	220	0,1	0,6133	0,39	36,41%	0,74259	-21,07%
0,8	0,1	220	0,2	1,4967	1,56	-4,23%	1,46916	1,84%
0,8	0,1	220	0,3	2,9567	3,51	-18,71%	2,68011	9,35%
0,8	0,1	220	0,4	4,3867	6,24	-42,25%	4,37544	0,26%
1,2	0,1	70	0,1	1,3233	0,26	80,35%	0,85986	35,02%
1,2	0,1	70	0,2	1,5967	1,04	34,86%	1,34424	15,81%
1,2	0,1	70	0,3	2,5267	2,34	7,39%	2,15154	14,85%
1,2	0,1	70	0,4	3,2567	4,16	-27,74%	3,28176	-0,77%
1,2	0,1	120	0,1	0,6467	0,26	59,79%	0,79386	-22,76%
1,2	0,1	120	0,2	0,8367	1,04	-24,30%	1,27824	-52,78%
1,2	0,1	120	0,3	2,2667	2,34	-3,24%	2,08554	7,99%
1,2	0,1	120	0,4	3,3933	4,16	-22,59%	3,21576	5,23%
1,2	0,1	170	0,1	0,4467	0,26	41,79%	0,72786	-62,95%
1,2	0,1	170	0,2	0,8033	1,04	-29,46%	1,21224	-50,90%
1,2	0,1	170	0,3	2,2833	2,34	-2,48%	2,01954	11,55%
1,2	0,1	170	0,4	3,2433	4,16	-28,26%	3,14976	2,89%
1,2	0,1	220	0,1	0,43	0,26	39,53%	0,66186	-53,92%
1,2	0,1	220	0,2	0,83	1,04	-25,30%	1,14624	-38,10%
1,2	0,1	220	0,3	2,1367	2,34	-9,52%	1,95354	8,57%
1,2	0,1	220	0,4	3,2033	4,16	-29,86%	3,08376	3,73%

Tabela 18: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $ap = 0,1$ mm

					Comparação Ra Teórico			
Re	ap	Vc	f	Média Ra Real	Rug Teórica	Erro Ra Teórico	Fórmula Minitab	Erro Ra Proposto
0,8	0,1	70	0,1	0,7733	0,39	49,57%	0,90139	-16,56%
0,8	0,1	70	0,2	1,5767	1,56	1,06%	1,62796	-3,25%
0,8	0,1	70	0,3	3,1	3,51	-13,23%	2,83891	8,42%
0,8	0,1	70	0,4	4,3533	6,24	-43,34%	4,53424	-4,16%
0,8	0,1	120	0,1	0,99	0,39	60,61%	0,83539	15,62%
0,8	0,1	120	0,2	1,5333	1,56	-1,74%	1,56196	-1,87%
0,8	0,1	120	0,3	3,2833	3,51	-6,90%	2,77291	15,55%
0,8	0,1	120	0,4	4,4867	6,24	-39,08%	4,46824	0,41%
0,8	0,1	170	0,1	0,7267	0,39	46,33%	0,76939	-5,88%
0,8	0,1	170	0,2	1,47	1,56	-6,12%	1,49596	-1,77%
0,8	0,1	170	0,3	3,1333	3,51	-12,02%	2,70691	13,61%
0,8	0,1	170	0,4	4,1033	6,24	-52,07%	4,40224	-7,28%
0,8	0,1	220	0,1	0,4633	0,39	15,83%	0,70339	-51,81%
0,8	0,1	220	0,2	1,5	1,56	-4,00%	1,42996	4,67%
0,8	0,1	220	0,3	2,99	3,51	-17,39%	2,64091	11,68%
0,8	0,1	220	0,4	4,3833	6,24	-42,36%	4,33624	1,07%
1,2	0,1	70	0,1	1,1433	0,26	77,26%	0,82066	28,22%
1,2	0,1	70	0,2	1,54	1,04	32,47%	1,30504	15,26%
1,2	0,1	70	0,3	2,0467	2,34	-14,33%	2,11234	-3,21%
1,2	0,1	70	0,4	3,16	4,16	-31,65%	3,24256	-2,61%
1,2	0,1	120	0,1	0,54	0,26	51,85%	0,75466	-39,75%
1,2	0,1	120	0,2	1,1633	1,04	10,60%	1,23904	-6,51%
1,2	0,1	120	0,3	2,0033	2,34	-16,81%	2,04634	-2,15%
1,2	0,1	120	0,4	2,78	4,16	-49,64%	3,17656	-14,26%
1,2	0,1	170	0,1	0,5367	0,26	51,55%	0,68866	-28,32%
1,2	0,1	170	0,2	1,11	1,04	6,31%	1,17304	-5,68%
1,2	0,1	170	0,3	1,9967	2,34	-17,20%	1,98034	0,82%
1,2	0,1	170	0,4	2,5667	4,16	-62,08%	3,11056	-21,19%
1,2	0,1	220	0,1	0,5467	0,26	52,44%	0,62266	-13,90%
1,2	0,1	220	0,2	1,1867	1,04	12,36%	1,10704	6,71%
1,2	0,1	220	0,3	2,14	2,34	-9,35%	1,91434	10,54%
1,2	0,1	220	0,4	2,87	4,16	-44,95%	3,04456	-6,08%

Tabela 19: Resultados dos erros obtidos para os cálculos de Ra utilizado a fórmula teoria e a proposta para $ap = 0,1 \text{ mm}$

Re	ap	Vc	f	Média Ra Real	Comparação Ra Teórico			
					Rug Teórica	Erro Ra Teórico	Fórmula Minitab	Erro Ra Proposto
0,8	0,2	70	0,1	0,79	0,39	50,63%	0,82299	-4,18%
0,8	0,2	70	0,2	1,4833	1,56	-5,17%	1,54956	-4,46%
0,8	0,2	70	0,3	2,3167	3,51	-51,51%	2,76051	-19,16%
0,8	0,2	70	0,4	4,1967	6,24	-48,69%	4,45584	-6,18%
0,8	0,2	120	0,1	0,8333	0,39	53,20%	0,75699	9,16%
0,8	0,2	120	0,2	1,4567	1,56	-7,09%	1,48356	-1,85%
0,8	0,2	120	0,3	2,8367	3,51	-23,74%	2,69451	5,01%
0,8	0,2	120	0,4	4,25	6,24	-46,82%	4,38984	-3,29%
0,8	0,2	170	0,1	0,9233	0,39	57,76%	0,69099	25,16%
0,8	0,2	170	0,2	1,4233	1,56	-9,60%	1,41756	0,41%
0,8	0,2	170	0,3	2,7833	3,51	-26,11%	2,62851	5,56%
0,8	0,2	170	0,4	4,0333	6,24	-54,71%	4,32384	-7,20%
0,8	0,2	220	0,1	0,8533	0,39	54,30%	0,62499	26,76%
0,8	0,2	220	0,2	1,4467	1,56	-7,83%	1,35156	6,57%
0,8	0,2	220	0,3	2,77	3,51	-26,71%	2,56251	7,49%
0,8	0,2	220	0,4	4,1433	6,24	-50,60%	4,25784	-2,76%
1,2	0,2	70	0,1	0,9133	0,26	71,53%	0,74226	18,73%
1,2	0,2	70	0,2	1,1633	1,04	10,60%	1,22664	-5,44%
1,2	0,2	70	0,3	1,9633	2,34	-19,19%	2,03394	-3,60%
1,2	0,2	70	0,4	3,2867	4,16	-26,57%	3,16416	3,73%
1,2	0,2	120	0,1	0,4867	0,26	46,58%	0,67626	-38,96%
1,2	0,2	120	0,2	1,06	1,04	1,89%	1,16064	-9,49%
1,2	0,2	120	0,3	2	2,34	-17,00%	1,96794	1,60%
1,2	0,2	120	0,4	3,18	4,16	-30,82%	3,09816	2,57%
1,2	0,2	170	0,1	0,46	0,26	43,48%	0,61026	-32,67%
1,2	0,2	170	0,2	1,0767	1,04	3,41%	1,09464	-1,67%
1,2	0,2	170	0,3	2,0733	2,34	-12,86%	1,90194	8,27%
1,2	0,2	170	0,4	3,08	4,16	-35,06%	3,03216	1,55%
1,2	0,2	220	0,1	0,4067	0,26	36,07%	0,54426	-33,83%
1,2	0,2	220	0,2	1,0833	1,04	4,00%	1,02864	5,05%
1,2	0,2	220	0,3	2,0067	2,34	-16,61%	1,83594	8,51%
1,2	0,2	220	0,4	3,1833	4,16	-30,68%	2,96616	6,82%