

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL NO
TORNEAMENTO DE AÇO COM FERRAMENTA DE SUPERFÍCIE LISA
E COM QUEBRA-CAVACO

Por

Victor Espanhol

Dissertação para obtenção do título
De Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2008.

Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco

Por

Victor Espanhol
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. José Esmério Mazzaferro – Promec/UFRGS

Prof. Dr. Vilson João Batista – Promec/UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez – Demec/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Maio de 2008.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de uma maneira ou outra, auxiliaram a realização deste trabalho. Em especial as pessoas abaixo citadas:

Professor Dr. Flávio José Lorini, orientador deste trabalho, que não poupou esforços, principalmente na revisão e ajustes finais da dissertação;

Professor Ms. Delfim Luiz Torok, pela sua total dedicação em colaborar nos ensaios, principalmente na questão eletrônica e de coleta de dados;

Professor Ms. Felipe Carlos Schneider pela disposição e confiança em liberar o laboratório de usinagem da Unisinos para a execução dos ensaios realizados neste trabalho;

Professor Ms. Walter Andrey Fontana, pela excelente colaboração e auxílio nos ensaios durante todo o período de trabalho;

Minha família, mulher e filhos, pela paciência que tiveram durante o tempo que tive na dedicação a este trabalho;

Engenheiro Geraldo André Fagundes, pela colaboração e auxílio no fornecimento dos corpos de prova para a execução dos ensaios;

Aços Finos Piratini, pelo envio dos corpos de prova para os ensaios;

Coordenação do Curso Técnico de Mecânica da Liberato, pelo empréstimo de instrumentos e ferramentas para os ensaios;

Empresa Sandvik, através dos engenheiros Francisco Marcondes e Aldeci Santos, pela total colaboração técnica no que diz respeito a ferramentas de corte, bem como o fornecimento das mesmas para os ensaios;

Engenheiro Francisco Marcondes, novamente, pelo auxílio na discussão das idéias que geraram este trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de testes com processo de usinagem para diferentes ferramentas de torneamento. Foram realizados ensaios para avaliar a diferença de comportamento quanto a esforços de corte e acabamento superficial em operação de torneamento para um mesmo tipo de ferramenta, com variação na superfície de saída, sendo uma com quebra cavaco com outra de superfície de saída lisa. O material usinado foi aço ao carbono 1045 recozido, testado para duas diferentes velocidades, variando-se também a profundidade de corte e avanço para cada ensaio. Os testes foram executados em um torno mecânico convencional, onde as variáveis do processo foram coletadas com um sistema de aquisição de dados, através de um dinamômetro piezoelétrico para avaliação das forças de corte e um rugosímetro portátil para medida da rugosidade superficial. Observou-se nos resultados, uma forte diminuição dos esforços quando aplicada a ferramenta sinuosa com quebra-cavaco, bem como melhoria nas características do cavaco. Em relação à rugosidade superficial houve uma pequena melhora quando utilizada a ferramenta com superfície de saída lisa, situação decorrente das condições de remoção do cavaco.

Palavras chave: forças de corte, usinagem, quebra-cavaco, rugosidade superficial.

ABSTRACT

“Comparative analysis of the cut efforts and surface finish in steel turning with grooved and flat tools”

This work presents the results of machining process tests with different turning tools. Tests were done to evaluate behaviors differences on cutting efforts and surface finishing in turning operations to a same type of tool, with a variation on rake face, where one had a chip-breaker groove and the other are flat. The machining material was 1045 annealed carbon steel, tested to two different cutting speeds, changing also the depth of cut and the feed rate for each case. The tests were done in a conventional lathe, where the process variances were collected by a data acquisition system, through a piezoelectric dynamometer to evaluate the cut efforts and a portable rugosimeter to measure the surface roughness. The results show a strong reduction of the efforts when grooved tools with chip-breaker were applied as well an improvement on the chip characteristics. In relation to the surface roughness, it was observed a slight improvement when the flat tool was used, because of the conditions of chip removal.

Keywords: cutting forces, machining, chip-breaker, surface finish.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Ferramentas de Corte.....	3
2.1.1 Materiais para Ferramentas de Corte.....	4
2.1.1.1 Aços-Rápidos.....	5
2.1.1.2 Metal Duro.....	6
2.1.1.3 Metal Duro com Cobertura.....	7
2.1.2 Insertos Lisos e Sinuosos (Não Lisos).....	9
2.1.3 Avarias e Desgastes das Ferramentas.....	10
2.1.3.1 Tipos de Avarias e Desgastes.....	11
2.1.3.2 Mecanismos Causadores dos Desgastes.....	12
2.1.3.3 Medição dos Desgastes das Ferramentas.....	13
2.1.4 Vida da Ferramenta.....	14
2.1.4.1 Fatores que Influenciam na Vida de uma Ferramenta.....	14
2.2 Acabamento Superficial.....	15
2.2.1 Caracterização de uma Superfície.....	16
2.2.2 Rugosidade.....	16
2.2.2.1 Avaliação da Rugosidade.....	17
2.2.3 Ondulações.....	19
2.2.4 Falhas na Superfície.....	20
2.2.5 Marcas de Avanço.....	20
2.3 Influência dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial.....	20
2.4 Cavaco.....	21
2.5 Forças e Potências na Usinagem.....	22
2.5.1 Força de Usinagem.....	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1 Material Ensaiado.....	26
3.2 Corpos de Prova.....	27
3.3 Ferramentas de Corte.....	27
3.4 Parâmetros de Corte.....	28
3.5 Equipamentos.....	29
3.6 Procedimento Experimental.....	32

4. RESULTADOS	33
4.1 Esforços de Avanço e Corte.....	33
4.2 Rugosidade.....	34
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
5.1 Avaliação.....	39
5.2 Conclusões.....	39
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
8. APÊNDICE	45
8.1 Tabelas de Resultados.....	45
8.2 Gráficos de Resultados.....	61
8.3 Cavacos Obtidos nos Ensaios.....	77
9. ANEXOS	83

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [mm ²]
a _p	Profundidade de Corte [mm]
b	Largura de Corte [mm]
Co	Cobalto
CVD	Deposição Química por Vapor
°C	Graus Celsius
F _c	Força de Corte [N]
F _f	Força de Avanço [N]
f _n	Avanço de Corte [mm/rot]
h	Espessura de Corte [mm]
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
K _b	Largura da Cratera [mm]
K _m	Distância do Centro da Cratera à Aresta de Corte [mm]
K _n	Fator de Remoção do Metal
K _s	Pressão Específica de Corte [N/mm ²]
K _t	Profundidade de Cratera [mm]
P _u	Força Principal de Corte [N]
PVD	Deposição Física por Vapor
R _a	Rugosidade Superficial [μm]
r _ε	Raio de Ponta [mm]
R _{máx}	Rugosidade Máxima [μm]
RPM	Rotações por Minuto
V _B	Desgaste de Flanco [mm]
V _c	Velocidade de Corte [m/min]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Suporte de Fixação Rígida.....	6
Figura 2.2 - Quebra-cavacos como parte da geometria da pastilha.....	9
Figura 2.3 - Desgaste de Flanco e de Cratera.....	13
Figura 2.4 - Percurso de Medição de rugosidade Ra.....	17
Figura 2.5 - Rugosidade Ry.....	17
Figura 2.6 - Rugosidade Rt.....	18
Figura 2.7 - Rugosidade Rz.....	18
Figura 2.8 - Representação Esquemática das Ondulações.....	19
Figura 2.9 - Componentes da Força Principal de Corte Pu.....	23
Figura 3.1 – Corpo de Prova.....	26
Figura 3.2 – Suporte com $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$ e $\kappa = 75^\circ$	27
Figura 3.3 – Inseto Sinuoso e Liso.....	28
Figura 3.4 – Detalhe do Quebra-Cavaco.....	28
Figura 3.5 – Torno Mecânico Romi IH-40.....	29
Figura 3.6 – PC com Software para Coleta de Dados.....	30
Figura 3.7 – Placa de Interface acoplada a placa de aquisição de dados no PC.....	30
Figura 3.8 – Tela principal do Software de Captura.....	31
Figura 3.9 – Rugosímetro Qualitest TR-200.....	31
Figura 4.1 – Rugosidade x Avanço para $V_c = 220\text{m/min}$ e $a_p = 1$	34
Figura 4.2 – Rugosidade x Avanço para $V_c = 220\text{m/min}$ e $a_p = 2$	35
Figura 4.3 – Rugosidade x Avanço para $V_c = 150\text{m/min}$ e $a_p = 1$	35
Figura 4.4 – Rugosidade x Avanço para $V_c = 150\text{m/min}$ e $a_p = 2$	36
Figura 4.5 – Rugosidade x Profundidade de Corte para $V_c = 220\text{m/min}$ e $f_n = 0,102$	36
Figura 4.6 – Rugosidade x Profundidade de Corte para $V_c = 220\text{m/min}$ e $f_n = 0,205$	37
Figura 4.7 – Rugosidade x Profundidade de Corte para $V_c = 150\text{m/min}$ e $f_n = 0,102$	37
Figura 4.8 – Rugosidade x Profundidade de Corte para $V_c = 150\text{m/min}$ e $f_n = 0,205$	38
Figura 8.1 – Força de Avanço Ensaio N°1.....	61
Figura 8.2 – Força de Corte Ensaio N°1.....	61
Figura 8.3 – Força de Avanço Ensaio N°2.....	62
Figura 8.4 – Força de Corte Ensaio N°2.....	62
Figura 8.5 – Força de Avanço Ensaio N°3.....	63
Figura 8.6 – Força de Corte Ensaio N°3.....	63

Figura 8.7 – Força de Avanço Ensaio N°4.....	64
Figura 8.8 – Força de Corte Ensaio N°4.....	64
Figura 8.9 – Força de Avanço Ensaio N°5.....	65
Figura 8.10 – Força de Corte Ensaio N°5.....	65
Figura 8.11 – Força de Avanço Ensaio N°6.....	66
Figura 8.12 – Força de Corte Ensaio N°6.....	66
Figura 8.13 – Força de Avanço Ensaio N°7.....	67
Figura 8.14 – Força de Corte Ensaio N°7.....	67
Figura 8.15 – Força de Avanço Ensaio N°8.....	68
Figura 8.16 – Força de Corte Ensaio N°8.....	68
Figura 8.17 – Força de Avanço Ensaio N°9.....	69
Figura 8.18 – Força de Corte Ensaio N°9.....	69
Figura 8.19 – Força de Avanço Ensaio N°10.....	70
Figura 8.20 – Força de Corte Ensaio N°10.....	70
Figura 8.21 – Força de Avanço Ensaio N°11.....	71
Figura 8.22 – Força de Corte Ensaio N°11.....	71
Figura 8.23 – Força de Avanço Ensaio N°12.....	72
Figura 8.24 – Força de Corte Ensaio N°12.....	72
Figura 8.25 – Força de Avanço Ensaio N°13.....	73
Figura 8.26 – Força de Corte Ensaio N°13.....	73
Figura 8.27 – Força de Avanço Ensaio N°14.....	74
Figura 8.28 – Força de Corte Ensaio N°14.....	74
Figura 8.29 – Força de Avanço Ensaio N°15.....	75
Figura 8.30 – Força de Corte Ensaio N°15.....	75
Figura 8.31 – Força de Avanço Ensaio N°16.....	76
Figura 8.32 – Força de Corte Ensaio N°16.....	76
Figura 8.33 – Cavaco Ensaio 1.....	77
Figura 8.34 – Cavaco Ensaio 2.....	77
Figura 8.35 – Cavaco Ensaio 3.....	77
Figura 8.36 – Cavaco Ensaio 4.....	78
Figura 8.37 – Cavaco Ensaio 5.....	78
Figura 8.38 – Cavaco Ensaio 6.....	78
Figura 8.39 – Cavaco Ensaio 7.....	79
Figura 8.40 – Cavaco Ensaio 8.....	79

Figura 8.41 – Cavaco Ensaio 9.....	79
Figura 8.42 – Cavaco Ensaio 10.....	80
Figura 8.43 – Cavaco Ensaio 11.....	80
Figura 8.44 – Cavaco Ensaio 12.....	80
Figura 8.45 – Cavaco Ensaio 13.....	81
Figura 8.46 – Cavaco Ensaio 14.....	81
Figura 8.47 – Cavaco Ensaio 15.....	81
Figura 8.48 – Cavaco Ensaio 16.....	82
Figura 9.1 – Rugosidade em Função do Processo de Fabricação.....	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Medições de Dureza dos corpos de prova.....	27
Tabela 3.2 – Dados de Corte dos Insertos.....	28
Tabela 3.3 – Parâmetros de Corte.....	29
Tabela 4.1 – Resultados para $V_c= 220\text{m/min}$	33
Tabela 4.2 – Resultados para $V_c= 150\text{m/min}$	34
Tabela 8.1 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°1.....	45
Tabela 8.2 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°2.....	46
Tabela 8.3 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°3.....	47
Tabela 8.4 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°4.....	48
Tabela 8.5 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°5.....	49
Tabela 8.6 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°6.....	50
Tabela 8.7 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°7.....	51
Tabela 8.8 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°8.....	52
Tabela 8.9 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°9.....	53
Tabela 8.10 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°10.....	54
Tabela 8.11 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°11.....	55
Tabela 8.12 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°12.....	56
Tabela 8.13 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°13.....	57
Tabela 8.14 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°14.....	58
Tabela 8.15 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°15.....	59
Tabela 8.16 – Forças de Avanço e de Corte e Rugosidade para o Ensaio N°16.....	60
Tabela 9.1 – Rugosidade x Raio de Ponta x Avanço.....	84

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é o processo de fabricação mecânica que consiste em alterar as dimensões de uma peça pela retirada ou produção de cavacos. Trent em 2000, já indicava este processo como o mais usado na indústria metal-mecânica, com custos associados superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados em todos os países industrializados.

Através de uma análise rápida dos custos inerentes ao processo de usinagem, juntamente com a representatividade destes na indústria mundial, constata-se que qualquer aprimoramento, seja de máquina, ferramenta, material ou processo, converte-se em redução de custos de fabricação.

Considerando o parque industrial metal-mecânico em constante evolução em termos de usinagem, pode-se destacar a necessidade da rápida modernização das ferramentas de corte. As empresas fabricantes de ferramentas, estão em constantes pesquisas e desenvolvimentos, inclusive com geometrias específicas para determinados tipos de trabalho. Informações como esforços de corte e potências de usinagem são de fundamental importância para os fabricantes de máquinas operatrizes, proporcionando assim, condições de executar seus projetos de produtos mais próximos da realidade e com custo final apropriado a demanda de mercado.

Diversos trabalhos experimentais em usinagem, seja na área acadêmica ou industrial, indicam uma tendência dos autores no enfoque nas ferramentas utilizadas, em especial sua durabilidade e/ou características específicas de materiais usinados, como maior ou menor usinabilidade dos mesmos. Certamente tudo está relacionado com uma maior ou menor economia no processo produtivo. Mas, também, deve-se considerar importantes os dados relacionados à máquina-ferramenta, seja nos aspectos de qualidade ou custo dos processos obtidos. Máquinas bem selecionadas podem significar redução de consumo de energia elétrica, custo de manutenção e demais características inerentes à fabricação.

1.1 Objetivos

O trabalho propõe-se a realizar ensaios experimentais para avaliar os parâmetros tecnológicos relativos ao torneamento, analisando, além dos esforços de usinagem, também a formação dos cavacos e a qualidade da superfície usinada obtida.

Os ensaios realizados são de curta duração, com o tempo suficiente apenas para a aquisição de dados comparativos de esforços entre os dois tipos de pastilhas. A rugosidade Ra é medida para avaliar a qualidade superficial obtida em cada caso bem como são analisados os cavacos produzidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A abordagem desta revisão bibliográfica é estruturada em dois enfoques distintos: primeiramente analisar algumas publicações de pesquisas pertinentes ao objetivo do trabalho e, em seguida, buscar relacionar tópicos essenciais de uma fundamentação teórica.

Um grande número de trabalhos relacionados ao estudo de usinagem vem sendo desenvolvido nos últimos anos. Pesquisas acadêmicas ou diretamente ligadas ao setor industrial, buscam testar novas ferramentas, avaliar usinabilidade de novos materiais e, principalmente, aperfeiçoar processos, seja pela redução de tempos e custos ou pela busca de melhorar qualidade e competitividade dos produtos.

No trabalho “*A influência da Adição de Bismuto na Usinabilidade dos Aços Ressulfurados*” [Amorim et al, 2003], é estudada a usinabilidade de dois aços tratados ao enxofre, com e sem adição de bismuto, utilizando ferramenta de aço rápido e metal duro em ensaios de longa duração. O estudo indica, pelos resultados experimentais, que a ferramenta de aço rápido proporciona melhor usinabilidade no aço com bismuto, com uma menor dependência da vida da ferramenta com a velocidade de corte para o aço com adição de bismuto.

Outro trabalho [Bas, 2000], trata do estudo de aços com características especiais para melhoria da usinabilidade. São citadas soluções metalúrgicas, técnicas de dopagem, tratamentos térmicos, engenharia de inclusões, controle de oxigênio e óxidos, sugerindo-se uma adequada ferramenta de corte própria para o material a ser trabalhado.

Diniz, 1999, em seu trabalho “*Ensaio de Usinabilidade de Aço*” realizado em âmbito acadêmico, estuda as características de usinabilidade do aço carbono SAE 1045 com velocidades de corte de 340, 380 e 420 m/min, medindo o desgaste da ferramenta, a rugosidade da peça e a corrente elétrica consumida pelo motor da máquina (proporcional a força de corte), até a ferramenta atingir o final de sua vida útil. A formação dos cavacos também é analisada. Observa-se que a rugosidade não sofre influência com a variação da velocidade de corte até 15 minutos de usinagem, enquanto a potência consumida aumenta com a elevação da velocidade de corte.

Ee [Ee et al, 2001], estuda a decomposição das forças de usinagem utilizando diversas formas de quebra-cavacos com geometrias diferentes de ferramentas, mostrando que há variações na distribuição dos esforços de acordo com o contato do cavaco com o inserto de corte. Há um ganho extraordinário do inserto com quebra-cavacos em relação ao liso quanto ao tipo de cavaco obtido no torneamento. O desgaste da ferramenta em geral, é influenciado pela forma tridimensional de escoamento do cavaco. Recentemente descobriu-se que muitas vezes ocorre o final da vida útil do inserto pelo desgaste da superfície de saída antes de ocorrer o desgaste de

flanco nos insertos sinuosos. Constatou-se que a vida da ferramenta é significativamente afetada, além das condições de corte, pela configuração da sinuosidade do inserto. Novos parâmetros de medição têm sido estabelecidos para desgaste de ferramentas com pastilhas sinuosas. Observações experimentais têm mostrado que as forças de corte são afetadas pelo processo de desgaste das ferramentas. Pode-se destacar as três regiões principais de desgaste na superfície de saída: região de borda, face de desgaste secundária e face de desgaste traseira. Observou-se nos ensaios que, para grandes avanços, as forças de corte tendem a aumentar linearmente com o avanço determinado, enquanto que para pequenos valores do mesmo, o aumento é não-linear.

Em outro trabalho [Fang e Jawahir, 2002] estuda-se a dissipação de calor no inserto com diferentes quebra-cavacos durante o torneamento. Um novo método analítico é apresentado baseado na integração efetiva do processamento universal do modelo de linha de deslocamento do cavaco. Pela incorporação de uma força adicional pelo contato na parede de trás do quebra-cavaco, o modelo de linha de deslocamento é definido na usinagem, pelo contato restrito na superfície de saída sinuosa. Foram feitos testes com pastilhas sinuosas com parede traseira alta, inserto sinuoso padrão (paredes iguais) e com parede reduzida (mais baixa). Resultados de esforços experimentais foram comparados com dados teóricos e detectou-se uma diferença bastante pequena, comprovando a validade do método analítico proposto.

Souza et al., 2006, no trabalho “*Avaliação do Processo de Formação de Cavaco no Torneamento do Aço ABNT 1045*”, comenta sobre a importância do cavaco como elemento de pesquisa na usinagem, o que a maioria dos profissionais da área de fabricação não dá importância. Usou-se velocidade de corte de 86, 117 e 136 m/min. Dez ensaios foram executados, tendo como objeto de análise o tipo, forma e cor do cavaco. Concluiu-se que maiores taxas de cisalhamento do cavaco geram mais calor na interface cavaco-ferramenta. O aumento da profundidade de corte pode ser associado a mudança na forma do cavaco, em lascas para menor velocidade de corte e em fita para maior velocidade. O aumento do avanço proporciona a formação de cavacos helicoidais.

No presente trabalho houve a preocupação em avaliar e comparar a usinagem com um inserto liso e outro sinuoso, para verificar as diferenças entre os esforços e rugosidades obtidas nas peças ensaiadas.

2.1 Ferramentas de Corte

A evolução dos materiais para ferramentas de corte é um fator a considerar em qualquer pesquisa relacionada à usinagem. O longo tempo decorrido entre o surgimento do chamado aço-

ferramenta e sua evolução ao aço-rápido, contrapõe-se ao grande salto de qualidade e produtividade após a descoberta do metal duro e novos lançamentos no mercado.

Atualmente, as ferramentas de corte mais utilizadas no torneamento de metais em geral, em especial dos aços, são os suportes com insertos intercambiáveis de metal duro, mais conhecidos como “pastilhas”, existentes em uma grande variedade de forma, tamanho e composição, para as mais diversas utilizações.

2.1.1 Materiais para Ferramenta de Corte

A escolha do material da ferramenta é fator fundamental para a usinagem de uma peça. Alguns critérios devem ser observados, dentre os quais, segundo Shaw(1984) e Trent(2000):

- dureza do material a ser usinado;
- processo de usinagem: se possui corte interrompido, corte contínuo, uso ou não de refrigeração de corte, tipo de operação (desbaste ou acabamento), tempo de ciclo;
- forma e dimensão da ferramenta;
- tipo de cavaco gerado pelo material a ser usinado;
- parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte;
- condições da máquina-ferramenta: rigidez, potência, controles durante o processo, sistema de refrigeração da ferramenta;
- custo-benefício da ferramenta;
- atender características finais do produto, como qualidade superficial e dimensional requerida.

A ferramenta, por sua vez, deve possuir as seguintes características:

- alta dureza, principalmente a quente;
- boa tenacidade para evitar falhas por rupturas;
- alta resistência ao desgaste;
- alta resistência à compressão e ao cisalhamento;
- boas propriedades mecânicas e térmicas;
- alta condutividade térmica;
- baixo índice de expansão volumétrica;
- alta resistência ao choque térmico;
- ser inerte quimicamente.

Segundo Machado & Silva, 2004, as propriedades mais significativas dos materiais das ferramentas de corte são a dureza/resistência ao desgaste e a tenacidade, fatores estes muito significativos nas pastilhas de metal duro, motivação para estes ensaios de pesquisa.

A grande questão entre os fabricantes de ferramentas de corte está exatamente na busca do balanço ideal entre dureza e tenacidade, já que são duas propriedades de extrema importância para o seu desempenho e que não são encontradas em um mesmo material. Atualmente se consegue boa combinação de dureza e tenacidade, tanto em materiais de substrato da ferramenta quanto em seu revestimento. Ao substrato (base) cabe mais a qualidade da tenacidade com alguma dureza e, ao revestimento, a alta dureza, resistência à abrasão e inércia química.

Um material ideal para ferramenta de corte teria que ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço-rápido e a inércia química da alumina (óxido de alumínio). Como isto não é possível, cabe aos técnicos e engenheiros fazer uma melhor seleção para a aplicação desejada.

2.1.1.1 – Aços-Rápidos

Os aços rápidos surgiram para substituir as ferramentas de aço carbono. Sabe-se que, hoje em dia, as ferramentas que dominam o mercado são as de metal duro. Mas convém fazer um breve relato sobre os mesmos, já que tiveram uma grande importância para a sua época. Recebem esta definição pela sua capacidade de reter durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo quando utilizados em corte rápido de materiais. Outra importante característica é a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C.

A microestrutura destes materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos (precipitados durante o revenimento, em um processo onde ocorre endurecimento secundário), cuja função é reter os carbonetos primários, mesmo sob altas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem. A *American Iron and Steel Institute* (AISI) divide os aços-rápidos em duas categorias (Bayer, 1990):

- **Série T:** aços-rápidos ao tungstênio, onde os principais elementos, além do tungstênio, são o cromo, vanádio, cobalto e carbono.

- **Série M:** aços-rápidos ao molibdênio, onde os principais elementos, além do molibdênio, são também o cromo, vanádio, cobalto e carbono, mas apresentando uma subdivisão classificada como aços-rápidos intermediários, os quais apresentam menores teores de elementos de liga e são empregados em aplicações onde a resistência ao desgaste dos aços carbono não é satisfatória e o custo dos aços-rápidos é muito elevado, como o uso em usinagem de madeira.

Ambas as séries são equivalentes em desempenho, porém os da série **M** mostram-se mais vantajosos, pois, além de terem uma tenacidade um pouco maior que os da série **T**, quando temperados para obter uma mesma dureza, apresentam menor custo inicial. Os elementos de liga Molibdênio, Tungstênio, Cromo, Vanádio e Cobalto são elementos importantes que caracterizam a composição dos aços-rápidos, cada um com suas propriedades específicas.

2.1.1.2 – Metal Duro

O metal duro é o material para ferramentas mais utilizado na indústria, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, obtida através de uma variação da composição química [Diniz et al, 2003]. Uma característica importante do metal duro é o coeficiente de dilatação térmica que tem um valor duas vezes menor se comparado com o aço em temperaturas ambiente e até 675°C. O metal duro é um produto resultante da metalurgia do pó, de partículas duras finamente divididas de carbonetos sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão, formado basicamente por dois constituintes:

- **carbonetos de tungstênio:** extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, podendo ser associados a outros carbonetos como os de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e nióbio (NbC) que conferem dureza a temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas.

- **elemento aglomerante:** trata-se de um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, cuja função é aglomerar as partículas dos carbonetos, sendo responsável pela tenacidade do material. A diminuição da percentagem de cobalto aumenta a dureza a quente do material.

O metal duro é utilizado, normalmente, na forma de pastilhas intercambiáveis (insertos) com fixação mecânica sobre um suporte (Figura 2.1).

Desenho de fixação rígida (RC)

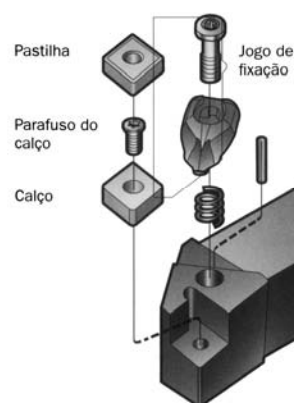


Figura 2.1 – Fixação Rígida [Sandvik, 2005]

De acordo com a composição e aplicações, o metal duro é classificado em seis classes:

- **Classe P:** constituídos de metais duros de elevado teor de carboneto de titânio e de tântalo, conferindo, assim, resistência ao desgaste e elevada dureza a quente. Esta classe é indicada para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos: aços, ferro fundido maleável e materiais dúcteis em geral.

- **Classe M:** possui propriedades intermediárias sendo destinado à ferramentas com várias aplicações. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos como curtos, como exemplo o aço inoxidável.

- **Classe K:** composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos, de ruptura e materiais não-metálicos: ferro fundido, aços temperados, metais não ferrosos (cobre, latão), plásticos e madeira. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera ao usinar os ferrosos.

- **Classe N:** classe do metal duro que combina excelente resistência ao desgaste por abrasão. Recomendada para metais não ferrosos e não metálicos.

- **Classe S:** classe de metal duro que combina boa resistência à deformação plástica, boa resistência ao desgaste por abrasão, tenacidade e boa resistência a altas temperaturas. Pode trabalhar tanto em altas como em baixas velocidades de corte. Recomendada para superligas resistentes ao calor, incluindo ligas de titânio.

- **Classe H:** classe de metal duro que combina boa resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade para torneamento de materiais endurecidos em baixas velocidades.

As ferramentas de metal duro podem usinar qualquer tipo de material, desde que este não ultrapasse a dureza de 45 HRC [Diniz et al, 2003]. Nas operações de usinagem como torneamento, as ferramentas de metal duro podem trabalhar com velocidades de corte bem maiores se comparadas com velocidades de corte de uma ferramenta de aço rápido. No entanto há uma exigência de máquina de maiores velocidades e maior rigidez para prevenir vibrações, já que o metal duro possui uma tenacidade menor se comparada com aço rápido, podendo, assim, chegar a uma avaria em um curto espaço de tempo de uso. Para melhorar as propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro foram desenvolvidas coberturas, que aumentam a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça.

2.1.1.3 Metal Duro com cobertura

A utilização de ferramentas de metal duro com cobertura nas indústrias atinge cerca de 90% (Machado & Silva, 2004). Este número é consequência de um maior domínio das técnicas

de revestimento, apresentando custo mais acessível do produto e, também, aumentando a concorrência dos fabricantes de ferramentas.

Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes de metal duro. Os metais duros podem receber o revestimento pelo processo PVD (Deposição Física por Vapor) e pelo processo CVD (Deposição Química por Vapor). Os fabricantes de ferramentas possuem em suas linhas de produtos ferramentas revestidas pelos dois processos. O processo por PVD garante a mesma tenacidade do substrato e isso não ocorre com o processo CVD.

Principais características das camadas de revestimentos:

- **carboneto de titânio (TiC)**: possui excelente resistência ao desgaste por abrasão; funciona como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro no núcleo. Possui baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação da aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica. É o revestimento mais utilizado como primeira camada.

- **óxido de alumínio (Al₂O₃)**: garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas por ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação.

- **nitreto de titânio (TiN)**: reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC por possuir menor tendência à difusão com aços.

- **nitreto de titânio-alumínio (TiAlN)** e **nitreto de alumínio-titânio (AlTiN)**: maior resistência à oxidação, permitindo o uso de temperaturas mais altas; baixa condutividade térmica. Protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco; alta dureza a frio e a quente; alta estabilidade química que reduz bastante o desgaste de cratera.

Alguns critérios para a seleção de uma ferramenta de metal duro para uma determinada aplicação, segundo Diniz et al, 2003:

- **severidade da operação de usinagem**: classes de ferramentas com maior teor de Co são utilizadas em operação de desbaste, com avanço e profundidade de corte maiores e cortes interrompidos, por criarem tensões elevadas na ferramenta.

- **velocidade de corte**: classes de ferramentas com menor teor de Co e mais carbonetos são utilizadas em operação de acabamento, com maiores velocidades de corte, por possuírem maior resistência ao calor e à abrasão.

- **condições da máquina-ferramenta**: classes com maior tenacidade, ou seja, maior teor de cobalto são recomendadas para máquinas menos rígidas. Já, ferramentas mais duras, com mais carbonetos e menos cobalto, necessitam de equipamentos mais rígidos devido a sua maior fragilidade.

2.1.2 – Insetos Lisos e Sinuosos(não lisos)

É de fundamental importância a boa qualidade da superfície de saída da ferramenta, pois é por ali que fluem os cavacos. Caso tenha-se uma superfície de baixa qualidade ou com desgaste excessivo pode-se ter sérios prejuízos durante o corte.

Atualmente os grandes fabricantes de ferramentas, preocupados com a boa formação do cavaco, realizam pesquisas e testam novas superfícies em busca de melhores resultados para a usinagem, desenvolvendo diferentes tipos de superfícies sinuosas (também chamada de “quebra-cavacos”) conforme mostrado na figura 2.2.

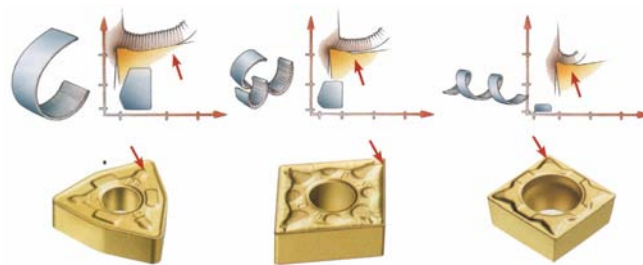


Figura 2.2 – Quebra-cavacos como parte da geometria da pastilha (Sandvik, 2005)

A quebra do cavaco pode ocorrer de forma automática, como no torneamento dos ferros fundidos, rompendo-se contra a ferramenta ou a peça.

O tipo de quebra do cavaco depende em parte da geometria da pastilha e dos parâmetros de corte. Algumas das formas de quebra de cavacos podem apresentar desvantagens, mas isto normalmente pode ser compensado pela correta escolha da geometria ou dos dados de corte. Na quebra contra a face de folga da ferramenta, o martelamento dos cavacos pode ser desvantajoso e uma geometria diferente (quebra-cavacos mais justo ou mais aberto) pode ser melhor. Alternativamente podem-se ajustar os dados de corte. Na quebra contra cantos da peça, quando se emprega profundidades de corte grandes, pode ocorrer quebra não satisfatória e um menor ângulo de posição deve ser considerado.

Materiais que geram cavacos pequenos precisam pouco ou nenhum quebra-cavacos, ao passo que alguns materiais que formam cavacos longos precisam quebra-cavacos projetados em função da geometria da pastilha, para deformar e forçar o cavaco a quebrar. A curva inicial do cavaco é, na maioria dos casos, insuficiente para forçar o cavaco a se quebrar no tamanho necessário. Em sua forma mais simples, um quebra-cavacos é uma obstrução incorporada ao fluxo dos mesmos. Esta forma tem muitas desvantagens e, em muitos casos, produz um efeito negativo sobre o desempenho da usinagem.

Foram desenvolvidas diversas formas de quebra-cavacos para pastilhas prensadas, quebra-cavacos esses, retificados em uma etapa posterior, antes das modernas pastilhas atuais. As modernas pastilhas intercambiáveis são uma combinação complexa de ângulos, planos e raios para otimizar a formação de cavacos por meio da ação de corte, comprimento de contato, quebra de cavacos, etc.

A maioria das pastilhas possui ângulos de saída positivos, combinados com inclinação negativa do suporte, para promover uma boa formação de cavacos e ação de corte positiva. Fases primárias negativas de diversos tamanhos, dependendo da área de trabalho da geometria, são aplicadas para reforçar a aresta de corte. Desta forma, o controle de cavaco é um dos fatores chave, especialmente em torneamento e furação.

O diagrama de quebra de cavacos para uma geometria de pastilha (baseado nas faixas recomendadas de avanço e profundidade de corte), em combinação com o material da ferramenta, é o fator chave para a aplicação de pastilhas. O moderno programa de pastilhas inclui geometrias de corte para atender a maioria dos materiais de peças mais utilizados. Estas geometrias atendem aplicações que variam de acabamento, semi-acabamento ao desbaste, bem como usinagem de desbaste pesadas. Desta forma o controle de cavacos é feito, principalmente, por meio da geometria da pastilha intercambiável em combinação com os dados de corte.

As pastilhas lisas possuem suas aplicações específicas. Normalmente são usadas para usinagem de materiais que possuem cavacos curtos por natureza como, por exemplo, o ferro fundido. Para aços de um modo geral, os fabricantes atuais utilizam-se, apenas, de pastilhas com quebra-cavacos (superfície de saída sinuosa) por facilitarem a usinagem, evitando acidentes durante o processo.

2.1.3 Avarias e Desgastes das Ferramentas

Segundo Machado & Silva, 2004, a destruição da ferramenta ocorre através de três formas: **avaria**, **desgaste** e **deformação plástica**.

- **Avaria**: processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da mesma. A avaria promove a perda de massa da ferramenta na maioria dos casos.

- **Desgaste**: de acordo com a norma ISO 3685 (1993), o desgaste em ferramentas de corte ocorre quando há mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. No desgaste ocorre a perda de massa de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas. Assim, haverá a perda gradual do poder de corte, ocasionando um aumento de potência requisitada da máquina operatriz.

- **Deformação plástica:** é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa ocasionado pelo cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das mesmas. A deformação plástica também pode ser considerada como uma forma de desgaste, uma vez que promove a mudança da geometria da ferramenta, que pode acarretar a destruição parcial ou total da aresta de corte (Trent & Wright, 2000). Para evitá-la, em muitos casos, deve-se selecionar uma classe de ferramenta com maior dureza e/ou reduzir a velocidade de corte, desde que não seja menor do que a mínima indicada pelo fabricante.

2.1.3.1 Tipos de Avarias e Desgastes

Principais tipos de avarias e desgastes (Diniz et al, 2003):

- **Lascamento:** é um tipo de avaria da ferramenta de corte. Partículas grandes da ferramenta são retiradas de uma só vez. Ocorre, principalmente, em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada (pequeno ângulo de cunha). Prejudica o acabamento superficial da peça e pode levar à quebra ou colapso da ferramenta. Para evitar ou amenizar o lascamento, pode-se trabalhar com uma ferramenta mais tenaz, aumentar o raio de ponta e/ou o ângulo de cunha, suavizando o primeiro contato da ferramenta com a peça;

- **Trinca:** outro tipo de avaria da ferramenta. É causada pela variação de temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. As trincas que ocorrem perpendicularmente à aresta de corte são de origens térmicas e quando paralelas à aresta de corte são de origens mecânicas. O crescimento da trinca leva a quebra da ferramenta. Para se evitar a formação de trincas de origem mecânica pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço de corte e aumentar a estabilidade da usinagem. Para se evitar trincas de origem térmicas, evitar o uso de fluido de corte aliado, também, ao uso de uma ferramenta mais tenaz;

- **Desgaste de flanco:** ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. O desgaste é acelerado com velocidade de corte muito alta ou muito baixa na presença de aresta postiça de corte, com resistência insuficiente da ferramenta com o fenômeno da abrasão. Para minimizar isto deve-se trabalhar com velocidades adequadas e selecionar uma ferramenta que resista mais ao desgaste;

- **Desgaste de cratera:** é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre esta e o cavaco, principalmente através do fenômeno da difusão. O aumento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta quando

tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco. Para evitar esse tipo de desgaste recomenda-se utilizar metal duro revestido ou ferramentas cerâmicas;

- **Quebra:** é o resultado final da continuação das avarias e desgaste ou da soma dos dois. A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na mesma, mas também no porta-ferramenta e na própria peça. A quebra também pode ser resultante de uma má especificação da ferramenta ou das condições inadequadas de trabalho.

2.1.3.2 – Mecanismos Causadores dos Desgastes

Segundo Diniz et al, 2003, os principais fenômenos causadores dos desgastes são:

- **Abrasão mecânica:** a abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela atua mais no desgaste de flanco, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco. O desgaste pela abrasão é incentivado por partículas duras presentes no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Outra fonte de partículas abrasivas é o mecanismo de aderência.

- **Aderência:** a aderência é formada por um extrato metálico quando duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas de um metal migram para a superfície do outro. Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, a profundidade de corte irregular ou falta de rigidez, promovem o fluxo irregular do cavaco e facilitam o mecanismo de desgaste por aderência. Isto pode ser amenizado com a utilização de fluido de corte com efeito lubrificante e com o revestimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio.

A aresta postiça de corte é formada pela aderência do cavaco à aresta de corte, modificando o comportamento desta em relação à força de corte, ao acabamento superficial da peça e ao desgaste da ferramenta. Em determinado momento a aresta postiça se rompe bruscamente, causando perturbação dinâmica e arrancando partículas da superfície de folga da ferramenta, gerando um desgaste de flanco muito grande, mesmo com baixas velocidades.

A forma do desgaste de flanco na presença da aresta postiça de corte é diferente da forma que se observa normalmente. Enquanto nas velocidades de corte maiores, onde não há aresta postiça de corte, a marca do desgaste é, aproximadamente, paralela à direção de corte; quando ela ocorre se apresenta inclinada em relação à direção de corte.

- **Difusão:** a difusão entre ferramenta e cavaco é ativada pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, e também depende da duração do contato e da afinidade físico-química dos metais envolvidos na zona de fluxo.

- **Oxidação:** altas temperaturas e a presença de ar e água contida nos fluídos de corte, gera oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito, causando o desgaste especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o desgaste de entalhe.

2.1.3.3 – Medição dos Desgastes das Ferramentas

Por convenção, a medida dos desgastes sempre é feita no plano ortogonal da ferramenta. Existem duas medidas para isto, uma medida do desgaste na superfície de saída da ferramenta e uma medida de desgaste na superfície de folga da mesma. Na superfície de saída, têm-se o desgaste de cratera. Mede-se a profundidade de cratera (K_T), a largura (K_B) e a distância do centro da cratera à aresta de corte (K_M) (Figura 2.3). Na superfície de folga têm-se o desgaste de flanco. Neste tipo de desgaste é medida a largura do mesmo (V_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco ($V_{B\text{máx}}$). Os valores desses parâmetros de medida são estipulados pela Norma ISO 3685 (1993).

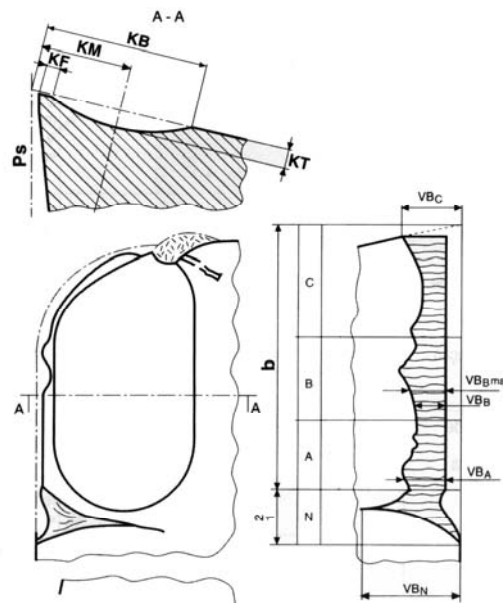


Figura 2.3 – Desgaste de Flanco e de Cratera (Norma ISO 3685)

2.1.4 – Vida da Ferramenta

Segundo Ferraresi (1977), a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente definido., após a qual a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. O fim de vida de uma ferramenta de corte é definido pelo tamanho ou nível de desgaste estabelecido dependendo de algumas características:

- qualidade ou quebra da aresta cortante,
- temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- tolerâncias dimensionais fora do padrão especificado;
- acabamento superficial não satisfatório;
- aumento excessivo da força de usinagem;
- critério para avaliar a usinabilidade do material.

2.1.4.1 – Fatores que influenciam na Vida de uma Ferramenta

Alguns fatores são fundamentais no processo de usinagem, podendo-se citar, como importantes, as características da peça a ser usinada, o tipo de ferramenta especificada, as condições de corte e da máquina e o fluido de corte (Machado & Silva, 2004). Os fatores relativos à peça que afetam a vida da ferramenta são:

- composição química;
- tamanho de grão e microestrutura;
- fusão e processo de fundição;
- tipo de fabricação de base: forjado, laminado, trefilado;
- tipo de tratamento térmico: recozimento, normalização, têmpera, revenimento;
- propriedades mecânicas: resistência à tração, ductilidade, dureza, encruamento;
- dimensão e forma.

Os fatores relativos à ferramenta de corte que afetam a vida da ferramenta são:

- composição química da ferramenta;
- tratamento térmico;
- dureza e resistência ao desgaste;
- geometria;
- tenacidade.

Os fatores relativos às condições de corte e à máquina que afetam a vida da ferramenta são:

- velocidade de corte;
- avanço de corte;
- profundidade de corte;
- tipo de máquina;
- rigidez do equipamento.

Os fatores relativos ao fluido de corte que afetam a vida da ferramenta são:

- propriedades refrigerantes;
- propriedades lubrificantes;
- formas de aplicação.

O bom aproveitamento do potencial da vida da ferramenta depende da boa conciliação de todos os fatores citados. No entanto, o fator mais significativo, segundo Machado & Silva, 2004, é a velocidade de corte, pelo fato de ser a principal causadora da progressão do desgaste, seguindo-se do avanço e, por último, a profundidade de corte.

2.2 – Acabamento Superficial

A qualidade da superfície de uma peça é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial (Silveira, 1983). Estas propriedades são influenciadas durante a operação de usinagem devido a ação de alguns fatores:

- pressão da ferramenta contra a peça;
- atrito da superfície de incidência contra a peça;
- atrito do material na região de deformação plástica;
- calor gerado no corte;
- vibração da máquina e ferramenta;
- fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- geometria da ferramenta;
- condições de usinagem, principalmente a velocidade de corte.

2.2.1 – Caracterização de uma Superfície

Algumas definições importantes devem ser consideradas em relação à superfície de uma peça acabada. A norma NBR 6405 define a caracterização das superfícies e sua qualificação da seguinte forma:

- **superfície geométrica**: superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Por exemplo, superfície plana, cilíndrica, etc., que sejam por definição perfeitas. Trata-se apenas de uma referência;

- **superfície real**: superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção. Por exemplo: torneamento, retífica, ataque químico, etc. Superfície que pode ser vista e tocada;

- **superfície efetiva**: superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição. É importante esclarecer que existem diferentes sistemas e condições de medição que apresentam diferentes superfícies efetivas;

- **perfil geométrico**: interseção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo: uma superfície plana perfeita cortada por um plano perpendicular originará um perfil geométrico que será uma linha reta;

- **perfil real**: interseção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície que resultou do método de usinagem e originará uma linha irregular;

- **perfil efetivo**: imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico sem qualquer filtragem e com as limitações atuais da eletrônica;

- **perfil de rugosidade**: obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um registro gráfico depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual geralmente se sobrepõe a rugosidade.

2.2.2 – Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é definida pelas irregularidades finas ou erros microgeométricos da ação inerente do processo de corte. A rugosidade superficial é utilizada para controlar o processo de fabricação, sendo avaliada com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro, em diversas considerações.

2.2.2.1 – Avaliação da Rugosidade

A rugosidade é avaliada pelos seguintes parâmetros:

- **rugosidade média (R_a)**: média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual a soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m) (figura 2.4). Esse parâmetro é conhecido como R_a (*roughness average*) que significa rugosidade média. O desvio médio aritmético é expresso em micrometro (μm).

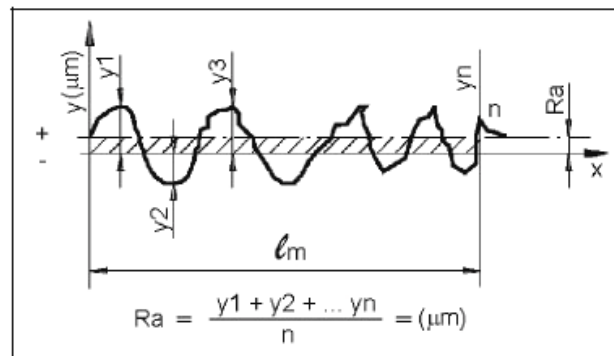


Figura 2.4 – Percurso de Medição de rugosidade R_a

- **rugosidade máxima (R_y)**: definida como o valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresentam no percurso de medição (l_m). Por exemplo, na figura 2.5, o maior valor parcial é o Z_3 , que está localizado no 3º *cut off* (comprimento de medição), e que corresponde à rugosidade R_y .

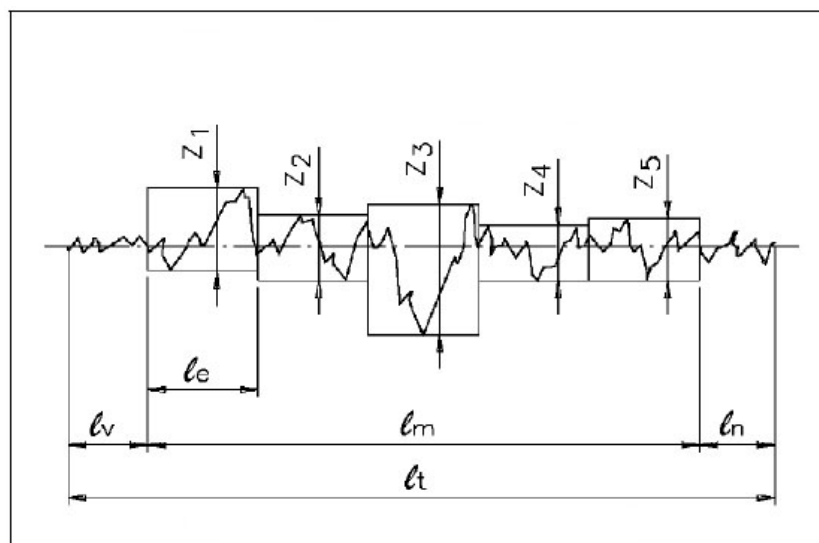


Figura 2.5 – Rugosidade R_y (maior valor em Z_3)

- **rugosidade total (R_t):** corresponde a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m), independente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). Pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z_1 (figura 2.6), e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z_3 . O parâmetro R_t tem o mesmo emprego do R_y , mas com maior rigidez, pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação.

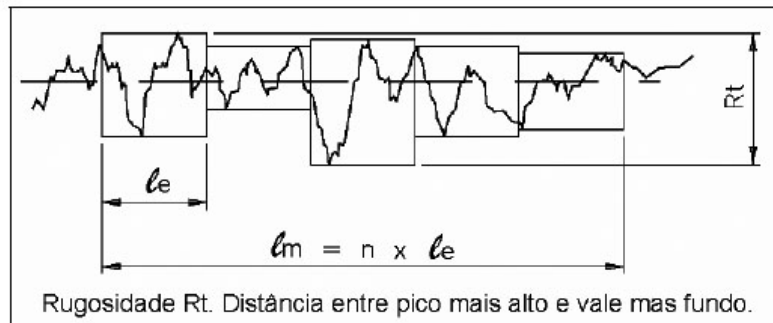


Figura 2.6 – Rugosidade R_t

- **rugosidade média (R_z):** é a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut off*). Este valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem (l_e) (Figura 2.7).

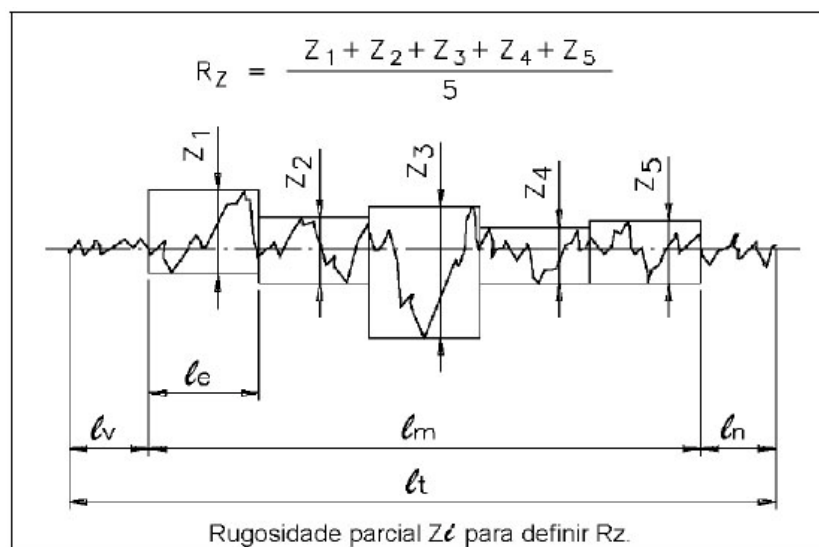


Figura 2.7 – Rugosidade R_z

A rugosidade R_a é um parâmetro largamente utilizado na avaliação da qualidade das superfícies geradas e na adequação das condições de usinagem. A utilização dos parâmetros apresentam algumas vantagens e desvantagens que devem ser consideradas adequadamente [Mitutoyo, 2005]:

Vantagens do Parâmetro Ra

- é o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo e aplicável à maioria dos processos de fabricação;
- os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor;
- para a maioria das superfícies o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude.

Desvantagens do Parâmetro Ra

- o valor de Ra em um percurso de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal efeito;
- o valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil, desta forma poderemos ter um mesmo resultado para superfícies originadas por processos de usinagem diferentes;
- nenhuma distinção é feita entre picos e vales;
- para alguns processos de fabricação onde há uma frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro até níveis inaceitáveis.

Obs.: Neste trabalho foi utilizado o parâmetro Ra como referência para as medições.

2.2.3 - Ondulações

São irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que o *cut-off* (aproximadamente 1mm)(Figura 2.8). Podem ser causadas por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou peça, devido a forças e temperaturas de corte.

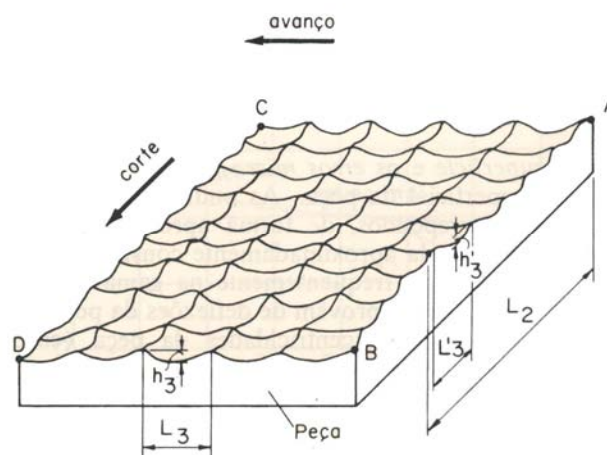


Fig. 2.8 – Representação Esquemática das Ondulações (Ferraresi, 1970)

2.2.4 – Falhas na Superfície

São interrupções na topografia típica da superfície de um componente, não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes ao processo de corte, tais como: inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir durante o processo de corte.

2.2.5 – Marcas de Avanço

São marcas que denotam as direções predominantes das irregularidades superficiais. Elas dependem da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina e da natureza do movimento relativo entre as duas.

2.3 – Influência dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial

O acabamento superficial é influenciado por diversos fatores durante a usinagem. A adequada especificação depende da coerência do técnico e/ou engenheiro de processos. Segundo Machado & Silva, 2004, a rugosidade é menor quando

- deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- a ponta da ferramenta não é aguda;
- a ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas, evitando desvios;
- o material da peça é uniforme, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- o eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgaste;
- a aresta de corte não possui quebras;
- não há aresta postiça de corte.

A combinação avanço e profundidade de corte têm grande influência no acabamento superficial. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o aumento do avanço. A profundidade de corte aumenta as forças e, portanto as deflexões. As alturas das ondulações também são aumentadas com a profundidade de corte. O mais indicado é trabalhar com velocidades de corte acima da crítica. Assim, evita-se a formação da aresta postiça de corte.

Em peças delgadas (grande comprimento e pequeno diâmetro) as forças elásticas e dinâmicas são mais sensíveis, ressaltando, assim, as ondulações. Ao contrário, para peças de grandes seções transversais e mais rígidas, as ondulações são menores.

A geometria da ferramenta tem influência significativa na qualidade da superfície gerada, destacando-se especialmente as características:

- **ângulo de saída:** quanto maior for o ângulo de saída, menor será a força de usinagem. Portanto as ondulações e deflexões serão menores;

- **ângulo de folga:** deve ser suficiente para prevenir o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. O atrito gera forças adicionais que causam deflexões. O contato pelo atrito tende a transferir o perfil de desgaste da ferramenta para a superfície usinada;

- **raio de ponta:** deve ser suficientemente grande para diminuir o efeito das marcas do avanço, com apreciável melhora no acabamento. Entretanto um raio muito grande pode gerar vibração no processo;

- **ângulo de posição:** os efeitos causados por este ângulo são pequenos, mas uma redução diminui as marcas do avanço e melhora o escoamento do cavaco e, por consequência, o acabamento. Ângulo de posição muito pequeno pode causar vibrações.

Outros efeitos também devem ser levados em consideração, como a rigidez da máquina ferramenta, ausência de erros de alinhamento e precisão de movimentos, para não haver interferência no acabamento superficial.

Pode-se citar, também, as características desejadas em uma máquina operatriz, como a potência motriz suficiente para manter a velocidade e o avanço requeridos, considerando uma folga inerente ao processo; adequada resiliência para evitar deflexões; rigidez e amortecimento contra vibrações levando em conta a boa fundação (base) do equipamento; bom alinhamento para precisão na fabricação e suportes rígidos para a peça e ferramenta.

O fluido de corte (aplicado em alguns casos) tende a diminuir o desgaste da ferramenta e o atrito desta com a peça ou cavaco, auxiliando, também, na melhora do acabamento superficial. Por outro lado, considerando o fluido como refrigerante, pode-se ter um aumento da força de usinagem e da rugosidade da peça. Segundo Machado & Silva, 2004, um revestimento adequado aplicado sobre uma ferramenta pode atuar como lubrificante, diminuir a afinidade química entre o material da peça e da ferramenta, contribuindo para a melhora do acabamento superficial.

2.4 – Cavaco

Cavaco é o material retirado da peça, pela ferramenta de corte, durante o processo de usinagem.

De acordo com Diniz et al, 2000, os cavacos formados em processos de usinagem podem ser classificados segundo três tipos: contínuo, de cisalhamento e de ruptura. O primeiro se caracteriza por lamelas justapostas em uma disposição contínua e agrupada, formando-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos com pequeno e médio avanço. O segundo tipo

apresenta a mesma configuração, porém as lamelas são mais definidas e estão parcialmente soldadas ao longo do cavaco, constituídos de grupos lamelares distintos e justapostos; estes elementos foram cisalhados e parcialmente soldados em seguida. Já o terceiro tipo tem como característica principal a ruptura completa dos segmentos lamelares, constituídos de fragmentos arrancados da peça usinada. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão.

Os cavacos também podem ser diferenciados quanto à sua forma, que pode ser em fita, helicoidal, espiral e em lascas. O cavaco em fita pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado. Geralmente a forma mais conveniente é o helicoidal. O cavaco em lascas é preferido quando houver pouco espaço disponível ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante (por exemplo, no caso de furação profunda).

O cavaco pode ser um elemento de pesquisa extremamente importante, apesar de os profissionais que lidam com fabricação muitas vezes não observarem sua devida importância. Em geral, o cavaco na indústria só é levado em conta quando interfere negativamente no produto final, riscando-o na própria máquina-ferramenta pelo excesso de volume ou por causar dificuldade no armazenamento ou descarte. Obviamente que o principal resultado a ser alcançado é o produto usinado e não o material removido do mesmo. Entretanto, o estudo do cavaco pode trazer informações importantes ao processo e, conseqüentemente, a sua otimização.

O fenômeno de formação do cavaco é um fenômeno intermitente, inclusive na formação do cavaco dito contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento para cada porção de material removido, cujo formato pode ser alterado em função das condições de usinagem.

Pode-se provocar a mudança na forma do cavaco alterando-se as condições de usinagem, mudando-se o ângulo da superfície de saída ou adicionando-se um dispositivo (quebra-cavacos) na ferramenta de corte.

2.5 – Forças e Potência na Usinagem

As forças e potência de usinagem devem ser conhecidas para permitir a seleção adequada da máquina ferramenta e para o projeto de dispositivos de fixação ou de ferramentas. Devido a vários fatores envolvidos, a predição da força de corte e potência ainda baseia-se em dados experimentais; a variação no coeficiente deve-se à variação de propriedades do material usinado, atrito, fluidos de corte e outras variáveis do processo.

2.5.1– Força de Usinagem

Denomina-se força de usinagem a força total que atua sobre a cunha cortante de uma ferramenta e considerada agindo em direção e sentido sobre a ferramenta.

As componentes da força de usinagem (P_u) são de fundamental importância para a operação de torneamento. As principais componentes que devem ser consideradas são: força de corte, força de avanço e força de profundidade de corte. As direções destes componentes definem as arestas de um triedro triortogonal, cujo vértice constitui o ponto de referência da ferramenta, onde a força é aplicada (Ferraresi, 1977). Uma representação esquemática das forças de usinagem é ilustrada na figura 2.9.

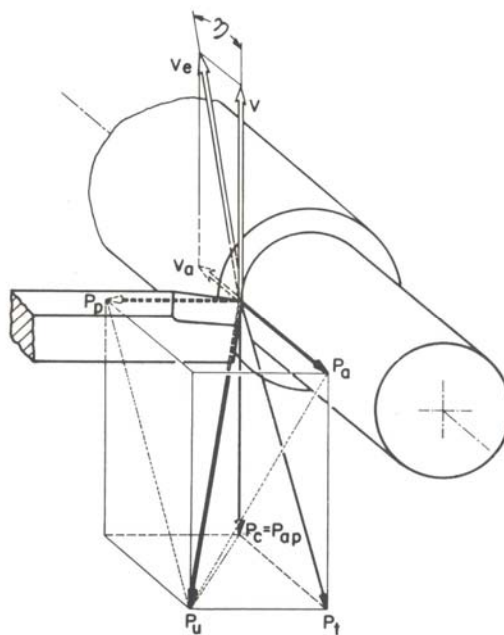


Figura 2.9 – Componentes da Força Principal de Corte P_u

$$P_u = P_c^2 + P_a^2 + P_p^2 \quad (1)$$

Onde:

a) força de corte P_c (F_c) – também chamada força principal de corte. É a projeção da força de usinagem P_u (F_u) sobre a direção de corte (dada pela velocidade de corte);

b) força de avanço P_a (F_f) – a força de avanço é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção de avanço;

c) força passiva P_p (F_p) – é também conhecida como força de profundidade. É a projeção da força de usinagem F_u sobre uma perpendicular ao plano de trabalho.

Segundo Stemmer (1989), numa consideração inicial e simplificada, pode-se estabelecer a seguinte correlação entre a força principal de corte F_c e a área da seção transversal $A = a_p \times f$:

$$F_c = K_s \cdot A \quad (2)$$

em que K_s é a pressão específica de corte em (N/mm²)

Em algumas bibliografias encontra-se, freqüentemente, como elemento para a determinação da potência de corte, o **fator de remoção de metal K_n** , o qual é definido como o volume de metal removido por unidade de potência na unidade de tempo.

Tem-se, ainda, que o volume de metal em mm³ removido por minuto, com a potência de corte de um (01) Kw é igual ao quociente de 60×10^6 , pela pressão específica de corte (N/mm²).

A Potência de Corte (P_c) é a potência disponível no gume da ferramenta e consumida na operação de remoção de cavacos. É ela que interessa nos cálculos de forças e pressões específicas de corte.

A Potência de Acionamento (P_a) é a potência fornecida pelo motor à máquina ferramenta. Ela difere da potência de corte pelas perdas que ocorrem por atrito nos mancais, engrenagens, sistemas de lubrificação e refrigeração, sistemas de avanço, etc.

A Potência de Avanço, embora seja uma parcela utilizada na operação de corte, no torneamento é usualmente tão pequena em relação à potência de remoção de cavacos, que, na prática, as vezes, compensa reuni-la no grupo das “perdas”.

A Potência em Vazio é a potência consumida pela máquina ferramenta ligada, com o mecanismo de avanço funcionando, porém sem que tenha nenhuma operação de corte. Cabe portanto a definição de Rendimento do equipamento:

$$\eta = \frac{P_c}{P_a} 100 \quad (3)$$

Um valor médio de rendimento de máquinas ferramentas é da ordem de 75%. Em velocidades muito altas o rendimento pode cair muito abaixo deste valor.

Influência das Variáveis de Processo na Força e Potência de Corte (Stemmer, 1989)

- **velocidade de corte:** todos os pesquisadores são unânimes em observar que na faixa usual de velocidades de corte, estas quase não têm influência sobre a pressão específica (K_s) e sobre a força de corte F_c . Para velocidades muito grandes, parece haver uma tendência de diminuição da força de corte, o que tem ensejado a realização de ensaios.

- **dimensões de corte:** as dimensões de corte são os fatores de influência preponderantes na força e na potência consumida. De um modo geral, verifica-se que a pressão específica de corte diminui com as dimensões do cavaco, sendo esta diminuição mais notável para um aumento do avanço do que para um aumento da profundidade de corte. Considerando a pouca influência da profundidade de corte, muitos fabricantes usam tabelas para as pressões específicas de corte, em que, além do material, aparece o avanço como variável.

Kienzle propõe uma fórmula bastante simples, visando a aplicação prática:

$$F_c = K_{s\ 1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc} \quad (4)$$

Onde:

h = espessura de corte

b = largura de corte

$K_{s\ 1.1}$ = pressão específica de corte para uma área de corte de $A=b.h = 1.1\text{ mm}^2$

Influência da Ferramenta de Corte na Força e Potência de Corte

a) Influência dos Ângulos da Ferramenta

- **ângulo de incidência**: em virtude de variar muito pouco nos casos usuais de usinagem, não tem grande influência na força de corte. Se houver necessidade de ângulos de incidência maiores, pode-se levar em conta o seu efeito calculando uma redução de 1% na força de corte por grau de aumento de ângulo.

- **ângulo de saída**: tem grande influência na força de corte. Observa-se que, segundo Kronenberg, a força de corte aumenta quase 50% quando o ângulo de saída varia de $+30^\circ$ para um ângulo negativo de -15° .

Pode-se computar o efeito do ângulo de saída como segue

- correções só devem ser calculadas para variações de $\pm 10^\circ$ em relação aos dados experimentais;

- para valores menores que os experimentais, o aumento da força de corte corresponde a 2% por grau de variação do ângulo de saída;

- para valores maiores que os experimentais, a redução da força de corte corresponde a 1,5% por grau de variação do ângulo de saída.

b) Desgaste da Ferramenta

Poucos dados experimentais correlacionam a força de corte com o grau de desgaste da ferramenta. Normalmente os dados experimentais referem-se à ferramenta afiada ou nova. Com o desgaste da ferramenta devem-se contar com valores de 50 a 100% maiores para a força de corte.

c) Material da Ferramenta

Salvo raras exceções, a força de corte e a potência consumida são independentes do material da ferramenta. Isto é válido tanto para a ferramenta de aço carbono, como de aço rápido, ligas fundidas ou metal duro. Para ferramentas de diamante, entretanto, tem-se encontrado valores excepcionalmente menores.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliação do desempenho de uma mesma ferramenta com alteração geométrica na superfície de saída, submetida as mesmas condições de corte, foram realizados ensaios experimentais.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Usinagem da Unisinos, em parceria com a Fundação Liberato e com o Laboratório de Usinagem – UFRGS, e apoio das Empresas Sandvik e Aços Finos Piratini, para avaliação do desempenho de uma mesma ferramenta com alteração geométrica na superfície de saída, submetida as mesmas condições de corte. Foram realizados ensaios de curta duração com, aproximadamente 15s, com aquisição simultânea e contínua das forças de corte e avanço, com medição da rugosidade média de cada superfície usinada. Os cavacos obtidos, também foram coletados para um comparativo de resultados no processo.

3.1 Material ensaiado

Neste trabalho foram ensaiados corpos de prova de mesmo material: aço ABNT 1045, recozidos a uma temperatura de 860°C e com dureza superficial média de acordo com tabela 3.1, dentro da especificação do fabricante e fornecedor Aços Finos Piratini. A verificação da dureza superficial dos corpos de prova foi realizada na totalidade dos mesmos, somente antes da realização dos ensaios. As condições de corte aplicadas não exigiram uma reavaliação das propriedades mecânicas. A figura 3.1 ilustra a região onde foram executadas as medições de dureza.

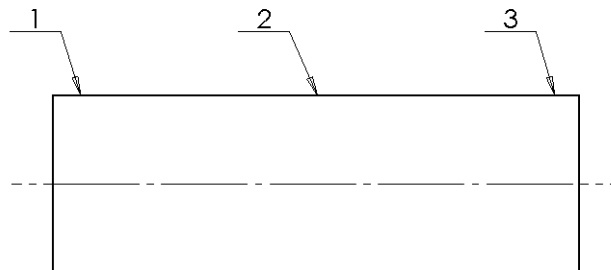


Figura 3.1 – Corpo de Prova

Tabela 3.1 – Medições de Dureza dos corpos de prova

Corpo de Prova	Medição de Dureza HB		
	1	2	3
1	170	184	187
2	184	177	195
3	207	202	191
4	215	202	198

3.2 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram de diâmetros variados, fazendo-se o recálculo da rotação da máquina em função da redução do diâmetro para uma velocidade de corte constante, tendo no final um menor número de peças usinadas. Iniciou-se com a peça cilíndrica sem rebaiços, de diâmetro 61mm e comprimento de 180mm com furo de centro nas duas faces. Nos ensaios seguintes, alterou-se a especificação da rotação para o aproveitamento do mesmo segmento longitudinal do corpo de prova. Todos os ensaios foram realizados com peças fixadas entre placa e ponto para uma maior segurança no trabalho, e certeza que não haveria influência do tipo vibração.

3.3 Ferramentas de Corte

Foram testados dois tipos de pastilhas com o mesmo suporte de ferramenta Sandvik PSBNR 2525 M12 (figura 3.2). As pastilhas: uma com superfície de saída sinuosa (quebra-cavacos) SNMG 120408 PM 4015 (figura 3.3.a) e outra lisa SNMA 120408 KR 3215 (figura 3.3.b), também da Sandvik, submetidas às mesmas condições de trabalho, com mesmos avanços e velocidades de corte. Em virtude de se ter realizado ensaios de curta duração, não foram atingidos níveis de desgastes que necessitassem troca de ferramenta.



Figura 3.2 – Suporte com $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$ e $\kappa = 75^\circ$



Figura 3.3 – Inseto Sinuoso (a) e liso (b)

A figura 3.4 mostra o detalhe do perfil quebra-cavaco.

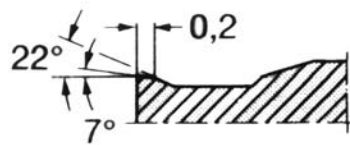


Figura 3.4 – Detalhe do Quebra-cavaco

3.4 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios estão apresentados na tabela 3.3. As velocidades de corte foram definidas respeitando-se o limite da máquina utilizada, uma rotação máxima de 1400 rpm. Por este fato, optou-se pelas velocidades de 220 e 150 m/min, apesar de não estarem dentro da faixa estipulada pelo fabricante, considerando a informação do mesmo no sentido de não haver variação nos resultados em função dos ensaios serem de curta duração. Quanto aos avanços e profundidades de corte, utilizaram-se valores recomendados pelo fabricante dos inserts (tabela 3.2), sempre respeitando o limite de potência do torno mecânico.

Tabela 3.2 – Dados de Corte dos Inserts

Característica	SINUOSA	LISA
ap (mm)	0,50~6,00	0,20~8,00
fn(mm/rot)	0,15~0,50	0,15~0,60
Vc (m/min)	320~490	265~395

Tabela 3.3 – Parâmetros de Corte

ENSAIO	VELOCIDADE DE CORTE	ap	fn
1	220	1	0,102
2		1	0,205
3		2	0,102
4		2	0,205
5		1	0,102
6		1	0,205
7		2	0,102
8		2	0,205
9	150	1	0,102
10		1	0,205
11		2	0,102
12		2	0,205
13		1	0,102
14		1	0,205
15		2	0,102
16		2	0,205

3.5 Equipamentos

Os testes de torneamento foram executados em um torno mecânico marca Romi, modelo IH-40 (Figura 3.5), com potência de 15 Kw, comprimento útil de 2000 mm, diâmetro máximo usinável de 400 mm e rotação máxima de 1400 rpm.



Figura 3.5 – Torno Mecânico Romi IH-40

Na medição das forças de usinagem utilizou-se um dinamômetro Kistler modelo 9263 com condicionador de sinais de saída de 0 a 10V. A este foi conectada uma placa de aquisição de dados (*Analog I/O and Digital I/O Board CIO-DAS08/JR*) e desenvolvido um software de captura em linguagem “*Visual Basic*”, específico para a coleta de dados. O dinamômetro executou a medição das forças nos eixos longitudinal (força de avanço F_f) e tangencial (força de corte F_c) através do efeito piezoelétrico. No software desenvolveu-se escalas de 0 a 500 N, 0 a 1000 N e 0

a 2000 N para uma melhor análise das forças menores e maiores nas várias condições de trabalho (Figura 3.6).



Figura 3.6 – PC com Software para Coleta de Dados

As forças nos eixos longitudinal e tangencial foram capturadas através dos condicionadores de sinais conectados aos três canais disponíveis na placa de interface com a placa de aquisição de dados (CIO-DAS08/JR) instalada no barramento ISA do Computador Pessoal, conforme ilustra a Figura 3.7. Dos três canais disponíveis foram utilizados somente dois adaptados às tensões de entrada na placa de aquisição de dados e na de interface. No software para aquisição de dados são adquiridos e tratados os sinais referentes aos esforços de corte.



Figura 3.7 – Placa de Interface acoplada a placa de aquisição de dados no PC.

Os valores analógicos, proporcionais as forças de corte e avanço, são convertidos em valores digitais de 12 bits pela placa de aquisição de dados. A Figura 3.8 apresenta a interface principal do Software de Captura para amostragem dos três canais multiplexados no tempo.

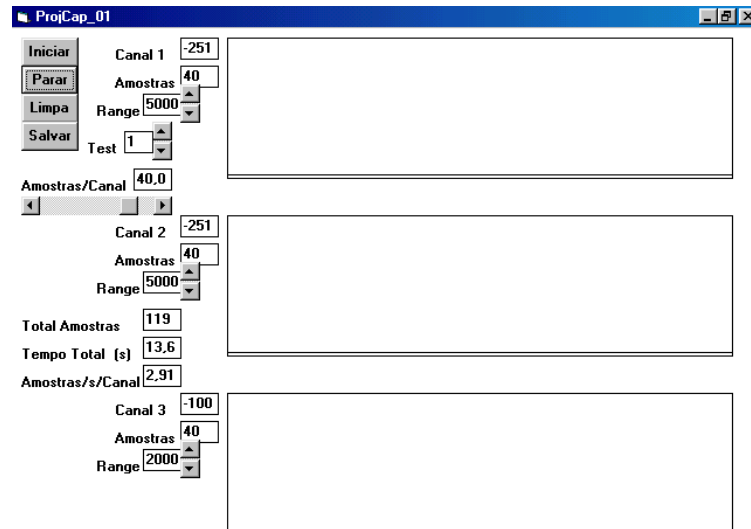


Figura 3.8 – Tela principal do Software de Captura.

O Software de Captura foi ajustado para 40 amostras por canal em um intervalo de tempo de 14 segundos, desta forma cada um dos canais apresenta aproximadamente 3 amostras por segundo na região de gráfico correspondente. Os valores adquiridos são armazenados temporariamente em vetores dimensionados na memória do PC, para cada um dos canais.

Completado um ciclo de captura de 40 amostras por canal, os valores armazenados em vetores na memória do PC, podem ser salvos em arquivos do tipo texto, que posteriormente serão convertidos em Tabelas do *MicroSoft Excel* e respectivos gráficos.

Para medição de rugosidade utilizou-se um rugosímetro Qualitest modelo TR-200 (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Rugosímetro Qualitest TR-200

3.6 Procedimento Experimental

O procedimento de teste aplicado para as diferentes ferramentas de corte seguiu a seguinte metodologia.

1. Usinagem do primeiro corpo de prova de diâmetro 61mm na velocidade de corte especificada até o tempo de, no máximo 15s, permitindo-se, assim, executar uma adequada medição de rugosidade e demais análises necessárias pelo adequado comprimento de corte, sem qualquer avaria ou desgaste da ferramenta de corte;

2. Coleta dos dados das forças de corte e avanço simultaneamente à usinagem, através da placa de aquisição e do software desenvolvido;

3. Medição da rugosidade Ra da superfície usinada;

4. Coleta dos cavacos produzidos no respectivo corte;

5. Recálculo da nova rotação para outro diâmetro;

6. Repetição de novo ensaio (itens 1 a 4).

4. RESULTADOS

São apresentados a seguir os dados levantados experimentalmente para os parâmetros referentes aos esforços desenvolvidos e cavacos obtidos na operação de torneamento. Os dados de esforços correspondem a um total de 40 amostras, sendo que foram eliminadas as iniciais e as finais, resultando em 20 efetivas.

4.1 Esforços de Avanço e Corte e Cavacos Obtidos

As tabelas a seguir ilustram os resultados dos esforços medidos e cavacos obtidos nas operações de usinagem considerando-se variações de avanço (f_n) e profundidade de corte (a_p). Os esforços correspondem a média final calculada para cada ensaio, sendo que os gráficos completos encontram-se disponíveis no apêndice deste trabalho.

Tabela 4.1 – Resultados para $V_c = 220\text{m/min}$

















		SINUOSA			LISA		
		Ff (N)	Fc(N)	Cavaco	Ff (N)	Fc(N)	Cavaco
ap=1	fn=0,102	200,5	295,5		233,0	307,4	
	fn=0,205	231,8	440,5		281,4	499,7	
ap=2	fn=0,102	387,4	536,3		461,3	587,8	
	fn=0,205	457,5	842,1		603,2	984,5	

Tabela 4.2 – Resultados para $V_c = 150\text{m/min}$

		SINUOSA			LISA		
		Ff (N)	Fc(N)	Cavaco	Ff (N)	Fc(N)	Cavaco
ap=1	fn=0,102	201,2	309,4		225,5	317,7	
	fn=0,205	240,1	474,9		298,0	527,2	
ap=2	fn=0,102	402,6	555,6		476,5	622,8	
	fn=0,205	484,0	886,5		671,9	1018,3	

4.2 Rugosidade

São mostrados a seguir os parâmetros relativos às rugosidades em função do avanço e da profundidade de corte, com análises comparativas entre as duas pastilhas testadas, considerando as situações de velocidade de corte de 220 e 150m/min, com avanços de 0,102 e 0,205mm/rot e profundidades de 1 e 2mm.

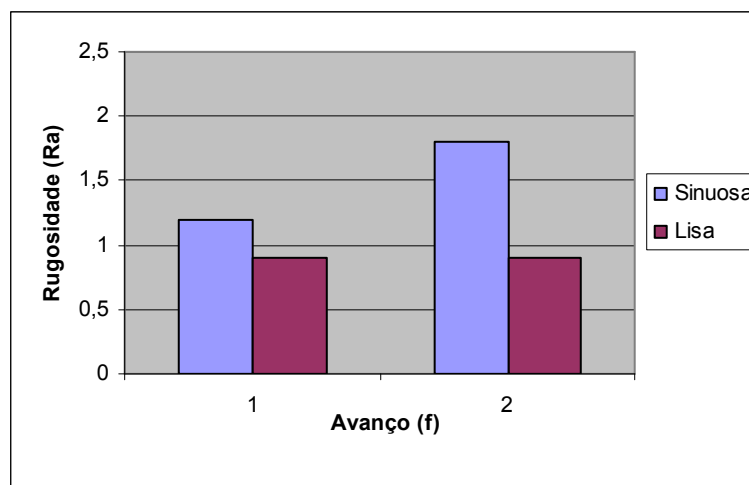


Figura 4.1 – Rugosidade x Avanço(1 para $f_n = 0,102\text{mm/rot}$ e 2 para $f_n = 0,205\text{mm/rot}$)
 $V_c=220\text{m/min}$ e $a_p=1\text{mm}$.

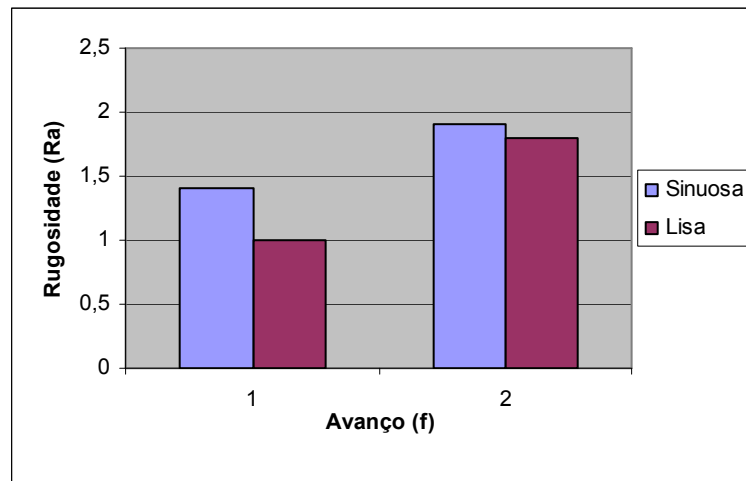


Figura 4.2 – Rugosidade x Avanço(1 para $f_n = 0,102\text{mm/rot}$ e 2 para $f_n = 0,205\text{mm/rot}$)
 $V_c=220\text{m/min}$ e $a_p=2\text{mm}$

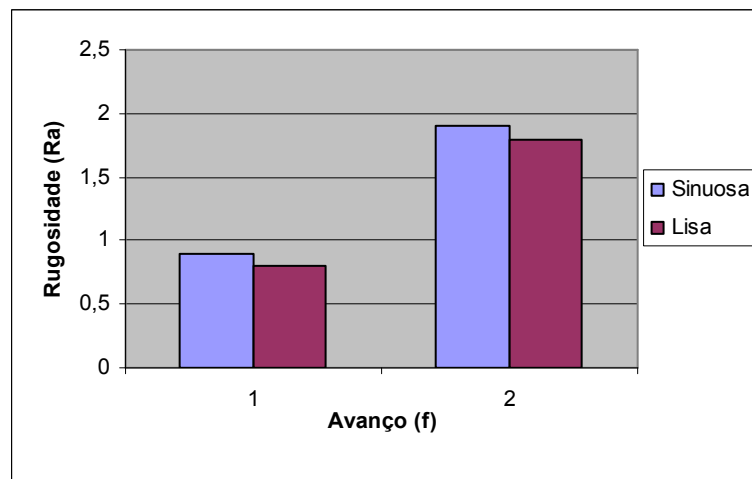


Figura 4.3 – Rugosidade x Avanço(1 para $f_n = 0,102\text{mm/rot}$ e 2 para $f_n = 0,205\text{mm/rot}$)
 $V_c=150\text{m/min}$ e $a_p=1\text{mm}$

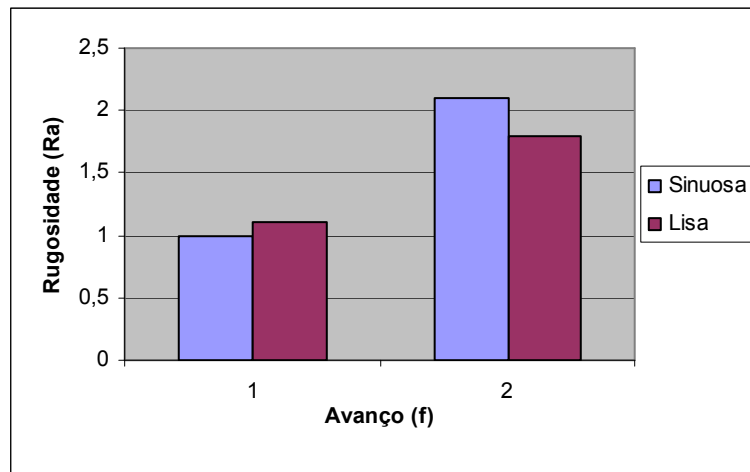


Figura 4.4 – Rugosidade x Avanço(1 para $f_n = 0,102\text{mm/rot}$ e 2 para $f_n = 0,205\text{mm/rot}$)
 $V_c=150\text{m/min}$ e $a_p=2\text{mm}$

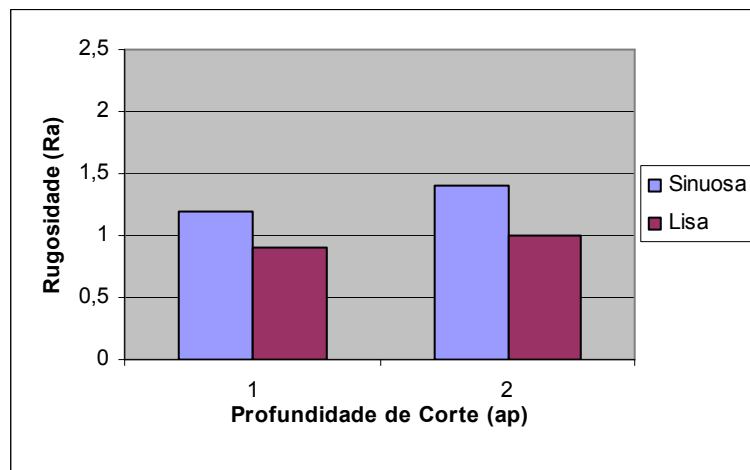


Figura 4.5 – Rugosidade (μm) x Profundidade de Corte (mm)
 $V_c=220\text{m/min}$ e $f_n=0,102\text{mm/rot}$.

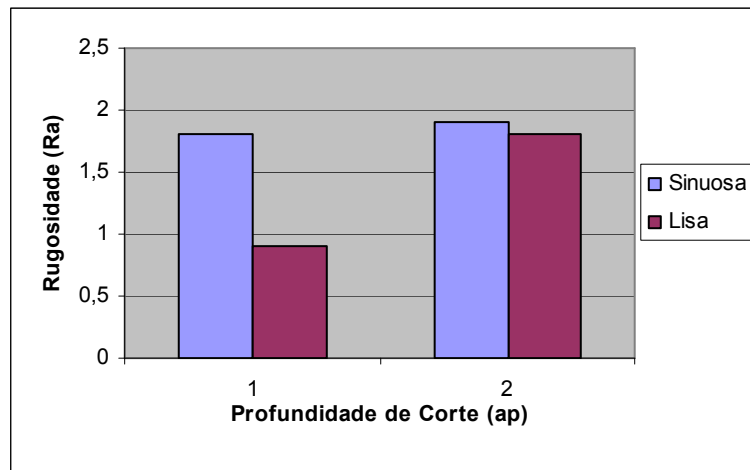


Figura 4.6 – Rugosidade (μm) x Profundidade de Corte (mm)

$V_c=220\text{m/min}$ e $f_n=0,205\text{mm/rot}$

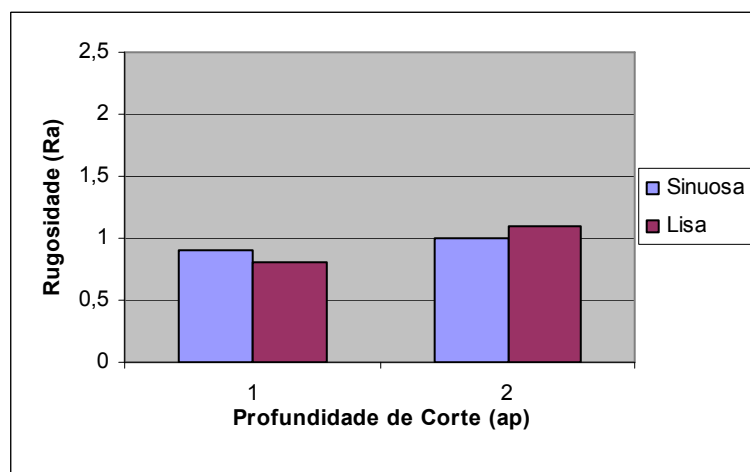


Figura 4.7 – Rugosidade (μm) x Profundidade de Corte (mm)

$V_c=150\text{m/min}$ e $f_n=0,102\text{mm/rot}$

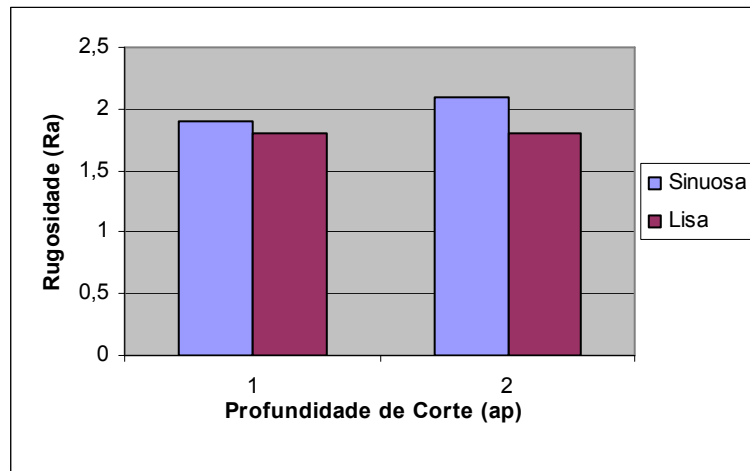


Figura 4.8 – Rugosidade (μm) x Profundidade de Corte (mm)

$V_c=150\text{m/min}$ e $f_n=0,205\text{mm/rot}$

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Avaliação

A seguir são comentados os resultados encontrados durante os ensaios experimentais considerando uma margem de erro de 10%, já que se trabalhou em ambiente climatizado em uma temperatura média de 25°C. O rugosímetro foi calibrado com padrão fornecido pelo fabricante. A análise dos esforços de corte é apresentada em forma de percentual comparativo entre o inserto sinuoso e o liso.

As forças de corte foram, em média, 15% menores para avanços de corte $f_n=0,205\text{mm/rot}$ na pastilha sinuosa em relação à lisa. Para avanços de corte $f_n=0,102\text{mm/rot}$, não houve grande variação da força de corte, podendo considerar-se iguais nos dois casos.

As forças de avanço foram, em média, 25% menores para avanços de corte $f_n=0,205\text{mm/rot}$ na pastilha sinuosa em relação à lisa. Para avanços de corte $f_n=0,102\text{mm/rot}$, as forças de avanço foram 10% menores para a pastilha sinuosa.

A rugosidade Ra foi 10% menor, em média, para a pastilha lisa, sem considerar prováveis danos à peça por haver geração de cavaco em fita. Mas, para a pastilha sinuosa, todos os valores medidos foram considerados corretos dentro dos parâmetros normais tabelados para torneamento. Para velocidade de corte $V_c=220\text{m/min}$ e avanço $f_n=0,205\text{mm/rot}$ com $a_p=1\text{mm}$, houve diferença mais acentuada na rugosidade obtida entre a pastilha sinuosa ($Ra=1,8$) e a lisa ($Ra=0,9$). Para a mesma condição de $V_c=220\text{m/min}$ e avanço $f_n=0,205\text{mm/rot}$ mas $a_p=2\text{mm}$, não houve diferença no Ra . Para velocidade de corte $V_c=150\text{m/min}$ houve uma diferença média de 8% para menos no Ra da superfície usinada com pastilha lisa, tanto para avanço $f_n=0,102\text{mm/rot}$ quanto para $f_n=0,205\text{mm/rot}$. Para velocidade de corte $V_c=220\text{m/min}$ com avanço $f_n=0,102\text{mm/rot}$ não se observou diferença considerável na rugosidade obtida, mas para a mesma velocidade $V_c=220\text{m/min}$ com avanço $f_n=0,205\text{mm/rot}$, observou-se uma redução de 50% no Ra para profundidade $a_p=1\text{mm}$, quando usada a pastilha lisa.

Na velocidade de corte $V_c=150\text{m/min}$ não houve variação considerável de Ra para nenhum dos casos.

5.2 Conclusões

Pode-se concluir que as pastilhas sinuosas, com quebra-cavaco, além de serem benéficas na quebra dos cavacos, fim para o qual foram desenvolvidas, ainda trazem consigo o benefício de reduzirem os esforços de usinagem, observados em maior diferença nas forças de avanço de corte. Quanto à rugosidade superficial, pode-se dizer, segundo dados obtidos nos ensaios, que as

pastilhas lisas são melhores, pois produzem Ra menores. Mas, porém, precisa-se comentar que, mesmo com Ra maiores obtidos com as pastilhas sinuosas, todos os valores de rugosidade obtidos estavam dentro dos limites médios definidos pelos fabricantes de ferramentas e praticados pelo mercado de usinagem nas empresas. Também, precisa-se ressaltar que não foram considerados os problemas de danos à superfície da peça causados pelo cavaco em fita, fator muito comum na utilização de pastilhas lisas, pelo fato dos ensaios terem sido de curta duração. Assim, conclui-se que, no quesito acabamento superficial, a pastilha sinuosa pode ser considerada benéfica para o uso industrial.

Comparando-se os resultados com o trabalho de Diniz, 1999, onde se concluiu que a rugosidade Ra não sofre alteração com a variação da velocidade de corte até os primeiros quinze minutos de usinagem, pode-se comentar que, isto confirma-se para avanços $f_n=0,205\text{mm/rot}$, utilizando-se pastilha sinuosa. Para avanço $f_n=0,102\text{mm/rot}$, percebe-se uma redução de 25% no Ra com a redução da velocidade de corte. Na utilização de pastilha lisa, confirma-se, segundo dados obtidos, a conclusão de Diniz.

Na análise dos cavacos, também se pode confirmar o estudo de Ee em 2001, concluindo-se o grande ganho das pastilhas sinuosas, que geram cavacos em formatos que beneficiam o processo de torneamento. Observou-se a formação de cavaco em lascas em seis dos oito ensaios executados com esta pastilha, sendo que os demais foram na forma helicoidal. Constatou-se, também, uma diferença de resultados se comparados ao trabalho de Souza, 2006, pois obteve-se cavacos em lasca tanto na velocidade $V_c=150\text{m/min}$ como na $V_c=220\text{m/min}$ para $a_p=2\text{mm}$ nos avanços maiores ($f_n=0,205\text{mm/rot}$). Nos avanços menores ($f_n=0,102\text{mm/rot}$) os cavacos foram helicoidais, todos com utilização da pastilha sinuosa. Para a lisa, nestas mesmas condições, todos os cavacos foram em fita. O aumento do avanço proporcionou a formação do cavaco helicoidal na profundidade $a_p=1\text{mm}$ na pastilha lisa, confirmando Souza. Mas para $a_p=2\text{mm}$, os ensaios apresentaram cavaco em fita.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os itens a seguir referem-se a algumas sugestões para outros trabalhos, segundo observações e dificuldades encontradas durante os experimentos executados. Assim sugere-se:

- Análise dos esforços de corte com maiores velocidades de corte;
- Medição e cálculo da pressão específica de corte para grandes velocidades de corte, já que as tabelas hoje existentes não contemplam esta variável, mas apenas o avanço de corte e o tipo de material usinado;
- Estudo do desgaste na superfície de saída das pastilhas sinuosas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J., 2004, “**Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**”, Edgard Blücher, São Paulo.

ALMEIDA, M. C., 2005, “**Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço de Corte Fácil ABNT 12L14**”, dissertação apresentada na Universidade de Itajubá, MG em Setembro de 2005.

AMORIM, H. J., MOMBRU, R.G., COLEMBERGUE, L.A., SOARES, R.B., NETO, A.O.K., 2003, “**A Influência da Adição de Bismuto na Usinabilidade de Aços Ressulfurados**”, In: 2º COBEF – Congresso Brasileiro de Fabricação, 2003, Uberlândia, MG.

AMORIM, H. J., 2002, “**Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**”, dissertação de mestrado apresentada na UFRGS, RS em Maio de 2002.

ASME, 1952. “**Manual on Cutting the Metals**”, the American Society of Mechanical Engineers, USA.

BALAJI, A. K., EE, K. C., LI, P. X., JAWAHIR, I. S., 2001, “**Force Decomposition Model for Tool-Wear in Turning with Grooved Cutting Tools**”, article from Elsevier Science, USA.

BAS, J., 2000, “**Aços Especiais de Usinabilidade Melhorada**”, artigo apresentado no Congresso de Usinagem, SP em Setembro de 2000.

BAYER, A.M., WALTON, L.R., 1990, “**Wrought Tool Steels**”, IN: ASM Handbook Metals Park: ASM, v.1: Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys p. 757-79.

BOOTHROYD, G., 1981, “**Fundamentals of Metals Machining and Machine Tools**”, International Student Edition, Mc Graw-Hill, 5 th Printing.

BORDINASSI, E. C., FILHO, M. S., BATALHA, G. F., 2007, “**Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um Aço Super-Duplex, Após Torneamento**”, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo.

DINIZ, A.E., 1999, “**Ensaio de Usinabilidade de Aço**”, departamento de Engenharia de Fabricação da UNICAMP, SP.

DINIZ, A.E. MARCONDES, F.C. e COPPINI, N.L., 2003, “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”, Artliber Editora Ltda, 4ª edição, São Paulo.

EE, K.C., BALAJI, A.K., LI, P.X., JAWAHIR, I.S., 2001, “**Force Decomposition Model for Tool-Wear in Turning with Grooved Cutting Tools**”, artigo Elsevier Science, USA em Julho de 2001.

FANG, N., JAWAHIR, I.S., 2002, “**An Analytical Predictive Model and Experimental Validation for Machining with Grooved Tools Incorporating the Effects of Strains, Strain-rates and Temperatures**”, departamento de Engenharia Aeroespacial Utah State University e departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Kentucky, USA.

FERRARESI, D., 1977, “**Fundamentos da Usinagem dos Materiais**”, Edgard Blücher Ltda, São Paulo.

FERRARESI, D., 1986, “**Características de Usinagem dos Metais para Operação de Torneamento**”, Associação Brasileira dos Metais – ABM, Campinas, São Paulo.

GALOPPI, G. S., FILHO, M. S., BATALHA, G. F., 2005, “**Torneamento de Aço 100Cr6 Temperado, com Insetos de CBN com e sem Cobertura**”, Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia em 2005, São Paulo.

GRAVALOS, M. T., MARTINS, M., DINIZ, A. E., MEI, P. R., 2007, “**Efeito da Usinagem na Estrutura e Propriedades Mecânicas do Aço Superaustenítico ASTM A351 CN3MN**”, Artigo Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 83-88, Jan.-Mar 2007.

KLUJSZO, L. A. C., SOARES, R.B., 2003, “**Novos Desenvolvimentos de Aços de Usinabilidade Melhorada**”. Revista Máquina e Metais, Abril 2003.

MACHADO, A.R. e SILVA, M.B., 2004, “**Usinagem dos Materiais**”, Universidade Federal de Uberlândia, 8ª edição.

MANZOLI, O. R., CARDOSO, R.A.D., MENEZES, M.A., 2004, “**Idealização de um Dispositivo para Medir Forças de Usinagem no Processo de Torneamento**”, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, UERJ, Rio de Janeiro.

MITUTOYO, 2005, “**Rugosidade Superficial: Análise do Parâmetro Ra**”, Revista Mitutoyo News, Nº 40, 2005.

NORMA ISO 3685, 1993, “**Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**”, International Standard 2ª Edition.

NORMA NBR 6405, 1988, “**Rugosidade da Superfície**”, Norma Brasileira Registrada, Brasil.

OWEN, J.V., 2001, “**Extend the Life of your Tools**”, Manufacturing Engineering, v. 126, n.1, p. 86-90.

PARAKKAL, G., ZHU, R., KAPOOR, S. G., DEVOR, R. E., 2001, “**Modeling of Turning Process Cutting Forces for Grooved Tools**”, article from Elsevier Science, USA.

PIMENTEL, M. F., PRADO, E. L., 2004, “**Usinabilidade de Aços de Corte Fácil Baixo Carbono**”, artigo publicado na Revista Siderurgia Brasil, GriP Editora – Ano 5, Nº 20 – Setembro/Outubro de 2004.

RODRIGUES, A. R., MATSUMOTO, H., YAMAKAMI, W. J., PAULO, R. G. R., ASSIS, C. L. F., 2007, “**Influência da Condição de Usinagem na Usinabilidade do Aço SAE 4118H**”, Artigo apresentado no 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, Peru, Outubro de 2007.

ROSA, L. C., 2004, “**Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial**”, Sorocaba, Unesp, São Paulo.

SANDVIK COROMANT, 2002, “**Ferramentas para Torneamento**”, AB Sandvik Coromant, Brasil, Catálogo 2002.

SANDVIK COROMANT, 2005, “**Manual Técnico de Usinagem**”, AB Sandvik Coromant, Brasil.

SHAW, W. C., 1984, “**Metal Cutting Principles**”, Oxford University Press.

SHULZ, H., EMRICH, A. K., FINZER, T., DON, J., 2000, “**Quais são e para que Servem os Revestimentos**”, Revista Máquina e Metais, nº 416, p. 38-45, Setembro de 2000.

SILVEIRA, J., 1983, “**Influência de Fatores Metalúrgicos na Usinabilidade de Ferros Fundidos FE 6002, FE 4212 e PC 25**”, dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas, SP.

SOUZA, F.L.C., RODRIGUES, A.R., YAMAKAMI, W.J., PAULO, R.G.R., 2006, “**Avaliação do Processo de Formação de Cavaco no Torneamento do Aço ABNT 1045**”, Faculdade de Engenharia, Campus Ilha Solteira, São Paulo.

STEMMER, C. E., 1989, “**Ferramentas de Corte**”, 2ª Edição, Editora UFSC, Florianópolis, SC.

TRENT, E. M. and WRIGHT, P. K., 2000, “**Metal Cutting**”, 4th Edition, Butterworth Heinemann.

8. APÊNDICE

8.1 - Tabelas de Resultados

Tabela 8.1 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°1

E01_Ff					E01_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	214	207	200		1	297	303	302	
2	207	170	197		2	251	299	324	
3	205	200	196		3	304	292	303	
4	207	190	206		4	331	296	260	
5	218	204	207		5	296	292	313	
6	187	191	206		6	281	327	300	
7	210	173	218		7	297	293	275	
8	198	171	182		8	287	289	265	
9	218	190	205		9	295	308	279	
10	217	216	205		10	293	246	321	
11	198	192	195		11	291	298	307	
12	213	181	206		12	268	274	294	
13	213	183	202		13	310	289	320	
14	220	207	208		14	300	266	297	
15	222	214	200		15	284	284	315	
16	204	227	179		16	304	298	313	
17	197	205	212		17	309	281	298	
18	236	176	200		18	289	321	311	
19	214	184	181		19	290	299	307	
20	206	190	204	Média	20	332	323	298	Média
Média =	210,2	193,6	200,5	200,5	Média =	295,5	293,9	300,1	295,5
DvPad =	10,8	16,0	10,1	10,8	DvPad =	18,4	19,0	18,0	18,4
Max =	236,0	227,0	218,0	227,0	Max =	332,0	327,0	324,0	327,0
Min =	187,0	170,0	179,0	179,0	Min =	251,0	246,0	260,0	251,0
Ra =	1,33	1,19	0,99	1,2	Ra =	1,33	1,19	0,99	1,2

Tabela 8.2 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°2

E02_Ff					E02_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	220	228	229		1	470	501	364	
2	225	220	184		2	494	432	391	
3	240	259	227		3	433	424	405	
4	222	236	232		4	497	449	443	
5	223	233	236		5	433	476	414	
6	233	237	217		6	406	449	410	
7	227	223	206		7	428	462	413	
8	214	246	221		8	499	453	418	
9	273	211	207		9	425	396	397	
10	221	257	252		10	432	429	428	
11	218	214	216		11	489	455	404	
12	246	231	249		12	492	442	425	
13	231	230	214		13	431	437	386	
14	243	216	212		14	475	397	380	
15	246	245	222		15	439	478	397	
16	211	251	244		16	409	427	372	
17	246	247	216		17	481	448	380	
18	214	232	244		18	478	398	393	
19	249	196	222		19	445	438	409	
20	233	243	223	Média	20	441	419	447	Média
Média =	231,8	232,8	223,7	231,8	Média =	454,9	440,5	403,8	440,5
DvPad =	15,5	16,3	16,4	16,3	DvPad =	31,1	27,3	22,1	27,3
Max =	273,0	259,0	252,0	259,0	Max =	499,0	501,0	447,0	499,0
Min =	211,0	196,0	184,0	196,0	Min =	406,0	396,0	364,0	396,0
Ra =	1,86	1,75	1,78	1,8	Ra =	1,86	1,75	1,78	1,8

Tabela 8.3 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°3

E03_Ff					E03_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	397	375	366		1	525	489	562	
2	379	436	369		2	519	548	542	
3	394	396	346		3	541	575	540	
4	408	393	370		4	506	517	603	
5	392	360	364		5	570	531	564	
6	389	379	373		6	503	562	495	
7	396	410	360		7	509	555	531	
8	375	414	367		8	543	545	507	
9	383	395	368		9	541	525	513	
10	399	376	347		10	526	527	516	
11	374	368	355		11	540	548	529	
12	377	392	350		12	497	521	495	
13	383	387	366		13	541	569	556	
14	391	392	370		14	533	533	537	
15	382	398	356		15	492	520	539	
16	403	381	359		16	560	529	557	
17	381	388	369		17	541	494	592	
18	389	359	353		18	531	564	501	
19	384	377	363		19	523	526	550	
20	391	371	362	Média	20	509	548	509	Média
Média =	388,4	387,4	361,7	387,4	Média =	527,5	536,3	536,9	536,3
DvPad =	9,4	18,6	8,1	9,4	DvPad =	20,6	23,1	30,2	23,1
Max =	408,0	436,0	373,0	408,0	Max =	570,0	575,0	603,0	575,0
Min =	374,0	359,0	346,0	359,0	Min =	492,0	489,0	495,0	492,0
Ra =	1,42	1,41	1,31	1,4	Ra =	1,42	1,41	1,31	1,4

Tabela 8.4 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°4

E04_Ff					E04_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	467	454	441		1	846	808	849	
2	503	477	454		2	815	826	810	
3	462	435	449		3	858	801	808	
4	469	452	429		4	879	817	830	
5	475	424	467		5	859	876	851	
6	447	461	429		6	852	836	830	
7	500	456	457		7	880	870	837	
8	455	439	461		8	883	822	822	
9	503	490	441		9	853	820	873	
10	451	466	435		10	877	770	829	
11	483	487	449		11	843	813	839	
12	475	476	447		12	923	792	729	
13	486	474	464		13	876	820	834	
14	444	463	449		14	818	788	812	
15	426	451	460		15	896	834	904	
16	474	469	440		16	844	847	869	
17	458	439	449		17	855	826	866	
18	449	447	460		18	839	802	877	
19	468	468	436		19	868	795	874	
20	454	421	452	Média	20	919	801	899	Média
Média =	467,5	457,5	448,5	457,5	Média =	864,2	818,2	842,1	842,1
DvPad =	20,6	19,4	11,3	19,4	DvPad =	28,5	26,2	38,8	28,5
Max =	503,0	490,0	467,0	490,0	Max =	923,0	876,0	904,0	904,0
Min =	426,0	421,0	429,0	426,0	Min =	815,0	770,0	729,0	770,0
Ra =	2,02	1,85	1,78	1,9	Ra =	2,02	1,85	1,78	1,9

Tabela 8.5 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°5

E05_Ff					E05_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	224	223	207		1	348	307	284	
2	244	239	212		2	317	309	280	
3	247	242	193		3	301	291	308	
4	221	246	193		4	268	324	297	
5	208	223	211		5	294	273	298	
6	231	245	196		6	315	322	306	
7	213	229	206		7	292	330	314	
8	238	230	211		8	308	291	306	
9	238	213	209		9	317	285	340	
10	234	243	220		10	289	324	322	
11	225	244	199		11	292	299	326	
12	235	244	210		12	299	313	291	
13	257	222	214		13	305	287	305	
14	217	242	198		14	301	306	294	
15	247	243	208		15	315	298	311	
16	224	245	202		16	332	318	317	
17	234	231	201		17	289	333	332	
18	227	212	207		18	270	306	300	
19	240	239	220		19	325	300	313	
20	256	229	202	Média	20	289	331	330	Média
Média =	233,0	234,2	206,0	233,0	Média =	303,3	307,4	308,7	307,4
DvPad =	13,4	11,0	7,9	11,0	DvPad =	19,6	17,0	16,0	17,0
Max =	257,0	246,0	220,0	246,0	Max =	348,0	333,0	340,0	340,0
Min =	208,0	212,0	193,0	208,0	Min =	268,0	273,0	280,0	273,0
Ra =	0,87	0,9	0,68	0,9	Ra =	0,87	0,9	0,68	0,9

Tabela 8.6 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°6

E06_Ff					E06_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	286	267	295		1	462	477	498	
2	276	287	276		2	559	489	497	
3	257	266	265		3	430	533	422	
4	285	260	287		4	561	453	490	
5	307	270	262		5	548	558	500	
6	300	286	272		6	476	484	465	
7	309	261	258		7	470	531	496	
8	277	278	296		8	482	537	501	
9	321	275	302		9	525	461	518	
10	297	304	294		10	503	563	528	
11	297	282	297		11	503	490	461	
12	291	291	272		12	525	501	542	
13	284	266	303		13	531	509	525	
14	301	277	284		14	554	418	522	
15	306	275	282		15	514	500	478	
16	340	283	313		16	569	521	442	
17	255	291	248		17	470	416	462	
18	292	304	260		18	461	488	521	
19	287	298	278		19	549	523	550	
20	315	253	284	Média	20	543	541	491	Média
Média =	294,2	278,7	281,4	281,4	Média =	511,8	499,7	495,5	499,7
DvPad =	20,2	14,5	17,3	17,3	DvPad =	40,8	41,1	33,1	40,8
Max =	340,0	304,0	313,0	313,0	Max =	569,0	563,0	550,0	563,0
Min =	255,0	253,0	248,0	253,0	Min =	430,0	416,0	422,0	422,0
Ra =	0,87	0,9	0,68	0,9	Ra =	0,87	0,9	0,68	0,9

Tabela 8.7 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°7

E07_Ff					E07_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	453	439	468		1	553	601	582	
2	459	444	461		2	615	577	562	
3	454	437	472		3	579	552	573	
4	438	455	456		4	560	592	576	
5	464	440	469		5	542	605	551	
6	475	433	467		6	588	579	574	
7	459	427	462		7	526	581	573	
8	449	450	459		8	611	578	595	
9	458	411	460		9	595	565	567	
10	444	438	453		10	562	579	575	
11	476	443	459		11	561	578	588	
12	456	446	449		12	597	606	554	
13	475	437	490		13	596	561	564	
14	476	454	482		14	616	574	577	
15	443	433	464		15	632	582	588	
16	459	431	471		16	616	611	605	
17	502	429	463		17	579	617	563	
18	455	438	439		18	624	622	580	
19	479	456	457		19	594	563	540	
20	451	448	454	Média	20	609	643	633	Média
Média =	461,3	439,5	462,8	461,3	Média =	587,8	588,3	576,0	587,8
DvPad =	15,3	10,8	11,2	11,2	DvPad =	29,3	23,3	20,3	23,3
Max =	502,0	456,0	490,0	490,0	Max =	632,0	643,0	633,0	633,0
Min =	438,0	411,0	439,0	438,0	Min =	526,0	552,0	540,0	540,0
Ra =	1,05	0,95	0,85	1,0	Ra =	1,05	0,95	0,85	1,0

Tabela 8.8 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°8

E08_Ff					E08_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	610	584	586		1	996	966	1006	
2	616	585	608		2	1032	1015	961	
3	594	608	613		3	983	983	1026	
4	609	613	619		4	1006	1065	993	
5	630	629	603		5	977	937	988	
6	619	622	580		6	942	960	904	
7	600	601	521		7	1047	1028	928	
8	578	592	551		8	1009	955	910	
9	610	591	532		9	977	1004	944	
10	603	634	633		10	967	994	978	
11	617	612	621		11	894	947	1020	
12	621	603	619		12	1011	956	982	
13	605	600	549		13	1020	1041	1062	
14	652	580	610		14	1023	1016	972	
15	628	609	575		15	999	972	1014	
16	615	600	598		16	937	941	1001	
17	595	609	594		17	994	967	952	
18	592	593	596		18	952	983	1033	
19	570	594	603		19	973	1019	962	
20	595	604	592	Média	20	1012	940	1005	Média
Média =	608,0	603,2	590,2	603,2	Média =	987,6	984,5	982,1	984,5
DvPad =	18,6	14,4	30,7	18,6	DvPad =	36,7	36,8	41,4	36,8
Max =	652,0	634,0	633,0	634,0	Max =	1047	1065	1062	1062,0
Min =	570,0	580,0	521,0	570,0	Min =	894,0	937,0	904,0	904,0
Ra =	1,9	1,75	1,72	1,8	Ra =	1,9	1,75	1,72	1,8

Tabela 8.9 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°9

E09_Ff					E09_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	205	200	195		1	284	322	294	
2	214	187	176		2	308	329	303	
3	203	203	183		3	296	296	298	
4	214	191	191		4	322	322	295	
5	209	212	183		5	305	310	302	
6	202	200	198		6	311	340	306	
7	208	196	188		7	293	315	313	
8	203	197	190		8	325	308	291	
9	206	208	198		9	311	271	319	
10	199	202	176		10	333	294	307	
11	207	191	185		11	307	294	313	
12	209	190	192		12	316	299	306	
13	216	216	200		13	324	310	301	
14	201	205	182		14	314	308	309	
15	212	202	183		15	309	313	292	
16	211	208	198		16	322	310	313	
17	191	199	190		17	326	336	321	
18	195	197	189		18	300	304	294	
19	215	216	199		19	322	292	298	
20	216	204	178	Média	20	327	315	323	Média
Média =	206,8	201,2	188,7	201,2	Média =	312,8	309,4	304,9	309,4
DvPad =	7,0	8,2	7,8	7,8	DvPad =	12,8	16,2	9,8	12,8
Max =	216,0	216,0	200,0	216,0	Max =	333,0	340,0	323,0	333,0
Min =	191,0	187,0	176,0	187,0	Min =	284,0	271,0	291,0	284,0
Ra =	0,91	1,04	0,89	0,9	Ra =	0,91	1,04	0,89	0,9

Tabela 8.10 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°10

E10_Ff					E10_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	225	242	250		1	492	474	502	
2	222	257	223		2	488	452	463	
3	249	245	240		3	480	495	449	
4	246	242	215		4	441	515	441	
5	253	237	271		5	462	456	480	
6	225	250	235		6	462	469	438	
7	238	232	239		7	482	487	438	
8	236	251	241		8	478	473	518	
9	243	231	270		9	489	514	489	
10	260	234	260		10	473	485	437	
11	243	262	228		11	511	485	481	
12	227	245	257		12	477	460	459	
13	236	233	241		13	446	476	479	
14	239	242	249		14	489	445	437	
15	250	250	230		15	478	480	463	
16	224	247	236		16	432	515	500	
17	225	268	231		17	468	488	515	
18	233	258	225		18	480	513	492	
19	232	222	230		19	491	456	477	
20	242	241	230	Média	20	479	450	451	Média
Média =	237,4	244,5	240,1	240,1	Média =	474,9	479,4	470,5	474,9
DvPad =	10,9	11,4	15,3	11,4	DvPad =	18,9	22,7	26,7	22,7
Max =	260,0	268,0	271,0	268,0	Max =	511,0	515,0	518,0	515,0
Min =	222,0	222,0	215,0	222,0	Min =	432,0	445,0	437,0	437,0
Ra =	1,86	1,86	1,95	1,9	Ra =	1,86	1,86	1,95	1,9

Tabela 8.11 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°11

E11_Ff					E11_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	407	418	378		1	560	550	532	
2	412	428	402		2	564	534	536	
3	408	431	405		3	529	536	543	
4	403	398	399		4	566	566	560	
5	403	420	387		5	565	598	576	
6	401	405	400		6	561	545	581	
7	399	403	393		7	523	547	595	
8	409	414	383		8	543	568	545	
9	399	415	393		9	526	568	529	
10	397	415	372		10	533	583	584	
11	400	418	404		11	589	556	522	
12	392	406	367		12	580	553	574	
13	406	413	377		13	558	572	546	
14	374	412	388		14	583	539	604	
15	421	424	404		15	540	540	608	
16	406	406	389		16	563	571	588	
17	398	407	396		17	542	529	547	
18	384	412	404		18	491	577	564	
19	420	413	368		19	588	525	587	
20	412	413	384	Média	20	592	555	599	Média
Média =	402,6	413,6	389,7	402,6	Média =	554,8	555,6	566,0	555,6
DvPad =	11,0	8,3	12,4	11,0	DvPad =	26,3	19,4	27,1	26,3
Max =	421,0	431,0	405,0	421,0	Max =	592,0	598,0	608,0	598,0
Min =	374,0	398,0	367,0	374,0	Min =	491,0	525,0	522,0	522,0
Ra =	0,99	0,94	1,07	1,0	Ra =	0,99	0,94	1,07	1,0

Tabela 8.12 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°12

E12_Ff					E12_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	472	496	506		1	897	896	886	
2	515	480	480		2	894	920	894	
3	491	478	498		3	839	912	892	
4	495	464	489		4	848	905	864	
5	488	447	482		5	848	891	838	
6	477	483	474		6	871	910	921	
7	516	488	504		7	843	887	855	
8	501	479	490		8	902	924	862	
9	483	484	486		9	950	936	832	
10	496	482	481		10	869	907	888	
11	499	485	478		11	861	871	909	
12	473	466	493		12	918	880	909	
13	503	482	476		13	909	914	896	
14	489	491	483		14	856	909	856	
15	481	505	458		15	918	935	915	
16	502	491	485		16	907	888	893	
17	463	471	485		17	950	974	866	
18	509	467	476		18	880	901	899	
19	482	495	478		19	872	891	845	
20	446	477	478	Média	20	898	920	882	Média
Média =	489,1	480,6	484,0	484,0	Média =	886,5	908,6	880,1	886,5
DvPad =	17,6	13,1	10,9	13,1	DvPad =	33,3	23,2	26,2	26,2
Max =	516,0	505,0	506,0	506,0	Max =	950	974	921	950,0
Min =	446,0	447,0	458,0	447,0	Min =	839,0	871,0	832,0	839,0
Ra =	2,04	2,1	2,19	2,1	Ra =	2,04	2,1	2,19	2,1

Tabela 8.13 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°13

E13_Ff					E13_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	212	211	220		1	318	308	321	
2	235	222	218		2	304	335	290	
3	216	246	198		3	319	298	342	
4	228	225	217		4	334	328	337	
5	231	228	218		5	312	322	317	
6	219	226	219		6	342	328	325	
7	224	228	235		7	293	314	312	
8	228	236	197		8	334	259	295	
9	224	215	239		9	309	332	301	
10	226	230	240		10	316	349	308	
11	228	238	214		11	317	330	276	
12	233	212	231		12	350	320	331	
13	231	230	221		13	329	343	325	
14	222	231	220		14	314	316	305	
15	205	224	218		15	331	317	332	
16	228	230	216		16	336	290	322	
17	219	217	221		17	307	315	343	
18	227	236	231		18	306	293	301	
19	245	227	222		19	304	292	351	
20	227	223	220	Média	20	339	338	320	Média
Média =	225,4	226,8	220,8	225,4	Média =	320,7	316,4	317,7	317,7
DvPad =	8,6	8,8	11,0	8,8	DvPad =	15,3	21,6	19,3	19,3
Max =	245,0	246,0	240,0	245,0	Max =	350,0	349,0	351,0	350,0
Min =	205,0	211,0	197,0	205,0	Min =	293,0	259,0	276,0	276,0
Ra =	0,83	0,78	0,84	0,8	Ra =	0,83	0,78	0,84	0,8

Tabela 8.14 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°14

E14_Ff					E14_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	318	315	280		1	318	315	280	
2	321	313	329		2	321	313	329	
3	305	294	292		3	305	294	292	
4	333	294	289		4	333	294	289	
5	336	316	284		5	336	316	284	
6	331	292	286		6	331	292	286	
7	333	277	292		7	333	277	292	
8	333	311	308		8	333	311	308	
9	275	300	316		9	275	300	316	
10	325	291	296		10	325	291	296	
11	318	258	289		11	318	258	289	
12	352	313	319		12	352	313	319	
13	327	282	295		13	327	282	295	
14	333	293	300		14	333	293	300	
15	339	304	288		15	339	304	288	
16	334	278	275		16	334	278	275	
17	360	315	316		17	360	315	316	
18	321	268	302		18	321	268	302	
19	326	303	297		19	326	303	297	
20	336	299	307	Média	20	336	299	307	Média
Média =	327,8	295,8	298,0	298,0	Média =	327,8	295,8	298,0	298,0
DvPad =	17,2	16,6	14,1	16,6	DvPad =	17,2	16,6	14,1	16,6
Max =	360,0	316,0	329,0	329,0	Max =	360,0	316,0	329,0	329,0
Min =	275,0	258,0	275,0	275,0	Min =	275,0	258,0	275,0	275,0
Ra =	1,78	1,67	1,81	1,8	Ra =	1,78	1,67	1,81	1,8

Tabela 8.15 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°15

E15_Ff					E15_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	478	499	480		1	546	607	676	
2	461	488	476		2	588	621	641	
3	474	492	498		3	590	622	640	
4	457	477	476		4	607	672	631	
5	460	486	482		5	618	593	641	
6	483	492	489		6	550	623	632	
7	475	485	483		7	560	630	651	
8	452	469	470		8	599	670	566	
9	462	489	469		9	575	642	621	
10	474	482	495		10	609	595	648	
11	460	483	466		11	585	649	610	
12	468	497	484		12	584	610	639	
13	470	503	464		13	584	646	603	
14	476	477	476		14	604	625	668	
15	473	497	469		15	606	621	608	
16	487	475	472		16	597	577	617	
17	489	489	474		17	595	622	659	
18	477	479	454		18	573	625	654	
19	483	497	469		19	600	590	636	
20	474	494	484	Média	20	614	615	666	Média
Média =	471,7	487,5	476,5	476,5	Média =	589,2	622,8	635,4	622,8
DvPad =	10,3	9,1	10,7	10,3	DvPad =	20,2	24,7	26,0	24,7
Max =	489,0	503,0	498,0	498,0	Max =	618,0	672,0	676,0	672,0
Min =	452,0	469,0	454,0	454,0	Min =	546,0	577,0	566,0	566,0
Ra =	1,08	1,05	1,05	1,1	Ra =	1,08	1,05	1,05	1,1

Tabela 8.16 – Forças de Avanço(F_f) e de Corte(F_c) e Rugosidade Ra para o Ensaio N°16

E16_Ff					E16_Fc				
Na	a	b	c		Na	a	b	c	
1	655	675	692		1	963	1014	976	
2	662	654	668		2	979	1041	1007	
3	670	689	672		3	941	952	998	
4	675	663	655		4	1052	1055	1084	
5	712	688	653		5	1043	1058	1006	
6	696	678	672		6	1044	1069	996	
7	659	697	679		7	1017	1097	1019	
8	692	672	656		8	1044	1058	1010	
9	681	662	662		9	1059	982	1014	
10	671	652	687		10	942	1117	999	
11	647	657	709		11	1036	960	998	
12	686	625	687		12	1036	1042	1095	
13	711	680	667		13	957	1011	1044	
14	663	649	650		14	930	984	1080	
15	685	645	712		15	1057	1010	1051	
16	655	649	692		16	946	956	1005	
17	657	668	704		17	1001	1068	1000	
18	662	667	704		18	1044	945	1023	
19	629	652	682		19	1035	1012	946	
20	670	683	687	Média	20	948	1060	1015	Média
Média =	671,9	665,3	679,5	671,9	Média =	1004	1025	1018	1018,3
DvPad =	20,9	17,9	19,3	19,3	DvPad =	47,0	49,9	36,5	47,0
Max =	712,0	697,0	712,0	712,0	Max =	1059	1117	1095	1095,0
Min =	629,0	625,0	650,0	629,0	Min =	930,0	945,0	946,0	945,0
Ra =	1,82	1,92	1,84	1,8	Ra =	1,82	1,92	1,84	1,8

8.2 Gráficos dos Resultados

As figuras de número 8.1 a 8.8 referem-se à pastilha sinuosa e de 8.9 a 8.16 à pastilha lisa com velocidade de corte de 220m/min; de 8.17 a 8.24 pastilha sinuosa e 8.25 a 8.32 pastilha lisa com velocidade de corte de 150m/min; “a” significa primeiro ensaio, “b” primeira repetição e “c” segunda repetição.

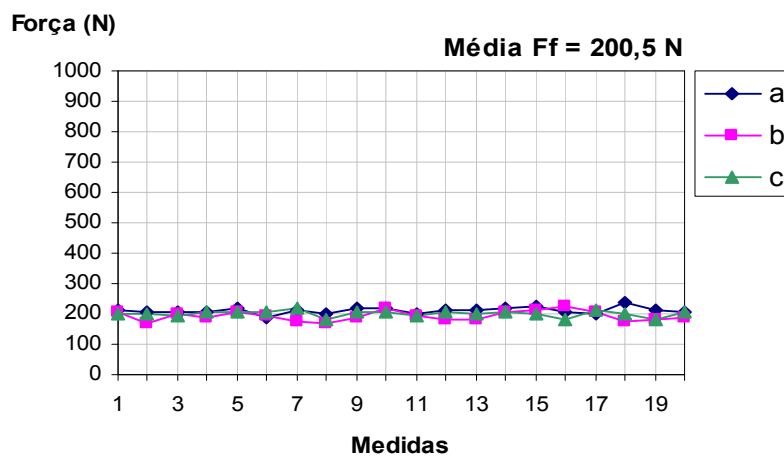


Figura 8.1 – Força de Avanço Ensaio 1

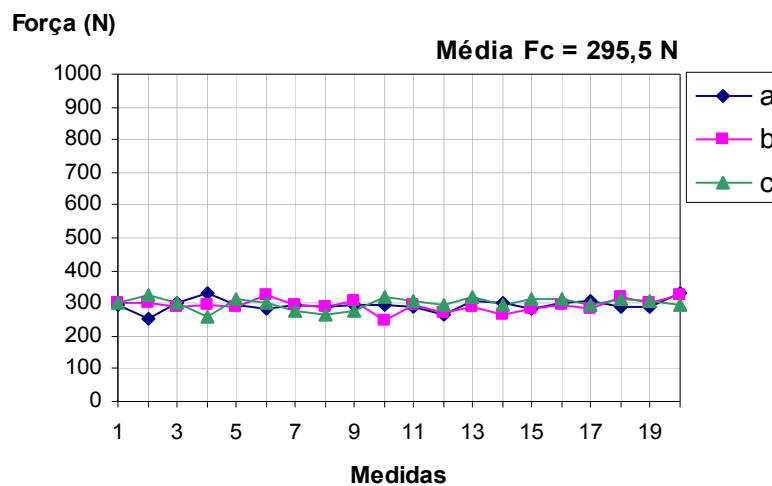


Figura 8.2 – Força de Corte Ensaio 1

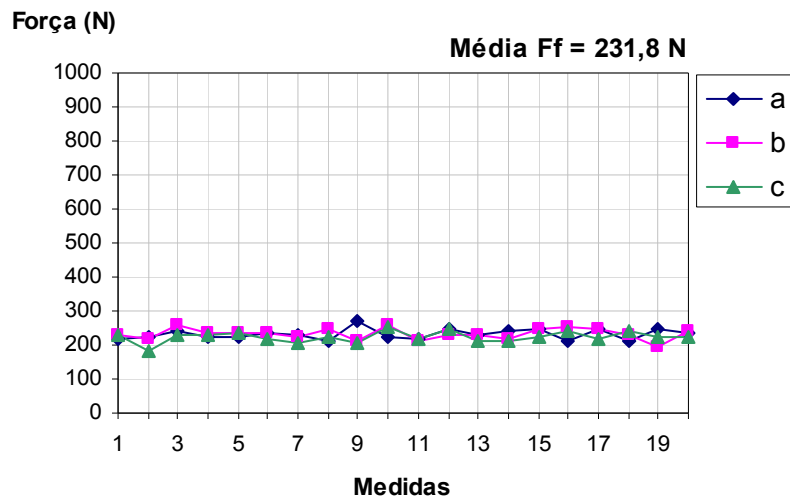


Figura 8.3 – Força de Avanço Ensaio 2

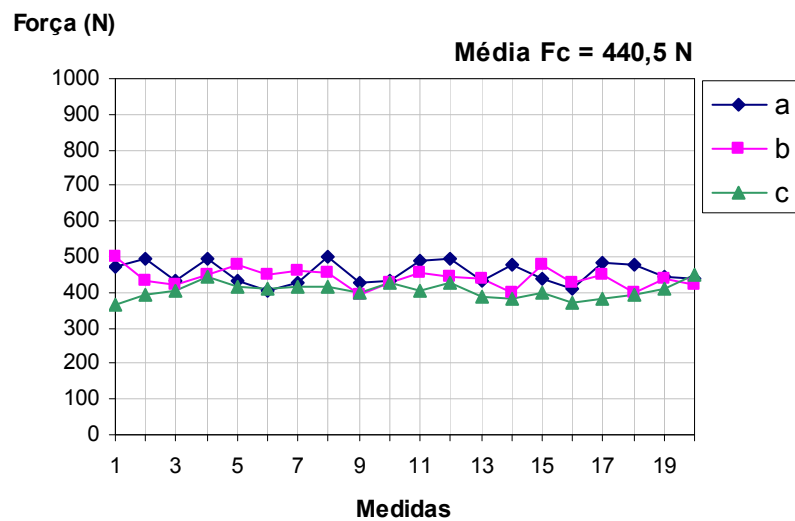


Figura 8.4 – Força de Corte Ensaio 2

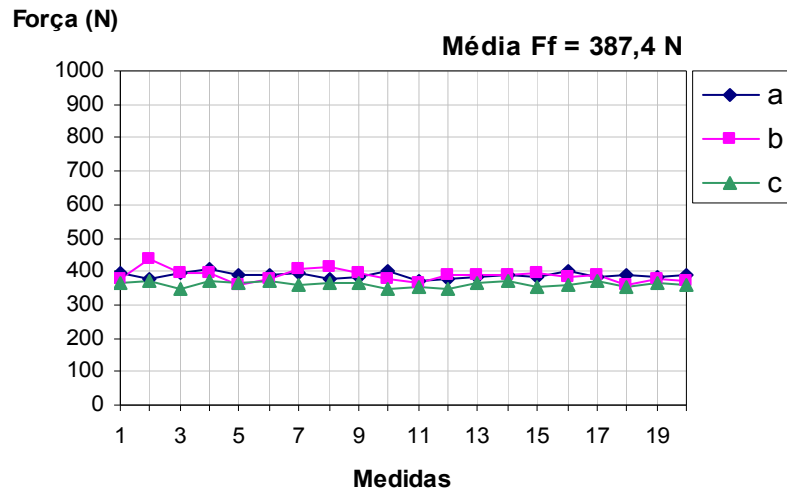


Figura 8.5 – Força de Avanço Ensaio 3

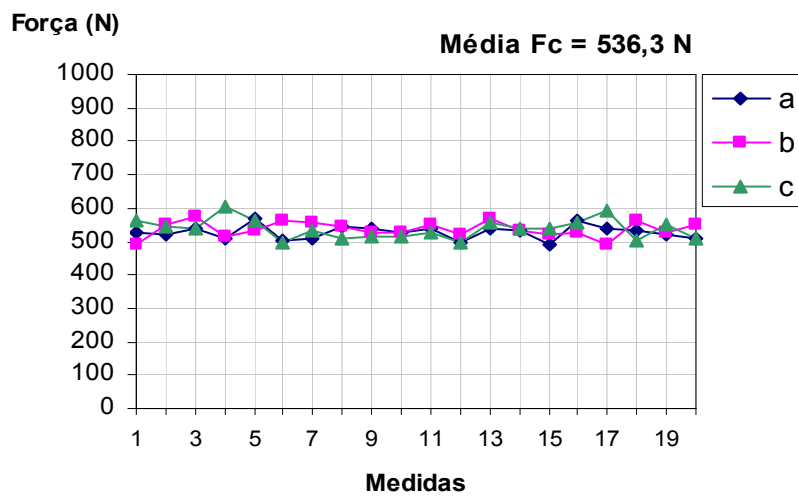


Figura 8.6 – Força de Corte Ensaio 3

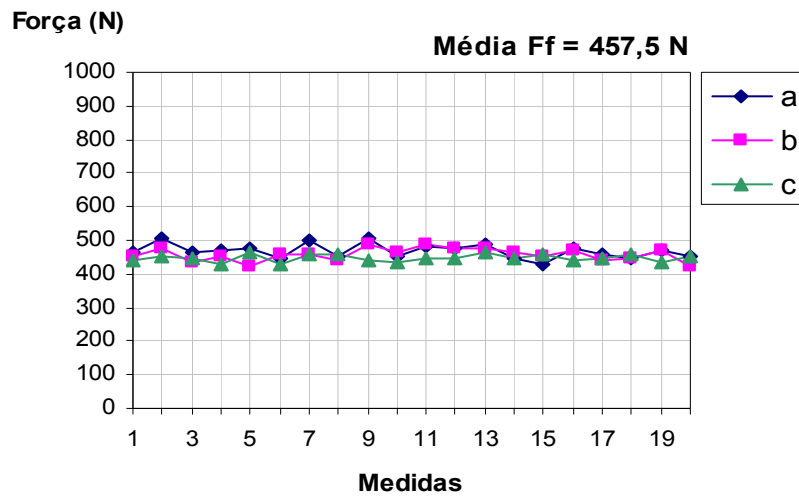


Figura 8.7 – Força de Avanço Ensaio 4

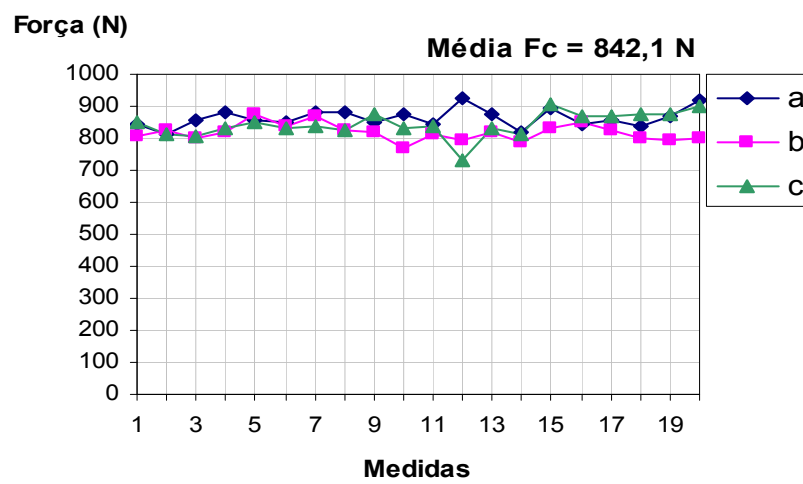


Figura 8.8 – Força de Corte Ensaio 4

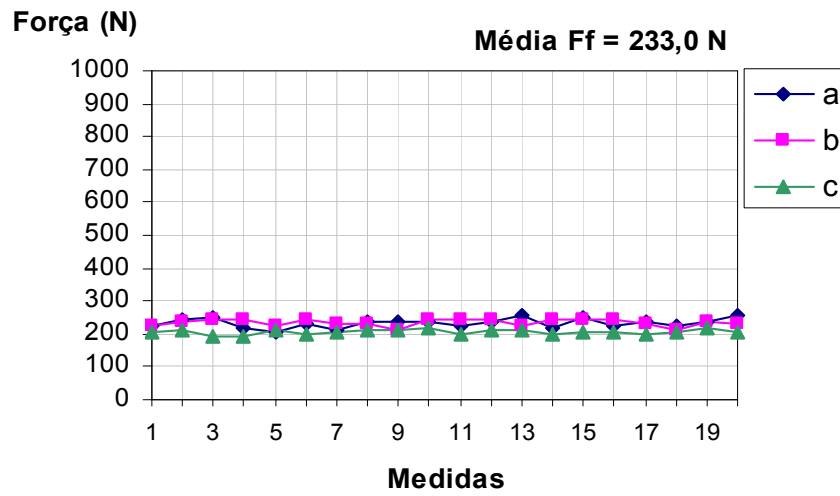


Figura 8.9 – Força de Avanço Ensaio 5

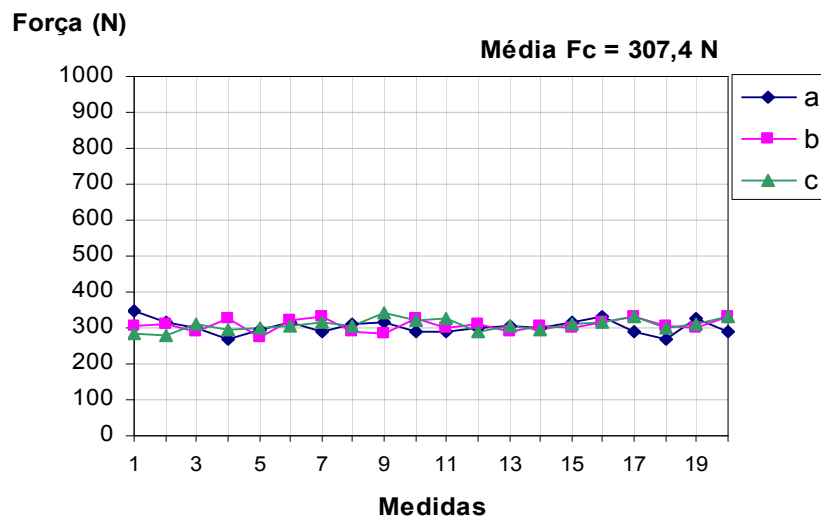


Figura 8.10 – Força de Corte Ensaio 5

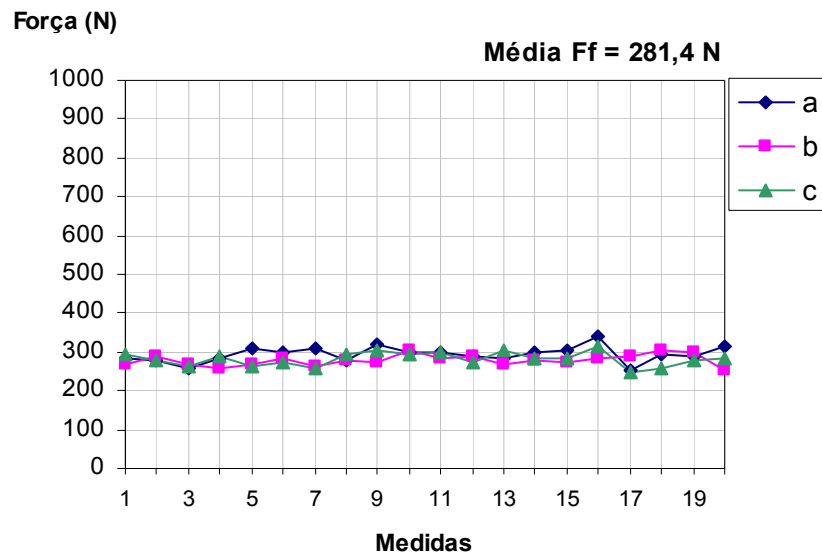


Figura 8.11 – Força de Avanço Ensaio 6

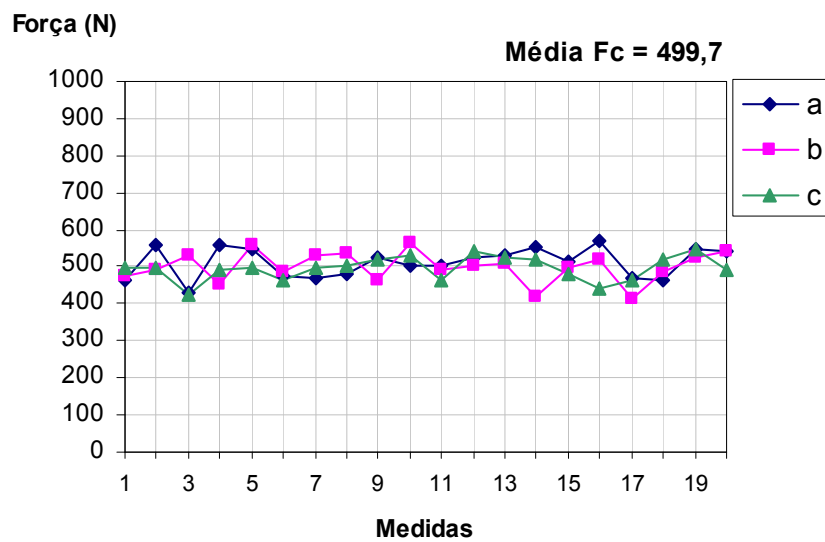


Figura 8.12 – Força de Corte Ensaio 6

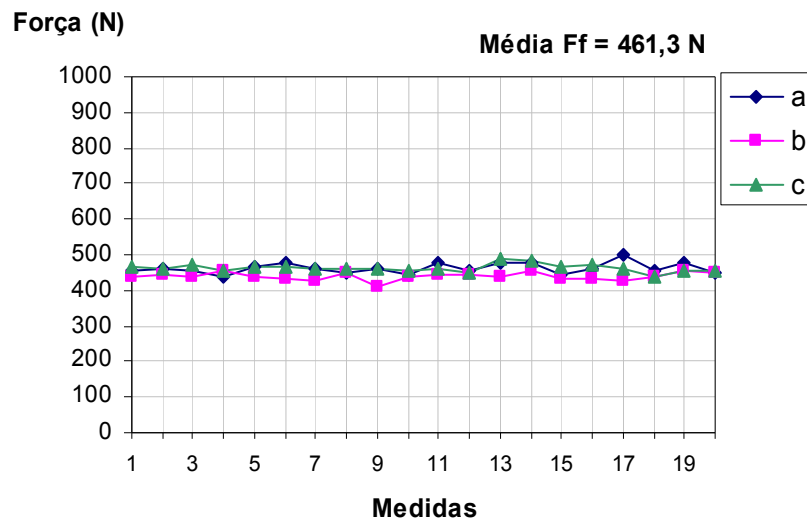


Figura 8.13 – Força de Avanço Ensaio 7

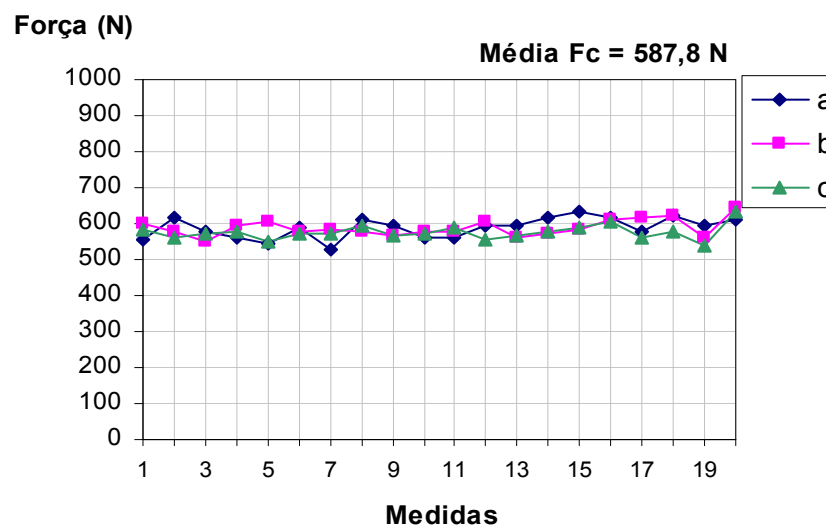


Figura 8.14 – Força de Corte Ensaio 7

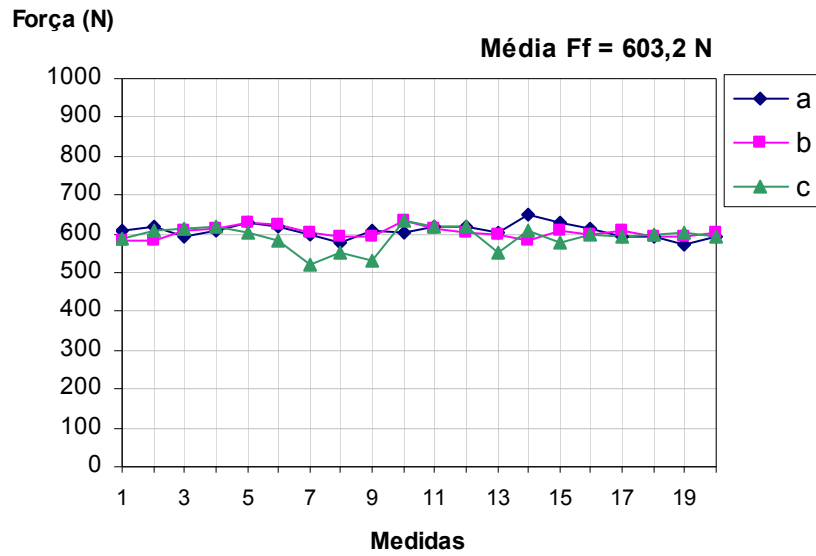


Figura 8.15 – Força de Avanço Ensaio 8

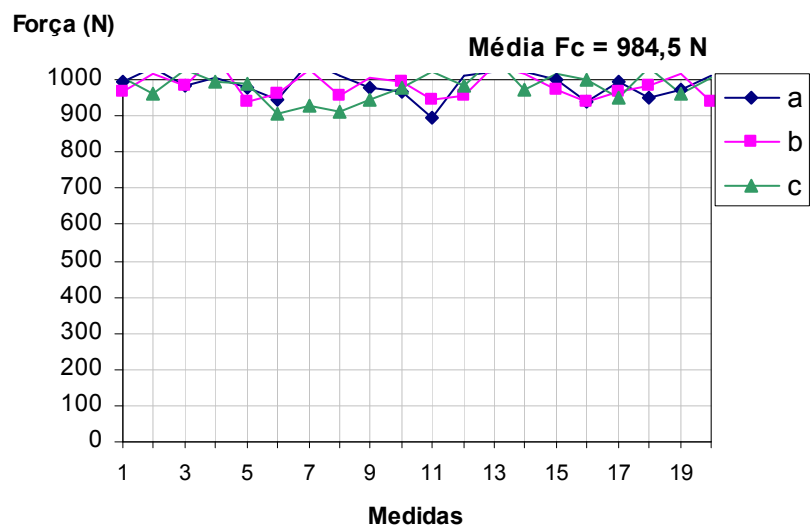


Figura 8.16 – Força de Corte Ensaio 8

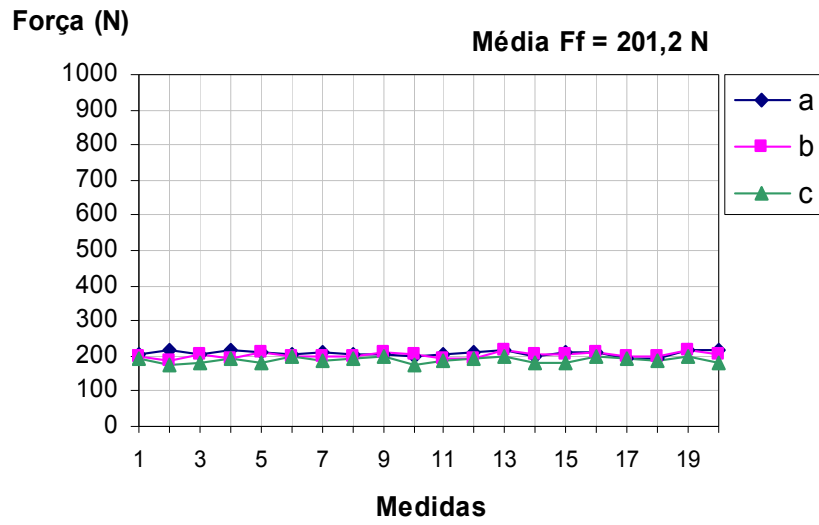


Figura 8.17 – Força de Avanço Ensaio 9

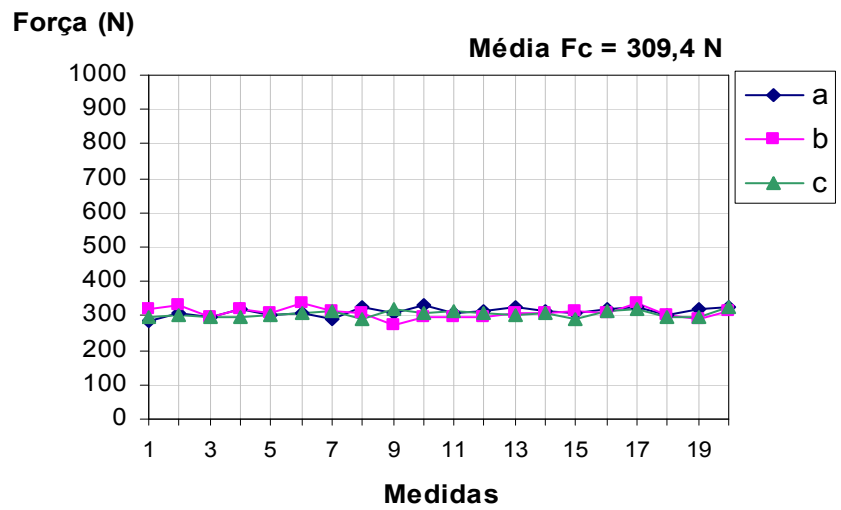


Figura 8.18 – Força de Corte Ensaio 9

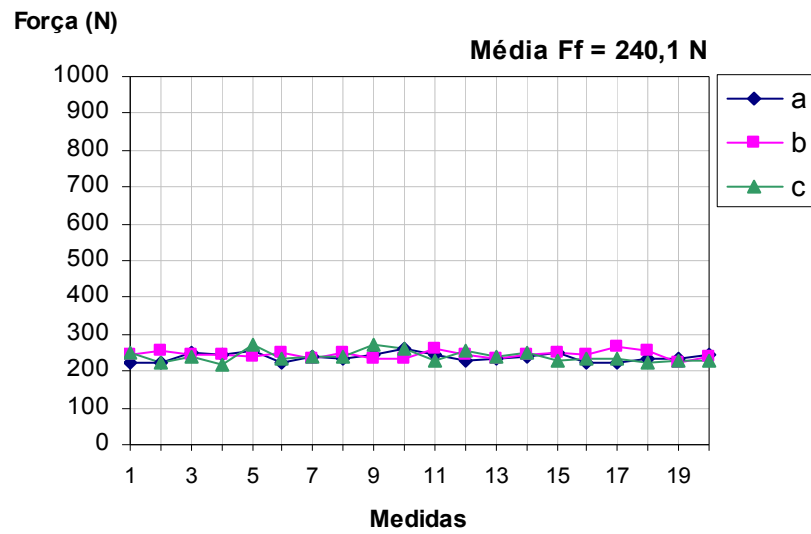


Figura 8.19 – Força de Avanço Ensaio 10

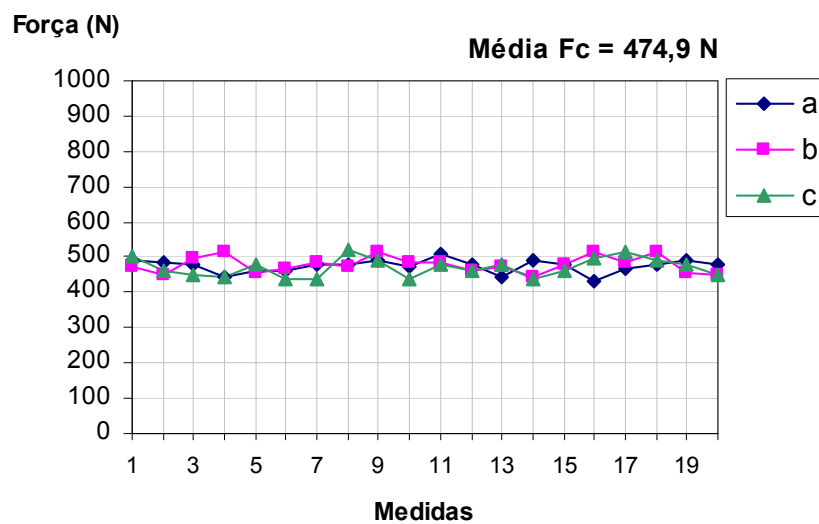


Figura 8.20 – Força de Corte Ensaio 10

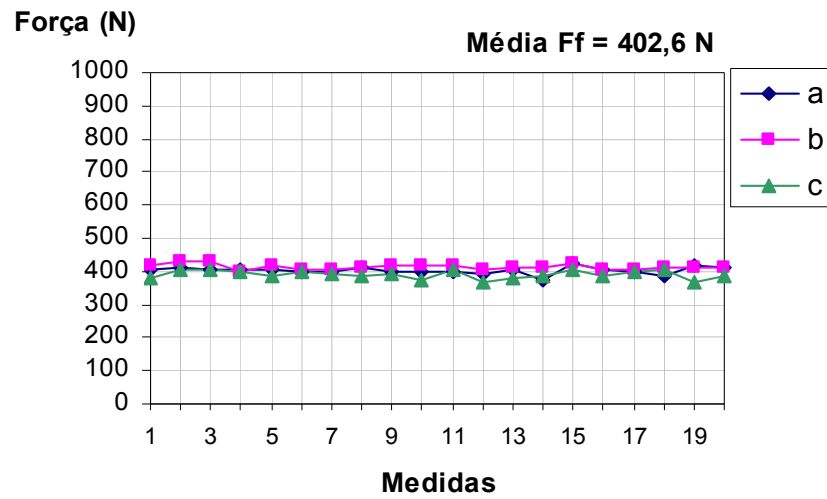


Figura 8.21 – Força de Avanço Ensaio 11

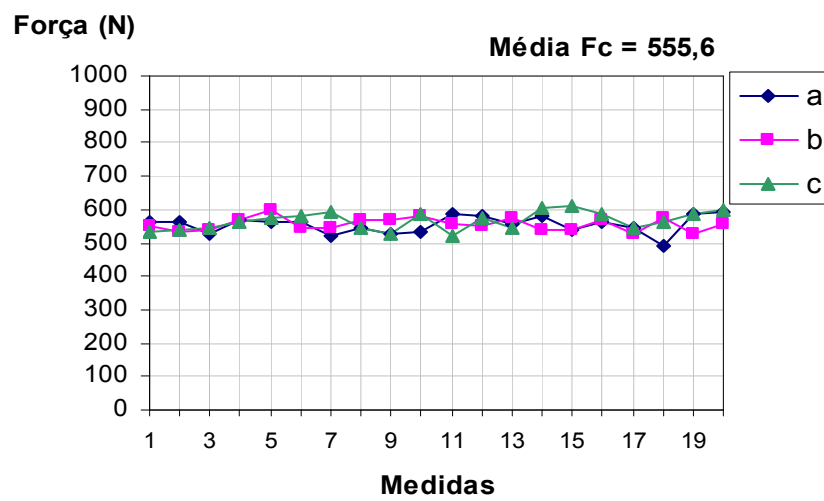


Figura 8.22 – Força de Corte Ensaio 11

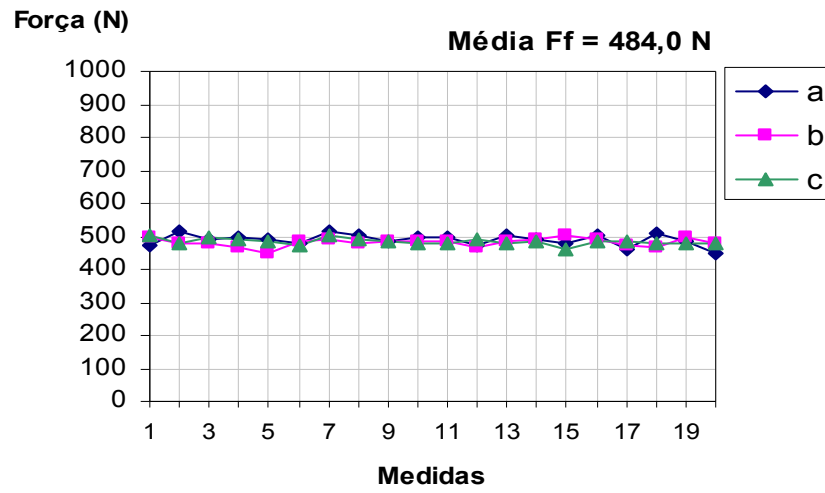


Figura 8.23 – Força de Avanço Ensaio 12

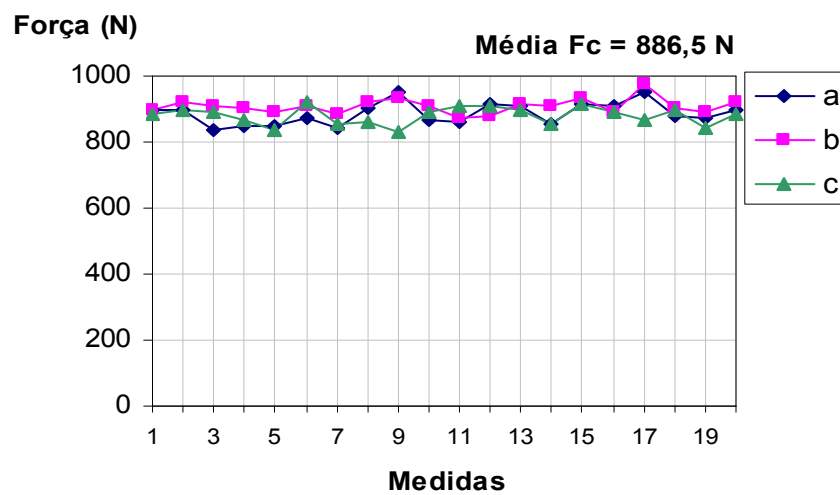


Figura 8.24 – Força de Corte Ensaio 12

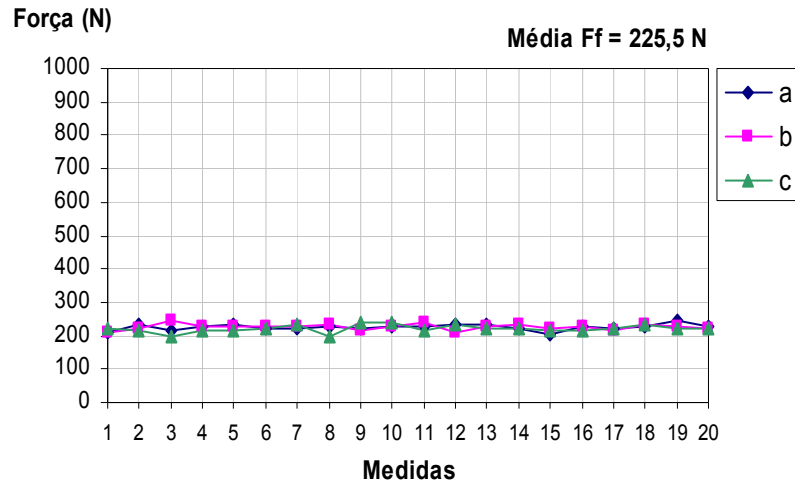


Figura 8.25 – Força de Avanço Ensaio 13

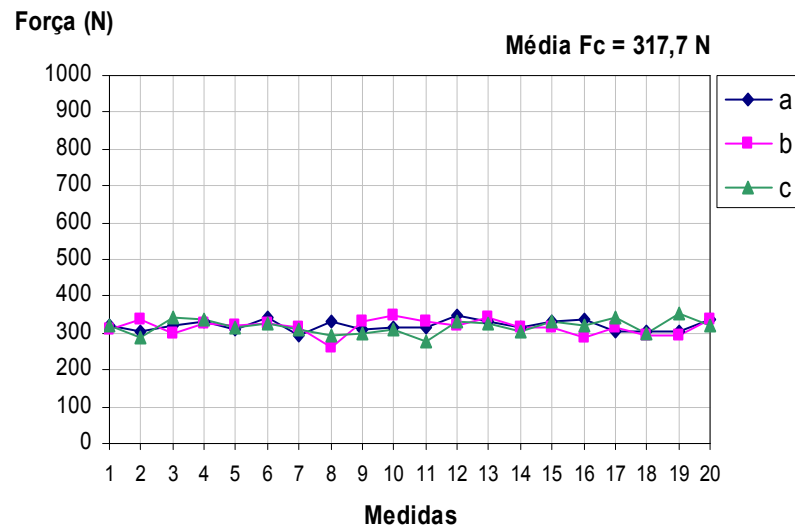


Figura 8.26 – Força de Corte Ensaio 13

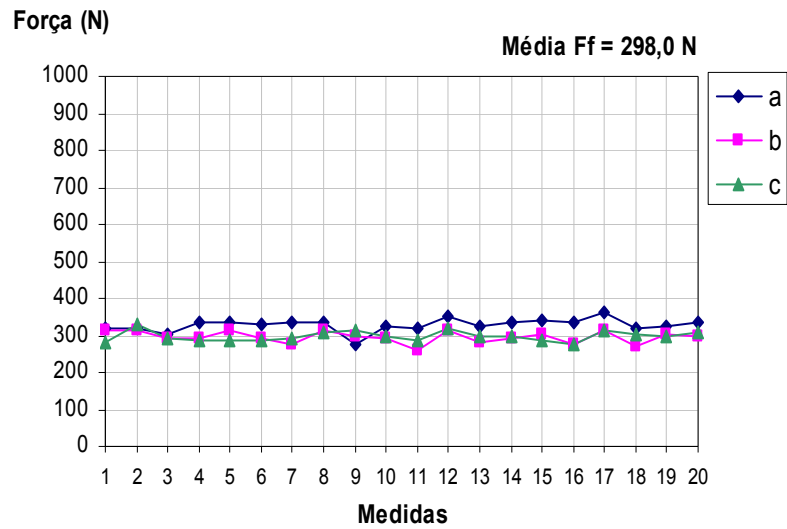


Figura 8.27 – Força de Avanço Ensaio 14

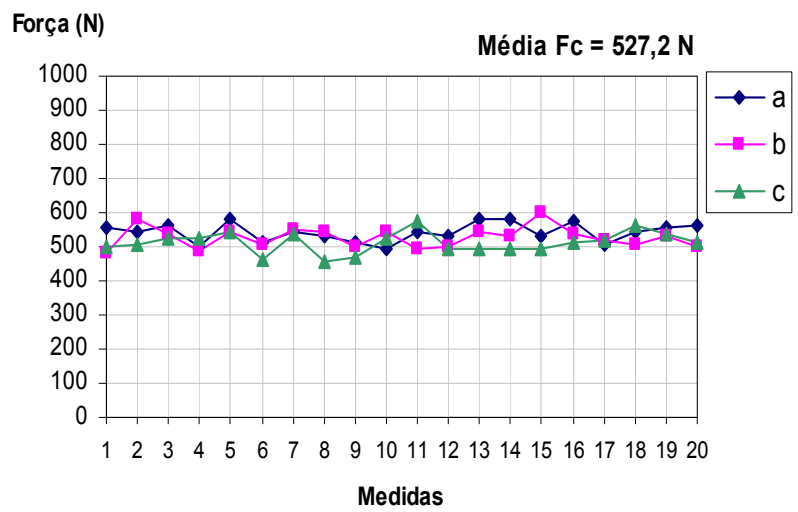


Figura 8.28 – Força de Corte Ensaio 14

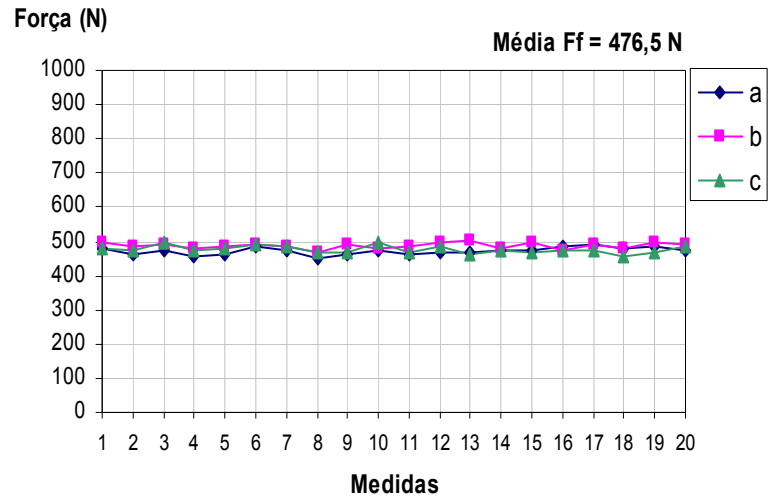


Figura 8.29 – Força de Avanço Ensaio 15

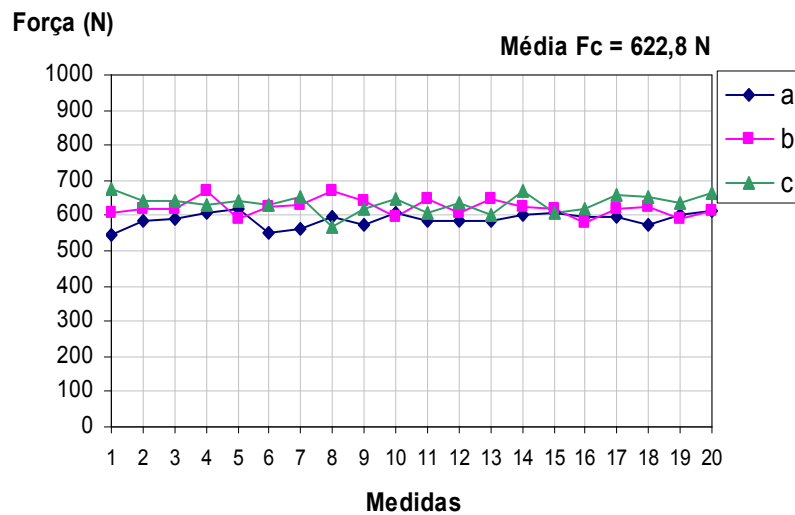


Figura 8.30 – Força de Corte Ensaio 15

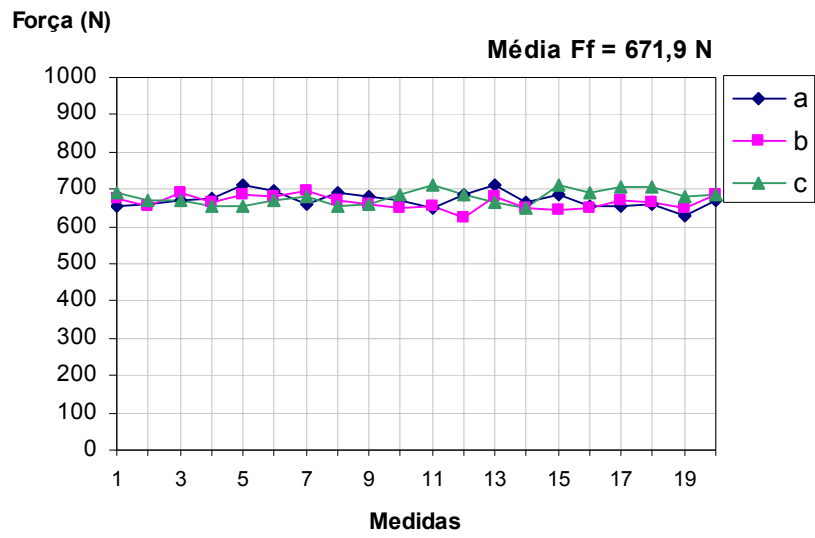


Figura 8.31 – Força de Avanço Ensaio 16

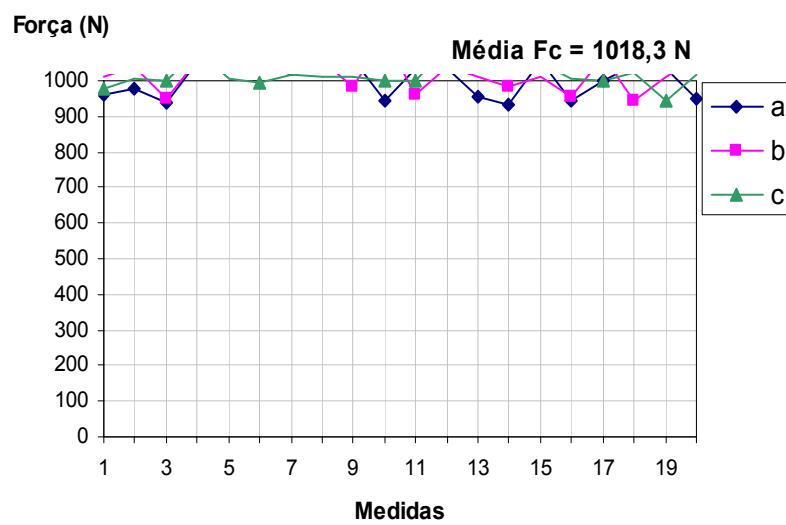


Figura 8.32 – Força de Corte Ensaio 16

8.3 Cavacos Obtidos nos Ensaio



Figura 8.33 – Cavaco Ensaio 1



Figura 8.34 – Cavaco Ensaio 2



Figura 8.35 – Cavaco Ensaio 3



Figura 8.36 – Cavaco Ensaio 4



Figura 8.37 – Cavaco Ensaio 5



Figura 8.38 – Cavaco Ensaio 6



Figura 8.39 – Cavaco Ensaio 7



Figura 8.40 – Cavaco Ensaio 8



Figura 8.41 – Cavaco Ensaio 9



Figura 8.42 – Cavaco Ensaio 10



Figura 8.43 – Cavaco Ensaio 11



Figura 8.44 – Cavaco Ensaio 12



Figura 8.45 – Cavaco Ensaio 13



Figura 8.46 – Cavaco Ensaio 14



Figura 8.47 – Cavaco Ensaio 15



Figura 8.48 – Cavaco Ensaio 16

9. ANEXOS

Ra (μ inch)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0,5
Ra (μ m)	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Rq (μ inch)	2112	1056	528	265	134	66,2	35,5	16,8	8,4	4,1	2,05	1,03	0,52
Rq (μ m)	53,8	26,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,86	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
Rmax (μ inch)	-	-	-	590	406	209	103	50	24	12	5,9	2,9	1,5
Rmax (μ m)	-	-	-	15	10,3	5,30	2,70	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04

Corte por chama	///	///	///										
Moldagem em areia	///	///	///										
Laminação a quente	///	///	///										
Forjamento		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Plainamento		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Rasquete	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Corte de serra	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Furação		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Usinagem química		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Corrosão eletrolítica		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Fresamento		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Torneamento / Mandrilamento		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Brochamento				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Alargamento				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Moldagem em coquilha				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Moldagem de precisão extrusão				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Laminação a frio-estir.		///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Moldagem sob pressão				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Retífica				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Êspelhamento				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Polimento eletrolítico							///	///	///	///	///	///	///
Rolagem							///	///	///	///	///	///	///
Polimento							///	///	///	///	///	///	///
Lapidação							///	///	///	///	///	///	///
Superacabamento							///	///	///	///	///	///	///



	Aplicação menos comum		Campo usual de aplicação
---	-----------------------	---	--------------------------

Figura 9.1 – Rugosidade em Função do Processo de Fabricação

