

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Avaliação da Força de Usinagem e
Energia Específica de Corte no Fresamento
com Alta Velocidade de Corte”**

Aldo Marcel Yoshida Rigatti

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP - Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação

Ilha Solteira - SP

Fevereiro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP – Ilha Solteira.

R565a Rigatti, Aldo Marcel Yoshida.
Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte / Aldo Marcel Yoshida Rigatti. Ilha Solteira : [s.n.], 2010
87 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2010

Orientador: Alessandro Roger Rodrigues

1. Usinagem. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Energia.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte

AUTOR: ALDO MARCEL YOSHIDA RIGATTI

ORIENTADOR: Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA, Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EPALDO JANNONE DA SILVA
Departamento de Engenharia de Produção / Universidade de São Paulo

Data da realização: 26 de fevereiro de 2010.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Madalena e Osvaldo pela educação a mim atribuída, à minha noiva Maria Thereza pela compreensão nos momentos de ausência e a Deus por todos os momentos de superação durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues pela orientação ao longo deste período, confiança depositada e permanente incentivo.

Ao Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto pela co-orientação, pelos importantes ensinamentos e apoio na realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Juno Gallego pelas inúmeras colaborações na parte teórica e experimental do trabalho.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho e ao técnico Ariel Fernando Gatti da EESC/USP que possibilitaram a realização dos ensaios de medição de força.

À equipe da oficina mecânica e ao técnico Mariano Teixeira Caetano da UNESP/FE/Campus Ilha Solteira que auxiliaram na fabricação de dispositivos de fixação para os ensaios.

Aos funcionários da seção de Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Mecânica por estarem sempre prontos a servir.

A toda equipe do Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) pelo apoio e amizade durante todo tempo de realização do trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para concretização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.

Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.

Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ...”

Martin Luther King

RESUMO

RIGATTI, A. M. Y. **Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte.** 2010. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência das condições de fresamento na força de usinagem e na energia específica de corte. Foram ensaiados dois tipos de materiais que sofreram diferentes formas de tratamentos térmicos. O aço CL 23 (Eaton Ltda) foi normalizado, resfriado ao forno e resfriado ao ar, e o aço COS AR 60 (Usiminas S/A) foi empregado na condição “como recebido” e tratado termomecanicamente, onde a microestrutura foi refinada a 1,7 μm . Para o primeiro material, empregou-se 3 condições de usinagem, com parâmetros de corte fixos e distintos entre si, e para o segundo material, foram utilizadas 8 condições, em que todos os parâmetros variaram visando à aplicação da Análise de Variância (ANOVA). Os ensaios de fresamento de topo concordante a seco foram conduzidos em um centro de usinagem CNC de 11 kW de potência e rotação do eixo-árvore de 7.500 rpm. Empregou-se ferramenta de diâmetro 25 mm com dois insertos de metal duro revestidos com TiN e TiAlN. A força de usinagem foi obtida utilizando-se um dinamômetro piezelétrico de 3 componentes e sistema de aquisição, cujos sinais foram pós-processados para o cálculo da força de usinagem máxima, força de usinagem RMS e energia específica de corte. Os resultados apontam para uma influência da condição de usinagem sobre a força de usinagem e energia específica de corte. A condição com alta velocidade de corte (HSC - *High-Speed Cutting*) apresentou menores forças de usinagem e maiores energias específicas de corte. A usinagem assumida como convencional, apresentou maiores níveis de força de usinagem e energia específica menores. A força de usinagem se mostrou estatisticamente dependente da profundidade de usinagem e a energia específica do avanço da ferramenta. A velocidade de corte influenciou de forma significativa na força de usinagem e na energia específica de corte. A condição microestrutural do material das peças apenas mostrou-se influente nas variáveis pesquisadas quando houve diferenças significativas em suas propriedades mecânicas, tal como a dureza. Os resultados de energia específica de corte gerados por trabalho apresentam boa correlação com os obtidos através dos modelos propostos por Taylor, Kienzle, ASME, AWF e Sandvik.

Palavras-chave: *Energia específica de corte, força de usinagem, fresamento HSC.*

ABSTRACT

RIGATTI, A. M. Y. **Evaluation of the machining force and specific cutting energy on milling at high-speed cutting**. 2010. 87f. Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira 2010.

This research deals with the influence of milling conditions on machining force and specific cutting energy. Two kind of workpiece materials thermally treated were used on tests. CL23 carbon steel (Eaton Ltda) was normalized, furnace cooled and air cooled and COS AR 60 carbon steel (Usiminas S/A) was employed in "as received" and refined grains (1.7 μm) conditions. For the first material, three machining conditions were applied with constant and different cutting parameters. For the second steel, eight machining conditions were implemented where all cutting parameters varied aiming at application of Variance Analysis (ANOVA). The machining tests were carried out by using dry end milling under down milling strategy in a CNC machining center with 11 kW power and 7,500 rpm spindle speed. A 25 mm diameter endmill with two inserts (TiN and TiNAl coatings) was used. The machining force was measured by means of 3-components piezoelectric dynamometer and acquisition system, whose signals were post-processed in order to calculate the maximum machining force, RMS machining force and specific cutting energy. The results show the cutting condition influences on all researched variables. High-speed cutting (HSC) decreased the machining force and increased the specific cutting energy. The milling named conventional condition elevated the machining force and diminished the specific cutting energy. The depth of cut was statistically influent on machining force and the feed per tooth was determinant for specific cutting energy. The cutting speed influenced significantly on machining force and specific cutting energy. Microstructural condition of workpiece material demonstrated to be important over studied variables only when hardness values were different significantly. The results of specific cutting energy from this work present good correlation with those obtained from theoretical models proposed by Taylor, Kienzle, ASME, AWF and Sandvik.

Keywords: *Specific cutting energy, machining force, high-speed cutting, milling process.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Geometria do cavaco.....	21
Figura 2.2 - Tipos de fresamento frontal.....	22
Figura 2.3 - Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento. .	23
Figura 2.4 - Distinção entre velocidade de corte convencional e HSC para vários materiais e operações.....	25
Figura 2.5 - Variação da temperatura de corte com a velocidade de corte.....	27
Figura 2.6 - Desenvolvimento histórico da usinagem com altas velocidades de corte.	29
Figura 2.7 - Variação da força de corte com a velocidade de corte pra o aço AISI 4340.	32
Figura 2.8 - Cavaco segmentado.....	34
Figura 2.9 - Zona de cisalhamento primária e secundária na peça durante a usinagem.....	36
Figura 2.10 - Variação da energia específica de corte com a profundidade de usinagem.....	38
Figura 2.11 - Variação da energia específica de corte com o avanço segundo AWF 158.....	38
Figura 2.12 - Energia específica de corte em função da espessura de corte h	39
Figura 2.13 - Relação entre energia específica de corte e área da seção de corte para vários materiais.	40
Figura 2.14 - Comportamento da energia específica de corte em função da velocidade de corte.	41
Figura 2.15 - Energia específica de corte em função da velocidade de corte para diferentes materiais.	41
Figura 2.16 - Energia específica versus espessura de corte para diferentes operações de usinagem.	43
Figura 2.17 - Energia específica de corte em função do avanço obtida por diferentes pesquisadores.	45
Figura 2.18 - Energia específica em função da espessura de corte h	46
Figura 2.19 - Energia específica em função da espessura de corte h em escala dilogarítmica.....	47
Figura 3.1 - Micrografia das amostras do aço CL 23 (a) normalizado, (b) resfriado ao forno e (c) resfriado ao ar.	49
Figura 3.2 - Geometria dos corpos de prova do aço CL 23 para avaliação da força de usinagem (\varnothing 70 x 15 mm).	49
Figura 3.3 - Micrografia do COS AR 60 (a) “como recebido” e (b) microgrão.....	51
Figura 3.4 - Desenhos esquemáticos do (a) suporte e (b) inserto de metal duro. Fonte: Sandvik (2003).	52
Figura 3.5 - Fixação do dinamômetro e do corpo de prova (a) CL 23 e (b) COS AR 60 no centro de usinagem. .	55
Figura 3.6 - Passes realizados nos corpos de prova (a) CL 23 e (b) COS AR 60 para medição da força de usinagem.....	56
Figura 3.7 - Montagem do dinamômetro para os ensaios do aço (a) CL 23 e (b) COS AR 60.	57

Figura 4.1 - Força de usinagem máxima para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.	61
Figura 4.2 - RMS dos sinais das forças de usinagem máximas para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.	63
Figura 4.3 - Energia específica de corte para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.	65
Figura 4.4 - Força de usinagem máxima para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.....	67
Figura 4.5 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a força máxima de usinagem.	69
Figura 4.6 - RMS da força de usinagem para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.....	70
Figura 4.7 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a força de usinagem RMS.	71
Figura 4.8 - Energia específica de corte para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.....	73
Figura 4.9 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a energia específica do aço COS AR 60.....	74
Figura 4.10 - Comparação da energia específica de corte para o aço COS AR 60 na condição CR.	76
Figura 4.11 - Comparação da energia específica de corte para o aço COS AR 60 na condição MG.	77
Figura 4.12 - Energia específica de corte em função da velocidade de avanço da ferramenta.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Significado das siglas de usinagem com alta velocidade de corte.	24
Tabela 2.2 - Vantagens e limitações da aplicação da técnica HSC.	31
Tabela 2.3 - Influência da espessura de corte na energia específica de corte.	40
Tabela 2.4 - Influência da velocidade de corte na energia específica de corte.	42
Tabela 3.1 - Composição química nominal do CL 32 utilizado na fase 1 da pesquisa (% em peso).	48
Tabela 3.2 - Tamanho médio de grão das amostras de CL 23.	49
Tabela 3.3 - Especificação química do aço COS AR 60 utilizado nos testes de usinagem (% em peso).	50
Tabela 3.4 - Corpos de prova do aço COS AR 60 caracterizados pela dureza e condição microestrutural.	50
Tabela 3.5 - Parâmetros de corte adotados no ensaio de usinagem do aço CL 23.	53
Tabela 3.6 - Simplificação dos níveis dos fatores de controle para o ensaio utilizando o aço COS AR 60.	53
Tabela 3.7 - Planejamento Fatorial para o experimento utilizando o COS AR 60.	54
Tabela 3.8 - Condições de corte para o ensaio de usinagem.	54
Tabela 4.1 - Valores obtidos para a força máxima de usinagem e seus respectivos desvios [N].	67
Tabela 4.2 - Quadro ANOVA sobre a resposta da força máxima de usinagem.	68
Tabela 4.3 - Valores RMS obtidos para as forças de usinagem e seus respectivos desvios [N].	69
Tabela 4.4 - Quadro ANOVA sobre a resposta da força de usinagem RMS.	71
Tabela 4.5 - Valores obtidos para energia específica de corte e desvios para o COS AR 60 [J/mm ³].	72
Tabela 4.6 - Quadro ANOVA para a energia específica de corte do aço COS AR 60.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A	Amostra resfriada ao ar
APC	Aresta postiça de corte
CNC	Controle Numérico Computadorizado
C_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]
CR	Condição do material “como recebido”
D	Diâmetro da fresa [mm]
F	Amostra resfriada ao forno
F_{ap}	Força de apoio [N]
F_c	Força de corte [N]
F_e	Força efetiva de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_p	Força passiva ou de profundidade [N]
F_t	Força ativa [N]
F_u	Força de usinagem [N]
F_x	Força na direção x
F_y	Força na direção y
F_z	Força na direção z
HB	Dureza Brinell [HB]
HPC	<i>High-Performance Cutting</i> (Alta taxa de remoção de material)
HRC	Dureza Rockell na escala C [HRC]
HSC	<i>High-Speed Cutting</i> (Alta velocidade de corte)
HSM	<i>High-Speed Machining</i> (Usinagem com altas velocidades)
HV	Dureza Vickers [HV]

HVM	<i>High Velocity Machining</i> (Usinagem com altas velocidades)
I_c	Impulso de corte [N.s]
MQF	Mínima quantidade de fluido
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
N	Amostra normalizada
R_c	Grau de recalque
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor quadrático médio)
TRM	Taxa de remoção de material
V_{rem}	Volume de material removido da peça [mm ³]

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a_e	Penetração de trabalho ou largura de usinagem [mm]
a_p	Profundidade de usinagem [mm]
b	Comprimento de corte [mm]
f	Avanço da ferramenta de corte [mm/rev]
f_z	Avanço por dente da ferramenta de corte [mm/dente]
h	Espessura de corte [mm]
h'	Espessura do cavaco [mm]
h_m	Espessura média do cavaco [mm]
h_{max}	Espessura máxima do cavaco [mm]
k_{c1}	Força de corte específica [N/mm ²]
k_s	Pressão específica de corte [N/mm ²]
k_{s1}	Constante específica do material (Kienzle)
l	Comprimento de contato peça-ferramenta na geração do cavaco [mm]
mc	Elevação da força de corte específica
s	Área da seção de corte [mm ²]

t_c	Tempo de corte
u	Energia específica de corte [J/mm ³]
u_s	Energia específica de cisalhamento [J/mm ³]
v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
v_{cav}	Velocidade do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta [m/min]
z	Coeficiente angular da reta (Kienzle)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de folga [°]
γ	Ângulo de saída [°]
λ	Ângulo de inclinação [°]
ϕ	Ângulo de cisalhamento [°]
χ	Ângulo de posição [°]
σ	Tensão normal [MPa]
τ_r	Tensão de cisalhamento na ruptura do material [MPa]
τ	Tensão de cisalhamento do material [MPa]
η	Ângulo de direção efetiva de corte [°]
ψ_0	Ângulo de contato do dente com a peça [°]
ψ	Ângulo de direção do avanço [°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.2 Justificativas	17
1.3 Estrutura do Trabalho	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Processo de Fresamento	19
2.1.1 Definições	19
2.1.2 Operações	20
2.1.3 Forças de Usinagem	22
2.2 Usinagem com Alta Velocidade de Corte	24
2.2.1 Definições	25
2.2.2 Histórico	27
2.2.3 Aplicações	30
2.2.4 Fenomenologia	31
2.3 Energia Específica de Corte	34
2.3.1 Definições	34
2.3.2 Fatores de Influência	36
2.3.3 Métodos de Cálculo e Estimação	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 Corpos de Prova	48
3.2 Planejamento Experimental	52
3.3 Banco de Ensaios	55
3.4 Procedimento Experimental	56
3.4.1 Ensaios de Usinagem e Aquisição	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Material CL 23	61
4.1.1 Força de Usinagem	61
4.1.2 Energia Específica de Corte	64
4.2 Material COS AR 60	66
4.2.1 Força de Usinagem	66
4.2.2 Energia Específica de Corte	72
4.2.3 Comparação entre Métodos de Cálculo de Energia Específica de Corte	75
5 CONCLUSÕES	80
5.1 Recomendações para Trabalhos Futuros	81
6 REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Usinagem é um dos mais importantes processos de fabricação. Peças fabricadas por outros processos muitas vezes exigem mais operações antes que o produto esteja pronto para aplicação. Operações de usinagem podem ser aplicadas tanto em materiais metálicos como em não metálicos, tais como polímeros, madeira, cerâmico e compósito. Atualmente nos países industrializados, o custo com usinagem soma mais de 15% de todos os processos de fabricação nestes países. Por este motivo, a usinagem, como parte da ciência da fabricação e tecnologia, é muito importante para as indústrias de manufatura moderna (DAVIM, 2008).

O processo de usinagem por fresamento é um dos mais universais e conhecidos, possuindo grande variação quanto ao tipo de máquina utilizada, movimento da peça e tipos de ferramentas. As aplicações freqüentes do processo são a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas, entre outros. Como vantagens gerais do processo de fresamento pode-se citar as altas taxas de remoção obtidas e a possibilidade de obtenção de superfícies de elevada qualidade e complexidade (KRATOCHVIL, 2004).

Com a evolução dos processos de usinagem, tem-se aumentado bastante a utilização da usinagem denominada *High-Speed Machining* (HSM), principalmente devido às grandes vantagens atribuídas ao processo, como por exemplo, economia de tempo, menores esforços de corte, melhor dissipação de calor, menor distorção da peça, melhor precisão, menores níveis de vibração mecânica, maior facilidade na remoção e armazenamento de cavacos e melhor acabamento superficial, visando sempre o crescimento da produtividade (CHEVRIER et al., 2003).

O monitoramento das componentes da força de usinagem é a base para o projeto de uma máquina-ferramenta, para a determinação das condições de corte, para a avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça), para a explicação de mecanismos de desgaste e também como um critério para a determinação da usinabilidade de um dado material de peça (FERRARESI, 1970).

Com o monitoramento das forças, é possível calcular a energia específica de corte que é uma relação entre a potência de corte e taxa de remoção de material (KING; HAHN, 1986). A energia específica de corte pode ser considerada como um parâmetro adequado

para estudar a usinagem HSM. Ele pode representar muito bem o fenômeno de corte, uma vez que é normalizada e é mais sensível a pouca profundidade do corte, condição especialmente aplicada neste tipo de operação (RODRIGUES et al., 2007). Elevados valores de energia específica geram elevadas taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais na peça, que podem convergir para uma pobre integridade superficial do produto, enquanto valores de energia específica baixos resultam em menos danos à peça, indicando qualidade e eficiência da ferramenta de corte.

1.1 Objetivos

O trabalho de pesquisa apresenta as seguintes metas principais:

- Investigar o efeito global de condições de corte ou estratégias de fresamento na força de usinagem e energia específica de corte;
- Estudar o efeito isolado dos parâmetros de corte na força de usinagem e energia específica de corte;
- Avaliar o efeito de diferentes condições microestruturais da peça na força de usinagem e energia específica de corte;
- Gerar um modelo de estimação da energia específica de corte e comparar com os modelos propostos na literatura técnico-científica.

1.2 Justificativas

A usinabilidade pode ser entendida como um conjunto de características globais resultantes da interação entre a peça, a ferramenta, os parâmetros de corte e o processo de fabricação. Não é uma propriedade do material, mas o modo como ele se comporta perante uma dada condição fixa de usinagem.

Neste contexto, as razões que motivaram a realização deste trabalho de pesquisa fundamentam-se, basicamente, em avaliar a usinabilidade de materiais de origens e aplicações distintas, além de compreender os efeitos que os principais parâmetros de corte podem causar em índices de usinabilidade tipicamente conhecidos, como a força de usinagem, e naqueles não tão utilizados, como a energia específica de corte.

No primeiro caso, o material CL23 é proveniente de um ambiente industrial do ramo metal-mecânico real, condizente com a realidade da engenharia de fabricação atual. Avaliar o comportamento da força de usinagem e da energia específica de corte desse material, gerado por diferentes tratamentos térmicos, pode permitir, entre outros ganhos, escolher estratégias de usinagem otimizadas, minimizar energia no processamento metalúrgico do material da peça e produzir peças usinadas com integridade superficial preservada.

No segundo caso, o material COS AR 60 é um aço comercial baixo carbono, cujos índices de usinabilidade são similares aos do aço ABNT 1015. Entretanto, o levantamento de indicadores de usinabilidade do material com grãos ultrafinos, derivado do material original, representa um estreitamento entre engenharia de microestrutura e de fabricação, uma vez que o processamento termomecânico de refino de grão gera um material inovador, ainda concebido em escala laboratorial no Brasil. Portanto, os índices de usinabilidade deste material ainda são desconhecidos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este documento está dividido e organizado em 5 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a contextualização do trabalho de pesquisa, a motivação e os objetivos que fundamentaram sua execução, bem como a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 trata da revisão da literatura e das fundamentações teóricas que explicam e se relacionam ao tema de pesquisa.

Encontra-se no Capítulo 3 uma descrição sobre os materiais e métodos empregados na execução dos ensaios.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais obtidos e sua respectiva discussão e o Capítulo 5 trata das conclusões do trabalho, sintetizando o conteúdo deste documento.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as referências utilizadas para compor a revisão da literatura e confrontar os resultados medidos com os obtidos por outros pesquisadores.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir é apresentada uma revisão teórica sobre o assunto tratado neste trabalho. Buscou-se a maior quantidade de informações relevantes, visando elaborar uma revisão sobre os principais assuntos abordados, por meio de pesquisas em manuais sobre usinagem e livros, além de artigos publicados. Os principais temas abordados nesta revisão estão divididos em três grupos: processo de fresamento, usinagem com alta velocidade de corte e energia específica de corte.

2.1 Processo de Fresamento

O fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria atual, devido a aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (MARCELINO et al., 2004).

2.1.1 Definições

Segundo a norma ABNT NBR 6175 de 1971, usinagem é um processo mecânico mediante a remoção de cavaco por determinada ferramenta, visando conferir a uma peça a forma, as dimensões ou acabamento especificado, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens. O cavaco é definido como uma porção de material removido da peça pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970).

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Neste processo a ferramenta gira e a peça e ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1970; SHAW, 1984). Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), boa parte das superfícies não planas de peças somente podem ser geradas por fresamento.

A fresa é uma ferramenta provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. Uma fresa pode apresentar as mais variadas formas, conferindo a esta

operação um caráter versátil em termos de geometrias possíveis de serem geradas. Shaw (1984) comenta que uma grande vantagem da operação de fresamento é que ferramentas pequenas e leves podem facilmente ser rotacionadas a altas velocidades para produzir superfícies planas ou curvas em peças de uma larga variedade de tamanhos e formas.

2.1.2 Operações

Dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais versátil na geração de superfícies planas. Sua versatilidade é possível devido principalmente à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por conseqüência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Além disto, a operação de fresamento apresenta outra vantagem em relação aos demais processos de usinagem, que é o fato de utilizar ferramentas que podem apresentar um número elevado de arestas de corte. Isto permite aliar a alta produtividade do processo à capacidade de gerar superfícies com um ótimo acabamento superficial, pois é possível utilizar altas velocidades de avanço (alta produtividade) com um avanço por dente pequeno (bom acabamento) (COSTA, 2003).

De acordo com a norma ABNT NBR 6175, existem 2 tipos básicos de fresamento, conforme a disposição dos dentes da fresa, e um terceiro que é a junção dos tipos básicos:

- Fresamento cilíndrico tangencial: processo destinado à obtenção de superfícies planas paralelas ao eixo de rotação da ferramenta;
- Fresamento frontal: processo destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta;
- Fresamento composto: em alguns casos, tem-se a junção dos dois tipos básicos, podendo haver predominância de um ou um caso de fresamento composto.

O fresamento também pode ser discordante, onde o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotativo da fresa, e concordante, onde o sentido do avanço é o mesmo do movimento giratório da fresa.

No fresamento discordante, quando a ferramenta toca a peça, como inicialmente a espessura do cavaco é zero e aumenta gradativamente, a tendência é do corte não ser realizado, ocorrendo um processo de deformação plástica, não formando cavacos e gerando

calor devido ao atrito peça-ferramenta. A remoção de cavaco somente será iniciada quando a pressão da aresta cortante atingir níveis para vencer a tensão de ruptura do material. Assim, esse processo produz uma alternância da componente vertical da força de usinagem, pois inicialmente o dente da fresa comprime a peça contra a mesa da fresadora. Com o início da remoção de cavaco a força se inverte e tende a arrancar a peça da mesa. A alternância de forças leva a vibrações que podem prejudicar o acabamento e a tolerância da peça fresada.

No fresamento concordante, a espessura do cavaco inicia em um máximo e reduz progressivamente até zero, isso faz com que o efeito da vibração seja minimizado, pois a força sempre permanece no mesmo sentido, comprimindo a peça contra a mesa da fresa, porém ainda existe o inconveniente do grande impacto de entrada da ferramenta que causa uma redução em sua vida. Toh (2004) afirma que o desgaste da ferramenta em fresamento concordante pode ser maior, porém quando tentamos preservar a ferramenta usando o corte discordante, tem-se o inconveniente de um pior acabamento superficial devido a vibrações.

Segundo Shaw (1984), os cavacos do processo de fresamento são geralmente curtos e de segmentos descontínuos, que são decorrentes da geometria do processo. A espessura de corte varia de zero a um máximo no corte discordante e de um máximo a zero no corte concordante. A Figura 2.1 mostra a geometria de um cavaco para fresamento concordante.

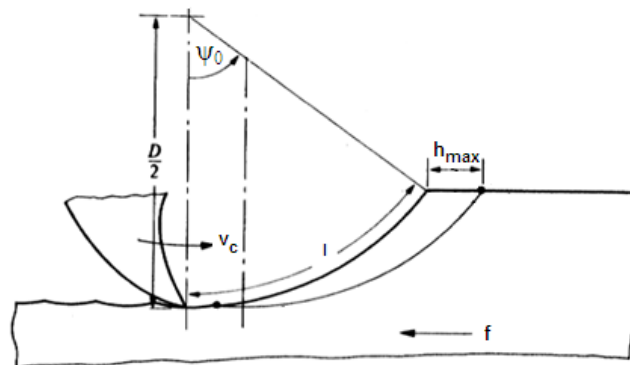


Figura 2.1 - Geometria do cavaco.

Fonte: Shaw (1984).

No fresamento frontal, pode-se ter formas de cavaco diferentes. No caso do fresamento frontal simétrico, onde a fresa se desloca sobre o eixo de simetria da peça, tem-se o início do cavaco com uma espessura inicial, passando por um máximo no eixo de simetria da peça e terminando com espessura inicial novamente. No fresamento frontal

assimétrico, quando toda superfície é fresada com fresas de facear, a espessura de corte se inicia em um mínimo e termina em um máximo. A Figura 2.2 exemplifica os casos citados.

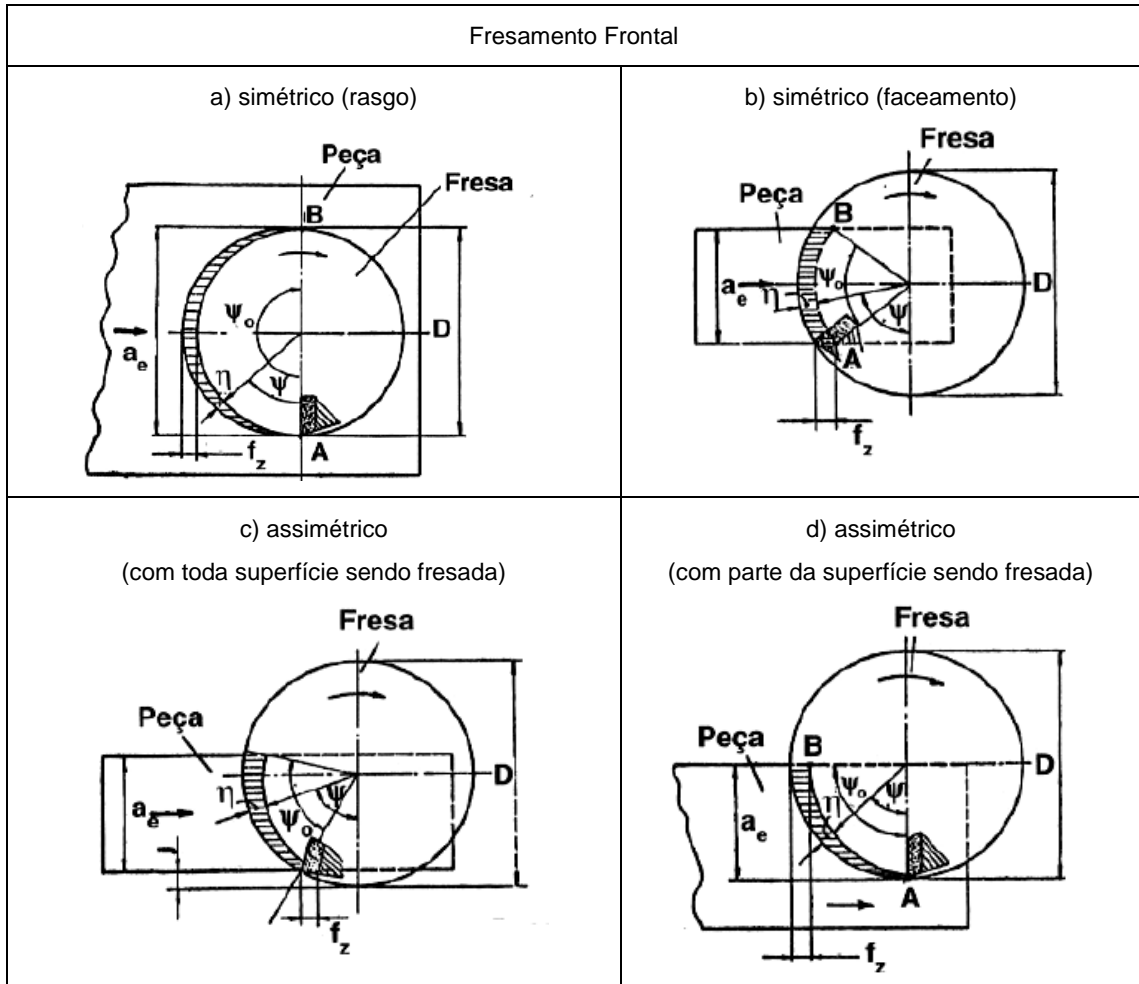


Figura 2.2 - Tipos de fresamento frontal.

Fonte: Modificado de Diniz, Marcondes e Coppini (2006).

2.1.3 Forças de Usinagem

O conhecimento das forças de usinagem ou de suas componentes (força de corte, de avanço e passiva) é a base para o projeto de uma máquina ferramenta, para a determinação das condições de corte, para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça), para a explicação de mecanismos de desgaste e também como um critério para a determinação da usinabilidade de peças.

A Figura 2.3 mostra as forças durante o fresamento. A força total que atua sobre a aresta de corte durante a usinagem é chamada força de usinagem F_u , suas componentes são a força ativa F_t e a força passiva F_p que é perpendicular ao plano de trabalho, plano onde os movimentos de usinagem são realizados, a força de usinagem é dividida em força de corte F_c , força de avanço F_f , força de apoio F_{ap} e força efetiva de corte F_e (não representada na figura) que é a projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

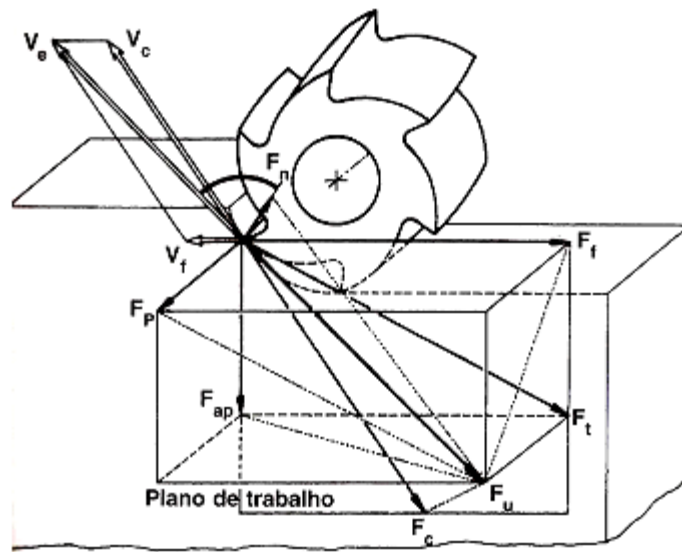


Figura 2.3 - Forças de usinagem em fresamento tangencial e suas componentes na operação de fresamento.

Fonte: Ferraresi (1970).

A força passiva F_p não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular ao movimento, sua importância está relacionada com a deflexão elástica da peça e flambagem da ferramenta durante o corte, com seu controle pode-se obter tolerâncias de forma e dimensões apertadas. Além disso, Costa (2003) afirma que a força passiva tem maior influência no desgaste do que a força de corte, tornando essa componente importante na determinação da vida da ferramenta e nos processos de monitoramento de desgaste.

Dentre os erros que podem ser causados pelas variações das forças de usinagem, o que exerce maior influência no acabamento e na tolerância dimensional é a deflexão da ferramenta. Segundo Law, Geddam e Ostafiev (1999), a deflexão da ferramenta de corte no fresamento de topo varia durante todo o processo, tanto na usinagem de segmentos retos quanto na usinagem de cantos. A exatidão no acabamento e na tolerância dimensional é, portanto, fortemente influenciada pela deflexão da ferramenta, que é causada pela variação das forças de corte, pelo diâmetro e pelo comprimento da fresa.

As forças de usinagem dependem de uma série de fatores, tais como material da peça, área da secção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição, estado de afiação da ferramenta, lubrificação e velocidade de corte. No item 2.3 (Energia Específica de Corte) será feito um estudo mais aprofundado em cada um desses fatores.

2.2 Usinagem com Alta Velocidade de Corte

Atualmente na usinagem dos materiais, há uma busca por maiores taxas de remoção com um elevado grau de automatização. Isto exige um processo de usinagem muito confiável, onde a previsibilidade do acabamento superficial, a precisão da peça e a vida das ferramentas são de grande importância (NING; RAHMAN; WONG, 2001). Desta forma, o conceito da usinagem com alta velocidade de corte tem ganhado grande destaque.

A usinagem com alta velocidade de corte (High-Speed Cutting - HSC) está ampliando cada vez mais seu campo de aplicação. Atualmente, várias indústrias, dentre elas aeronáutica, automobilística e, principalmente, a de fabricação de moldes e matrizes, têm recorrido a esta nova tecnologia, se é que se pode classificá-la assim, pois na verdade a usinagem com alta velocidade de corte ainda não está bem definida, principalmente em relação aos seus conceitos e à sua fenomenologia (PAULO, 2008).

Segundo Schützer e Schulz (2003), a usinagem com alta velocidade ainda apresenta dois segmentos de mercado distintos: a Usinagem com Altas Velocidades (High Velocity Machining - HVM) na qual a remoção de material é o mais importante e a Usinagem com Altíssimas Velocidades de Corte (High Speed Machining - HSM) com capacidade moderada de remoção de material, porém com velocidades de corte muito elevadas. Um resumo das nomenclaturas é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Significado das siglas de usinagem com alta velocidade de corte.

Sigla	Significado
HSC - High Speed Cutting	Prioriza o aumento de velocidade de corte
HSM - High Speed Machining	Prioriza o aumento da velocidade de todo conjunto
HVM - High Velocity Machining	Priorizam a remoção de material
HPC - High Performace Cutting	

2.2.1 Definições

O conceito de velocidade de corte no processo de usinagem, segundo a norma ABNT NBR 6162 de 1989, é definido como a velocidade instantânea de um ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. Esse parâmetro de usinagem é de extrema importância, pois tem-se uma dependência em relação o material usinado e aos diferentes processos de usinagem.

De acordo com Silva (2002), entende-se por usinagem com alta velocidade a usinagem de materiais com velocidades de corte e taxas de avanço aumentadas por um fator de 5 até 8 em relação às velocidades de corte e avanços tradicionais. Outros intervalos também têm sido mencionados na literatura, como de 7 a 10 vezes, por exemplo.

Schützer, Souza e Dionisio (1999) tratam a usinagem HSC como uma integração de várias concepções para manufatura, englobando desde o modelamento do produto utilizando um sistema CAD, passando por sistemas de auxílio à manufatura, geração de programas NC (controle numérico), até o processo de usinagem, envolvendo máquina-ferramenta, comando numérico, parâmetros e ferramentas de corte.

Christoffel (2001) afirma que utilizar somente a velocidade de corte convencional para definir os valores da alta velocidade de corte é insuficiente, pois o conceito de alta velocidade de corte depende do tipo de material e do tipo de operação. A Figura 2.4 apresenta as fronteiras entre velocidade de corte convencional e alta velocidade de corte.

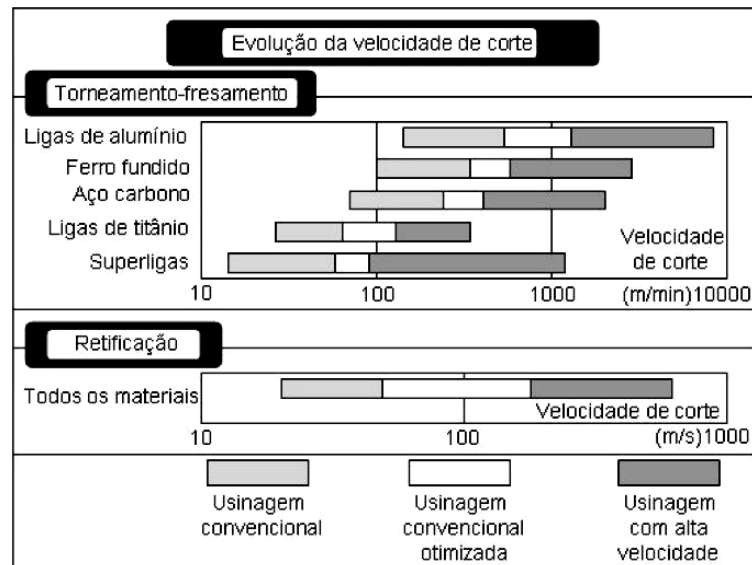


Figura 2.4 - Distinção entre velocidade de corte convencional e HSC para vários materiais e operações.

Fonte: Vigneau (1997).

Segundo Flom e Komanduri (1989), a usinagem com altíssimas velocidades de corte (HSC) é um termo relativo ao material da peça, por causa das diferentes velocidades nas quais os materiais podem ser usinados com aceitável vida da ferramenta. Por exemplo, é fácil usinar alumínio com aproximadamente 1800 m/min do que titânio a 180 m/min. Por causa desta diferença, a velocidade determina para um grau significativo se um material forma cavaco contínuo ou segmentado com cisalhamentos localizados. Assim, um modo de definir HSC é relacioná-la ao processo de formação do cavaco. Cisalhamentos localizados são ocasionados quando ocorre um efeito negativo da resistência ao aumento da temperatura, devido à intensa deformação plástica, que é igual ou maior ao efeito positivo do encruamento. Neste contexto, HSC para um dado material pode ser definido como a velocidade acima da qual o cisalhamento localizado se desenvolve completamente na zona primária de cisalhamento, mas isso não quer dizer que necessariamente em HSC só ocorram cavacos segmentados, há casos onde a usinagem HSC gera cavacos contínuos. Um detalhamento maior sobre o processo de formação de cavaco segmentado será visto no item 2.2.4.

A tecnologia HSC surge como uma alternativa a várias áreas de manufatura, como a fabricação de moldes e matrizes. Como seu nome sugere, tem-se uma usinagem em menores tempos e também melhorias no acabamento superficial, evitando etapas após a usinagem (DOLINSEK; EKINOVIC; KOPAC, 2004; AXINTE; DEWES, 2002; FANG; WU, 2009; LIAO, LIN e CHEN, 2009; BAUCO, 2003). Segundo Flom e Komanduri (1989) e Chevrier et al. (2003), a usinagem HSM causa também menores esforços de corte, melhor dissipação de calor, menor distorção da peça, melhor precisão, menores níveis de vibração mecânica, maior facilidade na remoção e armazenamento de cavacos, visando sempre o crescimento da produtividade.

Além da vantagem de se trabalhar com velocidades de corte de 5 a 10 vezes maiores que a convencional, normalmente também são usados avanços e profundidades de corte bem menores que os convencionais, possibilitando seu uso em operações de acabamento ou semi-acabamento, pela alta qualidade superficial que o processo HSC proporciona.

2.2.2 Histórico

O estudo da alta velocidade de corte iniciou-se com Carl J. Salomon na Alemanha em 27 de Abril de 1931, onde a empresa Friedrich Krupp AG recebeu a patente alemã referente às pesquisas efetuadas por Salomon. Em seus estudos, Salomon realizou usinagem de aços, metais não ferrosos e ligas leves utilizando velocidades de corte de 440 m/min para aços e velocidades de 16.500 m/min para alumínio. Para chegar a tais velocidades na época, Salomon utilizou serras circulares de grandes diâmetros, pois as máquinas disponíveis apresentavam baixas rotações.

O resultado mais importante obtido por Salomon foi o fato de que acima de determinadas velocidades de corte, as temperaturas de corte começavam a cair e em certas faixas velocidades de corte, a usinagem fica impraticável devido às altas temperaturas atingidas, conforme pode ser observado claramente na Figura 2.5., onde foram mantidos constantes o avanço e profundidade de usinagem.

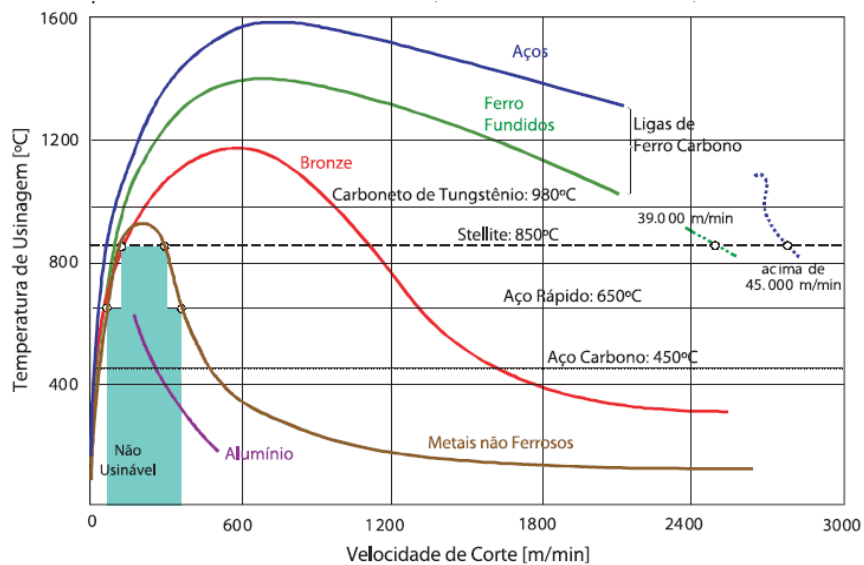


Figura 2.5 - Variação da temperatura de corte com a velocidade de corte.

Fonte: Schulz (1999).

O grande problema da não utilização da descoberta de Salomon deve-se ao fato de que ferramentas com grandes diâmetros raramente são usadas na prática, sendo assim impossível a aplicação de altas velocidades de corte na época de seus estudos, pois reduzindo o diâmetro das ferramentas, a rotação dos eixos-árvores das máquinas tem de

ser aumentadas para atingir altas velocidades. As pesquisas de Salomon foram então retomadas na década de 50, mesmo sem a existência de máquinas-ferramentas que pudessem alcançar a velocidade requerida. Para tanto, como forma alternativa, recorreu-se a ensaios balísticos. Estes ensaios consistiam em fixar a ferramenta em um projétil e no seu deslocamento por trilhos a ferramenta passava pela peça estacionária usinando-a ou a ferramenta ficava estacionária e a peça presa a projéteis passava pela ferramenta.

Dos ensaios da década de 50, outras importantes conclusões do processo foram obtidas. Com a alta velocidade de corte, as condições e a formação do cavaco são diferentes do processo convencional para alguns materiais da peça, que de contínuo passa a ser segmentado em altas velocidades de corte. A força de corte aumenta juntamente com velocidade de corte, mas a partir de uma determinada velocidade cai significativamente.

Já na década de 60, estudos realizados nos Estados Unidos demonstraram que a usinagem HSC permitia aumentar consideravelmente a produtividade e minimizar as vibrações nas máquinas-ferramentas. Nesta época, muitas pesquisas também se voltaram para os mecanismos de formação do cavaco em alta velocidade de corte.

Por volta de 1977, os estudos em HSC continuaram nos Estados Unidos com resultados dos ensaios balísticos e novas pesquisas com fresadoras que atingiam até 1980 m/min. Com o aumento da velocidade, a qualidade superficial foi melhorada e outro importante resultado obtido foi à dissipação de calor produzido no processo, onde grande parte é conduzido pelo cavaco.

Em 1979 na Alemanha, o *Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen* (PTW) focava suas pesquisas em mancais eletromagnéticos ativos para eixos-árvores de alta velocidade aplicados em máquinas-ferramentas e em 1980 esse objetivo foi alcançado, confirmando os resultados das pesquisas realizadas.

O processo de usinagem com alta velocidade de corte não ficou restrito apenas aos Estados Unidos e à Alemanha. Países como Austrália, França e Japão também investiram em pesquisas nesta área. O Japão, por exemplo, intensificou seus estudos na teoria de formação de cavacos (SCHÜTZER; SCHULZ, 2003). A Figura 2.6 sintetiza de forma cronológica o estado da arte das pesquisas com altas velocidades de corte no mundo.

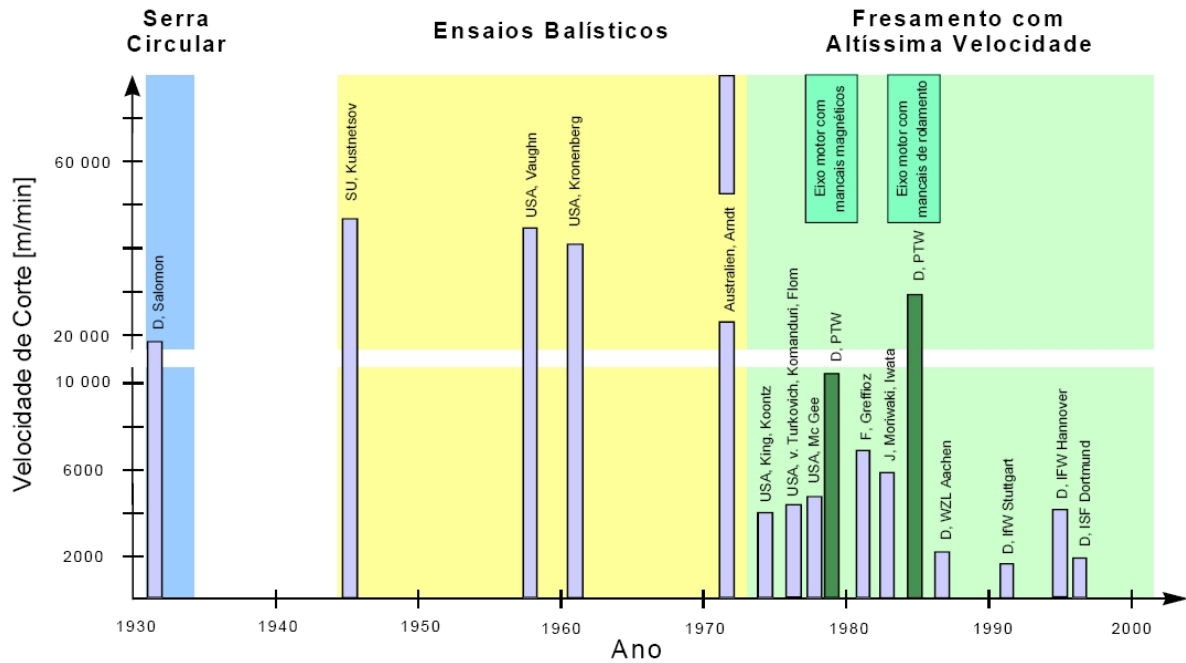


Figura 2.6 - Desenvolvimento histórico da usinagem com altas velocidades de corte.

Fonte: Schulz (1996).

A transformação de conhecimentos resultantes de pesquisas em produtos industriais ocupa um tempo relativamente longo, neste caso em particular cerca de 60 anos, devido não ao receio da indústria, mas pela falta de requerimento para implementação da usinagem em Altíssimas Velocidades de Corte. Somente na década de 80 as primeiras máquinas-ferramentas surgiram para o uso dessa nova concepção, que passou a ser aplicada no setor aeroespacial e automobilístico (SCHÜTZER; SCHULZ, 2003).

Não se pode esquecer que o desenvolvimento de máquinas-ferramentas para trabalharem em alta velocidade de corte conduziu também ao aprimoramento de novos materiais e coberturas para ferramenta de corte e novas estratégias de CAD/CAM para atender os estudos e a sua implantação na indústria.

Algumas empresas brasileiras já têm investido nesta tecnologia, adquirindo máquinas na faixa de transição para HSC e investindo em pesquisas científicas para auxiliar a implantação desta tecnologia no ambiente fabril, mas existe carência de profissionais qualificados, documentação técnica de suporte e *Know-How* suficiente para suprir as necessidades de mercado brasileiro. Embora a tecnologia HSC ainda esteja em desenvolvimento, já oferece inúmeras vantagens, representando uma alternativa valiosa para a indústria, aumentando a qualidade, reduzindo custos e tempos de produção (SCHÜTZER; SOUZA; DIONISIO, 1999).

As mais recentes pesquisas em HSC estão concentradas em quatro direções: desgaste de ferramenta, qualidade superficial, mecanismos de formação de cavaco e problemas da usinagem de materiais endurecidos (DOLINSEK et al., 2004). A tecnologia HSC vem ganhando espaço de destaque no setor de manufatura, na medida em que a economia mundial avança em direção à redução de lotes, configurações do produto ao cliente, grande diversidade de produtos e, principalmente, redução de seu tempo de vida, junto com a exigência de redução do tempo de lançamentos de novos produtos (HELLENO; SCHÜTZER, 2004).

2.2.3 Aplicações

O processo HSC é muito aplicado na produção de componentes automotivos, principalmente em blocos e cabeçotes de motores em ferro fundido e alumínio, sendo o processo de fresamento 2D o mais utilizado.

Encontra-se na indústria aeronáutica uma aplicação na fabricação de moldes e matrizes, sendo muita vantajosa nesta área se comparado com a usinagem convencional. A aplicação no setor acarreta em redução de tempo de usinagem, melhora da qualidade superficial e diminuição das forças de corte. Porém, atualmente, neste setor, até superligas a base de níquel, consideradas um dos materiais mais difíceis de serem usinados, estão sendo submetidos a este tipo de usinagem, a uma faixa de velocidade acima de 100 m/min (DUDZINSKI et al., 2004).

Outra aplicação é na produção de moldes e matrizes de materiais ferrosos, envolvendo as indústrias do setor automobilístico, eletrodomésticos e bens de consumo. A tecnologia HSC encontra-se com grande potencial para as áreas de prototipagem rápida, usinagem de ultra-precisão, usinagens de eletrodos para eletro-erosão, indústria óptica, usinagens com baixas temperaturas de processo, entre outras. A tecnologia HSC na Europa, Japão e EUA deixaram de ser apenas objeto de pesquisas em laboratórios e está sendo utilizada pela indústria com grande êxito (SCHÜTZER; SOUZA; DIONISIO, 1999).

A qualidade superficial alcançada no processo HSC reduz e, em alguns casos, elimina os processos de acabamento e semi-acabamento. Picos e vales na superfície da peça usinada obtidos no processo HSC são muito menores e, mesmo que a qualidade superficial não seja atingida após a usinagem HSC, o processo de acabamento, como por

exemplo um polimento, será executado em um menor tempo, reduzindo o tempo destes dois processos da cadeia produtiva.

Segundo Rodrigues e Coelho (2007), geralmente a melhoria no acabamento superficial com o emprego da usinagem HSC está relacionada ao mecanismo de formação do cavaco. A rugosidade das peças usinadas depende fortemente do avanço e da velocidade de corte. O primeiro pode ser associado mais diretamente à cinemática e geometria do processo de corte, sendo menor a rugosidade quanto menor a taxa de avanço. O segundo dita o padrão do comportamento plástico do cavaco ao ser cisalhado pela ação da aresta de corte da ferramenta.

A tecnologia HSC também usina pequenos detalhes e cantos sem retoques. Outra vantagem é usinar superfícies de moldes e matrizes endurecidas, em função das pequenas profundidades de usinagem e espessuras do cavaco.

Segundo Oliveira (2003), o processo HSC pode melhorar as características mecânicas da superfície usinada se comparada à eletroerosão. Testes realizados pela indústria automobilística europeia constataram que moldes e matrizes usinados no processo HSC tiveram suas vidas úteis elevadas quando comparadas com o processo de eletroerosão. As principais vantagens e desvantagens são resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Vantagens e limitações da aplicação da técnica HSC.

Vantagens	Desvantagens
Altas taxas de remoção de material	Maior desgaste das ferramentas
Menores forças de corte	Custos mais elevados de peças das máquinas
Menor distorção das peças	Controle e máquinas mais caras
Melhor qualidade superficial	Cuidado no balanceamento das ferramentas
Menos vibração mecânica	Baixa vida útil dos eixos das máquinas
Melhor dissipação de calor	Alto custo de manutenção

Fonte: Rodrigues (2005).

2.2.4 Fenomenologia

É confirmado que as forças de corte reduzem com o aumento da velocidade até uma velocidade característica do material. Além desta velocidade característica, a força de corte tende crescer aos poucos. Por exemplo, a força de corte para o aço AISI 4340 decresce até a velocidade de 1500 m/min e após esta velocidade característica, passa a aumentar

conforme a Figura 2.7. O decréscimo da força para alguns materiais requer menos potência da máquina, tornando possível usinagem de peças de paredes finas e parte de peças sem fixação (FLOM; KOMANDURI, 1989).

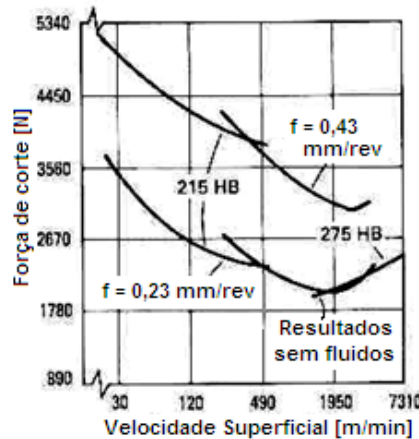


Figura 2.7 - Variação da força de corte com a velocidade de corte para o aço AISI 4340.

Fonte: Modificado de Flom e Komanduri (1989).

Schulz, Abele e Sahn (2001) observaram uma súbita diminuição da força de corte no momento da segmentação do cavaco e justificaram esta redução ao volume da banda de cisalhamento. Em comparação com um processo de corte com formação de cavacos contínuos, é necessário menos trabalho de deformação. Schulz, Abele e Sahn (2001) asseguram que a transição do cavaco contínuo para o segmentado é responsável pela redução das forças de corte.

Segundo Alauddin et al. (1998), a diminuição das forças de corte decorrem diretamente de dois fatores principais: aumento do ângulo de cisalhamento e diminuição do atrito na interface cavaco-ferramenta. Além disso, como é conhecido, a concentração de calor na região de corte aumenta a mobilidade atômica do material da peça, aumentando assim sua ductilidade e diminuindo a força de corte.

O uso de fluido de corte no processo é muito questionado. O fluido além de refrigerar, apresenta funções como lubrificação e remoção de cavacos. Em fresamento, o seu uso torna-se prejudicial à ferramenta levando a falhas mecânicas na aresta de corte devido à fadiga térmica. Porém, a remoção dos cavacos da área próxima da usinagem evitaria riscos na superfície. Um lubrificante reduziria o atrito na interface peça-ferramenta-cavaco e assim um bom sistema seria uma névoa de ar e óleo, onde o ar comprimido faz a

limpeza e o óleo lubrificante, processo conhecido como Mínima Quantidade de Fluido (MQF) (HEISEL; LUTZ; WASSMER; WALTER, 1998).

No processo de usinagem com altas velocidades são encontrados dois tipos diferentes de formações de cavacos, dependendo do tipo do material da peça e de sua respectiva condição metalúrgica: cavaco contínuo e segmentado. Materiais com estrutura cúbica de corpo centrado e cúbica de face centrada, materiais de alta difusividade térmica e baixa dureza, produzem cavacos contínuos em altas velocidades de corte. O cavaco segmentado é caracterizado por cisalhamento localizado e ocorre mais facilmente em materiais de estrutura hexagonal compacta, materiais com baixa difusividade térmica e materiais endurecidos (FLOM; KOMANDURI, 1989).

Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muito pouca ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos. É um processo totalmente diferente daquele verificado na formação do cavaco contínuo. Cook (1953) e Shaw et al. (1954) explicaram qualitativamente as características de segmentação dos cavacos. Em seus modelos, a taxa de diminuição na resistência do material, devido ao aumento local da temperatura (decorrente das deformações plásticas) iguala ou excede a taxa de aumento da resistência devido ao encruamento, no plano de cisalhamento primário. O cisalhamento para formar o cavaco começa a ocorrer em um plano de cisalhamento particular, quando as tensões, impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça, excedem o limite do escoamento do material.

A energia associada com esta deformação é convertida em calor imediatamente, e devido às pobres propriedades térmicas do material, altas temperaturas são desenvolvidas localmente. Isto vai provocar o amolecimento localizado do material e, portanto, as deformações continuam na mesma faixa (plano) de material, ao invés de se mudarem para novo plano de material adjacente, como ocorre na formação dos cavacos contínuos (COOK; 1953; SHAW, 1967).

Com o prosseguimento da deformação, existe uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da ferramenta e se movimenta por sobre a superfície de saída. Esta rotação vai prosseguindo até que o aumento de força devido a esta rotação excede a força necessária para deformar plasticamente o material mais frio, em outro plano mais favorável. Este processo já foi referido como “cisalhamento termoplástico catastrófico” (RECHT, 1964) ou “cisalhamento adiabático” (LE MAIRE; BACKOFEN, 1972) e resulta num processo cíclico de produção de cavacos na forma de uma serra dentada conforme a Figura 2.8.

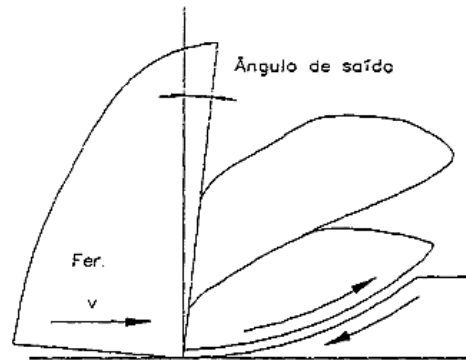


Figura 2.8 - Cavaco segmentado.

Fonte: Komanduri (1981).

2.3 Energia Específica de Corte

2.3.1 Definições

A energia específica de corte é uma das grandezas físicas mais importantes provenientes da fenomenologia da usinagem, sem esquecer-se de outros importantes parâmetros como força, temperatura de corte, tempo de usinagem, desgaste de ferramenta, entre outras (RODRIGUES, 2005).

No processo de usinagem, a energia total por unidade de tempo ou mesmo potência de corte pode ser determinada multiplicando-se diretamente a força de corte F_c pela velocidade de corte v_c . Entretanto, como muitos parâmetros influem diretamente no valor da energia consumida, ela é normalizada pela taxa de material removido da peça, ou seja produto da espessura de corte h , pela largura de corte b e velocidade de corte v_c , conforme Eq. 2.1

$$u = \frac{F_c \cdot v_c}{h \cdot b \cdot v_c} = \frac{F_c}{h \cdot b} \quad (2.1)$$

Na expressão acima u é denominado energia específica de corte, o que pode ser entendido também como a razão entre potência específica de corte e a taxa de remoção de material, o equivalente à energia por unidade de volume (KING; HAHN, 1986).

Para Shaw (1984), a energia específica de corte pode ser compreendida como uma quantidade intensiva que caracteriza a resistência oferecida ao corte por um dado material, assim como a tensão de tração e a dureza caracterizam a resistência a deformação plástica.

A energia específica é um conceito não só usado em usinagem com ferramentas de geometria definida e indefinida, mas também muito útil para processos de conformação (SHAW,1984). Na usinagem, podem-se estimar as forças de corte as quais, em projeto, determinam necessidades estruturais da máquina e em processo influem na qualidade dimensional e geométrica do produto. Em operações de usinagem, segundo Ersoy (2004), a energia específica de corte pode ser usada para determinar a potência requerida pela máquina-ferramenta.

A energia específica de corte pode ser considerada como um parâmetro adequado para estudar HSC, pois representa muito bem o fenômeno de corte, uma vez que é normalizado e é mais sensível à pouca profundidade de usinagem, condição especialmente aplicada em operações HSC (RODRIGUES et al., 2007).

Segundo Salmon (1992), a energia específica de corte tem uma relação direta com os resultados da usinagem. Valores altos de energia específica geram elevadas taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais na peça, que podem convergir para uma pobre integridade metalúrgica do produto, enquanto valores de energia específica baixos resultam em menos danos à peça, indicando qualidade e eficiência da ferramenta de corte (ERSOY, 2004).

Analogamente tem-se a pressão específica de corte k_s que é definida como a razão entre a força de corte e a área da seção de corte (MACHADO et al., 2009). Ela pode ser entendida como a energia efetiva consumida para remover uma unidade de volume do material da peça (SALMON, 1992). Em ambos os casos, a unidade é dada em energia por volume ou força por área. A pressão específica de corte é considerada um bom índice de usinabilidade dos materiais e permite compreender todo o processo de corte (POLONI; TURCHETTA, 2004). Dentre as várias formulações apresentadas por diversos pesquisadores, a expressão da pressão específica de corte para um caso geral é dada pela Eq. 2.2

$$k_s = \frac{F_c}{f \cdot a_p} \quad (2.2)$$

sendo F_c a força de corte, f o avanço e a_p a profundidade de usinagem. No sistema internacional, a pressão específica de corte é dada em N/m^2 ou submúltiplos, no entanto efetuando a multiplicação do denominador e numerador da Eq. 2.2 pela velocidade de corte v_c , têm-se uma forma equivalente da energia específica de corte, dada em J/mm^3 . A multiplicação da equação pela velocidade de corte não altera matematicamente o resultado e permite analisar a pressão específica de corte pelo aspecto energético do fenômeno de usinagem.

Os mecanismos de deformação plástica e rupturas inerentes aos processos de usinagem podem ser compreendidos pelo conceito de energia específica de corte. Cerca de $\frac{3}{4}$ da energia total é associada ao cisalhamento na zona primária, na direção do plano de cisalhamento, e $\frac{1}{4}$ da energia restante está associada à zona de cisalhamento secundária, interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte. Segundo Melo et al. (2003), a energia consumida no corte essencialmente converte-se em calor. Desse calor, aproximadamente de 80% a 90% é transferido para o cavaco, 5% a 10% à peça e 5% a 10% à ferramenta (TOH, 2005; LONGBOTTOM; LANHAM, 2006). A Figura 2.9 apresenta as regiões.



Figura 2.9 - Zona de cisalhamento primária e secundária na peça durante a usinagem.

Fonte: Sandvik (2000).

2.3.2 Fatores de Influência

A energia específica de corte sofre influência de vários parâmetros inerentes aos processos de usinagem. Dividindo esses fatores em três grupos, pode-se dizer que a energia específica depende do material da peça, de parâmetros de corte e da ferramenta.

As características inerentes às ferramentas de corte também trazem muitas variáveis influenciáveis na energia específica de corte. Do material do substrato passando pelo revestimento, geometria e até níveis de desgaste contribuem para alterar as magnitudes da energia específica.

Nas características intrínsecas ao material da peça tem-se a dureza, o tipo de material usinado, sua composição química e seu limite de resistência ao cisalhamento agindo na variação da energia específica de corte.

Materiais mais duros apresentam um maior valor de energia específica, mas deve-se ter cuidado quando se relaciona dureza com a energia específica, pois existem materiais de dureza semelhantes e valores de energia específica bem diferentes, devido a diferenças entre os elementos de liga ou estrutura cristalina.

A composição química do material tem uma grande influência sobre a energia específica. Por exemplo, para aços carbono comuns, o aumento da porcentagem de carbono eleva a energia específica de corte, já o aumento da porcentagem de fósforo, chumbo e boro fazem o valor da energia específica reduzir, devido à formação de planos de baixa resistência, o que requer menos energia para formação do cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

A tensão de ruptura ao cisalhamento, dentre as propriedades mecânicas mais comuns, é o fator mais adequado a se relacionar com a energia específica, uma vez que o mecanismo de formação do cavaco envolve cisalhamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

2.3.2.1 Condições e operações de usinagem

As influências dos parâmetros de corte e operações de usinagem na energia específica são os mais pesquisados. A seguir são apresentados os principais.

Profundidade de usinagem:

Estudos apontam para variações proporcionais pequenas na energia específica quando a profundidade de usinagem é alterada. Quanto maior a profundidade de usinagem, menor a energia específica de corte (ERSOY, 2004). A Figura 2.10 exemplifica o fato.

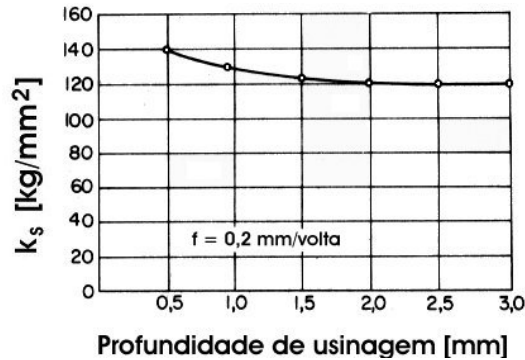


Figura 2.10 - Variação da energia específica de corte com a profundidade de usinagem.

Fonte: Ferraresi (1970).

Avanço:

O aumento do avanço causa uma diminuição no grau de recalque, acarretando em redução na energia específica de corte (FERRARESI, 1970). O avanço é mais sensível que a profundidade de usinagem, como pode ser visto ao comparar a Figura 2.10 e 2.11.

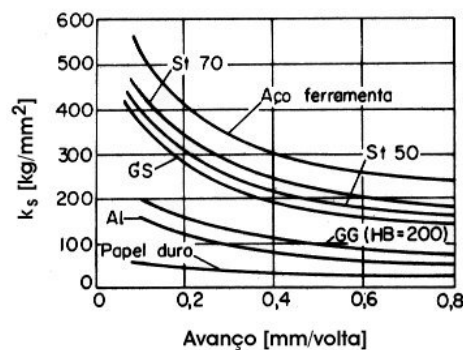


Figura 2.11 - Variação da energia específica de corte com o avanço segundo AWF 158.

Fonte: Ferraresi (1970)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), durante o processo de formação de cavaco, uma porção de material removido escorrega entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, gerando o chamado fluxo lateral de cavaco. Para pequenos avanços, a quantidade de material que se transforma em cavaco não é muito diferente daquela geradora do fluxo lateral de cavaco. Nesses casos, a força consumida por este fenômeno é relativamente grande. Quando o avanço aumenta, quase todo volume de material se transforma em cavaco e a energia específica diminui.

Espessura de corte:

Segundo Shaw (1984), no caso dos metais, determina-se experimentalmente que a energia específica é inversamente proporcional à espessura de corte h , Eq. 2.3

$$u = \frac{1}{h^n} \quad (2.3)$$

na qual a formulação é válida para valores de $h > 25 \mu\text{m}$. O expoente da espessura de corte, no denominador da razão, depende da operação de usinagem realizada. Por exemplo, n vale 0,2 para operações que utilizam ferramentas de geometria definida, 0,3 para retificação de desbaste e 0,8 a 1 para retificação de acabamento, lembrando que em retificação a geometria da ferramenta é indefinida. A Figura 2.12 traz várias faixas de energia específica em função da operação de corte e da espessura média de corte.

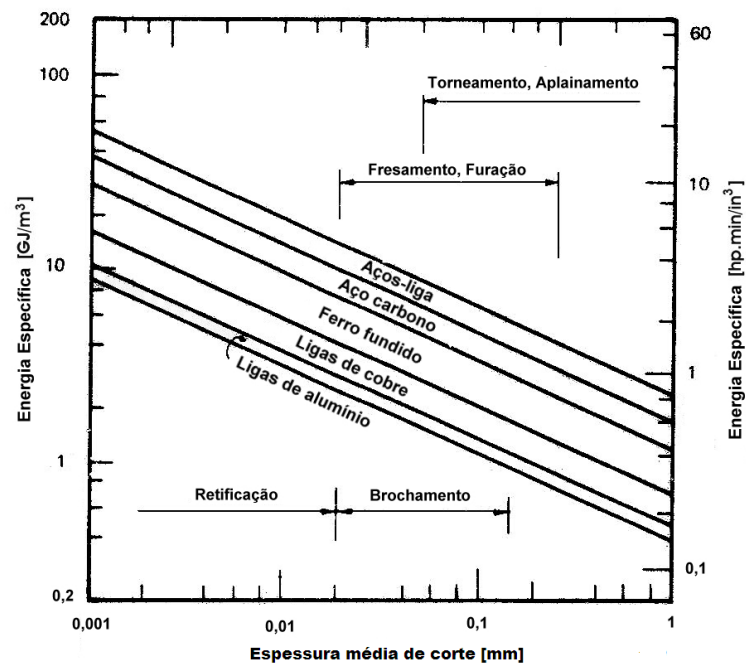


Figura 2.12 - Energia específica de corte em função da espessura de corte h .

Fonte: Modificado de Boothroyd e Knight (1989).

Shaw (1984) apresenta dados obtidos por Lapsley, Grassi e Thomsem sobre a influência da espessura de corte na energia específica (Tabela 2.3). Os pesquisadores ensaiaram aço ABNT 4130, em torneamento com ferramenta de aço rápido, largura de corte

constante de 12,1 mm, velocidade de corte de 27 m/min, ângulo de saída da ferramenta de 25° e corte ortogonal.

Tabela 2.3 - Influência da espessura de corte na energia específica de corte.

h [mm]	F_c [N]	τ [MPa]	σ [MPa]	u [J/mm ³]	u_s [J/mm ³]	u_s/u
0,06	1690	571	717	2,202	1,441	0,65
0,09	2113	514	662	1,972	1,241	0,63
0,13	2860	521	690	1,862	1,165	0,63
0,15	3238	454	596	1,758	1,207	0,69
0,22	4412	476	576	1,696	1,096	0,65

Fonte: Shaw (1984).

Área da seção de corte:

Neste ponto sabe-se que a energia específica é influenciada pelo avanço e pela profundidade de corte e que a influência do avanço é maior. Assim, como a área da seção de corte é uma junção destas variáveis, o aumento da área causa redução da energia específica de corte. A Figura 2.13 apresenta essa variação.

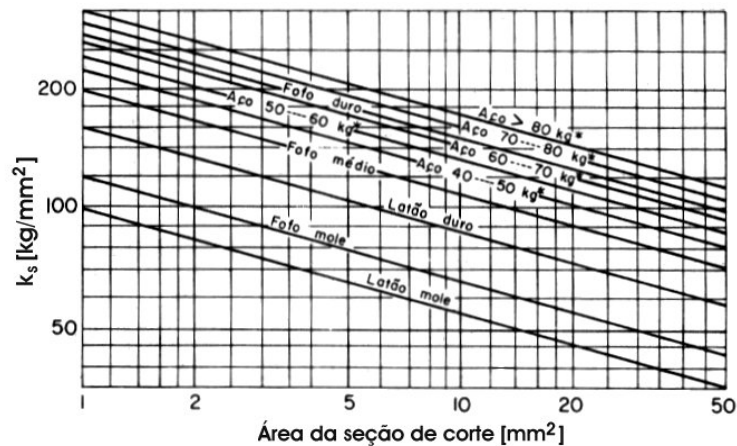


Figura 2.13 - Relação entre energia específica de corte e área da seção de corte para vários materiais.

Fonte: Ferraresi (1970).

Velocidade de corte:

Segundo Ersoy (2004), Diniz, Marcondes e Coppini (2006), a velocidade de corte apresenta uma pequena influência na energia específica de corte em comparação a outros parâmetros de corte. Materiais dúcteis com baixa velocidade de corte apresentam formação

de aresta postiça de corte, o que aumenta o ângulo efetivo de saída e conseqüentemente reduz a energia específica.

Aumentando-se a velocidade de corte sob níveis convencionais, a energia específica de corte tende a diminuir, devido à redução na deformação e dureza do cavaco e também pela redução das condições de atrito. A Figura 2.14 apresenta o comportamento genérico da energia específica de corte em função da velocidade.

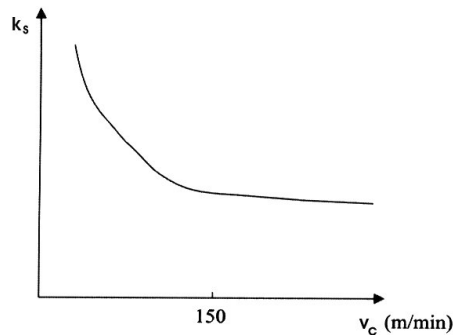


Figura 2.14 - Comportamento da energia específica de corte em função da velocidade de corte.

Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2006).

Ferraresi (1970) atribui três razões ao efeito da velocidade de corte na energia específica de corte: diminuição do grau de recalque R_c , aumento da temperatura na zona de corte e diminuição do coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta. Ensaios com ferramentas de metal duro nas faixas de trabalho de vários materiais testados mostraram que a energia específica diminui com aumento da velocidade de corte. A Figura 2.15 ilustra a dependência da energia específica em função da velocidade de corte para vários materiais.

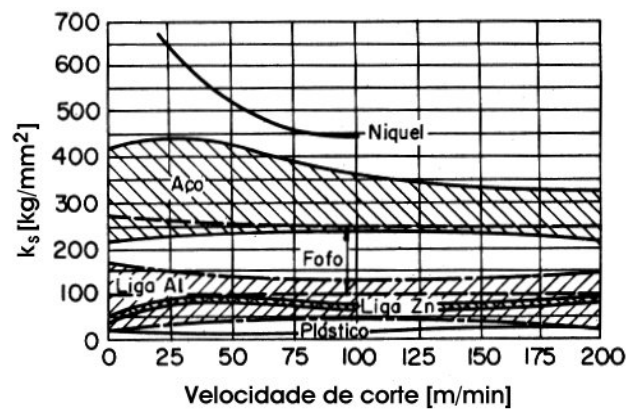


Figura 2.15 - Energia específica de corte em função da velocidade de corte para diferentes materiais.

Fonte: Ferraresi (1970).

Shaw (1984) também menciona sobre a influência da velocidade de corte na energia específica. Usando resultados obtidos por Merchant em 1945, Shaw afirma que o aumento da velocidade de corte causa diminuição da energia específica de corte. A Tabela 2.4 traz os valores para o aço NE 9445 com dureza de 187 HB, utilizando ferramenta de carboneto sinterizado em teste de torneamento com corte ortogonal, largura de corte de 6,35 mm e sem aplicação de fluido de corte.

Tabela 2.4 - Influência da velocidade de corte na energia específica de corte.

V_c [m/min]	F_c [N]	τ [MPa]	σ [MPa]	u [J/mm ³]	u_s [J/mm ³]	u_s/u
60	1646	586	793	2,758	2,013	0,73
122	1601	607	945	2,689	1,834	0,68
196	1463	621	889	2,455	1,717	0,70
362	1348	641	896	2,262	1,551	0,69

Fonte: Shaw (1984).

Segundo Lin, Liu e Li et al. (2001) e Ávila et al. (2004), a explicação para redução na energia específica está ligada ao fato de que velocidades de cortes elevadas aumentam mais que o normal a temperatura, qual causa amolecimento do material e queda da resistência ao cisalhamento do material usinado. Como resultado, a força de corte reduz, causando conseqüentemente uma redução da energia específica de corte.

Aços nos quais ocorre a formação de aresta postiça de corte (APC), a atenuação das forças ocorre rapidamente à baixa velocidade de corte até um ponto mínimo, a partir do qual a força de corte inicia o crescimento. O aço volta ao regime normal no momento em que a APC deixa de existir. O fenômeno da aresta postiça de corte se faz presente na usinagem de todos os metais que possuam segunda fase, causando uma diminuição acentuada da força de corte devido ao aumento do ângulo de saída efetivo. Este efeito desaparece a velocidades de corte mais elevadas (como a usadas na usinagem com metal duro), onde cessa a ocorrência de APC (AMORIM, 2002).

Tipo de operação de usinagem:

O tipo de operação de usinagem exerce influência na energia específica de corte. Qualidades de trabalho mais refinadas apresentam valores de energia específica maiores. Esse fato pode ser relacionado ao uso de menores espessuras de corte. A Figura 2.16 ilustra o fato e compara as operações de usinagem mais usuais relacionado à espessura de

corte. Na Figura 2.16 ainda pode-se observar uma diminuição da energia específica de corte com o aumento da espessura de corte.

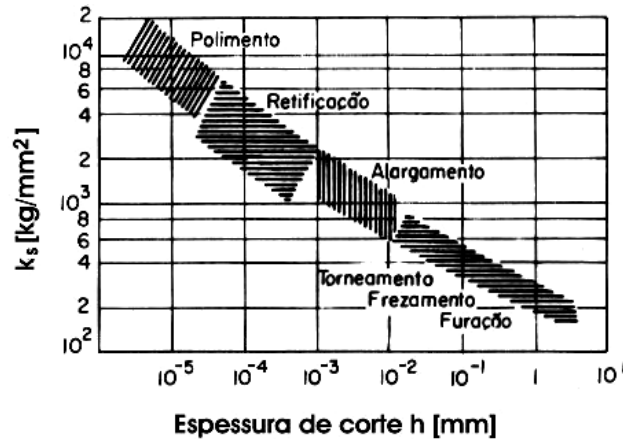


Figura 2.16 - Energia específica versus espessura de corte para diferentes operações de usinagem.

Fonte: Ferraresi (1970).

Condições de lubrificação e refrigeração:

Finalizando os fatores que influenciam na energia específica de corte, têm-se as condições de lubrificação e refrigeração, que interferem na energia específica devido a modificações das condições de atrito entre o cavaco e a ferramenta. Assim, quanto maior for a penetração do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta, melhor será o efeito do lubrificante, diminuindo as forças de usinagem e a energia específica. Altas velocidades de corte prejudicam a penetração do fluido, reduzindo sua ação lubrificante.

Ávila (2004), usinando aço inoxidável ABNT 304 com uso de diferentes fluidos, concluiu que o emprego de fluido de corte com aditivo cloro causa uma redução nas forças de corte quando comparado ao corte a seco, isso porque ocorre a formação de cloretos que atuam como aditivos de extrema pressão até 350°C.

2.3.3 Métodos de Cálculo e Estimação

Existem diversas teorias baseadas em resultados experimentais para o cálculo empírico da energia específica de corte. Taylor foi um grande estudioso da dependência da energia específica de corte com a área e a forma da seção de corte. Após muitos ensaios, o

pesquisador expressou as relações para ferro fundido cinzento, ferro fundido branco e aço carbono com médio teor de carbono, respectivamente (FERRARESI, 1970).

$$u = \frac{88}{f^{0,25} a_p^{0,07}} \quad (2.4)$$

$$u = \frac{138}{f^{0,25} a_p^{0,07}} \quad (2.5)$$

$$u = \frac{200}{f^{0,07}} \quad (2.6)$$

nas quais f é o avanço e a_p é a profundidade de usinagem.

A ASME - *American Society of Mechanical Engineers* - também pesquisou a energia específica de corte. Com uma coletânea de dados de potência de corte e taxa de remoção de cavaco, foi possível estimar uma expressão representativa desses dados, apresentada na Eq. 2.7.

$$u = \frac{C_a}{f^n} \quad (2.7)$$

na qual f é o avanço e n vale 0,2 para aços e 0,3 para ferro fundido, C_a é uma constante do material, obtida para diferentes materiais testados e parâmetros das ferramentas de aço-rápido pré-fixados, como os ângulos principais e raios de ponta, o uso de outros materiais e ferramentas é possível usando correções (FERRARESI, 1970).

A AWF - *Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung*, a Associação de Produção da Alemanha, tal como a ASME, apresenta uma tabela de energia específica de corte obtida de estudos para diversos materiais. A Eq. 2.8 resume esse estudo.

$$u = \frac{C_w}{f^{0,477}} \quad (2.8)$$

na qual C_w é uma constante do material e f é o avanço (FERRARESI, 1970).

A Figura 2.17 mostra uma representação gráfica das expressões empregadas para o cálculo da energia específica, onde é possível observar o comportamento comparativo das formulações propostas. As diferentes inclinações ocorrem devido aos diferentes expoentes do avanço (FERRARESI, 1970).

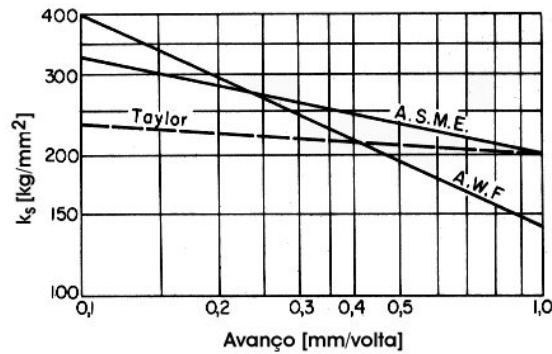


Figura 2.17 - Energia específica de corte em função do avanço obtida por diferentes pesquisadores.

Fonte: Ferraresi (1970).

Hucks, utilizando a teoria da plasticidade e inúmeros ensaios experimentais, estabeleceu a expressão de recorrência Eq. 2.9 para estimar a energia específica .

$$u = \tau_r \frac{1}{\sqrt{\tan^2 90^\circ + 2\gamma + 2 \arccot \cot \gamma \frac{R_c \operatorname{sen} \gamma}{\cos \gamma} + 1}} + \frac{R_c \operatorname{sen} \gamma}{\cos \gamma} \quad (2.9)$$

na qual τ_r é a tensão de cisalhamento na ruptura do material (FERRARESI, 1970).

Kronenberg propôs a seguinte equação para determinação da energia específica de corte.

$$k_s = \frac{C}{f^{ps} a_p^{qs}} = \frac{C_{ks} \left(\frac{G}{5}\right)^{gs}}{s^{fs}} \quad (2.10)$$

na qual $G = \frac{a_p}{f}$ é o índice de esbeltez, C , C_{ks} , ps , qs , gs e fs são constantes que dependem do par peça-ferramenta e s é a área da seção de corte (FERRARESI, 1970).

Kienzle buscando uma formulação simples e precisa, em 1951 apresentou a importante Eq. 2.12 que utiliza a espessura de corte. Através de testes práticos, é possível levantar a representação gráfica da energia específica para um determinado par peça-ferramenta, como na Figura 2.18.

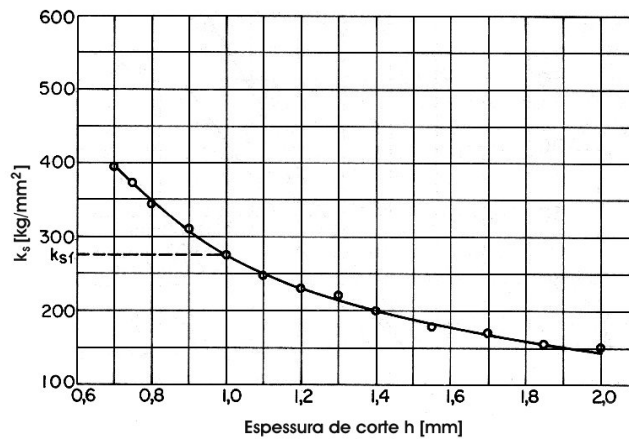


Figura 2.18 - Energia específica em função da espessura de corte h .

Fonte: Ferraresi (1970).

$$\log(k_s) = \log(k_{s1}) - z \cdot \log(h) \quad (2.11)$$

$$k_s = \frac{k_{s1}}{h^z} \quad (2.12)$$

na qual k_{s1} é uma constante do material para uma seção de corte de 1 mm² e z é o coeficiente angular da reta, que pode ser observada empregando escalas logarítmicas no gráfico de espessura de corte por energia específica (Figura 2.19) (FERRARESI, 1970).

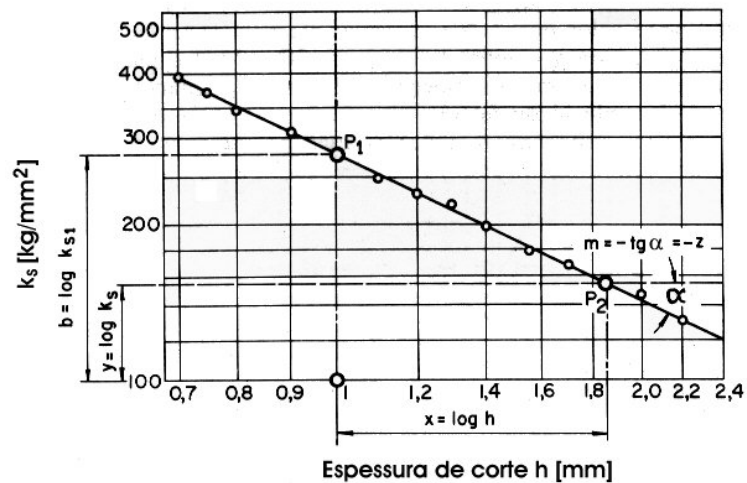


Figura 2.19 - Energia específica em função da espessura de corte h em escala dilogarítmica.

Fonte: Ferraresi (1970).

Métodos de cálculo da energia específica de corte mais atuais podem ser encontrados em catálogos de fabricantes de ferramentas para usinagem. A Sandvik Coromant desenvolveu um método no qual a partir da Eq. 2.13 e tabelas com valores da força de corte específica, é possível calcular a energia específica para diferentes parâmetros de corte e materiais da peça.

$$u = k_{c1} \times h_m^{-mc} \quad (2.13)$$

na qual k_{c1} é força de corte específica, h_m é a espessura média do cavaco e mc é o fator de aumento da força de corte específica em função da espessura do cavaco.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais adotados para obtenção das forças de usinagem e energia específica de corte são descritos a seguir. Este capítulo encontra-se dividido em planejamento experimental, banco de ensaios, especificações dos corpos de prova, ferramentas de corte utilizadas e o procedimento experimental adotados.

3.1 Corpos de Prova

Uma parte dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa foi fornecida pela empresa EATON - Divisão de Transmissão Ltda. As peças correspondem à parte interna (miolo) de engrenagens automotivas, também conhecida como espelho. Obtidas junto à Seção de Forjaria da empresa, as peças ainda na forma de tarugos cortados foram pré-aquecidas em forno de indução a 1200°C e forjadas imediatamente em duas etapas, em prensas com capacidade de 10 MN e 20 MN, respectivamente.

Depois do forjamento a quente, três diferentes rotas foram consideradas para obtenção de cada tipo de corpo de prova. A primeira amostra, tratada neste trabalho pela letra (N), foi normalizada a 950°C por duas horas em forno “tipo túnel” para obter uma estrutura ferrítico-perlítica mais homogênea e de baixa dureza ($188,6 \pm 4$ HV). A segunda amostra, representada pela letra (F), foi resfriada em forno com temperatura controlada de 600°C durante 20 minutos ($189,7 \pm 3$ HV). A terceira amostra analisada, caracterizada pela letra (A), foi resfriada ao ar livre após o forjamento, visando analisar as características do material isento de qualquer tipo de tratamento térmico ($229,4 \pm 6$ HV). O material utilizado é o aço denominado CL23, cuja composição química nominal é dada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química nominal do CL 32 utilizado na fase 1 da pesquisa (% em peso).

C	Mn	Cr	Mo	Si	P	S
0,23-0,28	0,90-1,30	0,35-0,70	0,10-0,20	0,15-0,35	0,25 máx	0,02-0,04

As diferenças de microestrutura podem ser observadas na Figura 3.1 onde em (a) tem-se o material normalizado, em (b) o resfriando ao forno e em (c) o resfriado ao ar.

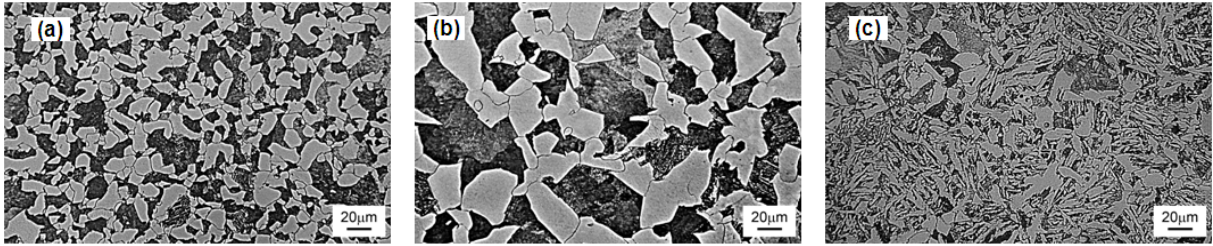


Figura 3.1 - Micrografia das amostras do aço CL 23 (a) normalizado, (b) resfriado ao forno e (c) resfriado ao ar. (Ataque Marshall seguido de Nital 2%).

É possível observar na Figura 3.1 que a microestrutura de todas as condições apresenta uma matriz predominantemente composta por ferrita na cor clara e perlita na cor escura. A Tabela 3.2 finaliza a caracterização microestrutural das amostras (N), (F) e (A), apresentando o tamanho de grão médio segundo a norma ASTM E 112-95.

Tabela 3.2 - Tamanho médio de grão das amostras de CL 23.

Condição da Amostra	Tamanho de grão [μm]	
	ferrita	perlita
N	8,6	11,2
F	15,5	24,0
A	5,5	7,2

A geometria das amostras após a pré-usinagem pode ser vista na Figura 3.2. É importante ressaltar que esta geometria das peças na forma de setor circular decorreu do formato cilíndrico dos tarugos fornecidos pela empresa. Além disso, a seção transversal em “U” foi consequência natural do processo de forjamento, quando do contato do punção da prensa com o material aquecido.

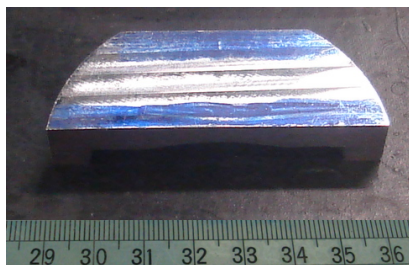


Figura 3.2 - Geometria dos corpos de prova do aço CL 23 para avaliação da força de usinagem (\varnothing 70 x 15 mm).

Um segundo lote de peças usadas neste trabalho foi proveniente de uma parceria entre o Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) e o Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O material comercialmente chamado de COS AR 60 foi fornecido pela Usiminas S/A.

Um tratamento termomecânico foi realizado em parte dos corpos de prova para obtenção de uma estrutura de grãos ultrafinos. Os corpos de prova de dimensões 25 x 25 x 100 mm, foram temperados em forno de resistência elétrica com resfriamento em água para atingir a dureza de 33 HRC. Após o processo de têmpera, as peças foram aquecidas e laminadas em três passes com retorno ao forno entre os passes para reaquecimento. Para finalizar o processamento termomecânico do material, foi feito um recozimento com posterior resfriamento em água. A especificação química do material pode ser visualizada na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Especificação química do aço COS AR 60 utilizado nos testes de usinagem (% em peso).

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti	Ceq
0,15	1,49	0,027	0,009	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016	0,40

Segundo dados da empresa, o material estudado neste trabalho é um aço baixo-carbono com propriedades melhoradas. Possui limite de resistência de 630 MPa, limite de escoamento de 530 MPa e alongamento de 26%. Em ensaio de impacto com entalhe em V de 2 mm, a energia média absorvida até a fratura à temperatura de 0 °C é de 176 J.

Na Tabela 3.4 encontram-se os valores de dureza Vickers dos corpos de prova, medidos no Laboratório de Ensaios Mecânicos da FEIS/UNESP segundo a norma ASTM E 92-92. A carga empregada nas medições foi de 98 N (10 kgf). Os dados representam a média de 5 medidas obtidas de cada peça.

Tabela 3.4 - Corpos de prova do aço COS AR 60 caracterizados pela dureza e condição microestrutural.

Condição do Material	Dureza [HV]	Identificação
“Como Recebido” na forma de chapa grossa	198 ± 2,6	CR
Submetido ao tratamento termomecânico	322 ± 7,3	MG

As diferenças de microestrutura podem ser observadas na Figura 3.3 onde em (a) tem-se o material “como recebido” apresentando um tamanho de grão médio da ferrita de $10,8 \mu\text{m}$ e em (b) o microgrão, com tamanho de grão médio da ferrita de $1,7 \mu\text{m}$, medidos através da norma ASTM E 112-95. Pelas imagens, nota-se a redução no tamanho de grão que o material COS AR 60 apresenta após o tratamento termomecânico.

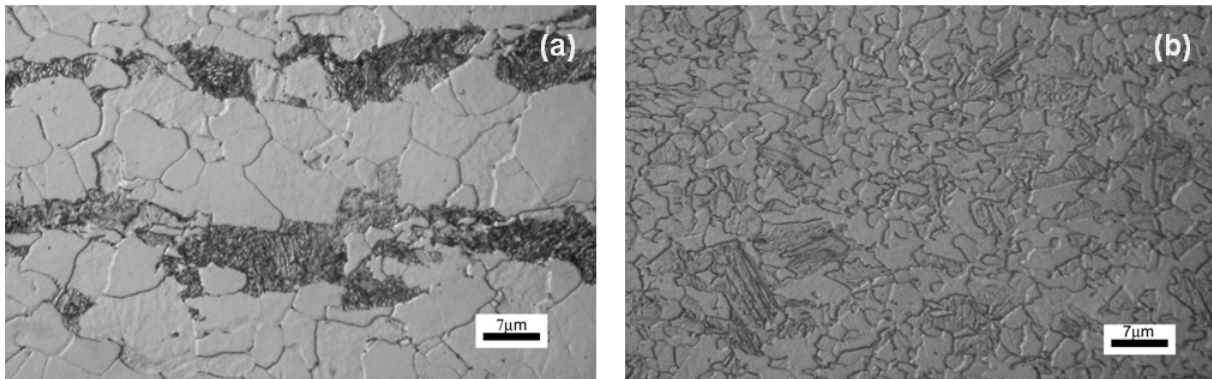


Figura 3.3 - Micrografia do COS AR 60 (a) “como recebido” e (b) microgrão. (Ataque Marshall seguido de Nital 1%).

As peças submetidas ao tratamento termomecânico, assim como as chapas grossas, foram recebidas na forma bruta. Dessa maneira, antes de realizar os ensaios de usinagem, elas foram submetidas a uma pré-usinagem por meio de um processo de fresamento convencional, visando à obtenção de superfícies planas. Após a pré-usinagem, foi obtida uma geometria $10 \times 24 \times 100 \text{ mm}$.

Apenas partes das amostras pré-usinadas foram utilizadas nas medições das componentes da força de usinagem, uma vez que pesquisas paralelas na área de usinabilidade e integridade superficial têm sido realizadas com o mesmo material. Assim, determinou-se utilizar um comprimento de aproximadamente 25 mm para cada condição de usinagem avaliada.

Os comprimentos particularizados de cada amostra, em associação às velocidades de avanço da ferramenta de corte, permitiram determinar o tempo de usinagem e, conseqüentemente, o corte (janelamento) dos sinais de força de usinagem para posterior tratamento dos resultados.

3.2 Planejamento Experimental

Para a usinagem do material CL 23, empregou-se pastilhas de metal duro da classe ISO P25, código R390-11 T3 08M-PM GC 4030, revestidas com TiN. Para a usinagem do aço COS AR 60, as pastilhas foram as mesmas, com mudança apenas no revestimento, que passou a ser Al_2O_3 (classe ISO P15 e código R390-11 T3 08M-PM GC 4220). Utilizou-se o suporte dos insertos de código R390-025A25-11L para os dois tipos de pastilhas. A Figura 3.4 mostra o suporte e a pastilha ilustradamente, sendo todo o ferramental adquirido da Sandvik Coromant.

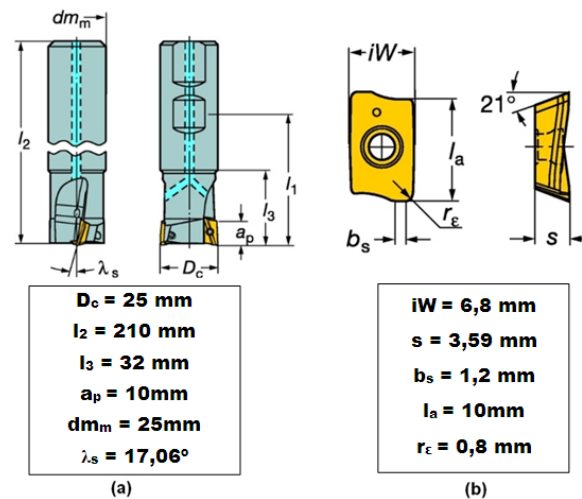


Figura 3.4 - Desenhos esquemáticos do (a) suporte e (b) inserto de metal duro. Fonte: Sandvik (2003).

Para investigar como as estratégias ou condições de corte influenciam na força de usinagem e energia específica de corte, utilizou-se como variáveis de entrada a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de usinagem e o material CL 23 com diferentes tratamentos térmicos.

Os parâmetros de corte adotados precisavam utilizar valores que gerassem possíveis diferenças entre as condições de corte (convencional e HSC), caso elas existissem. Desse modo, a condição convencional foi escolhida devido à proximidade dos parâmetros utilizados pela empresa fornecedora dos corpos de prova.

Para aumentar o número de condições de usinagem, resolveu-se adotar também uma condição intermediária, denominada neste trabalho como HPC (*High-Performance Cutting*) ou usinagem com alta taxa de remoção de material, a qual foi determinada por

parâmetros recomendados pelo fabricante da ferramenta de corte utilizada. Sendo assim, a Tabela 3.5 apresenta os parâmetros de entrada adotados nos ensaios de usinagem.

Tabela 3.5 - Parâmetros de corte adotados no ensaio de usinagem do aço CL 23.

Variáveis de Entrada	Condições de Usinagem		
	EMPRESA	HPC *	HSC **
Velocidade de corte [m/min]	100	250	400
Profundidade de usinagem [mm]	1,5	3,0	1,0
Avanço por dente [mm/dente]	0,15	0,10	0,08
Taxa de remoção de material [cm ³ /min]	2,865	9,555	4,075

* HPC: *High-Performance Cutting* (alta taxa de remoção de material) ** HSC: *High-Speed Cutting* (corte com alta velocidade)

Diferentemente do aço CL 23, onde avaliou-se a influência de estratégias de fresamento (parâmetros de corte fixos e distintos para cada condição de usinagem), para o aço COS AR 60, buscou-se investigar de forma isolada cada variável de entrada. Para tanto, foi elaborado um experimento fatorial completo com 4 fatores de controle e 2 níveis para cada fator, apresentados na Tabela 3.5. Cada condição de usinagem, mostrada na tabela, foi repetida duas vezes e aplicada em dois tipos de condições microestruturais dos corpos de prova, detalhadas no item 3.1.

Tabela 3.6 - Simplificação dos níveis dos fatores de controle para o ensaio utilizando o aço COS AR 60.

Fatores de Controle	Especificação
Velocidade de Corte	VC1 = 100 m/min VC2 = 589 m/min
Profundidade de Usinagem	PU1 = 0,5 mm PU2 = 3,0 mm
Avanço	AV1 = 0,05 mm/ dente AV2 = 0,20 mm/dente
Material	CR = Sem tratamento MG = Com tratamento

Uma aleatorização dos testes foi realizada ao longo da execução dos ensaios, uma vez que os métodos estatísticos requerem que as observações sejam variáveis aleatórias independentes para sua validação. Contudo, recorreu-se ao delineamento experimental como forma de ferramenta estatística. A análise dos resultados, que representa a etapa final do delineamento experimental, foi realizada considerando-se o Método da Análise de Variância (ANOVA). A Tabela 3.7 mostra a aleatorização da seqüência dos ensaios.

Tabela 3.7 - Planejamento Fatorial para o experimento utilizando o COS AR 60.

Aleatorização	Combinação das Variáveis	Identificação dos Parâmetros
1	VC1 - PU1 - AV1 - CR	100 / 0,5 / 0,05 / CR
5	VC1 - PU1 - AV2 - CR	100 / 0,5 / 0,2 / CR
3	VC1 - PU2 - AV1 - CR	100 / 3 / 0,05 / CR
7*	VC1 - PU2 - AV2 - CR	100 / 3 / 0,2 / CR
2**	VC2 - PU1 - AV1 - CR	589 / 0,5 / 0,05 / CR
6	VC2 - PU1 - AV2 - CR	589 / 0,5 / 0,2 / CR
4	VC2 - PU2 - AV1 - CR	589 / 3 / 0,05 / CR
8	VC2 - PU2 - AV2 - CR	589 / 3 / 0,2 / CR
9	VC1 - PU1 - AV1 - MG	100 / 0,5 / 0,05 / MG
13	VC1 - PU1 - AV2 - MG	100 / 0,5 / 0,2 / MG
11	VC1 - PU2 - AV1 - MG	100 / 3 / 0,05 / MG
15*	VC1 - PU2 - AV2 - MG	100 / 3 / 0,2 / MG
10**	VC2 - PU1 - AV1 - MG	589 / 0,5 / 0,05 / MG
14	VC2 - PU1 - AV2 - MG	589 / 0,5 / 0,2 / MG
12	VC2 - PU2 - AV1 - MG	589 / 3 / 0,05 / MG
16	VC2 - PU2 - AV2 - MG	589 / 3 / 0,2 / MG

*Condição adotada como convencional

**Condição HSC

Uma análise de variância visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Dessa forma, permite que vários grupos sejam comparados a um só tempo. Esses fatores podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente deve necessariamente ser contínua. O teste é paramétrico (a variável de interesse deve ter distribuição normal) e os grupos têm de ser independentes.

Resumindo as condições de corte para as duas condições do material COS AR 60, tem-se oito condições de corte dadas pela Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Condições de corte para o ensaio de usinagem.

Parâmetros de Corte	Condições de Usinagem							
	C1	C2	C3	C4*	C5**	C6	C7	C8
Velocidade de corte [m/min]	100	100	100	100	589	589	589	589
Profundidade de usinagem [mm]	0,5	0,5	3,0	3,0	0,5	0,5	3,0	3,0
Avanço por dente [mm/dente]	0,05	0,2	0,05	0,2	0,05	0,2	0,05	0,2

*Condição adotada como convencional

**Condição HSC

3.3 Banco de Ensaio

Os ensaios para aquisição dos dados das forças de usinagem durante o fresamento foram realizados no OPF (Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Os ensaios de usinagem foram conduzidos em um centro de usinagem CNC, marca ROMI, modelo Discovery 560, com rotação máxima de 7.500 rpm, potência de 11 kW e avanço rápido máximo de 30 m/min.

Para aquisição dos dados de força, foi usado um dinamômetro piezelétrico marca Kistler, modelo 9257BA, aquisição em 3 componentes, faixa de trabalho em F_x , F_y de -5 a 5 kN e F_z de -5 a 10 kN, frequência natural de 4 kHz, rigidez de 1000 N/ μm e um amplificador de carga de 3 canais, marca Kistler, modelo 5233A.

Para conversão e transmissão dos sinais analógicos para digital, foi utilizado uma placa de aquisição de dados, marca National Instruments, PCI e bloco de conectores da mesma marca.

O dinamômetro foi fixado na mesa da máquina-ferramenta por meio de grampos e conectado ao amplificador de carga, que por sua vez foi conectado à placa de aquisição, esta plugado à placa mãe do desktop munido do software Labview 7.1. A Figura 3.5 apresenta os detalhes do sistema de fixação do dinamômetro.

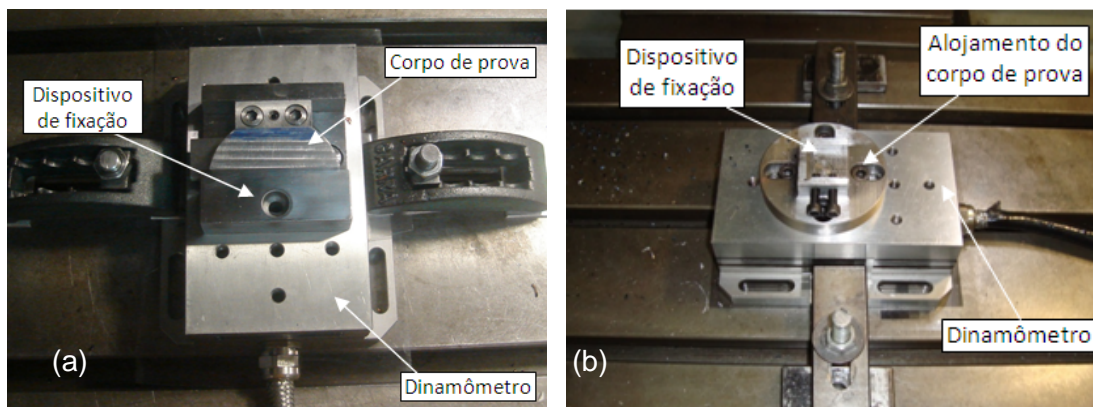


Figura 3.5 - Fixação do dinamômetro e do corpo de prova (a) CL 23 e (b) COS AR 60 no centro de usinagem.

3.4 Procedimento Experimental

Este item apresenta todos os procedimentos empregados durante a etapa experimental da pesquisa para obtenção dos resultados. Ele está dividido em ensaios de usinagem e aquisição, forças de usinagem e energia específica de corte.

3.4.1 Ensaios de Usinagem e Aquisição

Os ensaios foram realizados em fresamento de topo com corte concordante. Esta condição favorece a preservação da ferramenta, na medida em que a direção e sentido dos vetores velocidade de corte e de avanço coincidem na tangente à penetração de trabalho, fazendo com que a espessura do cavaco seja máxima na entrada da ferramenta e mínima na saída.

Durante a execução do ensaio, monitorava-se o comportamento da peça, da ferramenta e da remoção de cavaco. Ao menor sinal de ruído, vibração, desgaste da ferramenta ou remoção atípica de cavaco, os dados eram anotados.

Em cada corpo de prova foi possível usinar 3 passes com penetração de trabalho de 5 mm para o aço CL 23 e 2 mm para o aço COS AR 60. Para este último, antes dos ensaios definitivos, uma pré-usinagem das superfícies superior e lateral da amostra foi realizada em 2 passes para garantir um referenciamento adequadamente preciso. A Figura 3.6 apresenta detalhes dos passes executados.

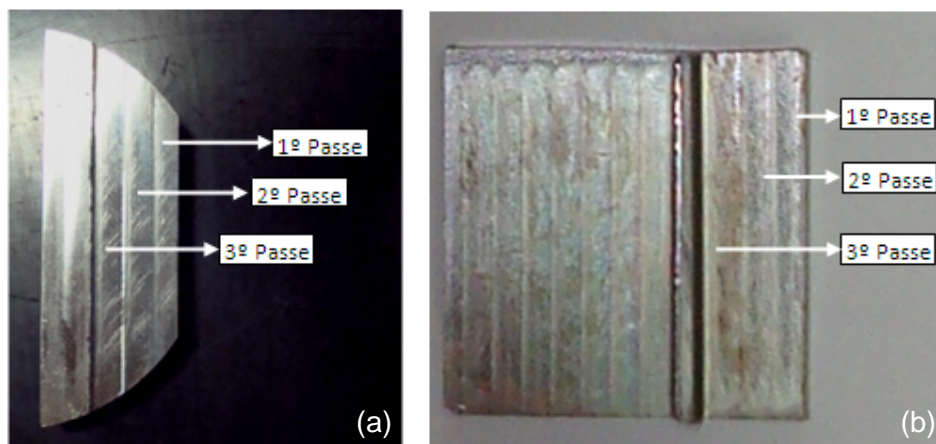


Figura 3.6 - Passes realizados nos corpos de prova (a) CL 23 e (b) COS AR 60 para medição da força de usinagem.

A partir da velocidade de corte, foi possível calcular a frequência de aquisição empregada nas medidas da força de usinagem do aço CL 23. De acordo com o diâmetro da fresa de topo e a velocidade de corte máxima utilizada nos ensaios de fresamento, a rotação máxima atingida alcançou aproximadamente 5.100 rpm. Considerando o número de insertos da ferramenta, gerou-se uma frequência de corte de aproximadamente 170 Hz. Assim, a frequência de amostragem mínima empregada na aquisição dos sinais de força de usinagem seria de 340 Hz. Para uma maior garantia, foi adotada uma frequência de 1000 Hz.

Já para o fresamento do aço COS AR 60, a velocidade máxima utilizada foi de 589 m/min, a rotação máxima atingida foi de aproximadamente 7500 rpm, gerando uma frequência de corte (excitação) de aproximadamente 250 Hz. Assim, a frequência de amostragem mínima seria de 500 Hz. Para uma maior garantia, foi adotada uma frequência de aquisição de 2000 Hz.

O uso de frequência de aquisição 2 vezes maior que a frequência de excitação do sistema evita a ocorrência do fenômeno denominado *Aliasing*, que consiste na aquisição de um sinal distorcido não correspondente ao sinal esperado.

3.4.1.1 Medição das Forças de Usinagem

Os sinais das forças de usinagem salvos em txt eram formados por uma matriz de três colunas, correspondendo a primeira ao eixo x, a segunda ao y e a terceira ao z. A Figura 3.7 mostra o sistema de coordenadas na máquina.

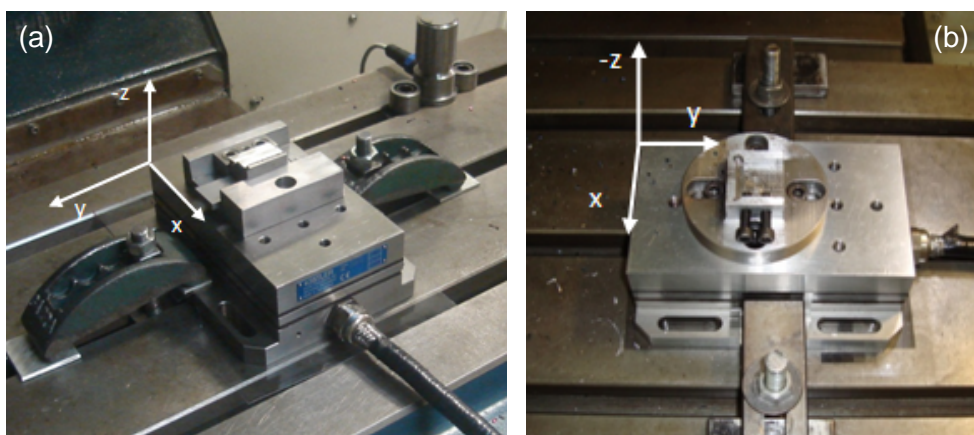


Figura 3.7 - Montagem do dinamômetro para os ensaios do aço (a) CL 23 e (b) COS AR 60.

Com o sistema de aquisição empregado, pode-se fazer um estudo das forças de avanço (eixo y), apoio (eixo x) e passiva (eixo z). As forças de avanço e apoio contribuem para remoção de material formando a força de corte, já a força passiva não é responsável pela remoção de material e sim pela precisão dimensional e deformações da ferramenta ou porta-ferramenta.

Os sinais de força foram adquiridos sem qualquer tratamento. Alguns arquivos apresentam deslocamento de zero, inclinação da curva (*drift*), ruído e outros pequenos problemas que necessitam ser corrigidos para evitar erro nos cálculos finais da força de usinagem. Após as correções citadas, passou-se a fase de corte (janelamento) do sinal no tempo, devido ao início e término da aquisição antes e depois da usinagem (passe), respectivamente. O corte devidamente adequado do sinal foi feito de acordo com o tempo de usinagem, calculado através das velocidades de avanço e do comprimento dos corpos de prova.

Feita a seleção do trecho do sinal responsável diretamente pela usinagem dos corpos de prova, a força de usinagem máxima e o valor RMS eram obtidos de acordo com a Eq. 3.1 e 3.2, respectivamente.

$$F_{u_{\max}} = \sqrt{F_{x_{\max}}^2 + F_{y_{\max}}^2 + F_{z_{\max}}^2} \quad (3.1)$$

$$RMS_{F_u} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_u^2} \quad (3.2)$$

na qual N é o número de elementos dos vetores força de usinagem.

O valor quadrático médio ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. Pode-se calcular para uma série de valores discretos ou para uma função variável contínua.

Cada corpo de prova, como já dito, forneceu 3 sinais (3 passes). Assim, com esses valores uma média pode ser obtida para cada corpo de prova, com seus respectivos intervalos de confiança, adotado em 95%.

3.4.1.2 Cálculo da Energia Específica de Corte

A partir da Eq. 3.3, foi desenvolvido o equacionamento para o cálculo da energia específica de corte.

$$u = \frac{F_c \cdot v_c}{h \cdot b \cdot v_c} \quad (3.3)$$

Substituindo espessura de corte h e comprimento de corte b na Eq. 3.3 pela profundidade de corte a_p e avanço f , tem-se que o denominador da equação é igual à taxa de remoção de material (TRM).

$$u = \frac{F_c \cdot v_c}{a_p \cdot f \cdot v_c} = \frac{F_c \cdot v_c}{\text{TRM}} \quad (3.4)$$

Multiplicando a Eq 3.4 pelo tempo de corte t_c , tem-se no denominador o volume total removido V_{rem} e no numerador, a velocidade de corte v_c multiplicando o impulso de corte I_c .

$$u = \frac{F_c \cdot v_c \cdot t_c}{\text{TRM} \cdot t_c} = \frac{v_c \cdot F_c \cdot t_c}{V_{\text{rem}}} = \frac{v_c \cdot I_c}{V_{\text{rem}}} \quad (3.5)$$

O impulso de corte é dado pela integral da força de corte no tempo, que é soma vetorial da força na direção x e y . Assim, tem-se a Eq. 3.6.

$$u = \frac{v_c}{V_{\text{rem}}} \int_0^{t_c} \left(F_x^2 + F_y^2 \right)^{1/2} dt \quad (3.6)$$

na qual $(F_x^2 + F_y^2)^{1/2}$ [N] é a força de corte F_c , v_c [m/min] é a velocidade de corte, t_c [s] é o tempo de corte e V_{rem} [mm³] é o volume removido da peça pelo processo de fresamento, calculado geometricamente através da multiplicação entre a profundidade de usinagem e a área fresada (paralela ao plano de trabalho). Para resolver a integral da Eq. 3.6, foi escolhido o Método Numérico 1/3 de Simpson, mais bem detalhado na Eq. 3.7.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)] \quad (3.7)$$

na qual $f(x)$ é uma função qualquer, a é o limite inferior de integração, b é o limite superior, h é passo fixo da integração (intervalo entre cada x). O Método 1/3 de Simpson utiliza um polinômio de 2º grau para obter o valor aproximado, pois considera 3 pontos em cada subintervalo de integração. Assim, este método implementado em Matlab possibilitou obter o valor da energia específica de forma adequada, pois necessita apenas dos valores da função em cada ponto e não, propriamente, da expressão (função) do comportamento da força de usinagem.

De forma análoga ao cálculo de forças, para a energia específica de corte foi considerada uma média de 3 valores para cada corpo de prova, decorrentes de cada passe, assim como o grau de confiabilidade, adotado em 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre a relação entre estratégias de usinagem ou parâmetros de corte, força de usinagem e energia específica de corte. O conteúdo é dividido em duas partes distintas, referentes aos dois materiais das peças empregados nos ensaios.

4.1 Material CL 23

4.1.1 Força de Usinagem

A força máxima de usinagem é calculada através da soma vetorial das componentes x , y e z máximas. Para o cálculo, também foi feita uma rotina computacional para efetuar a soma de todas as componentes de força x , y e z , resultando em um vetor da força de usinagem a partir do qual foi selecionado o máximo. Isso foi feito para as três condições de corte. A Figura 4.1 mostra os valores máximos obtidos para força de usinagem.

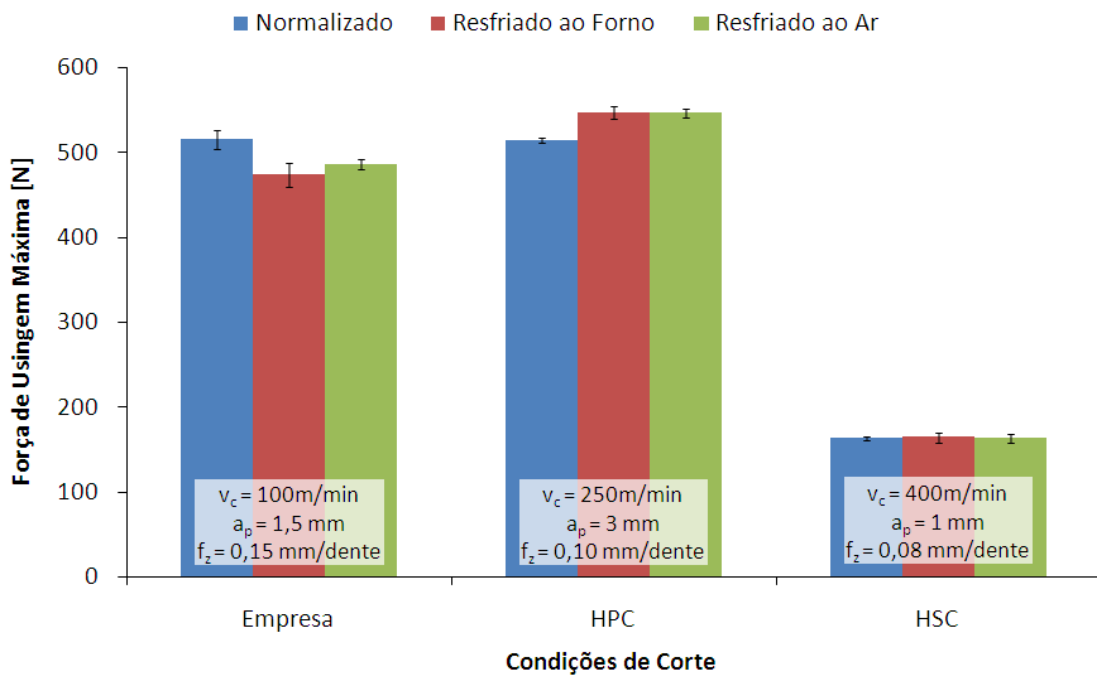


Figura 4.1 - Força de usinagem máxima para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.

Considerando as condições de corte, o material CL 23 normalizado apresentou as maiores forças máximas de usinagem para as condições baseadas na da Empresa e HPC, a média apresentada para a condição da Empresa foi de 516 ± 12 N e 514 ± 3 N para HPC, assim, estatisticamente ambas apresentam o mesmo valor. A condição HSC é a estratégia que apresentou menor valor, 163 ± 3 N, alcançando uma redução de 68%.

Já para o material resfriado ao forno, a força de usinagem máxima para condição HPC apresentou o maior valor de força 547 ± 7 N. A condição da Empresa foi de 474 ± 13 N, redução de 13% em relação à HPC, sendo o valor intermediário devido à sua área de corte intermediária. A condição HSC é a condição que apresentou menor valor, 164 ± 5 N, obtendo uma redução de 70% em relação a HPC e 65% em relação à condição da Empresa.

Também, para o aço CL 23 resfriado ao ar, tem-se o mesmo comportamento das forças de usinagem máxima, onde a condição HPC apresentou o maior valor de força 546 ± 5 N. Já para a condição da Empresa, a força foi de 486 ± 6 N, uma redução de 11% em relação a HPC, e a condição HSC é a estratégia que apresentou menor valor, 163 ± 4 N, alcançando uma redução de 70% em relação à estratégia HPC e 66% em relação à condição da Empresa.

Para conferir qual condição de usinagem realmente foi maior, utilizou-se o cálculo do valor RMS ou efetivo do sinal da força, pois tais cálculos levam em consideração todo trem de pulsos do sinal e não apenas um ponto máximo isolado. A Figura 4.2 apresenta os valores obtidos para as diferentes condições de usinagem e microestruturais das peças.

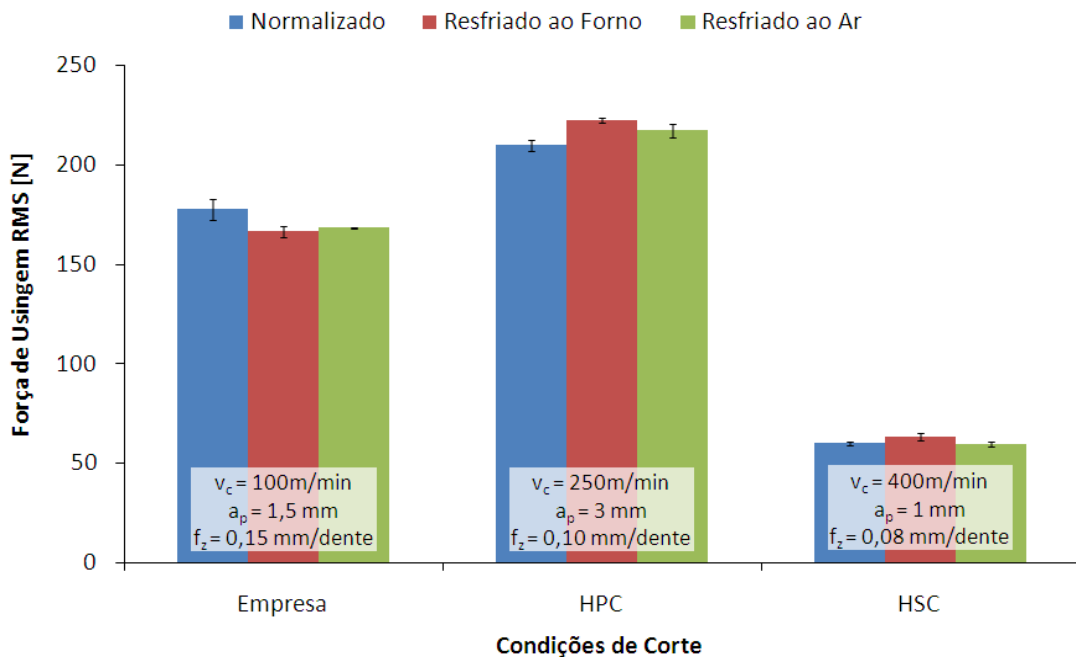


Figura 4.2 - RMS dos sinais das forças de usinagem máximas para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.

A partir das médias RMS, pode-se notar para o material CL 23 normalizado que a condição HPC apresentou o maior valor, $209,6 \pm 2,8$ N, justificado pela maior área de corte. A condição baseada na da Empresa apresentou valor intermediário, cerca de 15% menor que a HPC, sendo $177,5 \pm 5,1$ N, decorrente da área de corte intermediária. Assim como na força máxima, a estratégia de fresamento HSC apresentou a condição de menor força de usinagem RMS, $59,9 \pm 0,8$ N, sendo 66% menor que a condição da Empresa e 71% menor que a HPC.

As médias RMS do material CL 23 resfriado ao forno também apresentou o mesmo comportamento das forças máximas. A condição HPC apresentou o valor de $222,3 \pm 1,5$ N seguido da condição da Empresa, cerca de 25% menor que a HPC, sendo $166,3 \pm 2,7$ N e a estratégia de usinagem HSC apresentou a condição de menor valor, $63,2 \pm 1,8$ N, ou seja, 62% menor que a da Empresa e 72% mais baixo que a HPC.

Para o material CL 23 resfriado ao ar, o comportamento também se repetiu como o das forças máximas. A condição HPC apresentou o maior valor, $217,2 \pm 3,7$ N, seguido da condição da Empresa, 22% menor que a HPC, sendo $168 \pm 0,4$ N, e a condição HSC alcançou a menor valor RMS, $59,6 \pm 1,2$ N, sendo 73% mais baixo que HPC e 65% menor que a da Empresa.

Como se sabe, a área de corte pode ser calculada pela multiplicação do avanço da ferramenta pela profundidade de usinagem, sendo assim, quanto maiores forem esses parâmetros, maiores forças de corte ocorrerão. Portanto, a força de usinagem foi diretamente influenciada pela variação da área de corte, como pode-se ver nos resultados apresentados. A condição HPC apresentou a maior área de corte, $0,3 \text{ mm}^2$, e assim maiores esforços, quando comparada às outras condições. A condição baseada na da Empresa, com área de $0,225 \text{ mm}^2$, sofreu esforços intermediários e a condição HSC, com $0,08 \text{ mm}^2$, sofreu menores esforços.

Ao analisar a influência dos tratamentos térmicos do material da peça no valor RMS das forças de usinagem, observa-se que o resfriamento ao forno causou maiores patamares nas condições HPC e HSC, mas na condição baseada na da Empresa o material normalizado apresenta-se maior que os demais tratamentos. A amostra resfriada ao ar, considerando os desvios estatísticos, se igualou aos níveis de força RMS da condição resfriada ao forno (na condição da Empresa) e normalizada (na condição HSC). Essas análises indicam que as durezas estatisticamente iguais da amostra resfriada ao forno e normalizada ditaram sua alternância entre os valores máximos e que a maior dureza da amostra resfriada ao ar não foi suficiente para causar elevação na força de usinagem RMS.

Ao comparar as amplitudes das forças máximas para alguns materiais da peça, observa-se que os comportamentos de certos resultados diferiram-se em relação aos respectivos sinais da força RMS. A amostra normalizada, por exemplo, apresentou níveis de força máxima iguais entre as condições da Empresa e HPC, mas patamares distintos no valor RMS. A amostra resfriada ao ar, ao forno e normalizada alcançaram níveis de força máxima estatisticamente iguais na condição HSC, ao passo que no valor RMS, a amostra resfriada ao forno apresentou maior força. Essa diferença entre níveis de força pode ter ocorrido porque o cálculo da RMS considera todo o trem de pulsos (histórico) do sinal e o valor máximo é caracterizado pelo pico máximo obtido ao longo do sinal.

4.1.2 Energia Específica de Corte

A energia específica de corte é uma variável que representa a eficiência energética do processo e está sujeita à influência das condições de usinagem, do material da peça e da ferramenta de corte. Este item trata dos resultados obtidos e das respectivas discussões

propostas para energia específica. A Figura 4.3 apresenta os valores obtidos para energia específica de corte sob diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.

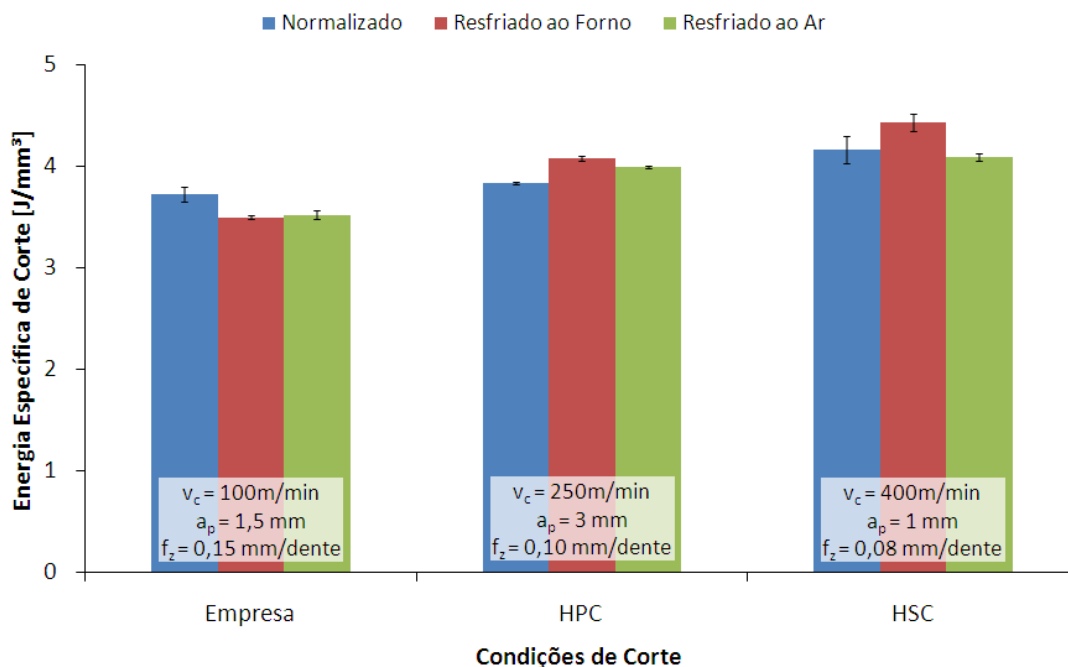


Figura 4.3 - Energia específica de corte para diferentes condições de corte e tratamentos térmicos do aço CL 23.

Analisando os valores obtidos para energia específica de corte, observa-se que a condição baseada na da Empresa apresentou os menores valores, seguidos da condição HPC e HSC. Para o aço CL 23 normalizado, a energia específica atingiu valores de $3,73 \pm 0,07\text{ J/mm}^3$ para condição da Empresa, $3,84 \pm 0,01\text{ J/mm}^3$ para HPC e a maior energia específica foi $4,17 \pm 0,13\text{ J/mm}^3$ para HSC. A condição HPC é 7,9% menor que a HSC, já a condição da Empresa é 2,8% menor que a HPC e 10,5% menor que a da HSC.

O material CL 23 resfriado ao forno apresentou valores de energia específica de corte iguais a $4,43 \pm 0,08\text{ J/mm}^3$ para a HSC, $4,08 \pm 0,02\text{ J/mm}^3$ para a HPC (8% menor que a HSC) e $3,50 \pm 0,03\text{ J/mm}^3$ para condição da Empresa (14,2% menor que a HPC e 21,1% que a HSC).

Já o material resfriado ao ar apresentou $4,09 \pm 0,03\text{ J/mm}^3$ para a condição HSC, $4,0 \pm 0,01\text{ J/mm}^3$ para a HPC (2,4% menor que a HSC) e $3,52 \pm 0,04\text{ J/mm}^3$ para a condição da Empresa (14% menor que a HSC e 12% menor que a HPC).

A condição HSC, embora tenha alcançado as menores forças de usinagem, apresentou a menor área de corte, resultando em maiores valores da energia específica de corte. A condição HPC, com a maior área de corte, teve um valor intermediário para energia específica de corte, mesmo alcançando as maiores forças de usinagem. Finalmente, a estratégia de usinagem empregada pela empresa apresentou área de corte e forças de usinagem intermediárias, gerando os menores níveis de energia específica de corte. Assim, pode-se inferir que o comportamento da energia específica de corte depende de um balanço entre variações da força de usinagem e da área da seção de corte.

Ao analisar a taxa de remoção de material, tem-se que a condição HPC apresenta a maior taxa (9,555 cm³/min), seguida da HSC (4,075 cm³/min) e da condição da empresa (2,865cm³/min). Assim, apesar da condição HPC não ter o maior nível de energia específica de corte, ela apresenta a maior taxa de remoção, conseguindo assim uma melhor eficiência no processo, pois a taxa de remoção por energia é maior em comparação com as outras duas estratégias de usinagem.

Ao analisar a influência dos tratamentos térmicos do material da peça na energia específica de corte, observa-se que o resfriamento ao forno causou maiores patamares nas condições HPC e HSC, mas na condição baseada na da Empresa, o material normalizado apresenta-se maior que os demais tratamentos. A amostra resfriada ao ar, considerando os desvios estatísticos, se igualou aos níveis de energia específica da condição resfriada ao forno (na condição da Empresa) e normalizada (na condição HSC). Essas análises indicam que as durezas estatisticamente iguais da amostra resfriada ao forno e normalizada ditaram sua alternância entre os valores máximos e que a maior dureza da amostra resfriada ao ar não foi suficiente para causar elevação na energia específica de corte.

4.2 Material COS AR 60

4.2.1 Força de Usinagem

A força máxima de usinagem foi obtida pela mesma rotina computacional usada para o aço CL 23, porém para o COS AR 60 considerou-se, além das repetições dos passes na mesma peça, as réplicas dos corpos de prova. A Tabela 4.1 mostra os valores médios obtidos para força máxima e seus respectivos desvios para cada uma das diferentes combinações dos parâmetros de corte e material.

Tabela 4.1 - Valores obtidos para a força máxima de usinagem e seus respectivos desvios [N].

Parâmetros de Corte			CR		MG	
v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/dente]	Média	Desvio	Média	Desvio
100	0,5	0,05	126	6	149	10
		0,20	206	12	241	5
	3,0	0,05	447	12	528	10
		0,20	806	28	969	11
589	0,5	0,05	44	8	100	7
		0,20	68	5	146	30
	3,0	0,05	164	5	244	19
		0,20	303	14	402	21

A partir dos resultados, pode-se efetuar diversas análises quanto à influência da velocidade de corte, profundidade de usinagem, avanço da ferramenta e material da peça. A Figura 4.4

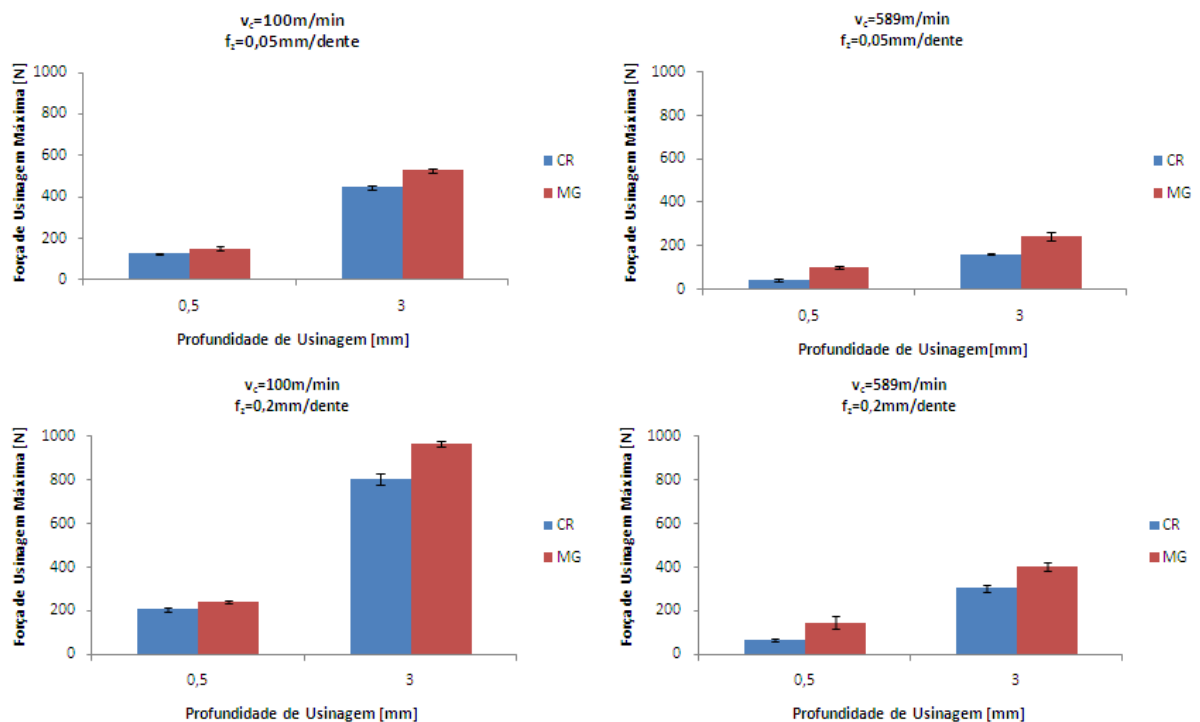


Figura 4.4 - Força de usinagem máxima para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.

O aumento de velocidade de corte em 5,89 vezes, de (a) para (b) e de (c) para (d), causou uma redução média na força de usinagem máxima de 64% para o material CR e 46% para o MG, respectivamente.

A redução do avanço da ferramenta em 75%, de (a) para (c) e de (b) para (d) causou uma redução média na força de usinagem máxima de 41% para o material CR e 39% para o MG, respectivamente.

A profundidade de usinagem apresentou as maiores reduções nas forças máximas com sua diminuição em 83%, sendo de 74% para o CR e 67% para o MG.

Finalmente, analisando o comportamento dos materiais dos corpos de prova, a condição CR apresentou menores forças máximas de usinagem que o MG, alcançando uma redução média de 29%.

Outra forma de se avaliar quais fatores realmente influenciam na força máxima de usinagem é através do uso da Análise de Variância (ANOVA). Adotando uma confiabilidade de 95%, ou equivalentemente um nível de significância de 5%, foi possível gerar o assim denominado QUADRO ANOVA dos fatores de controle. Um software estatístico comercial foi utilizado nos cálculos. A Tabela 4.2 traz o quadro ANOVA.

Tabela 4.2 - Quadro ANOVA sobre a resposta da força máxima de usinagem.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Material*	1	142773	142773	11,36	0,001
Velocidade de corte*	1	1499514	1499514	119,35	0,000
Profundidade de usinagem*	1	2900959	2900959	230,89	0,000
Avanço*	1	672288	672288	53,51	0,000
Erro	91	1143342	12564		
Total	95	6358877			

* Fator significativo

A interpretação do quadro ANOVA é feita através da análise do valor da probabilidade P. Níveis menores que o de significância estabelecido previamente ($\alpha = 0,05$ ou 5%) indicam que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, esses fatores causaram significativa variação na resposta força máxima de usinagem. Assim, analisando os resultados, tem-se que todos os fatores influem estatisticamente nas forças máximas de usinagem.

Graficamente, é possível constatar as influências observando-se a Figura 4.5. A profundidade de usinagem apresentou uma maior influência, seguida da velocidade de corte, do avanço por dente e do material.

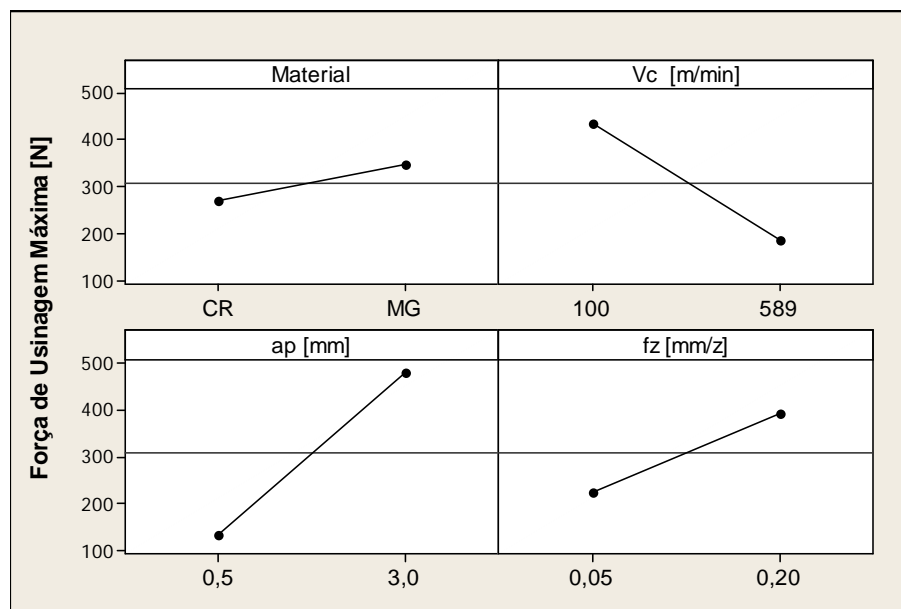


Figura 4.5 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a força máxima de usinagem.

Calculando o valor RMS dos sinais obtidos para força de usinagem, obteve-se um valor que representa toda a extensão do processo de usinagem. A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos para RMS das forças de usinagem e seus respectivos desvios para as diferentes combinações de parâmetros de corte e material da peça.

Tabela 4.3 - Valores RMS obtidos para as forças de usinagem e seus respectivos desvios [N].

Parâmetros de Corte			CR		MG	
v _c [m/min]	a _p [mm]	f _z [mm/dente]	Média	Desvio	Média	Desvio
100	0,5	0,05	25,1	1,1	35,1	3,5
		0,20	48,9	1,2	62,8	2,1
	3,0	0,05	117,9	5,4	148,4	9,2
		0,20	215,7	5,4	275,3	7,4
589	0,5	0,05	13,6	2,3	37,5	2,3
		0,20	27,4	3,2	59,7	11,0
	3,0	0,05	53,5	1,5	87,1	7,5
		0,20	111,7	3,1	160,3	7,3

Tal como para força de usinagem máxima, a Figura 4.6 a seguir apresenta um conjunto de gráficos para os valores RMS da força de usinagem.

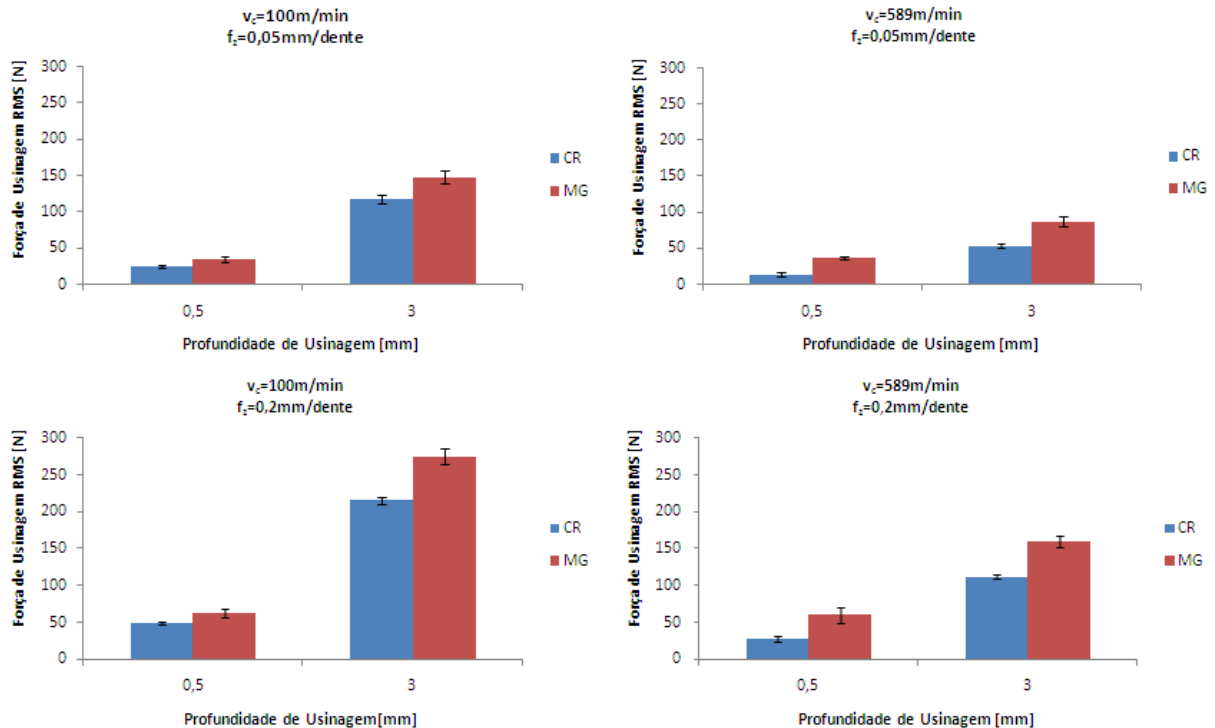


Figura 4.6 - RMS da força de usinagem para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.

O aumento da velocidade de corte causou uma redução média na força RMS para o CR de 48%. Por outro lado, analisando-se a condição do material MG, não se pode afirmar estatisticamente que a alta velocidade de corte acarretou em menores níveis de força de usinagem RMS, uma vez que as médias para com profundidade de corte de 0,5 mm na comparação de (a) com (b) e (c) com (d) encontram-se dentro dos desvios. Já para as demais condições, obteve-se uma redução média de 41% com o aumento da velocidade.

A redução do avanço por dente gerou uma queda na força RMS em média de 49% e 43%, respectivamente, para o material na condição CR e MG. A profundidade de usinagem, assim como para força de usinagem máxima, apresentou as maiores reduções nas forças RMS, sendo em média 77% para o MG e 68% para o CR.

Finalmente, analisando o comportamento dos materiais, a condição CR apresentou menores níveis de força de usinagem RMS que os do MG, alcançando uma redução média de 35%.

A Tabela 4.4 traz o quadro ANOVA para a força de usinagem RMS.

Tabela 4.4 - Quadro ANOVA sobre a resposta da força de usinagem RMS.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Material*	1	23893	23893	27,35	0,000
Velocidade de corte*	1	53712	53712	61,48	0,000
Profundidade de usinagem*	1	277295	277295	317,41	0,000
Avanço*	1	73789	73789	84,46	0,000
Erro	91	79499	874		
Total	95	508188			

* Fator significativo

Analisando os resultados obtidos, observa-se que todos os parâmetros influem na força de usinagem RMS, assim como para a força máxima de usinagem. Graficamente, é possível também é possível constatar as influências avaliando-se a Figura 4.7. A profundidade de corte apresentou uma maior influência, seguida do avanço, da velocidade de corte e do material da peça.

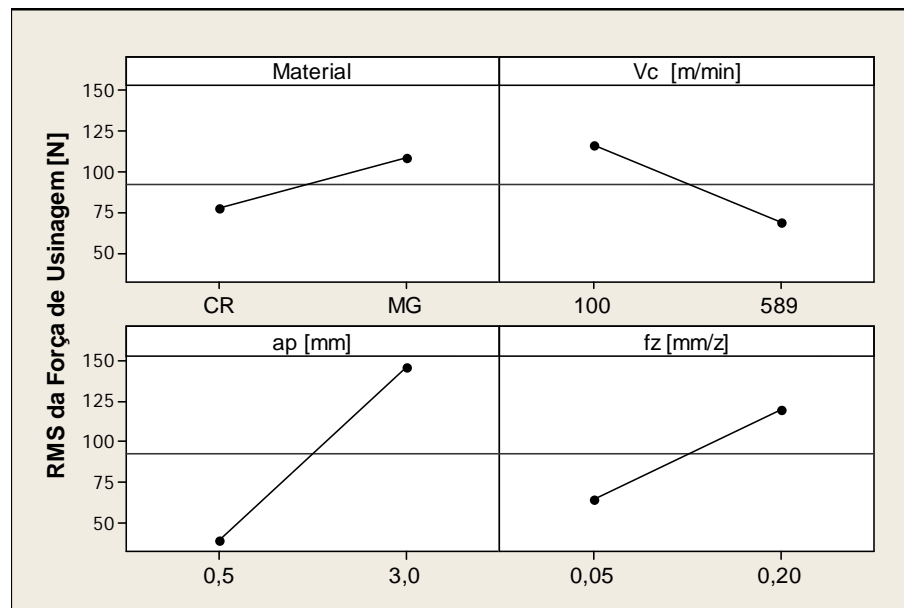


Figura 4.7 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a força de usinagem RMS.

Os resultados estão condizentes com pesquisa já realizadas por diferentes autores. Segundo Fang e Wu (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o aumento da velocidade

de corte eleva as forças até certo ponto e logo após passa a sofrer redução, para o aumento do avanço os autores também constataram o aumento das forças. Trent e Wright (2000) em seus estudos também comprovou que o aumento da velocidade de corte reduz a força de usinagem para diversos tipos de metais. Ferraresi (1970) constatou que o aumento da área de corte eleva a força de usinagem e que o aumento da velocidade de corte reduz levemente as forças de usinagem. Martinho, Silva e Baptista (2008) concluíram que o aumento do avanço causa em aumento da força de corte, porém para velocidade de corte não constaram influência significativa. Para Lalwani, Mehta e Jain (2008) o avanço e profundidade de corte são os fatores mais influentes na força de usinagem seguido da velocidade de corte.

4.2.2 Energia Específica de Corte

A energia específica de corte é uma variável que representa a eficiência energética do processo e está sujeita à influência das condições de usinagem, material da peça e ferramenta. Este item trata dos resultados obtidos e respectivas discussões propostas para a energia específica de corte do aço COS AR 60. A Tabela 4.5 mostra os valores obtidos da energia específica de corte e seus respectivos desvios para as diferentes combinações dos parâmetros de corte e da microestrutura da peça.

Tabela 4.5 - Valores obtidos para energia específica de corte e desvios para o COS AR 60 [J/mm³].

Parâmetros de Corte			CR		MG		
v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/dente]	Média	Desvio	Média	Desvio	
100	0,5	0,05	7,74	0,11	11,21	1,54	
		0,20	4,38	0,12	5,50	0,24	
	3,0	0,05	8,31	0,43	10,51	0,75	
		0,20	3,75	0,12	4,88	0,17	
	589	0,5	0,05	4,38	1,06	11,01	1,47
			0,20	3,07	0,15	5,25	0,26
3,0		0,05	4,67	0,20	9,22	0,83	
		0,20	3,07	0,23	4,62	0,23	

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos da energia específica na forma gráfica.

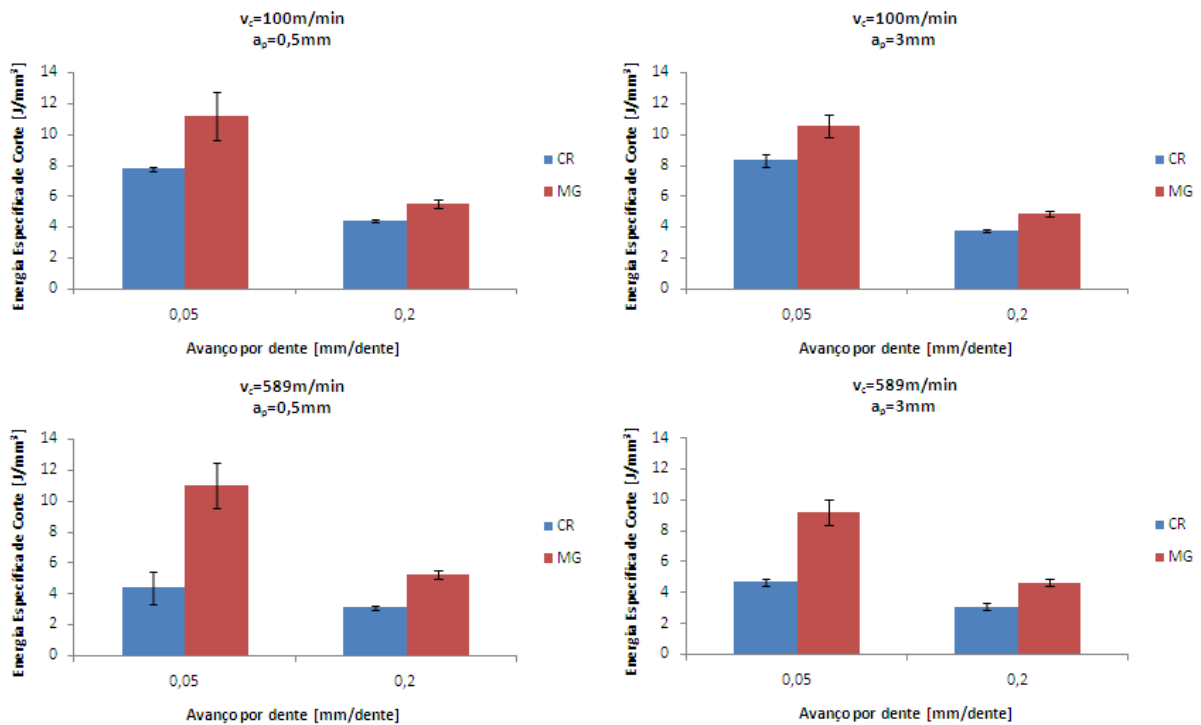


Figura 4.8 - Energia específica de corte para os diferentes parâmetros de corte e condições microestruturais do aço COS AR 60.

O aumento da velocidade de corte causou uma redução média de 34% na energia específica de corte para o material na condição CR. Já para o material MG, a elevada velocidade de corte estatisticamente não acarretou em menores níveis energia específica de corte, pois em todas as comparações possíveis, os desvios tornam as médias estatisticamente sem diferença.

O aumento do avanço acarreta em redução da energia específica de corte, sendo esse parâmetro o mais significativo. Obteve-se uma redução média de 41% para o CR e 52% para o MG. A profundidade de usinagem quase não apresentou alterações na energia específica para as duas condições microestruturais do material.

Finalmente, analisando o comportamento dos materiais da peça, a condição CR apresentou menores energias específicas que o material MG, alcançando uma redução média de 35%. Este comportamento sinaliza que a redução da energia específica de corte em diferentes condições microestruturais da peça é potencializada quando a usinagem ocorre sob maiores velocidades de corte.

A Tabela 4.6 traz o quadro ANOVA para energia específica de corte.

Tabela 4.6 - Quadro ANOVA para a energia específica de corte do aço COS AR 60.

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Material*	1	195,62	195,62	117,31	0,000
Velocidade de corte*	1	45,23	45,23	27,13	0,000
Profundidade de usinagem	1	4,60	4,60	2,76	0,100
Avanço*	1	396,81	396,81	237,97	0,000
Erro	91	151,74	1,67		
Total	95	794,00			

* Fator significativo

Analisando os resultados obtidos, observa-se que apenas a profundidade de usinagem não teve influência estatisticamente significativa na energia específica de corte, sendo os demais fatores, tais como o material da peça, velocidade de corte e avanço por dente influentes na energia específica.

Graficamente é possível constatar as influências avaliando-se a Figura 4.9. O avanço apresentou uma maior influência, seguida do material dos corpos de prova e da velocidade de corte.

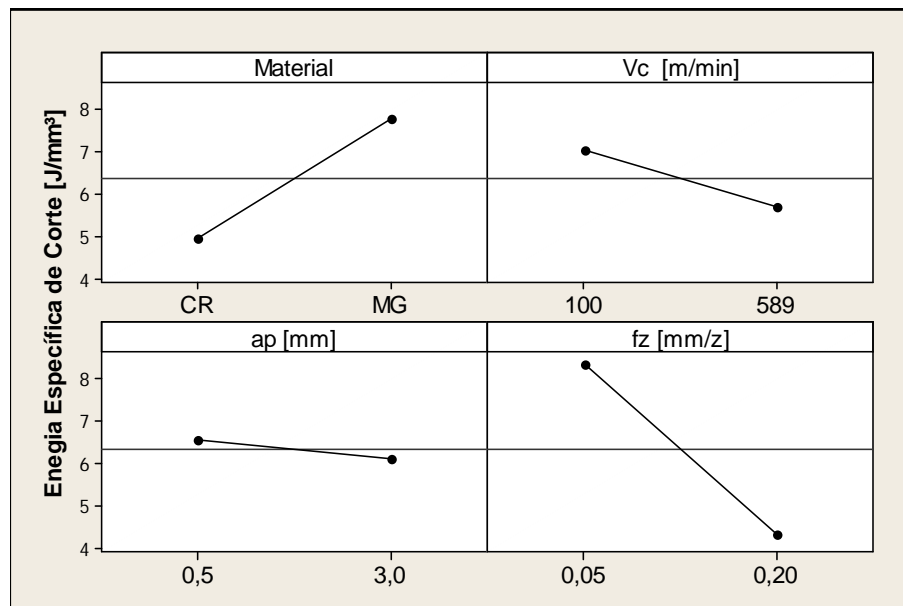


Figura 4.9 - Análise gráfica dos efeitos principais da ANOVA para a energia específica do aço COS AR 60.

De acordo com os resultados obtidos por Ferraresi (1970), Ersoy (2004) e Diniz, Marcondes e Coppini (2006), a energia específica sofre maior influência da ação do avanço,

onde maiores avanços resultam em menores energias específicas. A velocidade de corte e a profundidade de usinagem também causam efeito inversamente proporcional na energia específica, sendo esta última a menos influente. Com os resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível constatar e ratificar o efeito do avanço, da velocidade de corte e da profundidade de usinagem. A condição do material da peça apresentou a segunda maior variação, provavelmente devido às diferenças nas propriedades mecânicas decorrentes do processo de refino de grão, tais como a dureza, por relacionar-se aos novos níveis de tensão do material e à sua mudança no comportamento plástico durante o processo de formação de cavaco.

4.2.3 Comparação entre Métodos de Cálculo de Energia Específica de Corte

Comparar os resultados obtidos neste trabalho com métodos consagrados ou utilizados pela indústria é de grande importância para se avaliar o grau de coerência dos resultados obtidos nesta pesquisa.

Os métodos de cálculos da energia específica foram apresentados no item 2.3.3 e os modelos de Taylor, da ASME, da AWF, de Kienzle e da Sandvik Coromant foram escolhidos para comparação, pois requerem parâmetros de corte utilizados neste trabalho e dados tabelados relativos ao material da peça, mesmo que em alguns casos sejam aproximados. Assim, os dados para alimentação dos modelos foram extraídos de Ferraresi (1970), Sandvik Coromant (2003).

Utilizando os resultados de energia específica de corte obtidos para o aço COS AR 60 na condição CR, foi possível gerar as curvas de energia específica em função da taxa de remoção de material para os modelos citados acima (Figura 4.10). O emprego da taxa de remoção de material foi escolhido por ser representativo simultaneamente da velocidade de corte e do avanço por dente, ou seja, dos fatores mais influentes na energia específica.

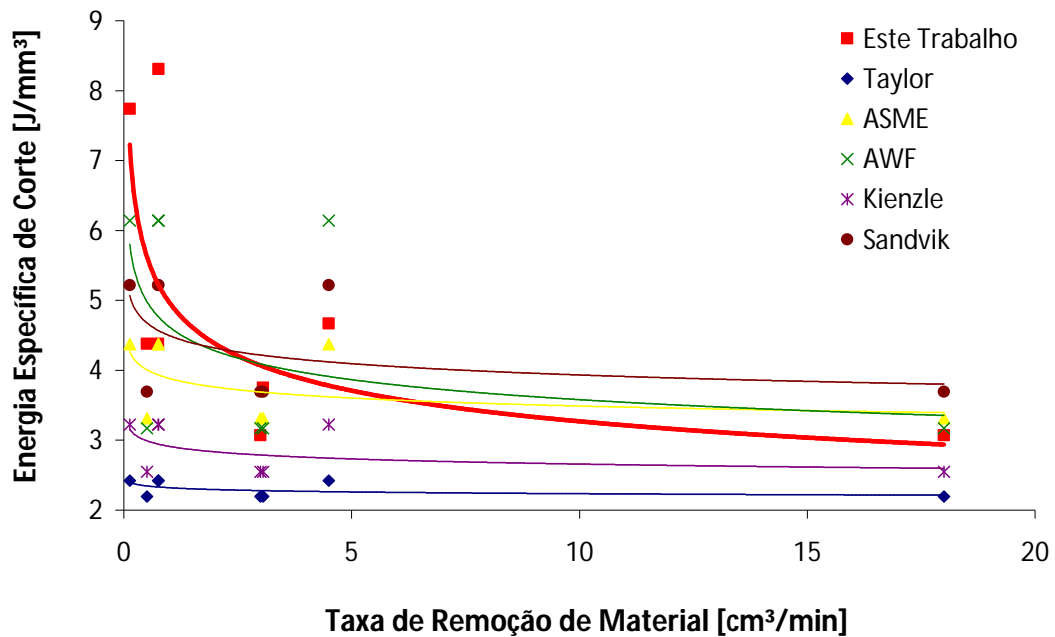


Figura 4.10 - Comparação da energia específica de corte para o aço COS AR 60 na condição CR.

Os valores experimentais da energia específica de corte do material CR obtidos por este trabalho mostraram um comportamento semelhante aos demais modelos. Apenas sob pequenas taxas de remoção de material a curva experimental apresentou um crescimento mais acentuado que os demais. Nota-se que a curva gerada por este trabalho aproximou-se mais dos métodos de cálculo da Sandvik Coromant, da ASME e da AWF.

De maneira análoga ao caso anterior, utilizando os resultados obtidos para o aço COS AR 60 na condição MG, foi possível gerar as curvas de energia específica em função da taxa de remoção de material (Figura 4.11), para os métodos clássicos de cálculo da energia específica de corte.

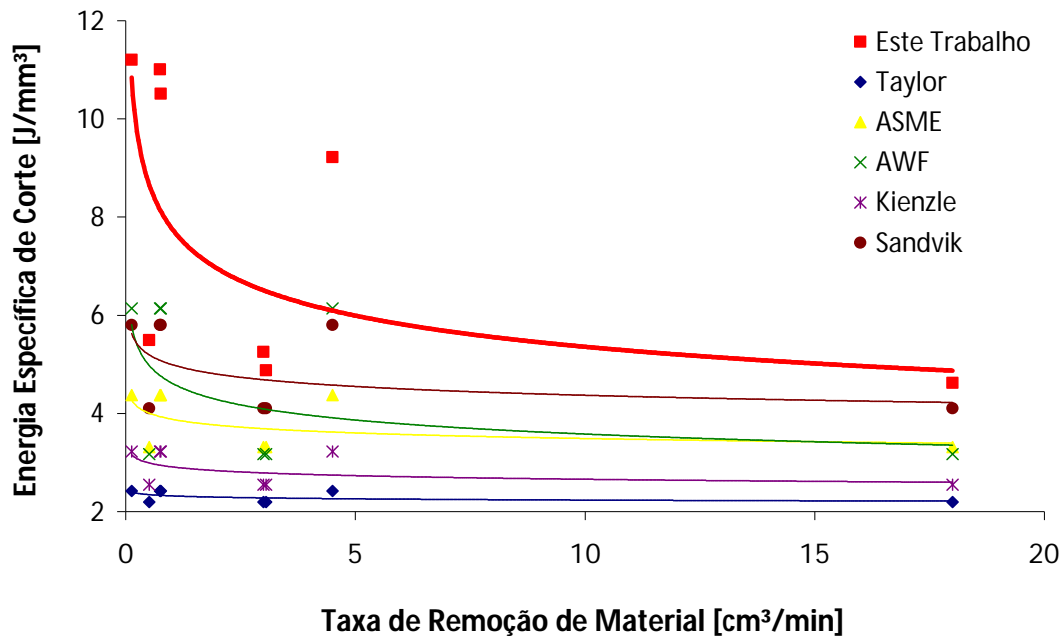


Figura 4.11 - Comparação da energia específica de corte para o aço COS AR 60 na condição MG.

Os valores experimentais da energia específica de corte do material MG obtidos por este trabalho, apesar de mais elevados para toda a faixa da taxa de remoção de material, mostraram também um comportamento considerado similar ao dos demais modelos. Novamente, somente para pequenas taxas de volume removido de cavaco a energia específica de corte elevou-se significativamente. Neste caso, observa-se que a curva obtida por este trabalho aproximou-se mais do método de cálculo proposto por Sandvik Coromant (2003).

Pelo exame das curvas obtidas, é possível verificar o fenômeno do efeito de escala, mais acentuado para o modelo proposto e menos acentuado para os demais métodos de cálculo da energia específica. Esta diferença de comportamento pode residir no fato de que os demais modelos baseiam-se mais propriamente no avanço da ferramenta e, em alguns casos, na profundidade de usinagem (menos significativo na energia específica), ao passo que o modelo proposto leva em conta, além do avanço da ferramenta (fator mais influente) a velocidade de corte (efeito mais significativo que a profundidade de usinagem).

Outra análise que pode ser realizada refere-se ao efeito da espessura do cavaco na energia específica de corte. Os métodos empíricos comparativos do modelo proposto, excetuando-se o da Sandvik Coromant, foram formulados para uma gama de materiais da peça usinada, considerando-se a espessura do cavaco constante. Este fato pode ser

causador das diferenças entre os modelos, a menos com o da Sandvik Coromant, que considera a espessura do cavaco variável, tal como no processo de fresamento realizado por este trabalho. Provavelmente por conta disso, os resultados da Sandvik e aqueles gerados nesta pesquisa apresentaram amplitudes e comportamentos mais próximos.

Além da diferença decorrente da variação na espessura do cavaco, alguns modelos extraídos de Ferraresi (1970), tais como o da ASME, AWF e de Kienzle foram alimentados com dados tabelados, aproximados aos tipos de materiais da peça usinada. O método de Taylor, por sua vez, leva em conta apenas o avanço da ferramenta de corte, sendo as constantes do modelo empregadas a aços com médio teor de carbono. Esta aplicação vasta do método de Taylor, não especificando por exemplo características como dureza, resistência mecânica ou composição química das peças, também pode ter conduzido às maiores diferenças entre os resultados.

Com a validação dos valores obtidos, torna-se possível a criação de modelos de cálculo da energia específica de corte para os materiais e parâmetros de corte empregados neste trabalho. A Figura 4.12 apresenta as interpolações dos resultados experimentais da energia específica em função da velocidade de avanço para os aços COS AR 60 nas condições CR e MG. Os ajustes das curvas considerando a velocidade de avanço, a exemplo da taxa de remoção de material mencionada anteriormente, parece representar bem o comportamento da energia específica, por incorporar os fatores mais influentes, que são o avanço e a velocidade de corte. O baixo coeficiente de ajuste do modelo para o material MG se deve apenas à heterogeneidade do tamanho e distribuição dos grãos no material, já mencionado no item 4.2.2.

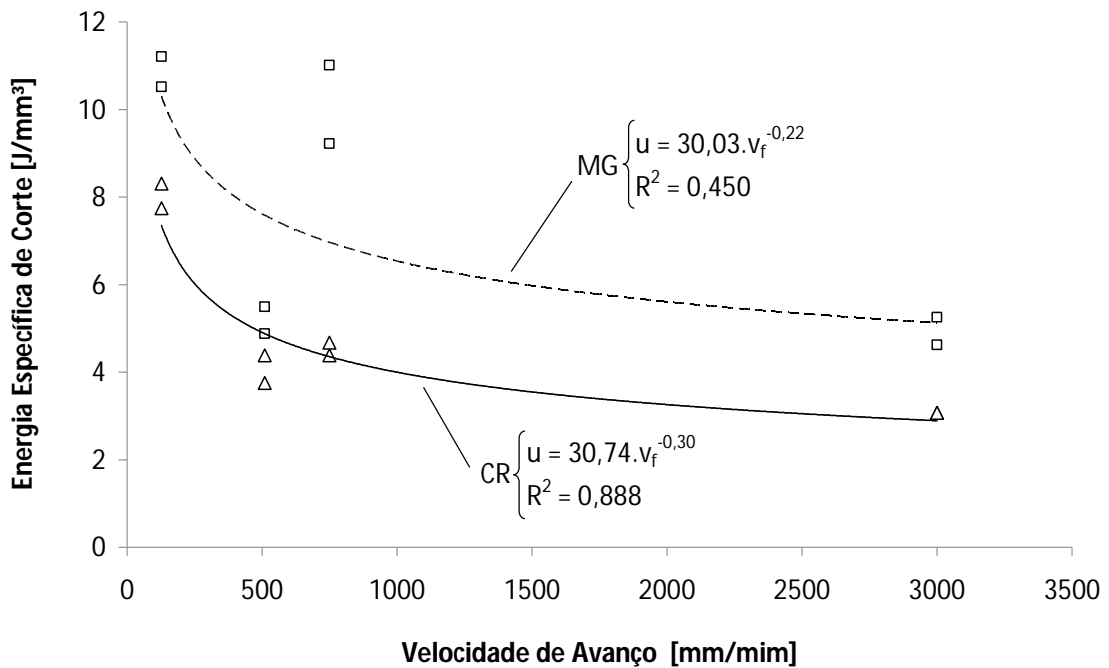


Figura 4.12 - Energia específica de corte em função da velocidade de avanço da ferramenta.

Analisando-se as expressões geradas pelos ajustes dos pontos para ambos os materiais, observa-se que as constantes multiplicativas do avanço são próximas, assim como seus expoentes. O fator multiplicativo para o material MG (30,03), ligeiramente menor que o do CR (30,74), poderia conduzir a menores valores de energia específica, mas seu expoente negativo (0,22), menor que o do CR (0,30), faz aumentar a energia específica de corte. Na realidade, além de regular a magnitude da energia específica, o expoente negativo da velocidade do avanço também determina o grau de curvatura da curva, pois quanto maior seu valor, mais assintótica é a curva em relação ao eixo y. Em outras palavras, o expoente é indicador da sensibilidade do material ao efeito de escala, sendo mais perceptível na condição CR o crescimento da energia específica com a diminuição da velocidade de avanço da ferramenta de corte.

5 CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um estudo essencialmente experimental para se avaliar o efeito de estratégias de fresamento de topo (condições fixas com análise conjunta dos parâmetros de corte) e parâmetros de corte isolados (combinados entre si) no comportamento da força de usinagem e da energia específica de corte. Portanto, com base em todos os ensaios apresentados neste trabalho, as seguintes conclusões são delineadas:

- Ao considerar estratégias de usinagem, a usinagem HSC causou redução da força de usinagem, porém elevou a energia específica de corte, ditado pelo emprego de pequenas áreas de corte;
- Para usinagem do material CL 23, independentemente de sua microestrutura, a estratégia HPC demonstra ser a condição de usinagem mais eficiente, dada a maior taxa de remoção de material por energia consumida, porém os esforços são os maiores, elevando a condição HSC como a melhor sob o ponto de vista dos esforços, já que sua taxa de remoção é intermediária. Assim, em condições de alta demanda, a usinagem HPC é preferencial;
- Considerando-se a análise isolada dos parâmetros de corte, o aumento da velocidade de corte reduziu a força de usinagem e a energia específica de corte;
- O aumento da profundidade de usinagem elevou significativamente a força de usinagem, contudo não se mostrou influente na energia específica de corte;
- O avanço foi o parâmetro mais influente na energia específica. Seu aumento reduziu a energia específica, porém elevou a força de usinagem;
- O material com grãos ultrafinos aumentou levemente a força de usinagem e mais significativamente a energia específica de corte;
- O modelo teórico formulado com base nos resultados empíricos deste trabalho apresentou boa concordância com os métodos de cálculo da energia específica de corte provenientes da literatura técnico-científica.

5.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas sugestões e propostas de atividades de pesquisa que podem enriquecer e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento.

- Elaborar modelos de estimação de temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária com base na energia específica de corte e comparar com simulações numéricas;
- Utilizar nos ensaios diferentes tipos de materiais de interesse industrial;
- Avaliar o processo de formação do cavaco e associar aos resultados de energia específica e força de usinagem;
- Comparar resultados de força e energia específica de corte com simulações numéricas.

6 REFERÊNCIAS

ALAUDIM, M.; MAZID, M. A.; AL BARADI, M. A.; HASHMI, K. S. J. Cutting forces in the end milling of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 77, n.1, p. 153-159, 1998.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e força de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ÁVILA, R. F.; BAPTISTA, B. S.; BARBOSA, C. A.; ABRÃO, A. M. Influência do fluido de corte sobre a força de usinagem e o acabamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, 7., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo : Local de Publicação, 2004. Não paginado.

AXINTE, D. A.; DEWES R. C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling - experimental data and empirical models. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.127, n.1 p.325-335, 2002.

BAUCO, S. A. High Speed Machining na Indústria de Moldes e Matrizes. In:_____. **Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2003. p.111–124.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. Mechanics of metal cutting. In:_____. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2.ed. EUA: Marcel Dekker, 1989. p. 73-108.

CHEVRIER, P.; TIDU, A.; BOLLE, B. ; CEZARD, P. ; TINNES, J. P. Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v.43, n. 11, p.1135-1142, 2003.

CHRISTOFFEL, K. High-speed machining – from a tool manufacture's perspective. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA - MANUFATURA AVANÇADA, 6., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: UNIMEP, 2001. p.121-151.

COOK, N. H. Chip formation in machining titanium. In: PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON MACHINE GRINDING TITANIUM, 1., 1953, Watertown Arsenal. **Proceedings...** Watertown 72: Massachussets Institute of Technology, 1953. p. 1–7.

COSTA, A. R. **Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis**. 2003. 123f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas 2003.

DAVIM, P. J. **Machining: fundamentals and recent advances**. London: Springer-Verlag, 2008. 389 p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Artliber, 2006. 255 p.

DOLINSEK, S.; EKINOVIC, S.; KOPAC, J. A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 157-158., n.1, p. 485–490. 2004.

DUDZINSKI, D. et al. A Review of developments towards dry and high speed machining of inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 44. n. 4. p. 439-456. 2004.

ERSOY, A.; ATICI, U. Performace characteristics of circular diamond saws in cutting of different type of rocks. **Diamond and Telated Materials**, Amsterdam, v. 13, n.1, p. 22-37, 2004.

FANG, N.; WU Q. A. Comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.209 n.209, p.4385–4389, 2009.

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 754 p.

FLOM D. G.; KOMANDURI, R. High Speed machining. In:_____. DAVIS, J. R. (Ed.). **Metals handbook: machining**. 9.ed. Ohio: ASM, 1989. v.16, p. 597-606.

HEISEL U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. A técnica da quantidade mínima de fluido e sua aplicação nos processos de corte. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo v.1, n. 386, p. 22-38, 1998.

HELLENO, A. L.; SCHÜTZER, K. Fatores que influenciam a usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v.12, n. 23, p. 7-14, 2004.

KING, R. I; HAHN, R. S. Principles of grinding. In:_____. **Handbook of modern grinding technology**. EUA: Ghapman and Hall, 1986. p. 30-71.

KOMANDURI, R; BROWN, R. H. On the Mechanics of chip segmentation in machining, **Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME**, New York, v. 33, n.1, p.103, 1981.

KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

LALWANI, D. I.; MEHTA, N. K.; JAIN, P. K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 206, n.1, p. 167-179, 2008.

LAW, K. M. Y.; GEDDAM, A.; OSTAFIEV, V. A. A Process-design approach to error compensation in the end milling of pockets. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 89-90, n.1., p. 238-244, 1999.

LE MAIRE, J. C.; BACKOFEN, W. A. Adiabatic Instability in ortogonal cutting of steel. **Metal-Transactions of the ASME**, New York, v. 3, n.10, p. 477-481, 1972.

LIAO, Y. S.; LIN, H. M.; CHEN, Y. C. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.209, n.01, p.3808-3817, 2009.

LIN, H. Z.; LIU, K.; LI, X. P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.113, n. 113, p. 378-384, 2001.

Longbottom, J. M.; Lanham, J. D. A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 46 n. 1, p. 1740–1747, 2006.

Machado, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 371p.

Marcelino, A. P.; Domingos, D. C.; Campos D. V.; Schroeter R. B. Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061. In: CONGRESSO ESTUDANTIL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CREEM, 11., 2004, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004. Não paginado.

Martinho, R. P.; Silva F. J. G.; Baptista, A. P. M. Cutting forces and wear analysis of Si₃N₄ diamond coated tools in high speed machining. **Vacuum**, Amsterdam, v.83, n.1, p.1415-1420, 2008.

Melo, A. C. A.; Viana, R.; Barbosa, F. Q.; Machado, A. R. Estudo da variação da temperatura de corte no fresamento frontal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - COBEF, 2., 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2003. Não paginado.

Ning, Y.; Rahman, M.; Wong, Y. S. Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.113, n.1, p. 360-367, 2001.

Oliveira, J. F. G. HSM - Conceitos e Aplicações. In:_____. **Usinagem em altíssimas velocidades - como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2003. p. 21-34.

Paulo, R. G. R. **Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte**. 2008. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

Poloni, W.; Turchetta, S. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 44, n.1, p. 1189-1196, 2004.

RECHT, R. F. Catastrophic thermoplastic shear. **Journal Applied Mechanics - Transactions of the ASME**, New York, v.86, n.1, p. 89-193, 1964.

RODRIGUES A. R.; COELHO R. T. Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 29, n.3, p. 279-283, 2007.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 2005. 227 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RODRIGUES, A. R.; MATSUMOTO, H.; YAMAKAMI, W. J.; PAULO, R. G. R.; ASSIS, C. L. F. Influência da condição de usinagem na usinabilidade do aço SAE 4118H. In: VIII CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA, 8., 2007, Cusco-Peru **Anais...** Cusco-Peru: Pontificia Universidad Católica del Peru, 2007. Não paginado.

SALMON, S. C. Fundamentals of grinding. In:_____. **Modern grinding process technology**. EUA: McGraw-Hill, 1992. p. 89-101.

SANDVIK. **Steel turning**. São Paulo: SANDVIK, 2000. 683p.(Catálogo de Ferramentas).

SANDVIK. **Ferramentas rotativas**. São Paulo: SANDVIK, 2003. 773p. (Catálogo de Ferramentas).

SCHULZ, H. High speed milling machines. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA - USINAGEM COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE. 1., 1996, Santa Bárbara d'Oeste. **Anais...** Piracicaba: UNIMEP, 1996. Não paginado.

SCHULZ, H. The History of high speed machining, **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 7, n.13, p. 9-18, 1999.

SCHULZ, H.; ABELE, E.; SAHM, A., Material aspects of chip formation in HSC machining. **Annals CIRP**, Paris, v. 50, n. 1, p. 45–48, 2001.

SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F.; DIONISIO, C. C. C. Introdução do processo HSC na indústria brasileira. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 407, n.1, p. 32-45, 1999.

SCHÜTZER, K; SCHULZ, H. Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais. In:_____. **Usinagem em altíssimas velocidades:** como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. 2.ed. São Paulo: Érica, 2003. p.13-26.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles.** New York: Oxford Science Publications, 1984. 594 p.

SHAW, M. C. The assessment of machinability. **ISI Special Report - Iron and Steel Institute,** London, v.94, n.1, p.1-9, 1967.

SHAW, M. C.; DIRK, S. O.; SMITH, P. A.; COOK, N. H.; LOEWEN E.G.; YANG C.T. Machining titanium. **MIT Report - Massachussets Institute of Technology,** Massachussets, 1954. Não paginado.

SILVA, L. R. **Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte.** 2002. 211f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

TOH, C. K. Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel. **Materials and Design,** Amsterdam, v. 25, n.1, p. 41–50, 2004.

TOH, C. K. Comparision of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology,** Amsterdam, v. 167, n. 1, p. 110-118, 2005.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting.** Boston: Butterworth Heinemann, 2000. 446 p.

VIGNEAU, J. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. **Máquinas e Metais,** São Paulo, v.1, n. 380, p.16-31, 1997.