



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**“SERRAMENTO DO AÇO ABNT 1045 UTILIZANDO SERRAS
CIRCULARES COM INSERTOS DE METAL DURO E
CERMET”**

MARIA CRISTINA MOREIRA

Belo Horizonte

2011

MARIA CRISTINA MOREIRA

**“SERRAMENTO DO AÇO ABNT 1045 UTILIZANDO SERRAS
CIRCULARES COM INSERTOS DE METAL DURO E
CERMET”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Produção e Logística

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011



Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Caixa Postal 209 – CEP 30161-970 – Belo Horizonte – MG
Fones: (31) 3499-4819 – Fax: (31) 3409-4883 – e-mail: ppgep@dep.ufmg.br

“SERRAMENTO DO AÇO ABNT 1045 UTILIZANDO SERRAS CIRCULARES COM INSERTOS DE METAL DURO E CERMET”

MARIA CRISTINA MOREIRA

Dissertação defendida e aprovada em 02 de Dezembro de 2011, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia de Produção**", na área de concentração de "**Produção e Logística**"

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão
Professor Associado - UFMG – Orientador

Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria
Professor Adjunto - UFMG – Coorientador

Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio
Professor Associado - UFMG

Prof. Dr. José Luís Lopes da Silveira
Professor Externo - UFRJ

Dedico este trabalho a minha família

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela infraestrutura laboratorial que permitiu a realização deste projeto.

À Kampmann do Brasil Ltda. pelo apoio ao projeto e pelo fornecimento de insumos.

Ao meu orientador, Alexandre Mendes Abrão, por acreditar no meu potencial e cuja seriedade, competência e dedicação, proporcionou a elaboração do trabalho com riquezas de informações práticas e científicas.

Aos Professores Paulo Eustáquio Faria e Juan Carlos Rubio pelas contribuições ao projeto, além de apoio nos momentos difíceis.

Aos Professores Paulo César de Matos Rodrigues e José Maria Ramon Caccioppoli e ao técnico Estevesom Ferreira Migueletti (Escola de Engenharia da UFMG) pelo apoio à realização do tratamento térmico dos corpos de prova.

Aos amigos Jason França, Raquel Gláucia e Demetrius Gil, pela paciência e apoio.

Ao Luiz Carlos Oliveira, pela amizade e por auxiliar no planejamento, desenvolvimento e montagem mecânica do experimento.

Aos colegas de trabalho da Kampmann do Brasil, em especial ao Admilson Ferreira de Oliveira, Edgar Kapp, Edmar Pereira dos Santos, Gilberto Antônio de Almeida, Júlio César Vieira, Marcos José Medeiros Lima e Miguel Moreira Brandão, por cooperarem e apoiar durante o período de desenvolvimento do projeto.

Aos colegas da UFMG, Cristiane Bastos Lopes, Thiago Monteiro, Luiz Finotti, Wanderson Oliveira Leite e Alexandre Bernandes, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eduardo Rulinkas (Wagner Lennartz), Anderson Ferreira da Silva (Sandi Ferramentas), Reinaldo José de Almeida (VMB do Brasil), Jan Stroesser (Vollmer do Brasil) e Marcus Schmuck (Vollmer do Brasil), que com suas experiências me apoiaram no desenvolvimento da revisão bibliográfica.

“A teoria é um tesouro, mas a chave que abre este tesouro é a prática”

Miguel Moreira Brandão

Jardineiro – Kampmann do Brasil

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo principal avaliar a influência dos parâmetros operacionais sobre o desempenho da operação de serramento do aço ABNT 1045 utilizando serras circulares com insertos de metal duro e cermet. Mais especificamente, serão analisadas as influências dos parâmetros velocidade de corte, avanço por dente e material e geometria do inserto (pré-cortador/cortador e sulcos alternados) sobre as forças de avanço, radial e axial, rugosidade da parede fresada (R_a , R_q , R_t e R_z), largura da fenda, formação de rebarbas, desgaste da ferramenta e formas dos cavacos produzidos. Em um primeiro momento será verificada por meio da análise de variância a influência dos parâmetros velocidade de corte e avanço por dente além da sua interação sobre os parâmetros de saída (forças, rugosidade e largura da fenda). Em seguida serão realizadas comparações entre as três serras por meio da análise dos gráficos *box plot* (verificação da dispersão da amostra) e valor médio do parâmetro de saída estudado. Por fim, será realizada a otimização dos parâmetros de corte para as três serras empregando o método de superfícies de resposta com o intuito de se identificar a combinação de parâmetros (v_c e f_z) responsável por forças mais baixas e melhor acabamento para cada serra. De uma forma geral, os resultados indicaram que a serra de metal duro com geometria pré-cortador e cortador foi responsável por menores forças de usinagem, cujos valores diminuiram com o aumento da velocidade de corte e aumentaram com a elevação do avanço. Com relação à rugosidade e largura da fenda, melhores resultados foram obtidos utilizando a serra de cermet. Os resultados da otimização apontaram que a serra de metal duro com geometria de sulcos alternados propiciou menores forças de serramento e menor rugosidade concomitantemente com taxa de remoção de material mais elevada que os demais insertos. A presença de rebarbas e as formas dos cavacos foram afetadas pelo material e geometria dos insertos das serras, mas não pelos parâmetros de corte. Finalmente, a serra de cermet apresentou desgaste gradual de pequena intensidade, ao passo que as serras de metal duro sofreram lascamento acentuado.

Palavras-chave: Serramento, serra circular, metal duro, cermet.

ABSTRACT

The principal aim of this work is to evaluate the influence of machining parameters on the performance of circular sawing of AISI 1045 steel using saw blades with tungsten carbide and cermet inserts. More specifically, the influence of cutting speed, feed rate and both insert geometry and material on feed, radial and axial forces, machined surface roughness (R_a , R_q , R_t and R_z), width of cut, burr formation, tool wear and chip forms will be investigated. Firstly, the influence of cutting speed and feed rate in addition to their interaction on the output parameters (forces, surface roughness and gap width) will be assessed using analysis of variance. Next, the performance of the three circular saw blades will be carried out with the aid of box plot graphs (sample dispersion) and both mean values and standard deviations. Finally the surface response method will be employed to optimize the cutting parameters for each saw blade in order to identify the cutting speed and feed rate responsible for lowest forces and best surface finish. In general, the results indicated that the carbide saw with pre-cutter and cutter geometry was responsible for lowest sawing forces, which decreased as cutting speed was elevated and increased together with feed rate. With regard to the machined surface roughness and width of cut, best results were obtained using the cermet saw blade. The optimization results showed that the carbide saw blade with alternating slots promoted lowest forces and best surface finish together with highest metal removal rate. Burr formation and chip forms were affected by the insert geometry/material, albeit the influence of the cutting parameters was found to be negligible. Finally, gradual wear was observed on the cermet saw blade, whereas the tungsten carbide inserts presented appreciable chipping.

Keywords: Sawing, circular saw blade, carbide, cermet

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Serramento alternativo	5
Figura 2.2 – Máquina de serrar com fita	6
Figura 2.3 – Serramento circular	7
Figura 2.4 – Detalhe da serra montada na máquina	9
Figura 2.5 – Serra circular inventada por T. Babbitt	10
Figura 2.6 – Formação do cavaco durante o serramento com serra circular	12
Figura 2.7 – Detalhes do cavaco do serramento	13
Figura 2.8 – Ângulo de contato	14
Figura 2.9 – Relação entre a variação da temperatura e a dureza do aço rápido	16
Figura 2.10 – Serra circular de aço rápido revestida com TiAlN	17
Figura 2.11 – Serra segmentada	19
Figura 2.12 – Variação da dureza e da resistência a ruptura transversal em relação à concentração de cobalto e refino do grão	21
Figura 2.13 – Serra circular com insertos de metal duro	21
Figura 2.14 – Serra circular com insertos de cermet	24
Figura 2.15 – Serra circular de fricção a frio	25
Figura 2.16 – Vista sobre o plano de referência	26
Figura 2.17 – Vista sobre o plano de corte	27
Figura 2.18 – Vista sobre o plano ortogonal	27
Figura 2.19 – Corte sem e com quebra cavaco	28
Figura 2.20 – Forma do dente pré-cortador cortador e quebra do cavaco	29
Figura 2.21 – Forma do dente sulco alternado e quebra do cavaco	30
Figura 2.22 – Forma do dente chanfro alternado e quebra do cavaco	31
Figura 2.23 – Forma do dente em V, bico de papagaio e V com chanfro	32
Figura 2.24 – Partes principais de uma lâmina de serra circular	33
Figura 2.25 – Detalhe da fenda externa e interna	34
Figura 2.26 – Gráfico comparativo da velocidade de corte (m/min) entre fabricantes para serrar barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45%)	35
Figura 2.27 – Gráfico comparativo do avanço por dente (mm) entre fabricantes para serrar barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45%)	37
Figura 2.28 – Profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e)	37
Figura 2.29 – Desgaste lascamento no inserto de metal duro P20 após 100 cortes	44

Figura 2.30 – Desgaste do inserto metal duro e cermet	45
Figura 2.31 – Mecanismo de desgaste de flancos	46
Figura 2.32 – Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido	47
Figura 2.33 – Trincas térmicas em serra de fricção a quente	47
Figura 2.34 – Comportamento da serra como uma função da rotação	48
Figura 2.35 – Resultado da medição da rugosidade das amostras	52
Figura 3.1 – Geometria da serra circular	54
Figura 3.2 – Centro de usinagem Romi Discovery 560	55
Figura 3.3 – Dinamômetro com o corpo de prova e batente	56
Figura 3.4 – Sistema de aquisição de dados das forças de usinagem	56
Figura 3.5 – Sistema de aquisição de imagens	57
Figura 3.6 – Serra de fita	58
Figura 3.7 – Rugosímetro Mitutoyo	58
Figura 3.8 – Exemplo de gráfico gerado pelo LabView durante a coleta de dados das forças de serramento	60
Figura 3.9 – Exemplo de gráfico da força de avanço (N) versus tempo (s)	61
Figura 3.10 – Exemplo de gráfico da força de avanço (N) versus tempo (s) com ajuste	61
Figura 4.1 – Gráfico probabilidade normal dos resíduos, resíduos versus valor ajustado, histograma e resíduos versus tempo, para análise residual de avanço F_x da serra cermet	65
Figura 4.2 – Gráfico de efeito principal para: força de avanço F_x e força radial F_y , serra cermet	67
Figura 4.3: Gráfico de efeito principal para força de avanço F_x (a) e força radial F_y (b) axial F_z para a serra MD S	69
Figura 4.4 – Gráfico de interação entre os resultados para a força de avanço para a serra MD S	70
Figura 4.5 – Gráfico de interação entre os resultados para a força radial para a serra MD S	70
Figura 4.6 – Gráfico de efeito principal para (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y para serra MD VN	71
Figura 4.7 – Gráfico de interação entre os resultados para a força de avanço para a serra MD VN	72
Figura 4.8 – Gráfico de interação entre os resultados para a força radial para a serra MD VN	72
Figura 4.9 – Gráfico <i>box plot</i> para forças de avanço (F_x)	73
Figura 4.10 – Gráfico do valor médio da força de avanço e o intervalo de confiança a 95%	73

Figura 4.11 – Gráfico <i>box plot</i> para força radial (F_y)	75
Figura 4.12 – Gráfico do valor médio da força radial e o intervalo de confiança a 95%	76
Figura 4.13 – Gráfico <i>box plot</i> para força axial (F_z)	76
Figura 4.14 – Gráfico do valor médio da força axial e o intervalo de confiança a 95% .	77
Figura 4.15 – Gráficos para análise residual de R_t para serra cermet: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus tempo	78
Figura 4.16 – Gráfico de efeito principal para R_a (serra MD VN)	80
Figura 4.17 – Gráfico de efeito principal para R_q (serra MD VN)	81
Figura 4.18 – Gráfico de efeito principal para R_t (serra MD VN)	81
Figura 4.19 – Gráfico de efeito principal para R_z (serra MD VN)	81
Figura 4.20 – Gráfico de interação rugosidade R_a (serra MD VN)	82
Figura 4.21 – Gráfico de interação rugosidade R_q (serra MD VN)	82
Figura 4.22 – Gráfico de interação rugosidade R_t (serra MD VN)	83
Figura 4.23 – Gráfico de interação rugosidade R_z (serra MD VN)	83
Figura 4.24 – Gráfico <i>box plot</i> para comparação da rugosidade R_a	84
Figura 4.25 – Gráfico do valor médio de R_a (intervalo de confiança a 95%)	85
Figura 4.26 – Gráfico <i>box plot</i> para comparação da rugosidade R_q	85
Figura 4.27 – Gráfico do valor médio de R_q (intervalo de confiança a 95%)	86
Figura 4.28 – Gráfico <i>box plot</i> para comparação da rugosidade R_t	86
Figura 4.29 – Gráfico do valor médio de R_t (intervalo de confiança a 95%)	86
Figura 4.30 – Gráfico <i>box plot</i> para comparação da rugosidade R_z	87
Figura 4.31 – Gráfico do valor médio de R_z (intervalo de confiança a 95%)	87
Figura 4.32 – Gráficos de análise residual para largura da fenda (serra cermet)	88
Figura 4.33 – Gráfico de (a) efeitos principais e (b) interação para a largura da fenda (MD S)	89
Figura 4.34 – Gráfico de efeito principal para a largura da fenda da serra MD VN	89
Figura 4.35 – Gráfico <i>box plot</i> para comparação das larguras das fendas	90
Figura 4.36 – Gráfico do valor médio da largura da fenda (intervalo de confiança de 95%)	91
Figura 4.37 – Otimização da v_c e f_z para a serra cermet	92
Figura 4.38 – Otimização da v_c e f_z para a serra MD S	93
Figura 4.39 – Otimização da v_c e f_z para a serra MD VN	93
Figura 4.40 – Rebarbas aderidas ao final do corte geradas pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN ($v_c= 140$ m/min e $f_z= 0,07$ mm/rev)	94
Figura 4.41 – Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal do inserto cermet após a realização dos testes	96
Figura 4.42 – Detalhe da superfície de folga principal do inserto cermet após realização dos testes	97
Figura 4.43 – Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto MD S	98
Figura 4.44 – Detalhe da aresta de corte do inserto MD S	99
Figura 4.45 – Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o	

inserto pré-cortador da serra MD VN	100
Figura 4.46 – Detalhe da aresta de corte do inserto pré-cortador da serra MD VN	101
Figura 4.47 – Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto cortador MD VN	101
Figura 4.48 – Detalhe da aresta de corte do inserto cortador da serra MD VN	102
Figura 4.49 – Cavacos gerados pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN ($v_c=140$ m/min e $f_z=0,04$ mm/rev)	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Passos de serras circulares	13
Tabela 2.2 – Composição química dos aços rápidos HSS-DMo5 e HSS-EC05.....	16
Tabela 2.3 – Comparação das propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC)	23
Tabela 2.4 – Faixa de ângulos de saída indicados para cada classe	31
Tabela 2.5 – Dimensões das serras circulares	33
Tabela 2.6 – Exatidão alcançável no corte	50
Tabela 3.1 – Denominação das serras circulares	53
Tabela 3.2 – Combinação dos valores de velocidade de corte e avanço por dente para cada teste	59
Tabela 4.1 – Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra cermet	65
Tabela 4.2 – Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra MD S	66
Tabela 4.3 – Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra MD VN ...	67
Tabela 4.4 – Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para as serras cermet	79
Tabela 4.5 – Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para as serras MD S	79
Tabela 4.6 – Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para a serra MD VN	79
Tabela 4.7 – Influência dos parâmetros de entrada sobre o parâmetro de saída	88
Tabela I.1 – Serra com inserto de cermet e geometria sulco alternado	113
Tabela I.2 – Serra com inserto de metal duro e geometria sulco alternado	114
Tabela I.3 – Serra com inserto de metal duro e geometria pré-cortador e cortador	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
ANOVA	Análise de Variância
APC	Aresta Postiça de Corte
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	Deposição Química de Vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
DIN	<i>Deustcher Industut für Normen</i>
HRC	Dureza Rockwell – Escala C
HSS	Aço Rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standartization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
NBR	Norma Brasileira
PVD	Deposição Física de Vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
RMS	Desvio Médio Quadrático (<i>Root Mean Square</i>)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TRS	Resistência à Ruptura Transversal
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

AlN	Nitreto de Alumínio
Mo₂C	Carboneto de Molibdênio
NbC	Carboneto de Nióbio
TaC	Carboneto de Tântalo
TaN	Nitreto de Tântalo
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
WC	Carbeto de Tungstênio

NOMENCLATURA

Letras Latinas

a_e	penetração de trabalho	[mm]
a_p	profundidade ou largura de usinagem	[mm]
D	diâmetro da serra circular	[mm]
f	avanço de corte	[mm.rev ⁻¹]
f_z	avanço por dente	[mm.rev ⁻¹]
F_c	força de corte	[N]
F_f	força de avanço	[N]
F_p	força passiva	[N]
F_u	força de usinagem	[N]
h_m	espessura de corte	[mm]
k_c	pressão específica de corte do material da peça	[N/mm ²]
k_d	constante de desgaste da ferramenta	[adimensional]
$k_{recalque}$	constante de recalque do material da peça	[adimensional]
k_v	constante do material da ferramenta	[adimensional]
L	comprimento da peça	[mm]
n	revolução por minuto	[rev.min ⁻¹]
p	passo da serra circular	[mm]
P_c	potência de corte	[W]
P_e	potência efetiva	[W]
P_f	potência de avanço	[W]
P_{mc}	potência do motor de corte	[W]
P_{mf}	potência do motor de avanço	[W]

t_h	tempo de corte	[s]
U_c	energia específica de corte	[GJ/m ³]
v_c	velocidade de corte	[m.min ⁻¹]
v_e	velocidade efetiva de corte	[m.min ⁻¹]
v_f	velocidade de avanço	[mm.min ⁻¹]
z	número de dentes da serra circular	[adimensional]
z_e	número de dentes em contato	[adimensional]

Letras Gregas

α_0	ângulo de folga	[graus]
β_0	ângulo de cunha	[graus]
ε_r	ângulo de ponta	[graus]
φ_s	ângulo de contato	[graus]
γ_0	ângulo de saída	[graus]
λ_s	ângulo de inclinação	[graus]
η_c	rendimento do motor de corte	[adimensional]
η_f	rendimento do motor de avanço	[adimensional]
χ_r	ângulo de posição	[graus]
χ'_r	ângulo de posição da aresta secundária	[graus]
ζ_s	ângulo de folga tangencial	[graus]

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
	1.1 Objetivos	2
	1.1.1 <i>Objetivos Específicos</i>	3
2	CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
	2.1 Operação de Serramento	4
	2.1.1 <i>Máquina de Serrar Alternativa</i>	4
	2.1.2 <i>Máquina de Serrar com Serra de Fita</i>	5
	2.1.3 <i>Máquina de Serrar com Serra Circular</i>	6
	2.2 Serra Circular	9
	2.2.1 <i>Serra Circular de Aço Rápido</i>	15
	2.2.2 <i>Serra Segmentada</i>	18
	2.2.3 <i>Serra Circular com Insertos de Metal Duro</i>	19
	2.2.4 <i>Serra Circular com Insertos de Cermet</i>	22
	2.2.5 <i>Serra de Fricção</i>	24
	2.3 Geometria das Serras Circulares	25
	2.3.1 <i>Ângulos do Dente</i>	25
	2.3.2 <i>Forma do Dente</i>	28
	2.3.3 <i>Geometria do Disco</i>	32
	2.4 Grandezas Físicas	34
	2.4.1 <i>Velocidade de Corte</i>	34
	2.4.2 <i>Velocidade de Avanço</i>	36
	2.4.3 <i>Profundidade de Usinagem</i>	37
	2.5 Fluido de Corte	38
	2.6 Força e Potência de Serramento	39
	2.6.1 <i>Força de Serramento</i>	39
	2.6.2 <i>Potência de Serramento</i>	41

Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009.

2.7	Desgaste da Serra Circular	43
2.8	Temperatura	46
2.9	Vibração	48
2.10	Qualidade de Superfícies Serradas	49
2.10.1	<i>Rebarbas</i>	50
2.10.2	<i>Rugosidade</i>	51
3	CAPÍTULO 3 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	53
3.1	Materiais	53
3.2	Equipamentos	54
3.3	Métodos	59
4	CAPÍTULO 4 –RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Forças de Corte	64
4.2	Rugosidade de Superfícies Serradas	77
4.3	Largura da Fenda	87
4.4	Otimização dos Parâmetros de Corte	91
4.5	Formação de Rebarbas	94
4.6	Desgaste das Serras	95
4.7	Formas dos Cavacos	103
5	CAPÍTULO 5 –CONCLUSÕES	105
6	CAPÍTULO 6 – PROPOSTA DE CONTINUIDADE	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICES	113

1. INTRODUÇÃO

Desde a Pré-História o homem vem desenvolvendo a tecnologia de corte, adequando sua utilização seja como armas com a finalidade de abater animais para a sua alimentação, ataque ou defesa frente aos seus oponentes, proteção pessoal contra seus predadores naturais ou como simples ferramentas. Esse desenvolvimento tem-se aprimorado ao longo dos séculos e das gerações. Pelo acompanhamento da evolução tecnológica observa-se que na época atual há um vasto leque de ferramentas para aplicações específicas dos materiais existentes, sejam para o uso pessoal (um simples canivete) ou industrial (moderníssimas máquinas de corte a laser), auxiliando a sociedade na execução de tarefas diárias com maior produtividade, exatidão, menor custo e esforço físico.

Frente a milhares de opções de ferramentas de corte atualmente em disponibilidade no mercado, este trabalho visa o aprofundamento do estudo sobre o corte interrompido, com ênfase no serramento com lâminas de serras circulares.

As lâminas de serras circulares são ferramentas amplamente utilizadas para corte de diversos tipos de materiais, desde madeiras até aços com elevada dureza, bitolas e perfis distintos. Os motivos que levam as empresas a utilizarem lâminas de serras circulares se devem ao fato da operação de serramento com as referidas lâminas proporcionarem cortes rápidos, precisos, com ótimo acabamento, conferindo aos processos industriais altíssima produtividade aliada a baixo custo. Embora as lâminas de serras circulares sejam largamente utilizadas, as informações existentes sobre a sua fabricação e princípio de funcionamento são escassas e há poucos trabalhos científicos publicados sobre o tema.

As serras circulares podem ser fabricadas com disco inteiriço de aço (serras de aço rápido e de fricção), com segmentos de aço rápido rebitados em sua periferia (serra segmentada), com insertos (metal duro ou cermet) brasados nos alojamentos de seus dentes ou ainda segmentos com ligas diamantadas brasados em sua periferia (serra diamantada).

No caso específico de grandes siderúrgicas que produzem aços das mais variadas ligas, durezas, bitolas e dimensões, ainda é comum a existência de equipamentos antigos, de tecnologia já ultrapassada e que utilizam lâminas de serras com segmentos de aço rápido. Este quadro está sendo alterado lentamente com a substituição dessas máquinas por tecnologia mais moderna na qual os equipamentos têm estrutura mais

estável, portanto, suportam elevadas velocidades de corte e avanços. Neste caso são usadas lâminas de serras dotadas de insertos de metal duro (carboneto de tungstênio), que são consideradas como tecnologia de ponta devido ao alto desempenho desta ferramenta tanto com relação à produtividade quanto ao custo final da tonelada cortada.

Outro material para os insertos que vem ganhando espaço no mercado é o cermet (carbonitreto de titânio). As serras com insertos de cermet representam uma tecnologia ainda em desenvolvimento, porém as experiências até então realizadas sugerem uma inovação tecnológica, podendo se configurar em um progresso que merece ser estudado em profundidade em função do seu desempenho frente às demais serras existentes.

As principais vantagens que o cermet apresenta em relação ao metal duro são maior resistência ao desgaste (por possuir dureza maior do que o metal duro), menor solubilidade no ferro a temperaturas elevadas e alta temperatura de oxidação. Por outro lado, as desvantagens são a baixa resistência ao choque térmico e baixa tenacidade.

A seguir serão informados os objetivos do presente trabalho. Nos próximos capítulos, a revisão bibliográfica apresentará a operação de serramento com a descrição dos tipos básicos de máquinas, serra circular (onde se apresenta um breve histórico desta ferramenta, seu funcionamento e condições para seleção), configuração da lâmina de serra, materiais para ferramenta, grandezas físicas, fluido de corte e parâmetros de operação (força e potência de corte, temperatura de serramento, desgaste da serra e acabamento da peça). O planejamento experimental indicará os materiais (lâminas de serra circulares com insertos e corpos de prova), equipamentos a serem utilizados para execução e medição das variáveis que se deseja estudar e os métodos de trabalho. Posteriormente resultados encontrados serão discutidos. Para finalizar serão apresentadas as principais conclusões obtidas, apresentação de uma proposta de continuidade de trabalho, referências bibliográficas e apêndices.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é identificar como os parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço por dente e material/geometria do inserto) afetam os parâmetros de saída (forças de corte, qualidade da peça, desgaste dos insertos e formas dos cavacos) durante o serramento do aço ABNT 1045 com serras circulares com insertos de metal duro e cermet. As análises serão fundamentadas em conceitos técnicos e estatísticos e também será feita a otimização dos parâmetros de entrada para cada serra

circular. Parâmetros referentes à qualidade de corte, desgaste dos insertos e cavacos gerados serão avaliados qualitativamente.

1.1.1 Objetivos Específicos

De maneira mais específica, pretende-se avaliar a influência dos seguintes parâmetros de entrada: velocidade de corte, avanço por dente, material e geometria do inserto sobre os valores das forças de avanço, radial e axial, rugosidade da superfície serrada (desvio aritmético médio, desvio médio quadrático, altura total do perfil e altura máxima de perfil) e largura da fenda. Também será analisada, de maneira qualitativa a formação de rebarbas, o desgaste dos insertos e a forma dos cavacos produzidos durante a operação de serramento para as três serras circulares.

No desenvolvimento do trabalho a análise de variância (ANOVA) será utilizada para avaliar a influência da velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) e sua interação sobre os parâmetros de força (F_x , F_y e F_z), rugosidade (R_a , R_q , R_t e R_z) e largura da fenda para cada serra circular. Em seguida, será realizada para cada parâmetro de saída a comparação entre as três serras circulares com o objetivo de verificar se existiam diferenças significativas entre valores. Para isto serão gerados os gráficos *box plot*, os quais permitem verificar a dispersão da amostra e valor médio do parâmetro de saída estudado para um intervalo de confiança de 95%.

Por meio da superfície de resposta será realizada a otimização dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por dente) para cada serra circular, com o objetivo de se obter os valores mínimos de força de avanço (F_x), força radial (F_y) e altura total do perfil (R_t).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido nos seguintes tópicos: operação de serramento com a descrição dos tipos básicos de máquinas, serra circular (onde se apresenta um breve histórico desta ferramenta, seu funcionamento e condições para seleção), geometria da serra, materiais para ferramenta, grandezas físicas, fluido de corte e parâmetros de operação com a descrição da força e potência de corte, temperatura de serramento, desgaste da serra e acabamento da peça.

2.1 Operação de Serramento

Uma das operações mais utilizadas no corte de materiais é o serramento, que na maioria das vezes é a primeira operação de fabricação, responsável por dividir a matéria prima (produzida na forma de chapas, tarugos, barras ou tubos) em peças menores que serão trabalhadas posteriormente.

O serramento é uma operação de usinagem na qual a ferramenta, com várias arestas de corte é, em geral, responsável pelos movimentos de corte e de avanço. Os tipos mais comuns de serramento para o corte de metais são aqueles realizados com serras alternativas, serras de fita ou com serras circulares.

Apesar dos três tipos de serra serem diferentes entre si em formato, todas executam o corte por meio de lâminas cujos dentes operam pelo mesmo princípio básico (DOYLE et al., 1962).

2.1.1 Máquina de Serrar Alternativa

Na máquina de serrar alternativa (também chamada de serra de arco), a lâmina é presa ao arco sob tração e a peça é fixa por meio de uma morsa. É comum a existência de um batente ajustável para posicionar a matéria prima sempre no mesmo comprimento.

O movimento de avanço é aplicado simultaneamente ao movimento de corte e aliviado no movimento de retorno, ou seja, a ferramenta corta somente em um sentido. No sentido de recuo, a lâmina será afastada da peça, o que ocorre para não danificar as arestas de corte da lâmina de serra (POLLACK, 1988).

É possível mudar a inclinação do suporte do arco para se obter cortes angulares. Além disso, a máquina desliga automaticamente após o término do corte. Máquinas de produção podem possuir comandos que alimentam as barras, medem e cortam

automaticamente uma série de peças partindo de uma ou mais barras. A Figura 2.1 mostra uma máquina de serrar alternativa.



Figura 2.1 – Serramento alternativo
Fonte: ZIMBARDI MÁQUINAS (2011)

2.1.2 Máquina de Serrar com Serra de Fita

Segundo a norma DIN 8589g de 1970, a máquina de serrar com serra de fita executa o corte com um movimento contínuo e geralmente reto dentro de uma faixa de rotação.

Na operação com serra de fita, a ferramenta é uma lâmina cujas extremidades são unidas por meio de brasagem. O comprimento médio varia de dois a nove metros (em serras maiores o comprimento pode chegar até vinte e dois metros). Ao contrário da serra de arco, neste tipo não há percurso improdutivo. A durabilidade das serras de fita é maior que as serras de arco uma vez que o número de dentes é mais elevado.

A serra de fita, ou fita dentada, pode ser adquirida em rolos e cortada no comprimento desejado. Segundo Pollack (1988), a serra de fita horizontal (Figura 2.2 a) é usada em operações de corte da seção transversal, ao passo que a serra de fita vertical (Figura 2.2 b) geralmente é utilizada para corte de contornos. A máquina de serrar pode possuir dispositivo para cortar, brasar, revenir e retificar a fita que pode se romper com relativa facilidade.



(a) (b)
Figura 2.2 – Máquina de serrar com fita: (a) horizontal e (b) vertical
Fonte: FRANHO (2011) e HEERMANN (2011)

Na máquina de fita vertical o avanço da peça contra a serra é feito por meio de esforço do operador. Já na máquina de fita horizontal, a peça é fixada em uma morsa e um sistema mecânico realiza o avanço da serra contra o material. Pode-se ainda executar operações de polimento através da substituição da fita dentada por uma fita abrasiva.

Por ter um perfil mais esbelto do que a serra circular, a serra de fita possui a vantagem de apresentar menor perda de material durante a operação, entretanto possui menor estabilidade durante a execução do corte.

2.1.3 Máquina de Serrar com Serra Circular

Segundo Koether & Rau (2008), a operação de corte com lâmina de serra circular é caracterizada por ser um processo contínuo, rápido e que fornece uma superfície de corte com pouca ou nenhuma rebarba, o que contribui para reduzir o número de operações subsequentes. Com isto, é utilizada em operações de separação de peças e semiacabamento, além do corte de sulcos e ranhuras.

A máquina de serrar circular consiste de um eixo responsável pelo movimento de rotação da ferramenta. Normalmente a lâmina de serra realiza o movimento de avanço e a peça é fixa à máquina. O avanço da serra pode ser realizado manualmente, por comandos hidráulico ou pneumático (Freire, 1976), porém nas máquinas modernas é

realizado por servomotores. A Figura 2.3 mostra a operação de serramento com lâmina de serra circular.



Figura 2.3 – Serramento circular

Fonte: RATTUNDE & CO GMBH (s.a.)

O desenvolvimento de componentes eletro-eletrônicos tais como o motor de alto rendimento, *encoder*, inversor de frequência, controlador lógico programável (CLP), comando numérico computadorizado (CNC), entre outros, levaram à evolução das máquinas operatrizes no sentido de otimizar sua operação. Máquinas ferramenta CNC podem ser definidas como sistemas de produção autoalimentados que podem ciclicamente realizar operações em circuito fechado utilizando um programa que além de definir todos os parâmetros necessários para a operação, também é capaz de emitir um protocolo de controle da qualidade. Apesar das características citadas, ainda são exigidos operadores para preparar a máquina. Bosetti & Bruschi (2010) afirmam que as máquinas de serrar atuais são mais rápidas, seguras, produtivas, precisas e mais integradas à dinâmica da fábrica.

De acordo com Machado et al. (2003), tradicionalmente as máquinas de serra automáticas para corte de tubos e barras metálicas usam um modo de velocidade de corte constante. A combinação de velocidade de corte constante com diferentes perfis de materiais a serem cortados expõe a lâmina de serra a forças variáveis, as quais variáveis contribuem para uma má qualidade de corte e um maior desgaste da ferramenta. Portanto, os parâmetros de corte são definidos para a condição de corte mais severa, ou seja, a maior dimensão do material a ser cortado.

Cimini & Castro (2011) instalaram um controlador lógico programável (CLP) Siemens S7-400-2DP em uma máquina de serrar com a finalidade de controlar o torque durante o corte do feixe com o objetivo de reduzir o tempo de corte. O feixe continha cinco tubos, de aço DIN X20Cr13 com diâmetro de 140,3 mm e parede de 7,72 mm. A lâmina de serra utilizada foi com insertos de metal duro e diâmetro de 1080 mm. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de avanço 3,78 mm/s e velocidade de corte era uma função da velocidade de avanço. O resultado obtido foi a redução média de 15% no tempo de corte sem que isso afetasse o custo da lâmina. Com isso, foi possível reduzir uma etapa do processo produtivo, gerando ganhos estimados em R\$ 1,3 milhão por ano.

Durante a operação de serramento é importante garantir que a lâmina de serra trabalhe com o mínimo de vibração possível para que o tempo de vida da ferramenta e a qualidade da peça produzida não sejam comprometidos. Normalmente, guias são instaladas próximas ao corpo da lâmina de serra para auxiliar na estabilidade durante o corte. Nas máquinas de serrar que cortam utilizando o sistema de serramento multi-ângulo (*sawing multi angle*) não é possível instalar tais guias porque a lâmina de serra é montada em um braço mecânico para permitir que a mesma seja colocada na posição desejada de corte. Para minimizar os efeitos da vibração neste sistema, normalmente são utilizadas lâminas de serra de pequenos diâmetros, ou seja entre 350 e 520 mm (HAGE SONDERMACHINENBAU GMBH & CO KG, s.a.). A Figura 2.4 mostra o detalhe da lâmina de serra montada no braço mecânico.

Para cada tipo de serra circular existe uma particularidade com relação à construção da máquina de serrar. Isto acontece em função das propriedades do material utilizado na confecção da serra, as dimensões e tipo do material a ser cortado e os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por dente).



Figura 2.4 – Detalhe da serra montada na máquina
Fonte: HAGE SONDERMACHINENBAU GMBH & CO KG (2011)

2.2 Serra Circular

Segundo Arshinov & Alekseevich (1979), as serras circulares podem ser comparadas a fresas que realizam o corte de canais estreitos, visto que são compostas de um disco com vários dentes em sua periferia.

As lâminas de serras circulares são ferramentas fabricadas dentro de tecnologia específica para o corte dos materiais que se pretende trabalhar. Em geral, todas as lâminas de serras são fabricadas em aços especiais com diâmetros compatíveis com o equipamento no qual serão montadas e possuem um furo central e alguns furos de arraste para sua fixação ao equipamento de corte.

Apesar das serras serem utilizadas desde a antiguidade, existe várias versões para o surgimento da lâmina de serra circular. Segundo Grimshaw (1880), embora se acredite que a serra circular tenha surgido na Holanda, seu aperfeiçoamento ocorreu na Inglaterra e nos Estados Unidos da América.

Na Inglaterra, em 1771 S. Miller obteve a patente de número 1152 para a máquina de serrar acionada por moinho de vento, porém ela não contempla a ferramenta (GRIMSHAW, 1880). Já nos Estados Unidos da América, em 1813 T. Babbitt desenvolveu a lâmina de serra circular, que é a versão mais próxima do que se utiliza hoje nas serrarias e indústrias. De acordo com Horthon (2009), a inspiração para este invento surgiu enquanto ela assistia seus irmãos a serrar madeira utilizando a lâmina de serra alternativa manual com grande comprimento, também conhecida como serra *two-*

man. Ela percebeu que metade do movimento da serra estava sendo desperdiçado. Para demonstrar a sua idéia, Babbitt criou um protótipo onde uma lâmina de serra foi montada em um eixo giratório. A primeira serra circular criada por ela está em Albany, Nova York (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Serra circular inventada por T. Babbitt
Fonte: TOOLS OF THE TRADE (2001)

As serras circulares para o corte de metais podem ser fabricadas com disco inteiro de aço (aço rápido, cromo-vanádio ou tungstênio-molibdênio), com segmentos de aço rápido rebitados na periferia do disco (serra segmentada), ou podem ter insertos de metal duro ou cermet brasados nos seus dentes. O disco das serras circulares segmentadas ou com insertos brasados é de aço carbono. A especificação dos materiais utilizados na fabricação de cada tipo de serra será detalhada posteriormente.

Apesar do aço rápido ser muito utilizado nos dias de hoje, as serras circulares segmentadas estão perdendo espaço para as serras com insertos de metal duro em grandes siderúrgicas. Entretanto, a aquisição da máquina de serrar que utilizam serras circulares com insertos de metal duro requer um alto investimento. Com isso, algumas siderúrgicas fizeram adaptações nas máquinas de serra que trabalham com lâminas circulares segmentadas para possibilitar sua utilização com insertos de metal duro.

Em seu trabalho, Cecconello (1996) relata uma alteração desta natureza a fim de possibilitar o uso de lâmina de metal duro em uma máquina com serra segmentada. Foram realizadas algumas modificações em uma máquina de serrar Ohler K400A, principalmente a substituição do motor com 4,3 kW de potência e 1140 rpm por outro com 7,36 kW de potência e 1730 rpm e da polia de transmissão, o que proporcionou o aumento da velocidade de corte na razão de 2,8. O sistema de refrigeração, que aplicava

emulsão na forma de jorro direcionado para o disco da lâmina de serra circular próxima a região de corte (com o objetivo de refrigerar a aresta de corte e o material) foi substituído por um sistema de mínima quantidade de fluido (MQF), no qual a névoa é direcionada para os dentes da serra circular que acabaram de realizar o corte, proporcionando assim a refrigeração da ferramenta com o intuito de aumentar sua vida. Também houve a inclusão de um dispositivo de limpeza de cavacos que consiste de duas escovas circulares de aço colocadas em contato com a lâmina e que giram solidárias a esta. As escovas removem os cavacos do espaço entre os dentes onde poderiam engripar e provocar a fratura do dente.

Por sua vez, as máquinas que trabalham com serras de metal duro e principalmente cermet precisam ter alta rigidez, pois os insertos têm tenacidade inferior ao aço rápido. Desta forma, estas ferramentas têm que trabalhar com o mínimo de vibração possível para não comprometer o rendimento da mesma.

As características principais de uma lâmina de serra são segundo Koether & Rau (2008): material da lâmina de serra, geometria dos dentes (ângulos, dimensões e forma dos dentes), número de dentes por unidade de comprimento (passo ou espaçamento) e dimensões.

Teoricamente, a lâmina de serra poderia ter apenas um único dente, entretanto, para se obter maior produtividade durante o corte, as lâminas são projetadas para trabalhar com o maior número possível de dentes, respeitando-se os limites técnicos do equipamento no qual a mesma será montada (potência e torque exigidos além de estabilidade estrutural do equipamento).

É importante lembrar que a resistência da lâmina de serra não pode ser superior à resistência do acionamento do equipamento, ou seja, em caso de esforços excessivos a lâmina de serra deve quebrar e não o equipamento.

Para analisar o funcionamento da serra pode-se considerar cada dente separadamente, como uma única aresta para remoção do cavaco. O volume de cavaco gerado durante a operação de serramento é proporcional ao caminho percorrido pelo dente. Em materiais maciços com grandes dimensões, o arco de contato é longo e com isso um volume considerável de cavacos é removido por cada dente (ARSHINOV & ALEKSEEVICH, 1979).

Comparando o volume de cavaco produzido pelo serramento com a operação de fresamento para a mesma finalidade, Doyle et al. (1962) observaram que o serramento executa o trabalho com maior economia de material, menor esforço e em menor tempo.

Sawar et al. (2010) compararam a espessura do cavaco formado pela operação de serramento com serra de fita com o torneamento, considerando os mesmos parâmetros de corte e do material da peça. Eles perceberam que a espessura do cavaco formado pelo serramento é menor que a do torneamento. Uma explicação para este resultado é o fato de vários dentes atuarem ao mesmo tempo durante o corte, dividindo assim o volume de cavaco a ser removido. Este fenômeno também ocorre nas lâminas de serra circulares.

Serras circulares são produzidas nos mais variados diâmetros. Cada tipo de serra apresenta diâmetro dentro de uma determinada faixa, mas todas são proporcionais à dimensão do material que será cortado. Normalmente o diâmetro da serra deve ser três vezes maior do que a largura do material a ser cortado, isto porque o diâmetro do flange que segura a ferramenta corresponde a um terço do diâmetro da serra e os outros dois terços são os que irão de fato cortar o material. Segundo Albuquerque (2010), a principal consequência de um flange menor do que o recomendado é a vibração e torção do disco, causando acabamento ruim no material e às vezes inutilizando a serra.

A distância entre dois dentes consecutivos, chamada de passo ou espaçamento, deve ser suficiente para acomodar os cavacos produzidos durante a operação, conforme mostrado na Figura 2.6.

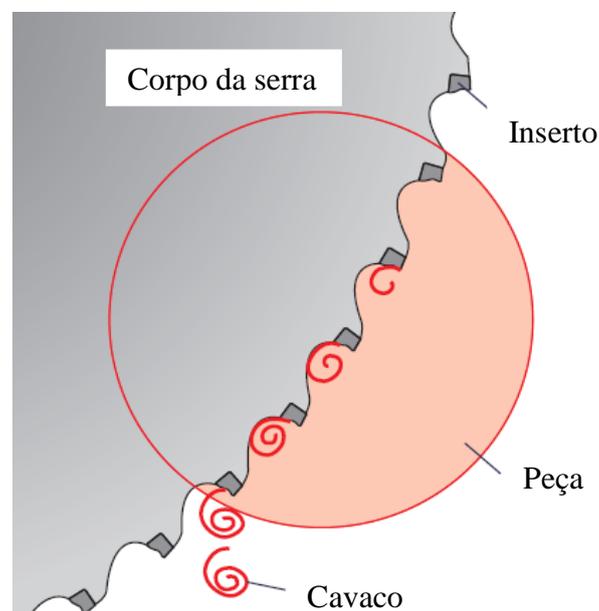


Figura 2.6 – Formação do cavaco durante o serramento com serra circular
Fonte: KANEFUSA (s.a.)

A forma e o tamanho dos cavacos retirados dependerão das propriedades do material a ser cortado e dos parâmetros de corte, entre outros. Com isso, o número de

dentos e a geometria do inserto devem ser determinados com base nas condições de trabalho da serra. A Tabela 2.1 apresenta recomendações de passo para o serramento de aços em geral.

Tabela 2.1: Passos de serras circulares

Espessura (mm)	Material Maciço				Tubos e Perfis		
	Até 6	de 6 a 20	de 20 a 50	maior 50	Até 3	de 3 a 6	maior 6
Passo (mm)	4	6	8	10 – 16	3 – 4	6	8

Fonte: TSCHÄTSCH e DIETRICH (2008)

Os cavacos provenientes da operação de serramento são em forma de arco, conforme ilustra a Figura 2.7 (a). Se os parâmetros de corte forem subdimensionados, ao invés da lâmina de serra circular dividir os cavacos, ela passa a atritar contra o material da peça formando assim os cavacos da Figura 2.7 (b). Esta situação é indesejável por propiciar o aumento da temperatura durante o serramento, ocasionando o aumento da quantidade de rebarba aderida na peça serrada além de diminuir a vida da ferramenta.

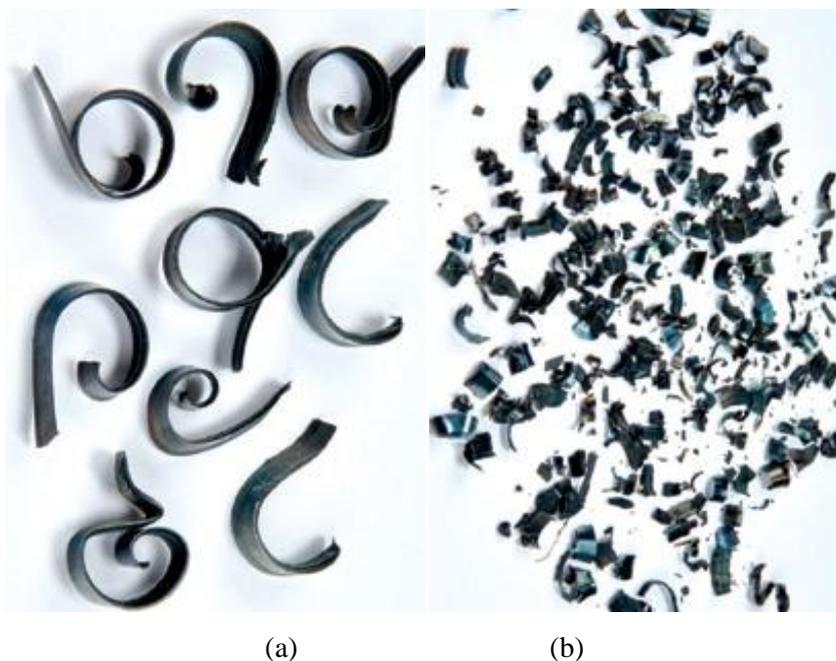


Figura 2.7 – Detalhes do cavaco do serramento (a) em forma de arco e (b) cavaco indesejado

Fonte: KAMPMANN DO BRASIL LTDA (s.a.)

Sawar et al (1997) afirmam que se não forem tomados os devidos cuidados no dimensionamento do passo e nos parâmetros de corte, o dente pode sofrer sobrecarga e com isso fraturar prematuramente.

Depois de se definir o diâmetro da lâmina de serra, dimensões e material da peça, o próximo passo é definir o número de dentes. Para se calcular o número de dentes (z) é utilizada a Equação 2.1:

$$z = \frac{D \cdot \pi}{p} \quad (2.1)$$

Onde D é o diâmetro da serra (mm) e p é o passo da serra (mm).

Outra característica importante é o ângulo de contato φ_s , que é o ângulo formado quando a serra está cortando a maior dimensão do material, conforme mostra a Figura 2.8. A definição deste ângulo é importante para o cálculo do número de dentes da serra.

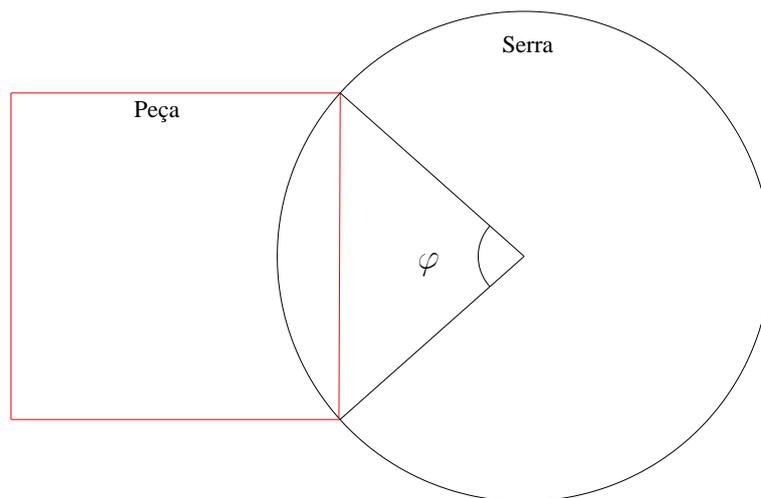


Figura 2.8 – Ângulo de contato

A quantidade de dentes em contato com o material (z_e) é determinada pela Equação 2.2:

$$z_e = \frac{\varphi_s \cdot z}{360} \quad (2.2)$$

Feres (2010) recomenda que ao selecionar a lâmina de serra circular ideal para uma determinada aplicação deve-se levar em consideração os seguintes fatores: material a ser cortado, dimensões e formato do material, frequência de corte, qualidade do acabamento.

2.2.1 Serra Circular de Aço Rápido

As ferramentas de aço rápido (*high speed steel* - HSS) são caracterizadas pela capacidade de usinar metais sob velocidades de corte muito maiores do que as permissíveis para os aços ao carbono ou de baixa e média liga, usuais à época de seu surgimento. Atualmente, ao contrário de seu nome, os aços rápidos são os materiais de ferramentas que utilizam as mais baixas velocidades de corte, significativamente inferiores aos materiais de ferramenta de última geração (MACHADO et al., 2009). Segundo Tillmann & Dültgen (2011), as serras circulares com corpo inteiriço de aço rápido pode trabalhar com velocidades de corte entre 45 e 180 m/min e velocidade de avanço entre 0,75 e 3 m/s para o corte de tubos de aço carbono.

Serras circulares de aço rápido possuem corpo inteiriço e normalmente são fabricadas em diâmetros que variam de 160 a 620 mm e a largura do disco entre 1 e 5 mm. São utilizadas em larga escala por empresas de pequeno porte ou em linhas de produção de tubos com costura. Devido ao seu baixo custo e à facilidade de afiação, dispensam afiadoras mais complexas. Segundo Kampmann (2010), para o corte de metais são utilizadas duas ligas de aço rápido: HSS-DMo5 e HSS-EC05.

Apesar de Ribeiro (2007) afirmar que as duas ligas de aço rápido possuem desempenho similar, em serras circulares eles são utilizados no corte de materiais com propriedades mecânicas distintas. O aço rápido HSS-DMo5 contém 5% de molibdênio e é padronizado pelas normas DIN 1.3343, AISI M2 e JIS SKHS1. A dureza deste material após tratamento térmico está entre 63 e 65 HRC e ele é adequado para o corte de aços carbono, aços ligas e não-ferrosos com resistência à tração entre 500 N/mm² e 800 N/mm². Já o aço rápido HSS-EC05 contém 5% de cobalto e é padronizado pelas normas DIN 1.3243, AISI M35 e JIS SKH55. Após tratamento térmico a dureza deste material 64 a 66 HRC e é indicado para o corte dos mesmos materiais com resistência a tração superior a 800 N/mm². A Tabela 2.2 mostra a composição química dos aços rápidos HSS-DMo5 e HSS-EC05.

Tabela 2.2: Composição química dos aços rápidos HSS-DMo5 e HSS-EC05

Elemento Químico	HSS-DMo5	HSS-EC05
Carbono	0,86 – 0,94%	0,88 – 0,96%
Silício	≤ 0,45%	≤ 0,45%
Manganês	≤ 0,40%	≤ 0,40%
Fósforo	≤ 0,03%	≤ 0,03%
Enxofre	≤ 0,03%	≤ 0,03%
Cromo	3,80 – 4,50%	3,80 – 4,50%
Molibdênio	4,70 – 5,20%	4,70 – 5,20%
Vanádio	1,70 – 2,00%	1,70 – 2,00%
Tungstênio	6,00 – 6,70%	6,00 – 6,70%
Cobalto	-	4,50 – 5,00%

Segundo Trent (1984), as propriedades que exercem maior influência sobre a capacidade de corte de ferramentas de aço rápido são dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. O aço rápido tem a capacidade de manter dureza elevada a altas temperaturas, normalmente superior a 58 HRC a 550°C e a 55 HRC a 600°C. A Figura 2.9 mostra a variação da dureza em relação a temperatura do aço rápido.

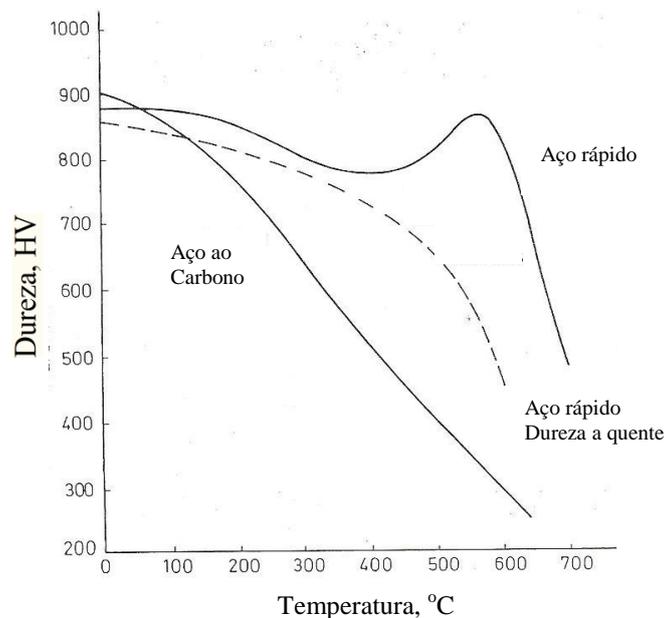


Figura 2.9 – Relação entre a variação da temperatura e a dureza do aço rápido
 Fonte: TRENT (1984)

A resistência ao desgaste por abrasão é determinada pelo tipo e quantidade de carbonetos duros que compõem o aço rápido. A tenacidade depende dos elementos de liga e do grau de dissolubilidade destes. Em geral os aços rápidos resistem ao desgaste por abrasão são pouco tenazes e vice-versa.

As serras circulares de aço rápido podem ser comercializadas com o revestimentos de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN). O processo utilizado para deposição de revestimento é por deposição física de vapor (PVD). Este processo é o mais indicado para este caso porque ocorre em temperaturas mais baixas em relação à deposição química de vapor (CVD). A vantagem é que após a deposição do revestimento do substrato não há a necessidade de se realizar um novo tratamento térmico. A Figura 2.10 apresenta uma serra com revestimento de TiAlN.



Figura 2.10 – Serra circular de aço rápido revestida com TiAlN
Fonte: KAMPAMNN DO BRASIL (s.a.)

Segundo Silva & Mei (2010), os revestimentos com composições à base de TiC (carboneto de titânio) e TiN (nitreto de titânio) demonstram excelente potencial para o aumento da resistência ao desgaste e à oxidação. A camada de revestimento possui elevado valor de dureza: cerca de 2000 HV para TiN, podendo chegar até 3200 HV por meio de modificação com alumínio. Outras características são: elevada ductilidade, redução sensível do caldeamento a frio (evita a formação de arestas postiças de corte), baixo coeficiente de atrito, inércia química, espessura de 1 a 4 μm e ótima aparência.

Sawar & Haider (2010) investigaram o fresamento de tiras de aço bimetálico (material utilizado na fabricação de serras de fita), cuja composição é o aço rápido M42

na borda soldado ao material de suporte aço D6A. As fresas utilizadas são inteiriças de aço rápido fabricadas pela metalurgia do pó com dureza de 900 HV. A primeira fresa teve a sua metade revestida por TiN e a outra metade sem revestimento. A segunda fresa teve a sua metade revestida por TiN e a outra metade revestida por TiAlN. As duas ferramentas realizaram 600 cortes e foram mantidos constantes os parâmetros de corte. Para primeira fresa a velocidade de corte foi 32 m/min, velocidade de avanço 63,5 mm/min e profundidade de corte 1,6018 mm. Já para a segunda fresa a velocidade de corte foi 32,85 m/min, velocidade de avanço 63,5 mm/min e profundidade de corte de 2,11 mm. Os resultados para a primeira fresa mostraram que a metade revestida com TiN teve um aumento da vida da ferramenta de até 30% em relação a metade não revestida. Já na segunda fresa foi percebido que a metade revestida com TiAlN apresentou melhora no tempo de vida em relação a metade revestida por TiN devido a maior dureza e resistência ao desgaste do TiAlN em relação ao TiN. A melhora de vida da ferramenta com os revestimentos foi associada à redução do desgaste de flanco nos dentes causadas pelos mecanismos abrasivo e adesivo. No entanto, o resultado variou de um dente para outro mostrando pouca ou nenhuma melhora em alguns casos.

2.2.2 Serra Segmentada

As serras segmentadas possuem diâmetro entre 315 e 1600 mm e largura do segmento entre 3,5 e 10,5 mm. São utilizadas para o corte de metais em geral, porém tratam-se de lâminas cuja tecnologia é muito antiga e que se encontram em fase de extinção devido ao elevado custo de produção aliado à baixíssima eficiência, larga espessura de corte e baixa produtividade.

De acordo com Klocke & König (2007), os parâmetros de corte para o serramento de aço ao carbono com serra circular segmentada são: velocidade de corte (v_c) entre 18 a 30 m/min e avanço por dente (f_z) entre 0,22 a 0,28 mm/rev. Em contrapartida, a serra circular com inserto de metal duro opera sob uma velocidade de corte entre 90 a 150 m/min e avanço por dente entre 0,12 a 0,18 mm/rev.

Os tipos de aço rápido utilizados nas serras segmentadas são os mesmos das serras circulares com o corpo inteiriço, porém como as serras segmentadas têm maior diâmetro e largura do disco e este material tem um custo elevado, ele é utilizado na forma de segmentos que são rebitados em um disco de aço carbono (SAE 6153, SAE 6158, 80CrV4, 75Cr1) temperado e revenido para uma dureza entre 43 e 45 HRC

(RULINSKAS & RULINSKAS, s.a.). As serras segmentadas são comercializadas sem revestimento ou com revestimento de TiCN, conforme mostrado na Figura 2.11.

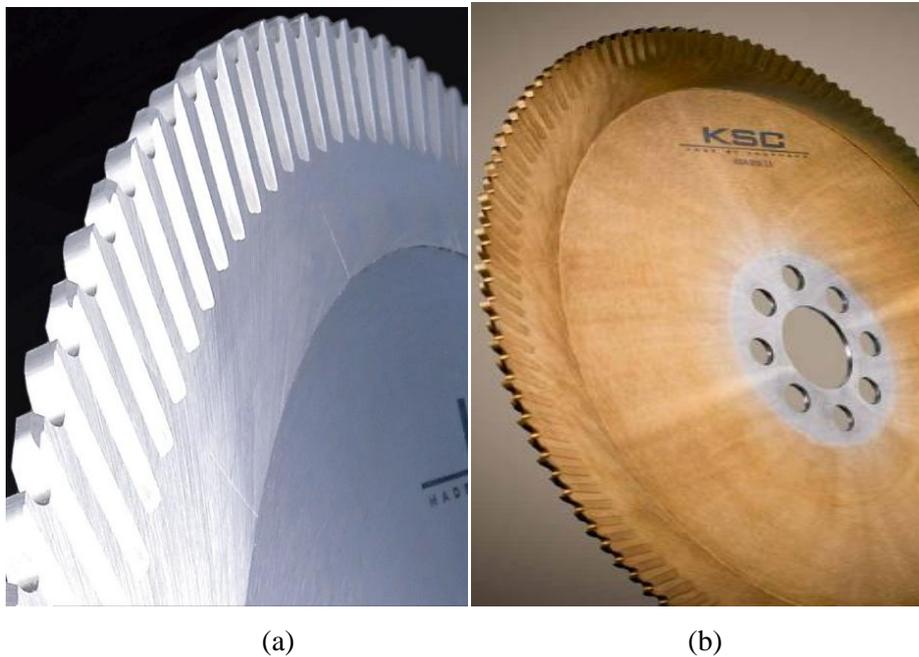


Figura 2.11 – Serra segmentada: (a) sem revestimento e (b) com revestimento de TiCN
Fonte: KAMPMANN GMBH (2010)

2.2.3 Serra Circular com Insertos de Metal Duro

Desde o seu advento por volta de 1920 na Alemanha, o metal duro tem sido desenvolvido com o intuito de melhorar suas propriedades de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. De acordo com Diniz et al. (2006), o metal duro é utilizado, na maioria das vezes, na forma de pastilhas fixas ao porta ferramenta por meio de brasagem ou mecanicamente (intercambiáveis). Existem lâminas de serras circulares com estes dois tipos de fixação, porém os insertos de metal duro brasados no corpo de aço são mais utilizados.

As lâminas de serras com insertos de metal duro são empregadas no corte de diversos tipos de materiais (desde madeiras até aços com alta dureza) em formato de barras, tarugos, perfis e tubos. Se comparadas com as lâminas de serra com segmentos de aço rápido, aquelas possuem maior rendimento de corte devido à alta velocidade de corte, vida mais longa e elevada eficiência devido à alta resistência ao desgaste do carboneto de tungstênio.

O inserto de metal duro, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, é composto por partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários,

sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência a compressão. As partículas duras são carboneto de tungstênio (WC) usualmente em combinação com outros carbonetos, tais como carboneto de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC). O metal aglomerante normalmente é o cobalto (Co). Como o metal duro é fabricado a partir da junção de vários componentes, é possível produzir ferramentas com diferentes valores de dureza à quente e tenacidade (ou resistência ao choque). Com isto, as ferramentas de metal duro são divididas em três principais grupos (SCHNEIDER, 1989):

- Classe P: compreende os metais duros com elevado teor de carboneto de titânio (TiC) e carboneto de tântalo (TaC), que conferem elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. As ferramentas desta classe são empregadas na usinagem de aços não ligados, aços de alta liga, aços fundidos e ferros maleáveis de cavacos longos. Formam grande área de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e desenvolvem temperaturas elevadas e acentuado desgaste de cratera.
- Classe M: neste grupo encontram-se os metais duros com propriedades intermediárias, destinados a ferramentas que tenham múltiplas aplicações. São empregados na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos, aços fundidos, aços-manganês, ferros fundidos e ferros fundidos maleáveis.
- Classe K: este grupo foi o primeiro a ser desenvolvido e é composto apenas por carboneto de tungstênio aglomerado por cobalto. Como este metal duro não é resistente ao desgaste de cratera, é aplicado na usinagem de ferro fundido cinzento e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e ainda materiais não-metálicos.

Segundo Ferraresi (1977), a dureza (tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas) e a resistência à ruptura transversal (utilizado para avaliar a tenacidade) são as propriedades fundamentais do metal duro quando aplicado a ferramenta de corte. Estas propriedades são influenciadas pelo teor de cobalto e o tamanho do grão do carboneto de tungstênio. A Figura 2.12 (a) mostra a variação da dureza e a Figura 2.12 (b) ilustra a variação da resistência à ruptura transversal em função do teor de cobalto e refino do grão de WC.

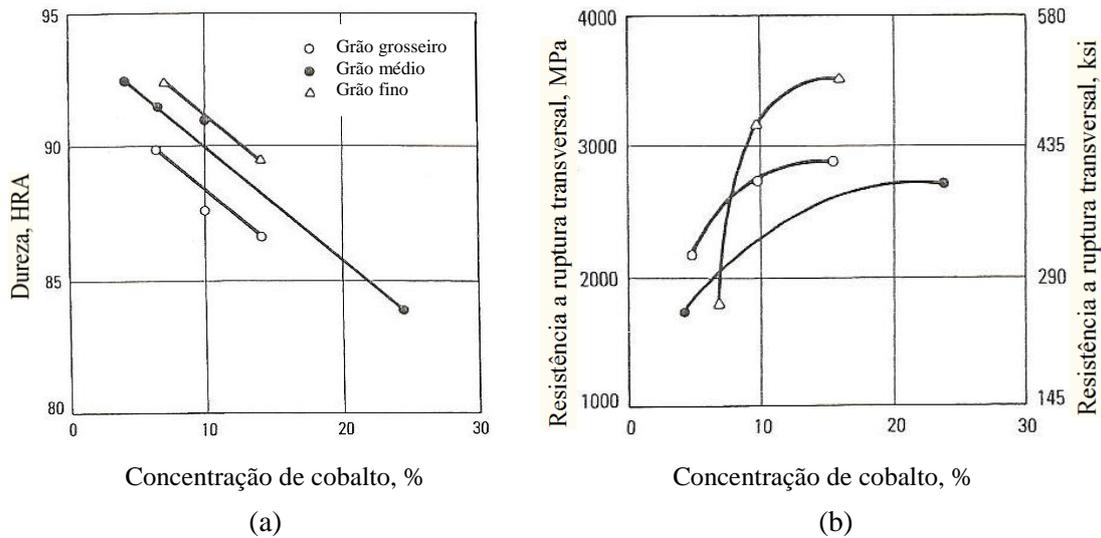


Figura 2.12 – Variação da (a) dureza e (b) resistência a ruptura transversal em relação à concentração de cobalto e refino do grão
 Fonte: SANTHANAM & TIERNEY (1989)

Santhanam & Tierney (1989) afirmam que o aumento do teor de cobalto implica em menor dureza, maior resistência à ruptura transversal, e, portanto, maior resistência ao impacto (ou tenacidade), menor módulo de elasticidade e, conseqüentemente, menor rigidez. Também foi observado que o refino do grão melhora a tenacidade em aproximadamente 50% e aumenta a dureza média, embora piore as propriedades térmicas.

As lâminas de serra com insertos de metal duro são fabricadas com diâmetros entre 160 e 2200 mm e pode ser comercializadas sem revestimento ou com os revestimentos TiN e TiAlN. A Figura 2.13 mostra o detalhe de uma serra circular com inserto de metal duro com revestimento (a) TiN e (b) TiAlN.

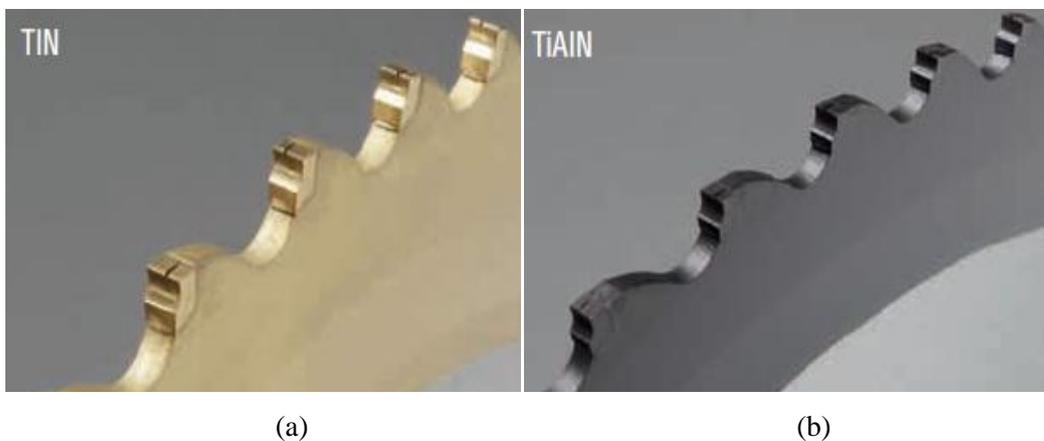


Figura 2.13 – Serra circular com insertos de metal duro e revestidas com: (a) TiN e (b) TiAlN
 Fonte: LENNARTZ (2008)

2.2.4 Serra Circular com Insertos de Cermet

Segundo Machado et al. (2009), dois fatores contribuíram para o surgimento do cermet: o primeiro foi a constatação que a adição de TiC aumenta a resistência ao desgaste, principalmente na superfície de saída do metal duro quando usinando aços e o segundo foi a escassez de tungstênio durante a Segunda Guerra Mundial, quando equipes de pesquisa concentraram esforços no desenvolvimento de um material similar ao metal duro.

As serras com insertos de cermet representam uma tecnologia ainda em desenvolvimento, porém os resultados encontrados até o momento sugerem uma inovação tecnológica, podendo se configurar em um progresso que merece ser estudado em profundidade em função do seu desempenho frente às demais serras existentes.

Como o metal duro, o cermet é utilizado, na maioria das vezes, na forma de pastilhas fixas no porta ferramenta por brasagem ou mecanicamente (intercambiáveis). Porém só existem lâminas de serras com os insertos fixos por brasagem no corpo de aço, onde mais uma vez o aço é o mesmo utilizado em serras circulares com insertos de metal duro.

O cermet é composto por TiC, TiN, e, geralmente, tem o níquel (Ni) como elemento de ligação. Pode conter também outros elementos, como alumínio (Al), cobalto (Co), molibdênio (Mo) ou compostos de outros carbetos (Mo_2C , TaC, NbC e WC) e nitretos (AlN e TaN) entre outros. Este material possui duas fases (cerâmica e metálica) em uma microestrutura heterogênea. A fase cerâmica é selecionada com materiais com alta dureza em temperaturas elevadas e resistência a oxidação. Já na fase metálica são utilizados elementos que oferecem resistência a choque mecânico, ductilidade e resistência ao choque térmico (SCHNEIDER, 1989).

Como os primeiros cermets eram muito frágeis, foram utilizados basicamente para operações de corte contínuo, como o torneamento. Porém, com a evolução deste material ao longo dos anos, o cermet passou a possuir bons níveis de tenacidade e resistência a impacto, elevada resistência ao desgaste da aresta de corte e alta resistência a craterização por possuir alta dureza a elevadas temperaturas e grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão (RIBEIRO, 2007). Esta evolução possibilitou a utilização deste material em operações de corte interrompido, como no caso do serramento. Normalmente as ferramentas de cermet são utilizadas sob alta velocidade de corte e baixo avanço. A Tabela 2.3 mostra as principais propriedades físicas do cermet em comparação com o metal duro.

De acordo com a Tabela 2.3, as principais vantagens do cermet são maior resistência ao desgaste devido à dureza superior (isto deve ao fato do TiC ter maior dureza em relação ao WC, possibilitando sua utilização sob velocidades de corte mais altas), menor solubilidade no ferro a temperaturas elevadas (o que inibe a dissolução do TiC reduzindo o desgaste por difusão) e alta temperatura de oxidação. As desvantagens do cermet são a baixa resistência a choque térmico (proporcionada pela baixa condutividade térmica associada ao alto coeficiente de dilatação), grande afinidade química do titânio com a maioria dos materiais (restringindo o uso da ferramenta à usinagem de materiais ferrosos) e baixa tenacidade (utilização de baixos avanços). Como ainda não existe uma norma para classificação dos insertos de cermet utilizados em serras circulares, os fabricantes de serras circulares não informam maiores detalhes sobre o inserto utilizado.

Tabela 2.3: Comparação das propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC)

Propriedades Físicas	Cermet	Metal Duro
Dureza (HV)	3200	2100
Energia livre de formação (kcal/g - atm 1000° C)	-35	-10
Solubilidade no ferro (wt% a 1250° C)	0,5	7
Temperatura de oxidação (°C)	1100	700
Condutividade térmica (cal/cm s °C)	0,052	0,42
Coeficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	7,2	5,2
Coeficiente de choque térmico*	1,9	27,1

$$* \text{ Coeficiente de choque térmico} = \frac{\text{condutividade térmica} \times \text{resistência à tração}}{\text{coeficiente de dilatação} \times \text{módulo de elasticidade}}$$

Fonte: MACHADO et al. (2009)

As lâminas de serra com insertos de cermet são fabricadas com diâmetros entre 250 a 460 mm. Este tipo de lâmina de serra é adequado para o corte de aços que possuam resistência mecânica entre 400 a 1200 N/mm². A Figura 2.14 mostra o detalhe de uma serra circular com inserto de cermet.



Figura 2.14 – Serra circular com insertos de cermet
Fonte: KAMPMANN GMBH (2010)

2.2.4 Serra de Fricção

Este tipo de lâmina de serra é produzido empregando uma tecnologia totalmente diferente das serras descritas anteriormente. O calor causado pelo atrito amolece o metal da peça, que é eliminado da região de corte. Apenas uma pequena parte do disco se mantém em contato com o material a cada instante. O restante da superfície é resfriado com emulsão ou jato de água abundante antes de entrar no corte novamente (DOYLE et al., 1962).

O corpo das serras circulares de fricção para corte tanto a quente quanto a frio pode ser composto dos seguintes aços: cromo – vanádio (DIN 1.2235) e tungstênio – molibdênio (DIN 1.2604). Estes materiais recebem tratamento térmico para que sua dureza varie de 48 a 58 HRC.

A serra de fricção a quente é utilizada para o corte de produtos laminados (barras, perfis, entre outros). Nesta operação o calor remanescente do processo de laminação é aproveitado, facilitando a remoção do material na região de corte e proporcionando um corte economicamente mais viável. Normalmente esse tipo de serra é utilizado durante o processo de laminação nas usinas siderúrgicas.

A serra de fricção a frio é utilizada para o corte dos mesmos produtos indicados anteriormente, porém sua execução geralmente ocorre em laminações onde não é possível o corte a quente, obrigando as empresas a recorrerem a este processo fora da linha de produção. Esta lâmina é dotada de dentes afiados com geometria trapezoidal e

pontas retas, de forma que o atrito entre o dente e a superfície a ser cortada provoque a elevação da temperatura do material a ser cortado para valores superiores a 250°C. A Figura 2.15 mostra o detalhe dos dentes de uma serra de fricção a frio.



Figura 2.15 – Serra circular de fricção a frio
Fonte: KAMPMANN GMBH (2010)

2.3 Geometria das Serras Circulares

Neste item serão mostrados os principais atributos dos dentes (como ângulos e forma de remoção do cavaco) e dos corpos de serra circular mais comumente utilizados no corte de metais.

2.3.1 Ângulos do Dente

A descrição dos ângulos segue a Norma Brasileira NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante, Terminologia (ABNT, 1980). Os ângulos são agrupados de acordo com o plano no qual estão localizados (MACHADO et al., 2009).

A Figura 2.16 mostra a vista sobre o plano de referência onde podem ser visualizados os ângulos de posição principal (χ_r), de posição secundário (χ_r') e de ponta da ferramenta (ϵ_r). O ângulo de posição principal é formado pelo plano de corte da ferramenta (P_s) e pelo plano de trabalho (P_f). O ângulo de posição secundário da ferramenta é formado pelo plano de corte secundário (P_s') e pelo plano de trabalho (P_f).

O ângulo de ponta da ferramenta é formado pelo plano de corte principal (P_s) e secundário (P'_s). Os ângulos desta vista são suplementares.

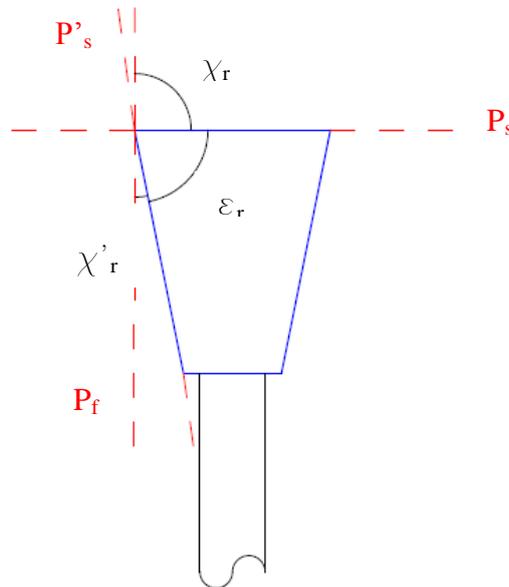


Figura 2.16 – Vista sobre o plano de referência

A Figura 2.17 mostra a vista sobre o plano de corte, onde se vê o ângulo de inclinação (λ_s). O ângulo de inclinação da ferramenta é medido entre a aresta de corte principal (S_γ) e o plano de referência da ferramenta (P_r). No caso específico de serras circulares, considera-se ainda o ângulo de folga tangencial (ζ_s), que recebe este nome por ser tangente ao diâmetro da serra, medido entre o plano ortogonal (P_o) e a superfície de folga secundária (A'_α). Embora não esteja previsto na norma NBR 6163 (1980), este ângulo é muito importante para a serra circular com insertos brasados por evitar o contato das arestas secundárias com a peça.

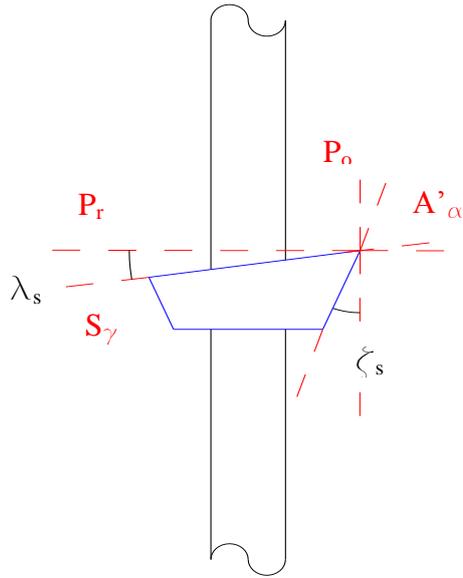


Figura 2.17 – Vista sobre o plano de corte

Finalmente, a Figura 2.18 mostra a vista sobre o plano ortogonal, que contém os ângulos de folga (α_o), de cunha (β_o) e de saída da ferramenta (γ_o). O ângulo de folga da ferramenta está situado entre a superfície de folga principal (A_α) e o plano de corte da ferramenta (P_s). O ângulo de cunha da ferramenta é formado pelas superfícies de saída (A_γ) e de folga (A_α). Por fim, o ângulo de saída se localiza entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência da ferramenta (P_r).

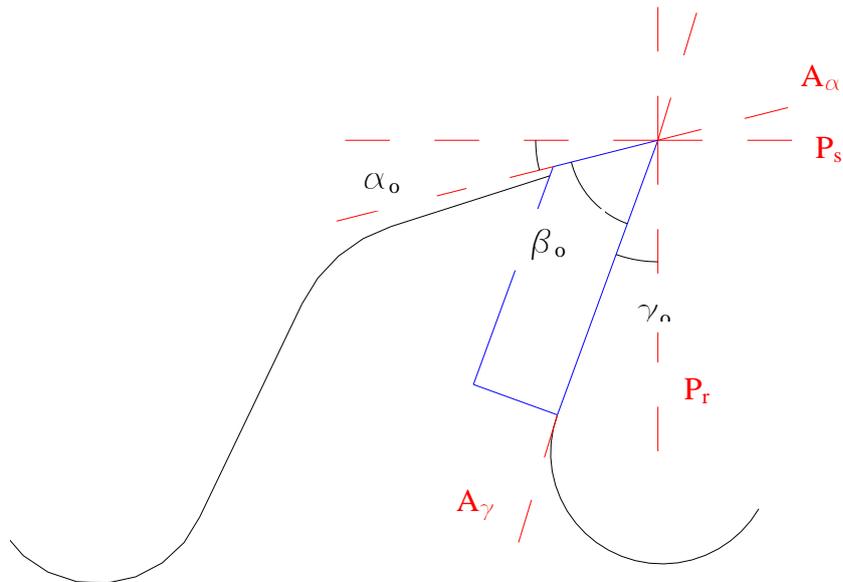


Figura 2.18 – Vista sobre o plano ortogonal

As serras circulares com insertos brasados também podem possuir quebra-cavacos na sua superfície de saída, cuja finalidade é provocar a fratura periódica do cavaco e facilitar sua formação e o escoamento. A Figura 2.19 mostra a diferença do corte com inserto sem quebra cavaco e com quebra cavaco. Normalmente, os quebra cavacos em serras circulares são afiados juntamente com o inserto.

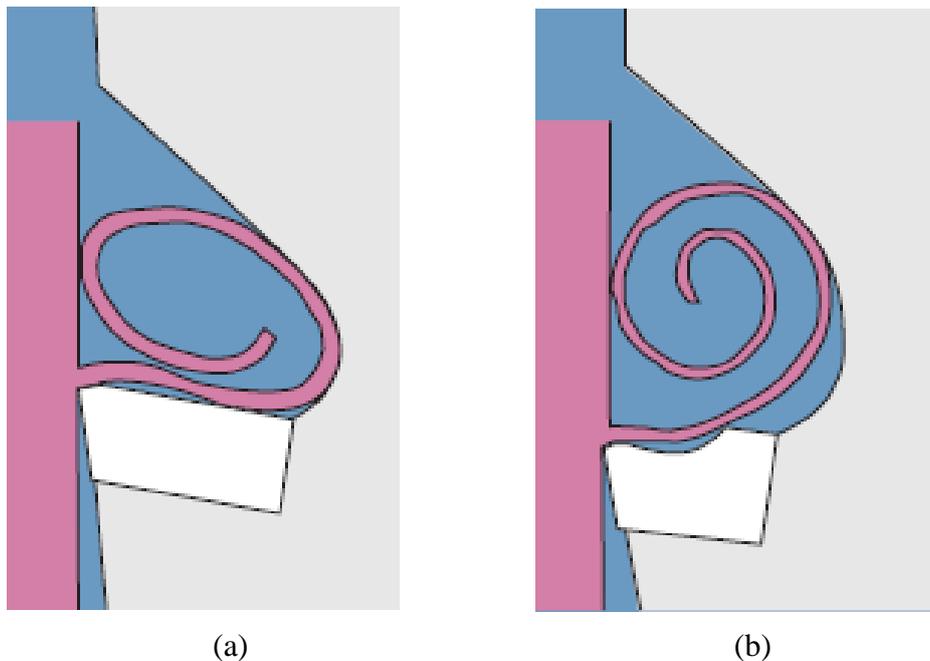


Figura 2.19 – (a) Corte sem quebra cavaco e (b) e com quebra cavaco
Fonte: KANEFUSA (s.a.)

2.3.2 Forma do Dente

As lâminas de serra circulares são padronizadas segundo normas DIN 1837 e DIN 1838 para as serras de disco inteiro com diâmetros até 315 mm e para serras de disco não inteiro com diâmetro entre 315 a 1600 mm pelas normas DIN 1840 e DIN 8576. Apesar destas normas serem desenvolvidas para serras circulares com corpo inteiro de aço rápido e para serras segmentadas, elas podem ser estendidas às serras com inserto de metal duro e cermet.

Como as lâminas de serra circulares têm o disco mais espesso que as lâminas de serra de fita, é muito difícil o travamento dos dentes. A forma do dente substitui a função do travamento de quebrar periodicamente do cavaco. Segundo Klocke & König (2007), para garantir o efeito de corte da serra é necessária a quebra dos cavacos para que estes fiquem mais estreitos do que a largura do corte e para que não se acumulem na bolsa do dente.

A Figura 2.20(a) ilustra a forma dos dentes denominada “C”, onde se observa que há dois tipos de dentes: pré-cortador e cortador. A quebra do cavaco será obtida por meio da diferença de altura entre os dois tipos de dente, ou seja, o dente pré-cortador é chanfrado e mais alto em relação ao cortador, vide Figura 2.20(b). Por ser mais alto o dente pré-cortador é mais estreito, possuindo assim uma aresta de corte menor do que a espessura de corte. Esta geometria é utilizada para o serramento de materiais maciços e duros.

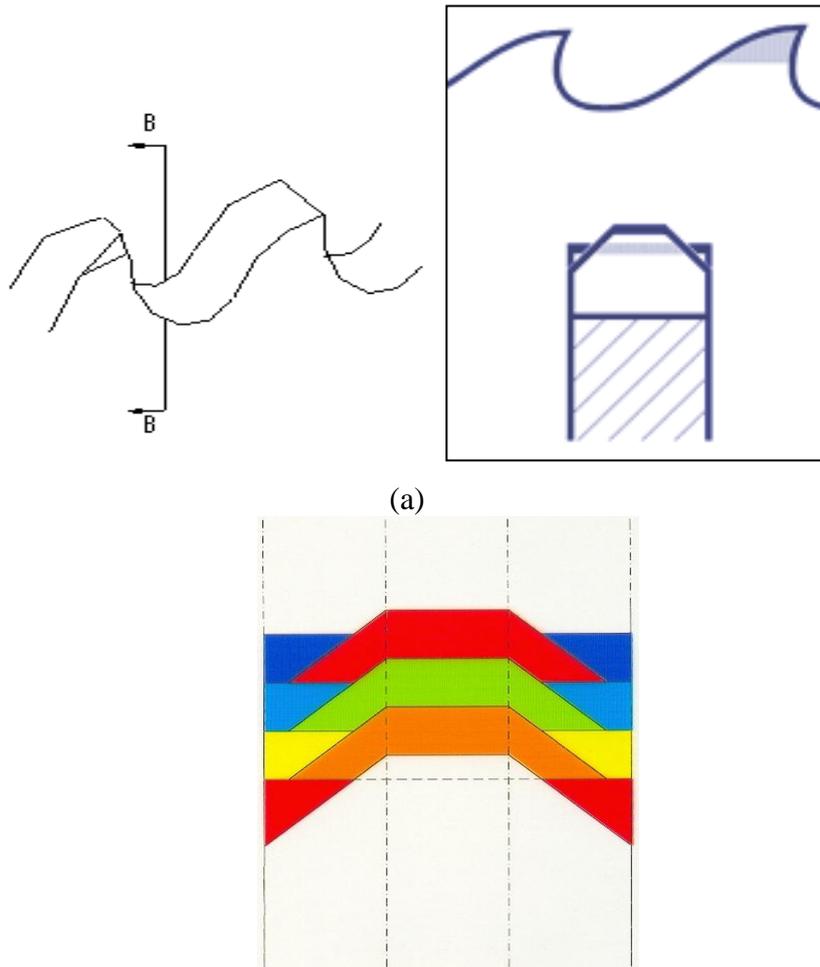


Figura 2.20 – (a) Forma do dente pré-cortador e cortador e (b) quebra do cavaco
 Fonte: KAMPMANN DO BRASIL LTDA (s.a.)

Outra forma do dente é denominada “B”, conforme mostra a Figura 2.21(a). Neste caso todos os dentes têm a mesma geometria e o que muda é a posição dos sulcos abertos na aresta de corte. Esta configuração propicia a geração de dois cavacos (um mais estreito e outro mais espesso), que são guiados para a região do sulco e assim não aderem à fenda de corte, vide Figura 2.21(b). De acordo com Klocke & König (2007), apesar do dente remover um volume maior de material na região do sulco anterior, isso

tem efeito desprezível em relação ao desgaste do dente. A vantagem consiste no fato de um único dente com sulco alternado conseguir remover o mesmo volume de material que os dentes pré-cortador e cortado juntos. Porém este fato acarreta a desvantagem de ser necessária maior força para realizar o corte. Esta geometria é aplicada para materiais duros e nas configurações maciça, perfil e tubular. Com a evolução das máquinas e a utilização de motores mais potentes, este tipo de formato vem sendo utilizado em larga escala.

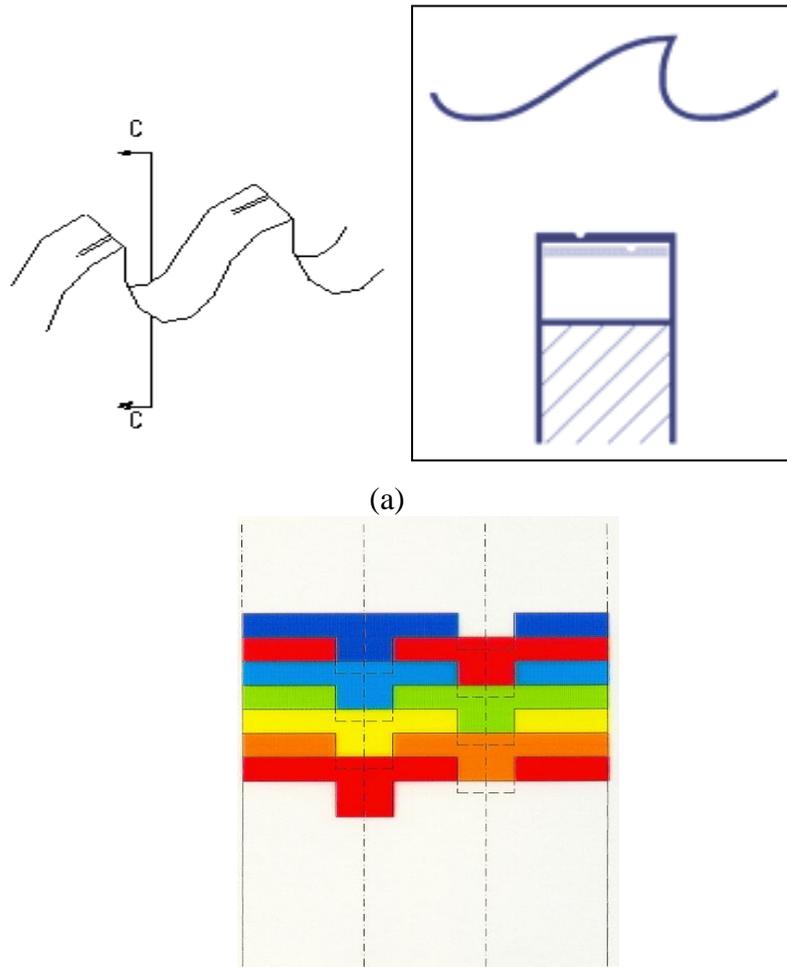


Figura 2.21 – (a) Forma do dente sulco alternado e (b) quebra do cavaco
 Fonte: KAMPMANN DO BRASIL LTDA (s.a.)

A Figura 2.22(a) mostra a forma do dente “BW”. Aqui todos os dentes têm a mesma geometria e o que muda é a posição dos chanfros. Este tipo de afiação geralmente é utilizada para o corte de madeira e metais com baixa dureza.

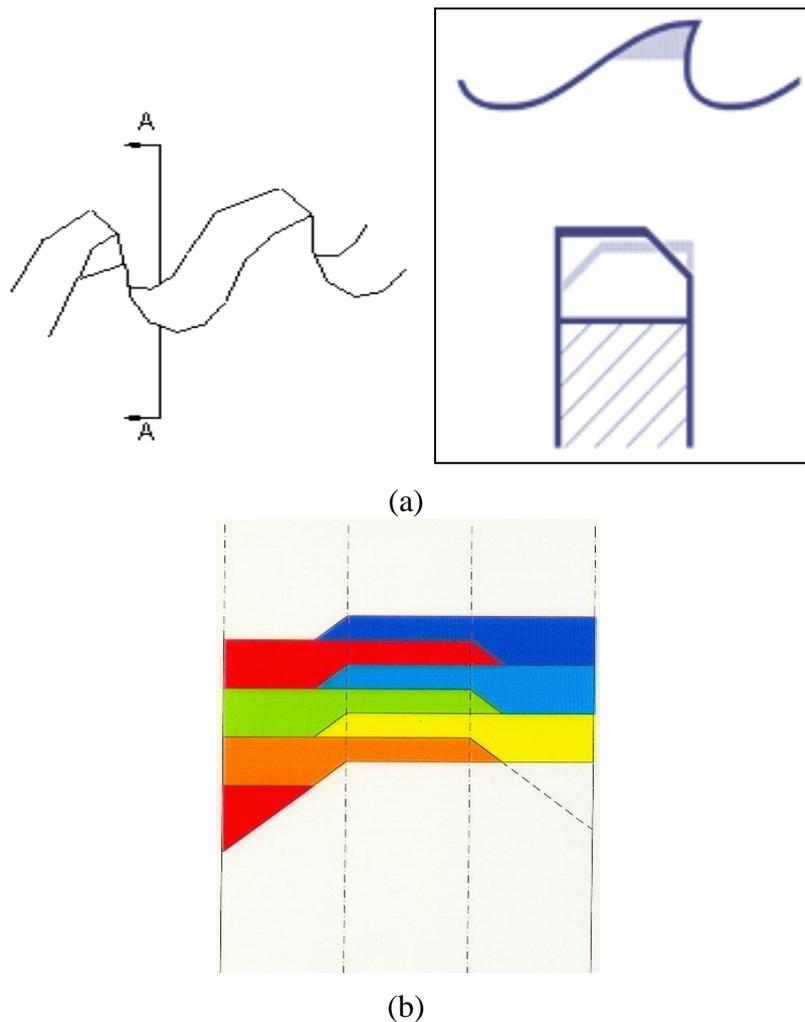


Figura 2.22 – (a) Forma do dente chanfro alternado e (b) quebra do cavaco
 Fonte: KAMPMANN DO BRASIL LTDA (s.a.)

Também é necessário definir a classe da serra circular quanto ao material que será cortado: GG para aços de construção mecânica, N para metais não ferrosos, H para materiais duros e finalmente W para materiais macios. A Tabela 2.4 apresenta a faixa de ângulos de saída recomendadas para cada classe de material.

Tabela 2.4 – Faixas de ângulos de saída indicados para cada classe

Forma do dente	Ângulo de saída (γ_o)					
	N		H		W	
	De	Até	De	Até	De	Até
Dente angular C	13°	17°	6°	10°	23°	27°
Dente curvo B	13°	17°	6°	10°	23°	27°
Dente curvo BW	3°	7°	-2°	2°	8°	12°

Fonte: TSCHÄTSCH & DIETRICH (2008)

No caso das lâminas de serras de fricção, cujo mecanismo de remoção do cavaco é muito diferente das serras de aço rápido e com insertos brasados, existem três geometrias para o corte de metais: dente em V, bico de papagaio e dente em V com chanfro. A Figura 2.23(a) mostra a geometria do dente em V, utilizada para o corte a quente de tarugos, tubos e aços e ligas a temperatura superior a 600° C. A Figura 2.23(b) mostra a geometria bico de papagaio, utilizada para o corte a frio de aço ao carbono a temperatura abaixo de 100° C. A Figura 2.23(c) mostra a geometria do dente em V com chanfro, utilizada para o corte a quente de tarugos, tubos e ligas de aço a temperatura superior a 800° C (KAMPMANN, 2010).

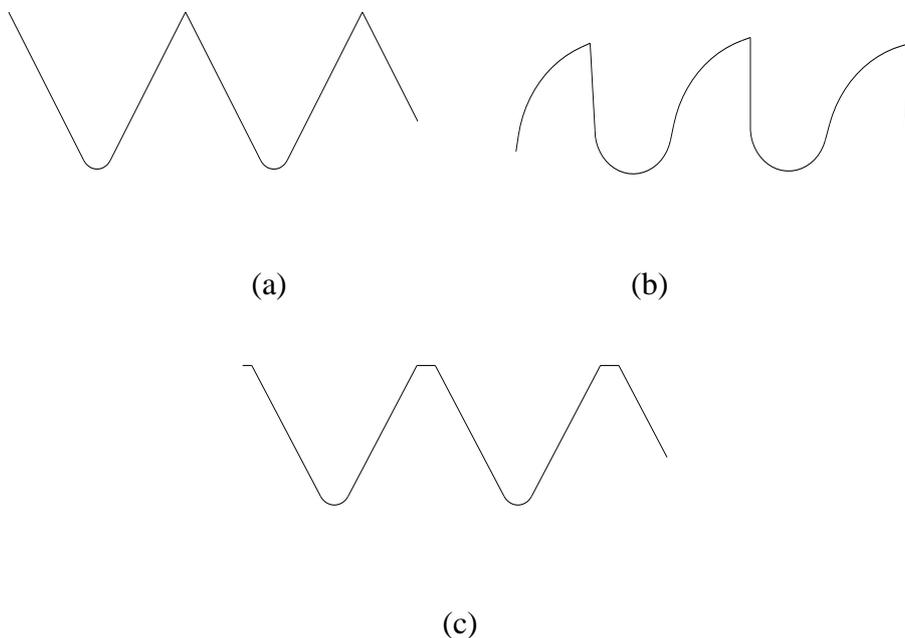


Figura 2.23 – Formas do Dente (a) em V, (b) Bico de Papagaio e (c) em V com Chanfro

2.3.3 Geometria do Disco

Tão importante quanto a definição da geometria dos dentes da serra é a definição da geometria do disco, que também tem suas dimensões padronizadas para as serras com diâmetros até 315 mm pelas normas DIN 1837 e DIN 1838 e para serras com diâmetro entre 315 a 1600 mm pelas normas DIN 1840 e DIN 8576.

Os principais elementos do disco de serra são mostrados na Figura 2.24. O diâmetro externo depende das dimensões da peça e da máquina de serrar e do furo central onde se fixa a lâmina de serra ao eixo do motor. Este furo deve ser produzido com tolerância H7. As serras também podem possuir furos de arraste que fixam a serra

ao flange, garantindo a estabilidade da ferramenta, além de furos de suspensão para que serras com diâmetros acima de 1000 mm sejam movimentadas dentro da fábrica.

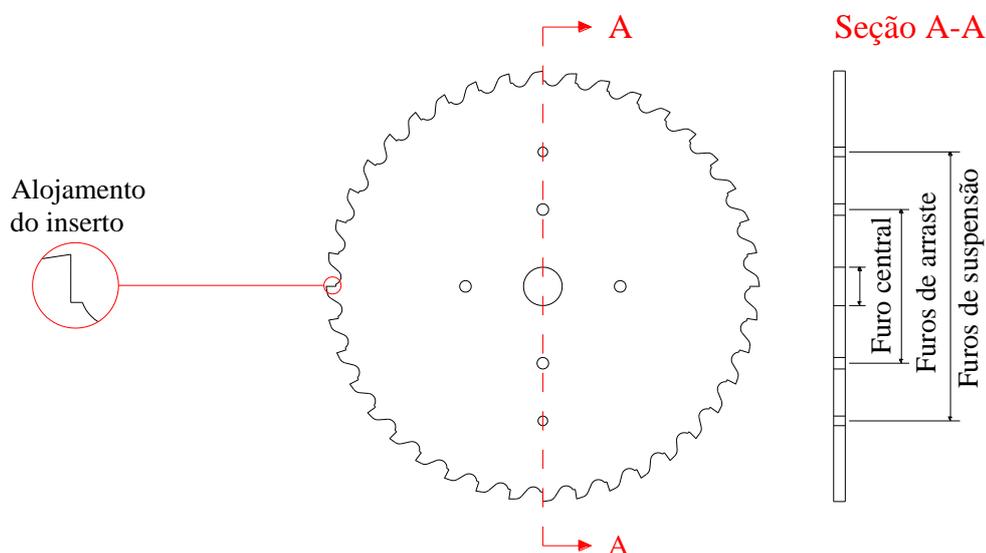


Figura 2.24 – Partes principais de uma lâmina de serra circular

Outro atributo importante da serra circular é a sua espessura. Existem duas espessuras no disco da serra: a espessura do inserto e a espessura do disco. Isso é necessário para que haja uma folga entre as laterais do corpo da lâmina de serra e a peça, reduzindo assim o atrito (ARSHINOV & ALEKSEEVICH, 1979). Apesar das serras circulares de corpo inteiriço apresentarem em sua descrição apenas a espessura de corte, durante o processo de fabricação as laterais são retificadas de maneira que o núcleo da serra tenha espessura menor que a sua periferia. As dimensões do furo central, largura do inserto e do disco são padronizadas pela norma DIN 8576 (vide Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Dimensões das serras circulares

Diâmetro externo (mm)	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Diâmetro do furo central (mm)	32	40	50	50	80	80	100	100	100
Largura do inserto (mm)	4,0	4,5	5,0	5,6	6,3	7,0	8,0	9,0	12,6
Largura do disco (mm)	3,0	3,5	3,8	3,8	4,5	5,0	6,0	7,0	10,5

Fonte: TSCHÄTSCH & DIETRICH (2008)

Para o corte de materiais como madeira e metais não ferrosos, nos quais o serramento é realizado sob altas velocidades de corte tendo como consequência o aumento da temperatura, fendas podem ser geradas no corpo da serra para que seja possível o alívio de tensão do disco durante o corte. A fenda pode ser de duas formas: externa e interna, conforme ilustra a Figura 2.25.

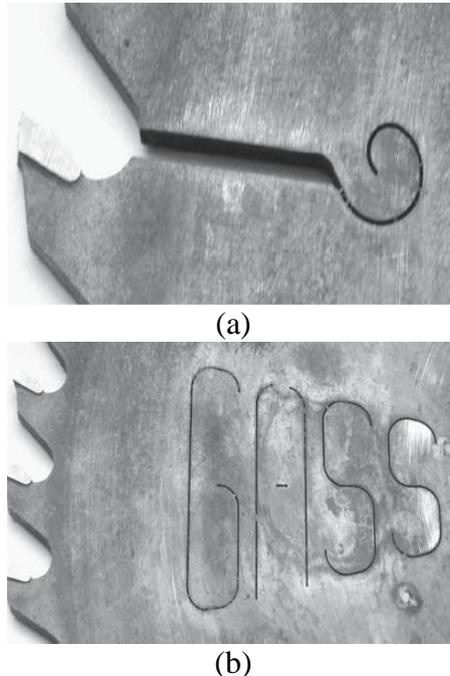


Figura 2.25 – Detalhe das fendas de alívio para compensar dilatação: (a) externa e (b) interna

Fonte: ORLOWSKI et al. (2007)

Segundo Orłowski et al. (2007), se a fenda for muito grande ela pode causar a diminuição da rigidez da lâmina de serra. Beljo - Lucic & Gloglia (2001) observam que o ruído emitido durante a operação de serramento diminui com a presença das fendas no corpo da serra porque estas absorvem vibrações autoinduzidas.

Duas propriedades muito importantes do disco são o seu empeno e tensionamento. Stakhiev (2004) relata que quando a serra apresenta valores adequados de empeno e tensionamento é possível utilizar velocidades de corte e avanços mais altos, além de disco de menor espessura. Só é possível atingir a velocidade de rotação ideal com a serra circular tensionada, pois neste caso a ferramenta tem maior rigidez.

2.4 Grandezas Físicas

Os conceitos relacionados às grandezas físicas envolvidas no processo de usinagem são normalizados pela NBR 6162 - Movimentos e Relações Geométricas na

Usinagem de Metais: Terminologia (ABNT, 1989) e serão brevemente descritos a seguir.

2.4.1 Velocidade de Corte

A velocidade de corte (v_c) é definida como sendo a velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido de corte. Ela é calculada pela Equação 2.3.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.3)$$

Onde D é o diâmetro da ferramenta (mm) e n é a rotação da ferramenta. Nota-se, portanto, que para manter valor de velocidade de corte constante, quando se aumenta o valor do diâmetro da ferramenta, a rotação da serra diminui na mesma proporção. Isto é muito importante para serras circulares, pois deve-se manter a velocidade de corte apropriada para o processo, material e ferramenta selecionadas.

Normalmente a velocidade de corte é selecionada a partir do material da ferramenta, operação a ser realizada, material da peça, condição de refrigeração e condição do equipamento. Os fabricantes de ferramentas recomendam a faixa de velocidade para o serramento de cada material. A Figura 2.26 compara as faixas de velocidade de corte recomendadas por dois fabricantes para serrar barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45% C) utilizando serras de cermet e metal duro.

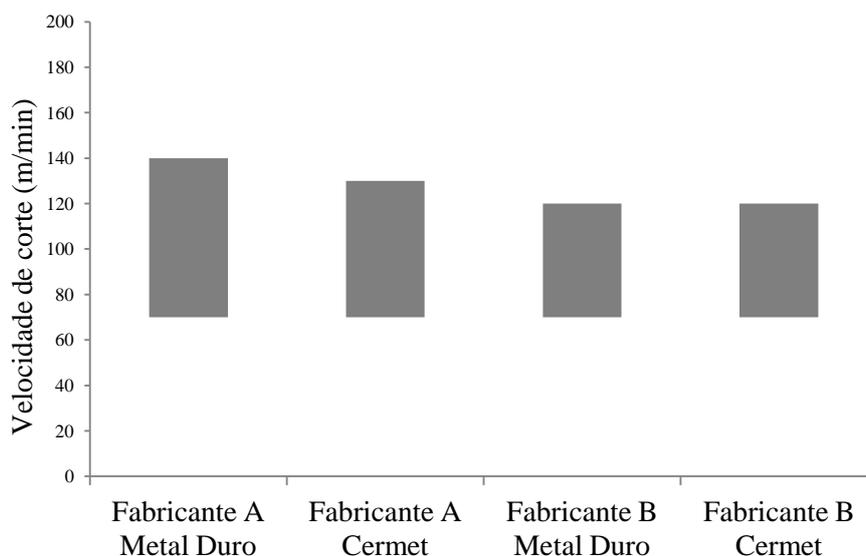


Figura 2.26 – Gráfico comparativo da velocidade de corte (m/min) entre fabricantes para serrar barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45% C)
Fonte: KAMPMANN GMBH (2010) e KANEFUSA (s.a.)

A velocidade de corte está diretamente relacionada à vida da ferramenta e sua capacidade produtiva. Quando se aumenta a velocidade de corte, aumenta-se a temperatura durante a operação de usinagem, diminuindo assim a resistência ao desgaste da ferramenta.

2.4.2 Velocidade de Avanço

A velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É calculada de acordo com Equação 2.4. Onde f é o avanço por revolução (mm/rev).

$$v_f = f \cdot n \quad (2.4)$$

Como as lâminas de serras circulares possuem mais de um dente, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta (correspondente à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem), conforme a Equação 2.5.

$$f = f_z \cdot z \quad (2.5)$$

Com o aumento do avanço, eleva-se a força de usinagem. Este parâmetro tem ligação com o acabamento (quando diminui o avanço, reduz a rugosidade da peça, gerando um melhor acabamento) e com a taxa de remoção (quanto maior o avanço maior a taxa de remoção). A velocidade de avanço também influencia o tempo de corte (t_h), como mostra a Equação 2.6.

$$t_h = \frac{L}{60 \cdot v_f} \quad (2.6)$$

De forma análoga à velocidade de corte, os fabricantes de ferramentas recomendam uma faixa de avanço para cada material. Em particular, para serras circulares são indicados os valores de avanço por dente. A Figura 2.27 compara a faixa de avanço por dente recomendadas por fabricantes para serrar barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45% C) utilizando serras de cermet e metal duro.

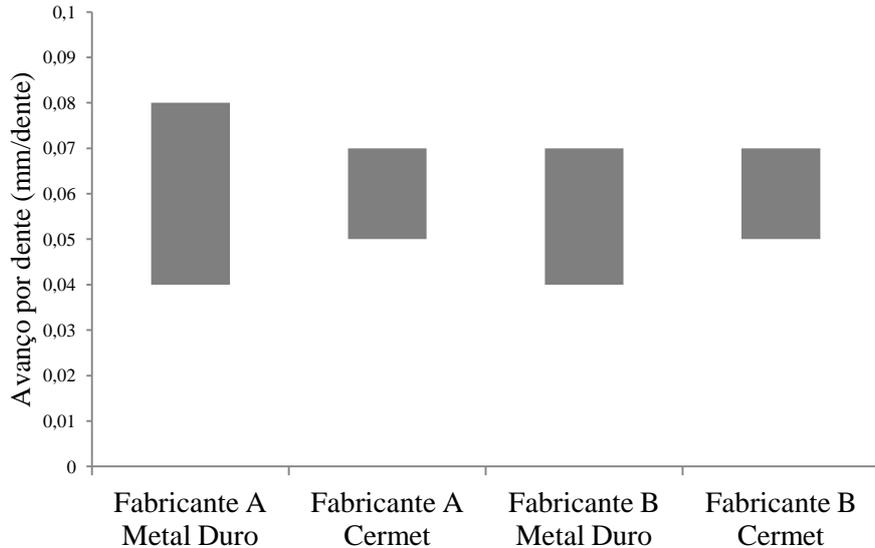


Figura 2.27 – Gráfico comparativo do avanço por dente (mm/dente) entre fabricantes para serras barras maciças de aço ao carbono (0,40 a 0,45% C)

Fonte: KAMPMANN (2010) e KANEFUSA (s.a.)

2.4.3 Profundidade de Usinagem e Penetração de Trabalho

A profundidade ou largura de usinagem (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. No caso do serramento com lâmina circular, corresponde à espessura do inserto.

A penetração de trabalho (a_e) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. Machado et al. (2009) salientam a importância desta grandeza no fresamento e na retificação. A Figura 2.28 ilustra a profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e) na operação de serramento.

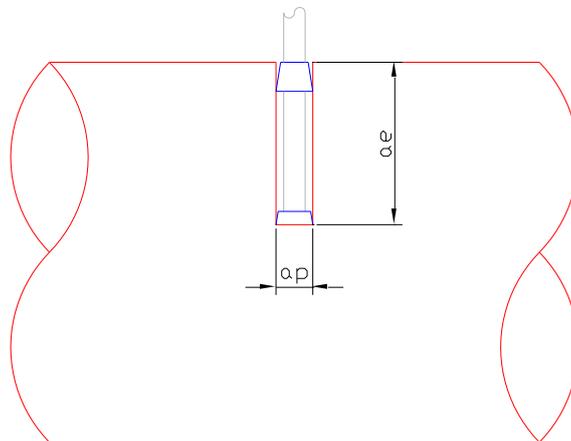


Figura 2.28 – Profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e)

2.5 Fluido de Corte

O fluido de corte é um elemento aplicado na peça e na ferramenta durante a usinagem com o intuito de facilitar a operação de corte. A seleção adequada deve levar em conta aspectos tais como a composição química, propriedades para lidar com as adversidades de um processo de corte específico, agressividade ao meio ambiente e segurança do trabalhador.

As principais funções do fluido de corte são: lubrificação (redução do atrito e da área de contato ferramenta/cavaco), refrigeração (transferência de calor da região de corte), remoção dos cavacos da zona de corte e proteção da máquina ferramenta e da peça contra oxidação.

Segundo Machado et al. (2009), embora as funções de lubrificação e refrigeração sejam normalmente consideradas prioritárias, há situações em que a remoção de cavacos se torna crítica, como no serramento e na furação profunda, processos nos quais a aplicação deficiente de fluido de corte pode resultar no engripamento dos cavacos, causando a quebra prematura da ferramenta. A capacidade do fluido de corte de remover os cavacos da zona de corte depende da sua viscosidade e vazão, além da natureza da operação e do tipo de cavaco que está sendo formado.

A remoção de cavacos é importante no serramento com lâmina de serra de fita, serra circular de aço rápido, segmentada e de fricção. No caso do serramento com serra circular com insertos de metal duro e cermet, o fluido de corte tem como principal função a refrigeração.

Para operações com serras alternativas, serras de fita ou serras circulares, recomenda-se o uso de emulsões ou óleos minerais sulfurados. Os fluidos servem, nestes casos, para limpar os dentes da serra, impedir a adesão de cavacos, resfriar a ferramenta e diminuir a vibração das lâminas (Ferraresi, 1977).

Existem três métodos de aplicação do fluido de corte: jorro a baixa pressão, sistema de alta pressão e atomização. O método do jorro a baixa pressão é mais utilizado por sua simplicidade. Já o sistema de alta pressão exige equipamento mais complexo (bomba de múltiplos estágios, reservatório com elevada capacidade e encapsulamento da máquina ferramenta). Finalmente, o método da atomização (também chamado névoa ou MQF “mínima quantidade de fluido”), vem sendo desenvolvido nos últimos tempos visando a redução do consumo do fluido de corte, tanto pelo fator econômico quanto pela preocupação ambiental além da segurança do operador. Ele apresenta como vantagens o alto poder de penetração e alta velocidade do fluido.

Serras circulares de aço rápido inteiriço e com segmentos de aço rápido empregam emulsão por meio de jorro a baixa pressão. As serras de fricção utilizam o sistema de alta pressão e o fluido de corte é a água. Para que a refrigeração funcione de forma eficiente é necessário garantir que a água seja aplicada sob alta pressão (de 30 a 50 bar para o corte a quente e 100 bar para o corte a frio) e baixa vazão (máximo de 6 m³/h). As serras com insertos de metal duro e cermet utilizam como fluido de corte emulsões aplicadas pelo método da atomização.

2.6 Força e Potência de Serramento

É de grande importância a determinação da força envolvida durante a operação de serramento, pois esta influencia diretamente na potência requerida para o corte. Nesta parte do trabalho serão abordadas a força e potência de serramento.

2.6.1 Força de Serramento

A força de usinagem (F_u) é considerada como uma ação da peça sobre a ferramenta, a qual é responsável pela deformação local do material, formando assim o cavaco. Esta força pode ser decomposta em três forças: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p), que é a projeção de F_u na direção do plano de trabalho (P_f).

De acordo com Trent (1984), a força de usinagem depende principalmente da resistência ao cisalhamento do material e da área dos planos de cisalhamento primário e secundário. Desta forma, os fatores que podem afetar a área e a resistência são: a peça (material e formato), fluido de corte (condições de refrigeração e lubrificação), parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e ferramenta (geometria, material e desgaste).

De acordo com Tillmann (2011), ao serrar tubo de aço S235JR com serra circular com insertos de metal duro, quando se eleva a velocidade de corte de 300 m/min para 1500 m/min, dependendo do avanço, a força de corte pode reduzir em até 30%.

Segundo Machado (2003), quando ocorre a operação de serramento, em cada dente é exercida uma força proporcional ao material a ser removido (pois esta força depende da geometria do dente). A força exercida na lâmina de serra é o somatório das forças exercidas em cada dente que está em contato com a peça durante o corte.

No serramento, a força de corte pode ser calculada conforme a Equação 2.7 (LOCHMANN, 2009):

$$F_c = a_p \cdot f_z \cdot k_c \cdot z_e \quad (2.7)$$

Onde k_c é a pressão específica do material a ser cortado (N/mm^2). É possível observar que com o aumento de qualquer um dos parâmetros envolvidos tem-se a elevação de F_c .

Sawar et al. (2009a), ao realizar testes com serra de fita bimetálica serrando os materiais aço rolamento, aço inoxidável e aço níquel – cromo – molibdênio concluíram que as forças medidas em todas as operações de serramento refletem o mecanismo de formação de cavacos, eficiência de corte e taxa de desgaste.

Quando a operação ocorre a baixas velocidades, pode ocorrer um fenômeno chamado de aresta postiça de corte (APC). Segundo Diniz et al. (2006), a APC é a camada de cavaco que adere à superfície de saída e aresta de corte. A APC interfere diretamente na força de corte, pois age como se fosse uma ferramenta com maior ângulo de saída, reduzindo assim o comprimento de contato na aresta de corte e com isso diminuindo o valor da força de usinagem.

A pressão específica (k_c) de corte pode ser entendida como a energia efetiva consumida para arrancar uma unidade de volume do material da peça (MACHADO et al., 2009). Há a possibilidade de se calcular este valor isolando k_c da Equação 2.7.

$$k_c = \frac{F_c}{a_p \cdot f_z \cdot z_e} \quad (2.8)$$

Segundo Lochmann (2009), o cálculo da pressão específica no serramento também pode ser efetuado pela Equação 2.9.

$$k_c = k_v \cdot k_{\text{desgaste}} \cdot k_{\text{recalque}} \cdot k_{ch} \quad (2.9)$$

Onde k_v é o constante do material da ferramenta ($k_v = 1,2$ para aço rápido e $k_v = 1,0$ para metal duro), k_{desgaste} é a constante de desgaste do material ($k_{\text{desgaste}} = 1,3$), k_{recalque} é a constante de recalque do material ($k_{\text{recalque}} = 1,2$) e k_{ch} é calculado pela Equação 2.10.

$$k_{ch} = \frac{k_{c1,1}}{h_m^{mc}} \quad (2.10)$$

Onde $k_{c1,1}$ (N/mm^2) e mc são constantes do material e h_m é espessura de corte (mm). Normalmente as lâminas de serras circulares possuem ângulo de posição principal (χ_r) de 90° . Neste caso h_m é igual a f_z .

A força de corte também pode ser relacionada com a energia específica de corte (U_c) pela Equação 2.11 (SAWAR et al., 1997):

$$U_c = \frac{F_c \cdot v_c}{a_p \cdot f_z \cdot z_e \cdot v_c} \quad (2.11)$$

Onde U_c é a energia específica de corte (GJ/m^3).

De acordo com Sawar et al. (2009b), a eficiência do processo de usinagem pode ser estabelecida pela determinação do desgaste da ferramenta, ação das forças de corte, avanço para remoção do material ou raio do cavaco. Outros parâmetros como a rugosidade da superfície usinada, ruído e vibração, temperatura de corte, características do cavaco, entre outros, são também excelentes indicadores da eficiência da operação. Entretanto, nenhum destes parâmetros pode quantitativamente medir a eficiência da usinagem para um processo em particular com determinada combinação ferramenta/peça. A energia específica de corte (U_c) é o melhor caminho para medir quantitativamente a eficiência do processo de corte de metais ou usinagem de uma peça. U_c é um parâmetro específico, capaz de avaliar produtos e processos baseados nos valores específicos associados com as forças de corte (potência) e taxa de remoção de material. Em geral, quanto menor U_c , maior a eficiência do processo de corte.

Bradbury & Lewis (2000) investigaram o serramento dos materiais aço AISI O1, Nimonic PK 31, Inconel 600L e aço AISI 1018 com serra circular inteiriça de aço rápido e analisaram a força de usinagem e a energia específica de corte. Os resultados apontaram uma grande variação nas exigências de energia para a usinagem dos diferentes materiais. Parte dessa energia é convertida em aumento da temperatura, fenômeno que reduz o tempo de vida da ferramenta. Quanto maior a temperatura durante o corte, maior a deformação plástica e o desgaste por difusão.

2.6.2 Potência de Serramento

A potência necessária para a usinagem resulta do somatório dos produtos entre as componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes da velocidade efetiva de corte (FERRARESI, 1977). Assim, somente os componentes velocidade de corte e avanço contribuem para a potência de usinagem. A potência de corte (P_c) é o produto da força de corte pela velocidade de corte, vide Equação 2.12:

$$P_C = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} \quad (2.12)$$

De maneira análoga, calcula-se o valor da potência de avanço conforme a Equação 2.13.

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60000} \quad (2.13)$$

A potência efetiva de corte (P_e) é a resultante da soma vetorial da potência de corte e da potência de avanço, vide Equação 2.14.

$$\vec{P}_e = \vec{P}_c + \vec{P}_f \quad (2.14)$$

As potências fornecidas pelo acionamento dos motores (P_{mc} e P_{mf}) são calculadas a partir potências resultantes das Equações 2.12 e 2.13 divididas pelas respectivas eficiências (η_c e η_f), conforme mostram as Equações 2.15 e 2.16, respectivamente.

$$P_{mc} = \frac{P_c}{\eta_c} \quad (2.15)$$

$$P_{mf} = \frac{P_f}{\eta_f} \quad (2.16)$$

A potência de corte também é alterada pelo desgaste da ferramenta. Quanto mais desgastada a ferramenta estiver, maior potência será necessária para realizar o corte. Shaw (1982) afirma que um dos parâmetros que mais afeta a potência de corte é o ângulo de saída da ferramenta (γ_o). O aumento deste ângulo favorece o escoamento do cavaco, diminuindo os esforços de corte. No caso do serramento, um fator importante é a forma do dente. Como visto anteriormente, existe a forma do dente pré – cortador e cortador onde o esforço para realizar a remoção de cavaco é distribuído entre este dois dentes. Em contrapartida, na forma de sulco alternado o mesmo volume de cavaco é removido por apenas um dente. Com isto, a forma pré – cortador e cortador requer uma potência de corte menor que a forma sulco alternado.

De acordo com Tillmann & Dültgen (2011), a geometria da serra circular influencia na potência requerida durante a operação de serramento. Isto foi percebido quando foram realizados os testes de serramento do tubo de aço S235JR utilizando serras circulares com insertos de metal duro e de fricção. Os parâmetros de corte foram mantidos constantes (velocidade de corte 22 m/s e velocidade de avanço 3,3 m/s). Para o corte com serra com inserto de metal duro, a potência requerida em relação à largura de corte foi de 4,1 kW/mm. Já para o serramento com serra de fricção, a potência requerida em relação à largura de corte foi de 6,4 kW/mm. Concluiu-se que nesta situação específica é mais vantajosa é a utilização de serra com insertos de metal duro

porque além de demandar menor potência, a peça serrada apresentou menos rebarbas e houve menor geração de ruído.

Maciel (1989) relata que a potência de corte durante a operação de serramento com serra circular varia constantemente. Isso se deve ao fato de haver mais de um dente trabalhando ao mesmo tempo e a espessura variável do cavaco. Segundo Cimini & Castro (2011), a importância do torque é a mesma da força de corte, pois quando se aumenta o diâmetro da serra, aumenta o torque (T_c), conforme a Equação 2.17.

$$T_C = \frac{F_c \cdot d}{2} \quad (2.17)$$

2.7 Desgaste da Serra Circular

De acordo com Bosetti & Bruschi (2010), o desgaste da serra circular acontece de duas maneiras: a primeira ocorre de forma súbita e se deve à fratura de um ou mais dentes, geralmente causando um aumento abrupto do torque. Este tipo de desgaste não é preocupante, pois em máquinas CNC onde o torque do eixo é continuamente monitorado, ele é facilmente detectado. Este desgaste interfere diretamente na qualidade do corte.

A segunda maneira, o desgaste gradual e progressivo, é provocado por variações de temperatura durante o serramento. Este desgaste afeta principalmente a cunha de corte e a quantidade de rebarbas aderida ao corpo da peça. É mais difícil de ser detectado, pois necessita da avaliação do operador do equipamento. Segundo Sawar et al. (2010), as principais formas de desgastes que ocorre no dente da serra de fita de aço rápido serrando peças de aço são: desgaste de cratera, desgaste de flanco e lascamento. Esta situação também é válida quando se trata de lâmina de serra circular.

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, na interface entre ferramenta e cavaco. O seu surgimento se deve à combinação dos mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão. A difusão acontece em altas temperaturas e consiste na transferência de átomos de um metal para outro. A adesão ocorre quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato sob carga moderada, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, formando assim um extrato metálico entre elas.

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. A alteração no ângulo de folga ocasiona o contato entre

a superfície de folga e o material da peça. Esta situação não é desejada porque deteriora o acabamento superficial da peça. Outro transtorno se dá pelo fato de modificar totalmente a forma da aresta de corte original, alterando as dimensões da peça em operações como torneamento e fresamento (CHILDS et al., 2000).

O lascamento é um tipo de avaria da ferramenta. Representa uma falha acidental e prematura da ferramenta devido a solicitações térmicas ou mecânicas excessivas em sua cunha de corte. Normalmente ocorre quando a ferramenta entra bruscamente em contato com parte da máquina ferramenta ou peça.

Realizados por Tillmann (2011) testes de serramento do tubo aço S235JR utilizando serra circular com inserto de metal duro classe P20, indicaram que ao elevar a velocidade de corte de 300 m/min para 1500 m/min (para um avanço por dente de 0,03 mm/rev) ocorreu o lascamento da superfície de folga principal. A Figura 2.29 mostra o lascamento após 100 cortes.



Figura 2.29 – Desgaste o lascamento no inserto de metal duro P20 após 100 cortes

Fonte: TILLMANN (2011)

No mesmo experimento, Tillmann (2011) comparou o desgaste entre serras com insertos de metal duro e cermet, usados no corte do aço DIN X2CrNi12. Os parâmetros de corte foram velocidade de corte de 510 e 960 m/min e avanço por dente 0,021 e 0,03 mm/rev. Foi observado desgaste por adesão na serra com insertos de metal duro,

impossibilitando o emprego sob estas condições. Na serra com insertos de cermet, também foi percebido este mesmo fenômeno além do desgaste de flanco. A Figura 2.30 (a) mostra o cavaco aderido na aresta de corte do inserto de metal duro e (b) o desgaste de flancos do inserto de cermet.

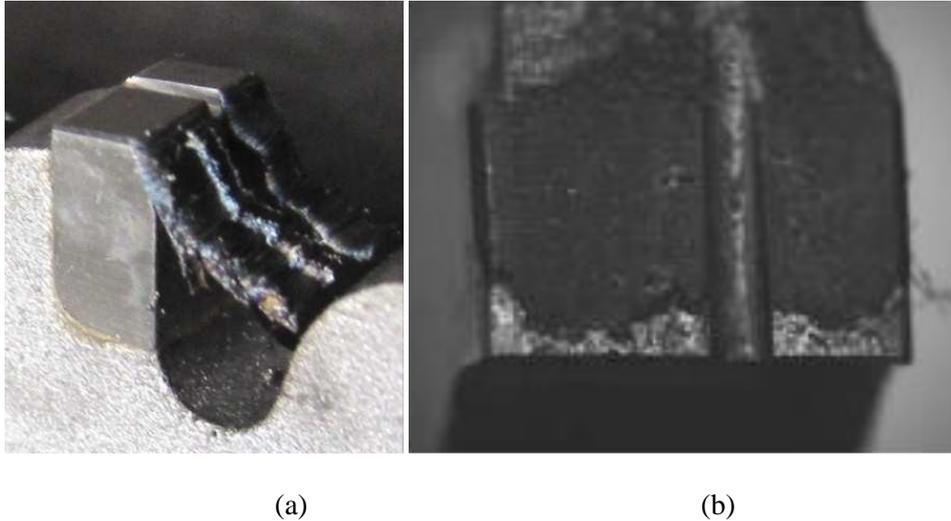


Figura 2.30 – Desgaste do inserto (a) metal duro e (b) cermet

Fonte: TILLMANN (2011)

Sawar et al. (2005) realizaram testes de vida em serras de fita bimetálica (aço rápido M42 na borda soldado ao material de suporte aço D6A) cortando aço rolamento (SAE 52100) para verificar o mecanismo de desgaste. Foi determinado que após aproximadamente 200 peças seria analisado o desgaste da ferramenta (a serra rompeu após 857 cortes). Nos estágios iniciais de desgaste da serra de fita foi percebido o aparecimento do desgaste de flanco, que ao longo da vida foi gradativamente aumentando além do aparecimento da APC, até que em um determinado momento houve aumento assimétrico provocando a quebra da ferramenta. Outro fenômeno observado foi o aumento da espessura do cavaco ao longo da vida. Foi concluído que o mecanismo de desgaste de flancos é uma combinação de adesão e abrasão, mostrados na Figura 2.31. Também foi observado que em algumas amostras de serra de fita, abaixo da camada da APC, o material apresentou um amolecimento/ revenimento, isto ocorreu próximo ao fim da vida devido ao fato da força e temperatura serem mais elevadas.

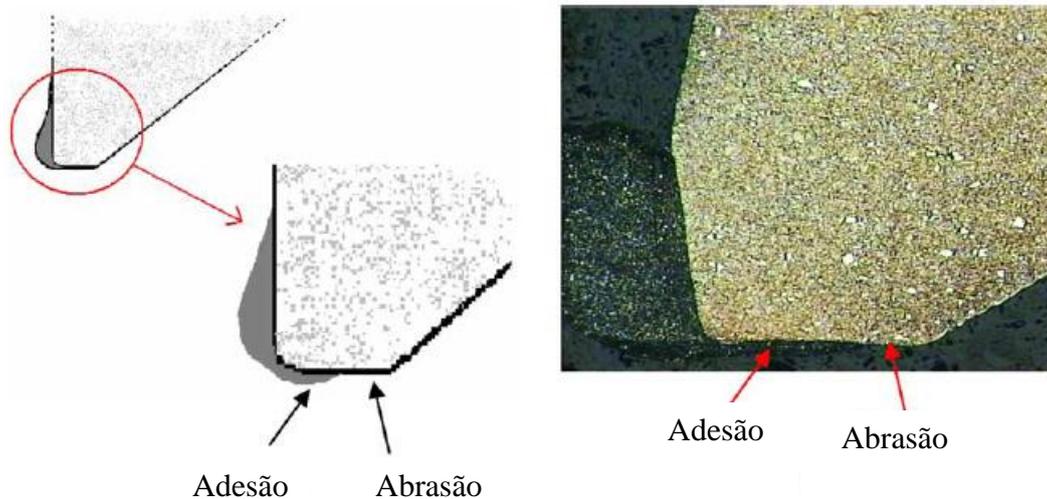


Figura 2.31 – Mecanismo de desgaste de flancos

Fonte: SAWAR et al. (2005)

Lewis et al. (1996) investigaram os mecanismos de desgaste da lâmina de serra circular com segmentos de aço rápido serrando ligas a base de níquel (Cupro 107, Ineonel 1600L 1 e Nimonic PK3I). Foi observado que quando a dureza do material da peça é moderada, predominam os mecanismos de desgaste por abrasão e adesão. Quando o material da peça tem alta dureza, a temperatura da zona de corte é mais alta, os mecanismos de desgaste principais são a difusão e deformação plástica da ferramenta.

2.8 Temperatura

A temperatura durante a operação de usinagem é um fator muito importante em se tratando do desempenho da ferramenta e, conseqüentemente, da qualidade da peça usinada.

No corte interrompido, quando uma aresta está em contato com a peça realizando o corte, aquela se aquece. Logo em seguida a aresta sai da peça e em contato com o ar ela se resfria. Assim, a temperatura atinge seus pontos máximos e mínimos de forma cíclica, como mostra Figura 2.32. Estas variações de temperatura são dependentes dos parâmetros de corte, como velocidade de corte e avanço, material a ser cortado, material da ferramenta de corte e do tempo ativo e inativo durante o ciclo do corte interrompido.

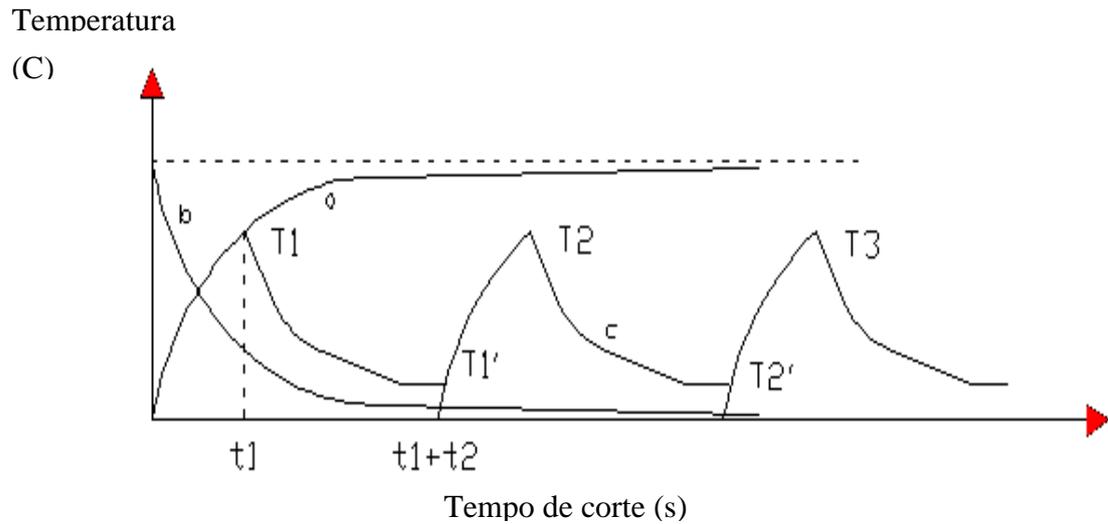


Figura 2.32 – Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido

Fonte: MACHADO et al. (2009)

Diniz et al. (2006) afirmam que quando a espessura de corte é variável, a distribuição de temperatura é irregular. A mudança cíclica de temperatura leva à modificação da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, o que provoca a formação de trincas térmicas. A Figura 2.33 mostra trincas térmicas em uma lâmina de serra circular de fricção.

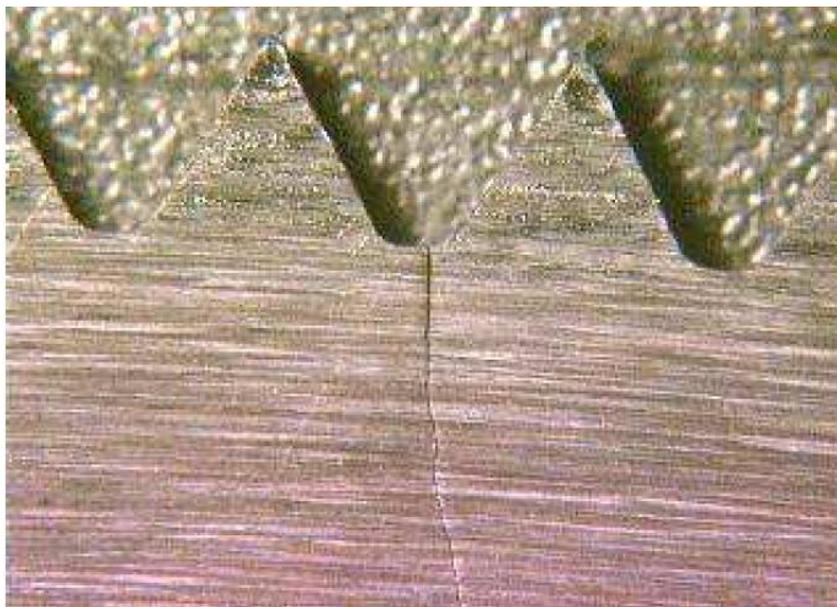


Figura 2.33 – Trincas térmicas em serra de fricção

FORTE: TILMANN (2011)

Segundo Nordström & Bergström (2001), a temperatura na periferia da lâmina de serra durante o corte pode variar de 200°C a 800°C. Esta faixa de temperatura ocorre normalmente no serramento com serras de aço rápido e de fricção. Caso contrário a ferramenta pode apresentar deformações plásticas em seu corpo. De acordo com Sawar et al. (1997), o ponto de fusão do metal de adição necessário para brasagem normalmente está entre 600°C a 650°C, o que aponta para a necessidade de controle da temperatura durante o serramento para que a serra circular não tenha seu tempo de vida reduzido.

2.9 Vibração

As trepidações caracterizadas pelas vibrações autoinduzidas de grandes amplitudes prejudicam enormemente o acabamento superficial da peça. A vibração durante o serramento pode ocorrer principalmente por baixa rigidez da máquina ferramenta, serra com o disco empenado ou não tensionado e desgaste da ferramenta.

Stakhiev (1998) investigou a relação entre velocidade de rotação e vibrações na ferramenta durante testes realizados em vazio. O comportamento da lâmina de serra ao longo do aumento gradual da velocidade de rotação é dividido em três faixas: A, B e C, ilustrado na Figura 2.34.

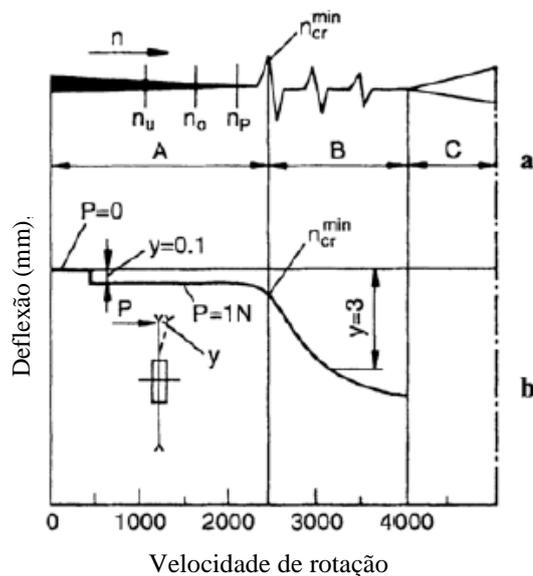


Figura 2.34 – Comportamento da serra como uma função da rotação
Fonte: STAKHIEV (1998)

A região A é a faixa segura de operação, onde a deflexão é mínima e constante. Quando se entra na região B, a qual é chamada de região de velocidade crítica, o corte

se torna instável devido à força transversal. Na região C surgem vibrações autoexcitadas que levam a destruição da serra (aparentemente porque a tensão normal excede a tensão de ruptura do material da ferramenta). A deflexão da serra aumenta quando se sai de A (deflexão de 0,1 mm) para B (deflexão de 3 mm).

O desalinhamento do disco causa o desalinhamento da aresta de corte, provocando assim vibrações. Outro fator que provoca a vibração da ferramenta é o desgaste das arestas de corte. À medida que a ferramenta de corte se desgasta, mais intensa será a vibração.

Durante o corte do aço ABNT 1020 com lâmina de serra circular com insertos de cermet, dos Santos (2010) monitorou o sinal de vibração através de um acelerômetro ligado a um multímetro digital. Este sistema de aquisição, apesar de exigir alguns cuidados especiais principalmente para o correto posicionamento do acelerômetro na máquina, mostrou-se sensível ao desgaste dos dentes. O sinal de vibração apresentou uma elevação de aproximadamente 16%, após o corte de 900 cm³, mostrando-se apropriado ao monitoramento do desgaste dos dentes da serra.

2.10 Qualidade de Superfícies Serradas

Segundo Bosetti & Bruschi (2010), o mercado de produtos usinados é caracterizado pela crescente procura por produtos de alta qualidade. Nesta parte do trabalho serão abordados alguns parâmetros que afetam a qualidade da peça serrada.

As características que podem favorecer a obtenção de um melhor acabamento da superfície usinada são (MACHADO et al., 2009): pequenas vibrações e deflexões geradas pelos esforços de usinagem, ponta da ferramenta não aguda, ferramenta e peça corretamente posicionadas e centralizadas, material da peça ser puro e livre de defeitos, eixo principal da peça esta alinhado e guias sem desgaste, aresta de corte sem quebras e corte sem aresta postiça de corte (APC).

De acordo com Tschätsch & Dietrich (2008), para o serramento existem dois tipos de exatidão que são a longitudinal e a angular. A exatidão longitudinal indica qual a variação do comprimento da peça em relação à medida desejada. Já exatidão angular mostra qual a variação da retilineidade da face serrada da peça. A Tabela 2.6 mostra uma comparação entre os três tipos de serramento.

Tabela 2.6: Exatidão alcançável no corte

Índice de Avaliação	Serra Alternativa	Serra de Fita	Serra Circular
Exatidão longitudinal (mm)	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3	0,15 - 0,2
Exatidão angular (mm por 100 mm de altura de corte)	0,2 - 0,25	fita nova 0,15 fita usada 0,5	0,15 - 0,3

Fonte: TSCHÄTSCH & DIETRICH (2008)

Para garantir a exatidão e acabamento desejados após a operação de serramento, é de grande importância o monitoramento da formação de rebarbas e a rugosidade da superfície serrada.

2.10.1 Rebarbas

A rebarba formada durante o corte é um fenômeno não desejado. Em alguns casos pode provocar alteração na geometria e nas dimensões da peça usinada, dificultar a montagem do conjunto, além de aumentar os riscos para o operador. Outro efeito é o desgaste excessivo da ferramenta. É necessário o controle a formação de rebarbas, pois isto acarreta em certas ocasiões a eliminação de uma operação de usinagem (acabamento) e com isso se ganha em produtividade e aproveitamento do material. Normalmente a rebarba proveniente da operação de serramento aparece no final do corte e é chamada de rebarba tipo faca.

Bosetti & Bruschi (2010) realizaram testes de serramento de tubo de aço inoxidável AISI 304 com diâmetro de 50 mm e espessura da parede 3 mm utilizando serras inteiriças de aço rápido com uma camada de TiN. Foi observado que o formato da rebarba depende das características de desgaste dos dentes da serra. Foram percebidas modificações no formato da rebarba ao longo dos testes, além da modificação na coloração da rebarba no final de vida da serra, o que indica a ocorrência de oxidação e temperaturas elevadas.

Sawar et al. (1997) realizaram testes de serramento de aço inoxidável e de aço com baixa dureza utilizando serras circulares segmentadas com insertos brasados. A redução da força de corte resulta na diminuição da quantidade de rebarba ao final do corte.

2.10.2 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é composta das irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, entre outros) e depende de vários parâmetros, como máquina ferramenta, propriedades do material da peça, geometria da ferramenta e operação de usinagem.

As condições de corte têm grande efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro mais influente, ou seja, a distância entre picos e a vales tende a aumentar com o aumento do avanço em uma proporção quadrática.

A velocidade de corte também influencia a rugosidade: baixas velocidades de corte podem promover o aparecimento da aresta postiça de corte (APC) e com isso piorar o acabamento, visto que, partes da APC são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça usinada. Para evitar este efeito, basta aumentar a velocidade de corte, pois além de dificultar o aparecimento da APC, aumenta-se a temperatura e, conseqüentemente, diminui-se a resistência do material ao cisalhamento, reduzindo assim as forças de usinagem e gerando um melhor acabamento. Porém, é preciso tomar cuidado para não se aumentar em excesso a velocidade de corte, pois velocidades altas podem provocar vibrações indesejadas além de acelerar o desgaste da ferramenta, piorando o acabamento.

Durante a operação de usinagem, quando se aumenta a profundidade de usinagem, aumentam as forças de corte e com isso as ondulações, piorando assim o acabamento da peça usinada.

A geometria e desgaste da serra circular influenciam diretamente a rugosidade. Os ângulos que mais influenciam na rugosidade são os de saída (maior o ângulo de saída, menor a força de usinagem e rugosidade), ângulo de folga (suficiente para evitar o contato com a superfície usinada) e de posição principal (quanto menor, reduz as marcas do avanço e menor a rugosidade). Com relação ao desgaste, quanto maior o desgaste da ferramenta, pior o acabamento por provocar maior adesão de rebarbas na superfície usinada.

Segundo Kötter (2006), o raio de ponta (r_e) tem grande efeito sobre a rugosidade. Quanto maior o valor do r_e (pelo menos o dobro do avanço) menores as marcas de avanço, melhorando assim o acabamento. Porém, se r_e for excessivamente grande, pode induzir vibrações.

Além dos parâmetros de corte e ferramenta, para se obter um bom acabamento no serramento é necessário que a máquina seja rígida, sem problemas de alinhamento do leito de alimentação com a máquina e ter movimentos exatos. E por último, o fluido de corte deve reduzir o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou o cavaco, contribuindo para a melhoria do acabamento.

Santos (2010), avaliou a rugosidade (R_a , R_t e R_z) durante o serramento do aço ABNT 1020 utilizando serra circular com insertos de cermet. Uma amostra foi retirada após 120 peças cortadas e a outra após 220 cortes. Não foi possível concluir que a rugosidade esta relacionada com o desgaste dos insertos da serra. A Figura 2.35 ilustra o resultado das medições da rugosidade das amostras.

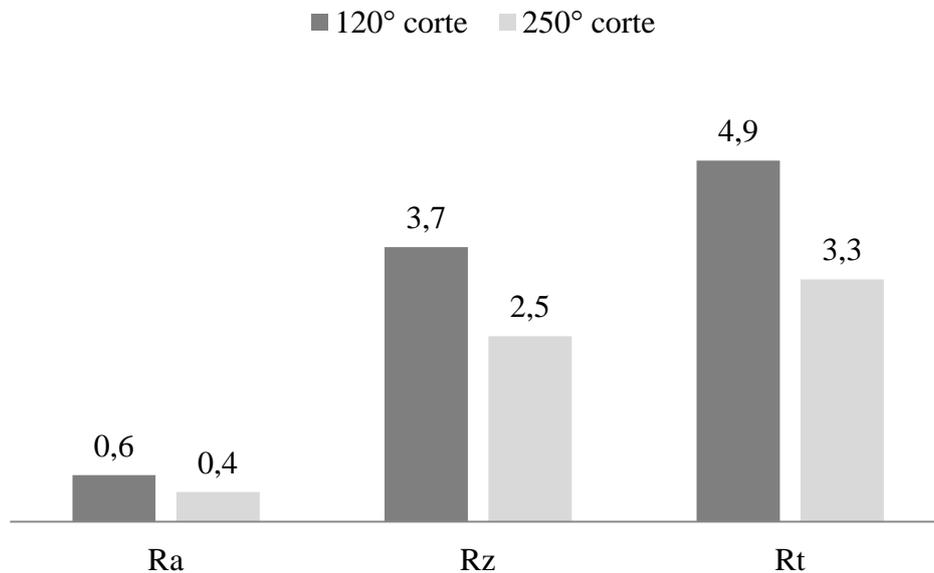


Figura 2.35– Resultado da medição da rugosidade das amostras

Fonte: DOS SANTOS (2010)

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresentará o planejamento experimental para realização dos testes. Serão abordados os materiais do corpo de prova e das serras circulares, equipamentos a serem utilizados e métodos empregados. Os experimentos serão realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

3.1. Materiais

O material do corpo de prova é o aço ABNT 1045 laminado que possui a seguinte faixa de composição química básica: carbono (0,43 – 0,50%), manganês (0,60 – 0,90%), fósforo ($\leq 0,03\%$) e enxofre ($\leq 0,05\%$). Este aço é amplamente utilizado para eixos e peças para indústria agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, entre outros. O material recebeu tratamento térmico de recozimento a 850°C por seis horas, o que resultou em uma dureza média de 174 HV. As dimensões dos corpos de prova são: 101,6 x 101,6 x 50 mm e estes possuem quatro furos de diâmetro 10 mm para fixação no dinamômetro.

As lâminas de serra circulares utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Kampmann do Brasil Ltda. (Belo Horizonte, MG). As denominações das lâminas de serra circulares utilizadas durante o experimento estão indicadas na Tabela 3.1. As serras têm diâmetro externo de 200 mm com 20 dentes, largura do disco de 1,7 mm, largura do inserto de 2,0 mm, furo central com diâmetro de 25,4 mm e quatro furos de arraste com diâmetro de 11,0 mm. Os furos de arraste estão posicionados no diâmetro primitivo de 40 mm, conforme mostra a Figura 3.1. Os insertos denominados cermet e MD S possuem sulco alternado (Figura 2.21) e MD VN, pré-cortador e cortador (Figura 2.20).

Tabela 3.1: Denominação das serras circulares

Denominação	Material do inserto	Geometria do inserto
Cermet	Cermet	Sulco alternado
MD S	Metal duro	Sulco alternado
MD VN	Metal duro	Pré-cortador e cortador

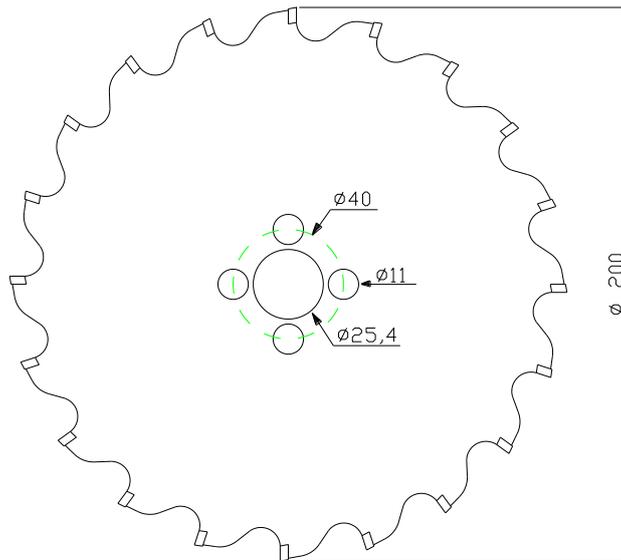


Figura 3.1 – Geometria da serra circular

Foram utilizadas três afiações sendo que duas lâminas de serra possuem insertos de metal duro da classe ISO P40 e uma lâmina de serra possui insertos de cermet cuja classe ISO não foi disponibilizada pelo fabricante.

A fixação da lâmina de serra no equipamento é realizada por meio de um mandril porta fresa MAS/BT403 cone ISO 40. Um par de flanges foi desenvolvido para fixar a lâmina de serra circular ao mandril. Foram fabricados flanges do aço ABNT 4140 para fixação da serra ao mandril.

Durante os testes será aplicado lubrificação por mínima quantidade de fluido (MQF). O fluido utilizado foi emulsão KHO 700 a uma concentração de 5%, fornecido pela Kampmann do Brasil Ltda (Belo Horizonte, MG). Este fluido é semissintético, pois possui como base óleos vegetais transformados e sintéticos.

3.2 Equipamentos

Os testes serão executados no centro de usinagem Romi, modelo Discovery 560, com potência de 9,0 kW e rotação máxima de 7.500 rpm, equipado com comando numérico Siemens 810D e ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Centro de usinagem Romi Discovery 560

Foi instalado um reservatório na parte superior do centro de usinagem e um bico de refrigeração próximo a lâmina de serra circular (Figura 3.3). O reservatório é conectado ao bico por um tubo de aço inoxidável. Neste tubo também é conectada a mangueira com ar comprimido. No bico de refrigeração ocorre a mistura do ar comprimido com a emulsão para formar a névoa. A pressão do ar comprimido foi mantida constante em 2,5 bar e controlada por meio de uma válvula reguladora de pressão Parker modelo DTGB7. A vazão do fluido também foi mantida constante em 6 mL/min.

Antes da realização dos testes, a dureza do corpo de prova foi mensurada por meio do durômetro portátil Time TH 130. Para garantir que o mandril havia sido montado de maneira correta no centro de usinagem, o batimento axial da serra circular foi certificado por meio de um relógio comparador Digimes com curso de 0,8 mm e resolução de 0,01 mm. O relógio comparador teve a sua ponta de medição instalada 10 mm abaixo do fundo da bolsa entre os dentes e se o batimento fosse superior a 0,3 mm o mandril era retirado e montado novamente.

Durante os testes de serramento foram medidas as forças de usinagem. Para tal, o corpo de prova foi fixado sobre o dinamômetro Kistler modelo 9257 BA, conforme mostra a Figura 3.3. Para eliminar folgas e garantir que os corpos de prova fossem montados sempre na mesma posição, um batente foi fixado sobre o dinamômetro.



Figura 3.3 – Dinamômetro com o corpo de prova e batente

Por sua vez, o dinamômetro foi conectado ao amplificador de sinais Kistler modelo S233.A1 e este a placa de aquisição National Instruments NI C DAQ-9174 Compact DAQ ligada a um computador com processador AMD K6. O *software* LabVIEW Signal Express 2010 foi utilizado para coleta e armazenamento dos dados. A Figura 3.4 mostra o sistema de aquisição de dados.

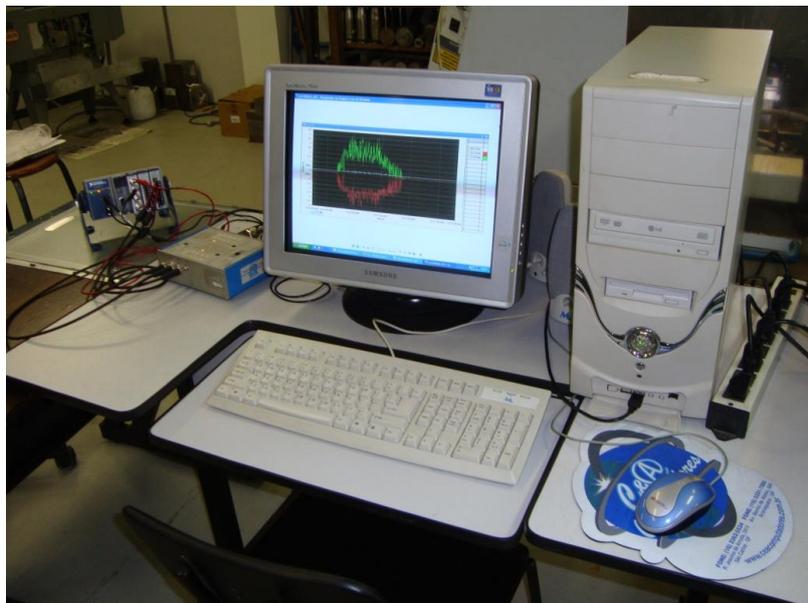


Figura 3.4: Sistema de aquisição de dados das forças de usinagem

Após os testes foram medidas a largura da fenda e rugosidade das superfícies laterais serradas. A largura da fenda foi mensurada pelo microscópio Olympus SZ 61 com auxílio de uma câmera CCD. As imagens foram analisadas no computador por meio do *software* Image-Pro Express. Antes da medição da largura de corte o sistema foi ajustado com um padrão com resolução de 0,1 mm. Este equipamento também foi utilizado para fotografar os cavacos gerados durante o corte. A Figura 3.5 apresenta o sistema de aquisição de imagens.

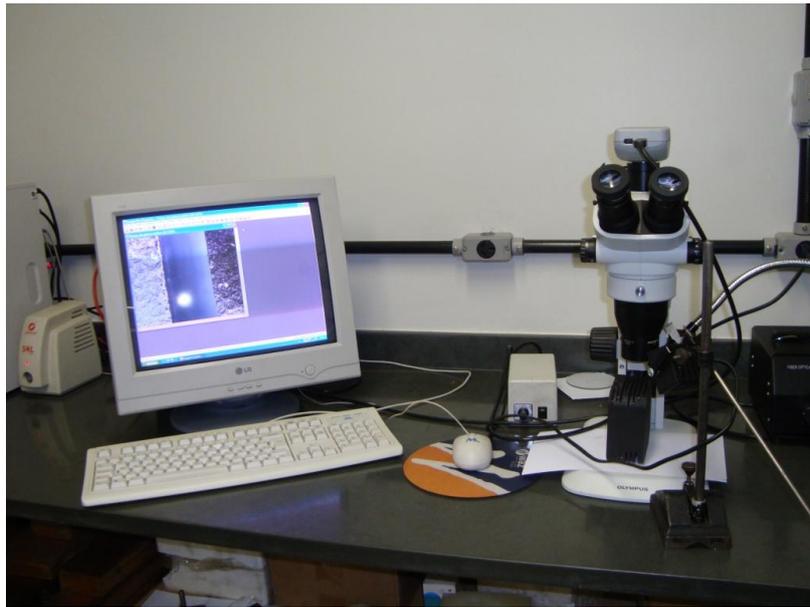


Figura 3.5 – Sistema de aquisição de imagens

Foi necessária a utilização da máquina de serra de fita Kalamazoo C7AD para separa as partes cortadas após a medição da largura da fenda. A Figura 3.6 ilustra a serra de fita em operação.



Figura 3.6 – Serra de fita

A rugosidade foi mensurada por meio de um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 301 com comprimento de amostragem de 0,8 mm e comprimento total de medida 4,0 mm, ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Rugosímetro Mitutoyo

Ao fim da coleta dos dados foram utilizados os *softwares* Matlab 6.5 e Minitab 15. O primeiro foi utilizado para obter o valor médio das forças medidas e o segundo para análise estatística dos resultados dos experimentos.

3.3 Métodos

As grandezas de entrada para os testes são: material e geometria da ferramenta, velocidade de corte e avanço por dente. Foram escolhidos três valores de velocidade de corte e três valores de avanço por dente. Com isto, obteve-se 9 combinações dos parâmetros, vide Tabela 3.2. O valor de penetração de trabalho (a_e) foi mantido constante em 10 mm.

Tabela 3.2: Combinação dos valores de velocidade de corte e avanço por dente para cada teste

Teste	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	Tempo de corte (s)
1	140	0,04	34
2	140	0,07	20
3	140	0,10	14
4	180	0,04	27
5	180	0,07	15
6	180	0,10	11
7	220	0,04	22
8	220	0,07	12
9	220	0,10	9

De acordo com Montgomery & Runger (2009), quando vários fatores são de interesse em um experimento, um planejamento fatorial completo deve ser usado. Isto significa que em cada tentativa completa ou réplica do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas. O planejamento experimental será fatorial completo, ou seja, n^k , onde k é o número de fatores e n o número de níveis. Neste trabalho, têm-se três fatores (inserto, v_c e f_z) em três níveis, logo o número de experimentos será 27. Os testes serão realizados com uma réplica, portanto, o número de experimentos será multiplicado por dois, chegando assim a 54 testes. Para evitar que fatores não controláveis influenciassem os resultados, os testes serão realizados em ordem aleatória.

Com o objetivo de se otimizar os parâmetros de corte, após a execução dos 54 testes foram repetidos 4 vezes os testes com os parâmetros intermediários (velocidade de corte 180 m/min e avanço por dente 0,07 mm/rev).

As grandezas de saída medidas durante os testes são: força de avanço (F_x), força radial (F_y) e força axial (F_z). O *software* LabVIEW realiza a coleta das forças a cada 0,1 s durante 51 s e informa o valor de tensão elétrica (V). A Figura 3.8 mostra um exemplo de gráfico gerado pelo LabVIEW durante os testes. A curva verde (superior) representa F_x , a curva vermelha (inferior) F_y e a curva branca (central) F_z . Após os testes foram mensuradas a largura de corte, os parâmetros de rugosidade desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q), altura total do perfil (R_t) e altura máxima do perfil (R_z) do corpo de prova serrado.

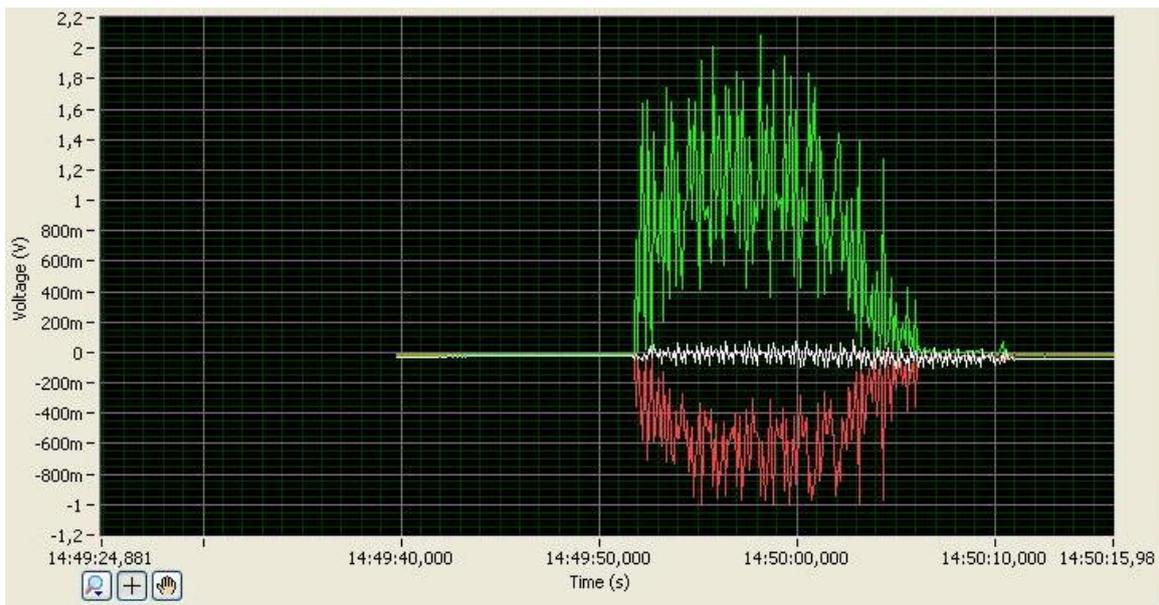


Figura 3.8: Exemplo de gráfico gerado pelo LabView durante a coleta de dados das forças de serramento

O tempo de corte de todos os testes foi inferior a 51 segundos, como indica a Tabela 3.3. A coleta de dados foi iniciada aproximadamente 10 segundos antes do corte. Ao fim de cada teste, os dados eram salvos em uma planilha Excel™.

A escala do dinamômetro para as três forças foi de 5 mV/N. Assim, para converter o valor de tensão em força foi necessário dividir o valor da tensão pelo valor da escala. Uma vez convertidos os valores, estes foram transferidos para o Matlab para a

realização do cálculo da área abaixo da curva. A Figura 3.9 ilustra um gráfico com os dados da força radial (N).

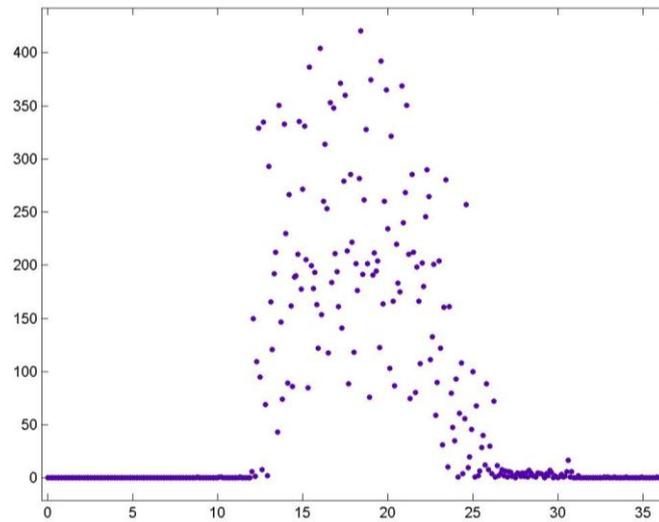


Figura 3.9: Exemplo de gráfico da força de avanço (N) versus tempo (s)

Como os dados são informados como pontos, é necessária uma curva de ajuste para possibilitar o cálculo da área abaixo da curva. No caso deste experimento, foi utilizado o ajuste *interpolant cubic spline*, que passa por todos os pontos e que, portanto, o erro quadrático é igual a zero. A Figura 3.10 mostra um exemplo de gráfico com os dados da força radial (N) versus tempo (s).

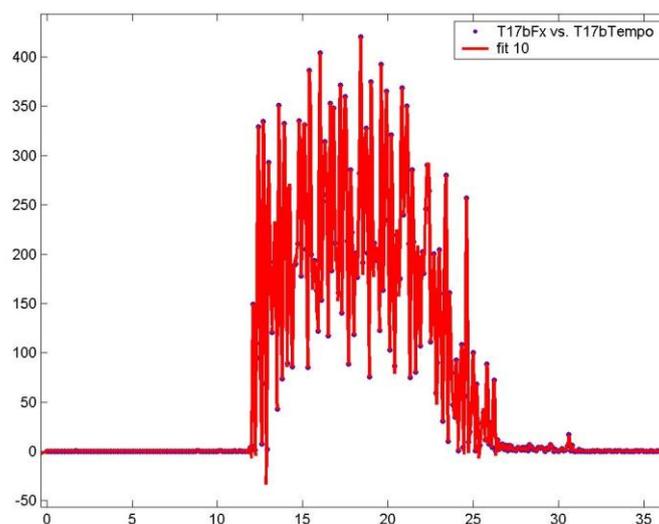


Figura 3.10: Exemplo de gráfico da força de avanço (N) versus tempo (s) com ajuste

Finalmente, o valor da área abaixo da curva foi dividido pelo tempo de corte para se obter o valor médio da força para cada combinação de parâmetros. Para a obtenção dos valores médios das rugosidades e largura da fenda, foram realizadas quatro medições de cada parâmetro, após isto foi calculada a média aritmética.

Com o intuito de verificar a adequação do modelo, realizou-se a análise residual dos dados. Segundo Drumond et al. (1996), o resíduo é a diferença entre uma observação e a média do tratamento correspondente. A verificação da adequação do modelo de análise de variância é feita por meio do estudo dos gráficos de resíduo. Para validar a análise de variância, os resíduos têm que atender às seguintes suposições: serem normalmente distribuídos com média igual a zero, independentes no tempo e não apresentarem tendência de acordo com o valor ajustado.

Uma vez verificado a adequação do modelo, foi realizado a análise de variância (ANOVA) para verificar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída. Neste experimento, foram analisados isoladamente os parâmetros de corte (v_c e f_z), além da combinação entre ambos. Se a diferença encontrada entre os parâmetros analisados fosse suficientemente grande, ou seja, valor P maior que 5%, concluía-se que o parâmetro de entrada não influenciava o parâmetro de saída.

A próxima etapa será a comparação dos valores de saída entre as três serras circulares. Para isto será utilizada a técnica *box plot*, que permite a identificação dos valores da mediana, primeiro quartil, terceiro quartil, máximos e mínimos. Os valores descritos acima são importantes para se visualizar a variabilidade dos dados. A mediana indica o valor central da série após a ordenação dos dados (crescente ou decrescente). O primeiro quartil indica que abaixo deste valor estão 25% dos dados da série. Já o terceiro quartil indica que 75% dos valores da série estão abaixo do mesmo. O valor máximo, como o próprio nome já diz indica o valor com maior magnitude da série de dados que é determinado pela Equação 3.1.

$$V_{m\acute{a}x} = Q_3 + 1,5.(Q_3 - Q_1) \quad (3.1)$$

Onde $V_{m\acute{a}x}$ é o valor máximo, Q_1 o primeiro quartil e Q_3 o terceiro quartil. Já o valor mínimo ($V_{m\acute{i}n}$) é determinado pela Equação 3.2. Os valores que estão acima ou abaixo dos valores $V_{m\acute{a}x}$ e $V_{m\acute{i}n}$ são chamados de *outliers*.

$$V_{m\acute{i}n} = Q_1 - 1,5.(Q_3 - Q_1) \quad (3.2)$$

Também foi construído o gráfico do valor médio dos parâmetros de saída com o intervalo de confiança de 95% para possibilitar a comparação entre as três serras circulares. Assim, pode-se verificar se realmente há diferença significativa entre os valores médios do determinado parâmetro analisado.

Em seguida, será realizada a otimização dos parâmetros de entrada para cada serra circular. Primeiramente serão verificadas as análises de variância realizada para cada parâmetro de saída, selecionando assim os parâmetros de saída a serem otimizados. A otimização ocorrerá no intuito de encontrar as melhores condições de velocidade de corte e avanço por dente para que se obtenha o valor desejado dos parâmetros de saída. A otimização será feita por meio de ferramenta “Superfície de Resposta” do *software* Minitab.

Também serão analisados, porém apenas qualitativamente, a rebarba aderida ao corpo de prova, o desgaste dos insertos e os cavacos gerados durante a operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estarão mostrados os resultados experimentais. Serão analisadas de maneira quantitativa as forças de corte, rugosidade da superfície serrada e largura da fenda. Também serão analisadas qualitativamente: rebarbas, desgaste das serras e formas dos cavacos.

4.1. Forças de Corte

Durante os testes foram medidas a força de avanço (F_x), a força radial (F_y) e a força axial (F_z). Os dados referentes a cada teste encontram-se no Apêndice I. Primeiramente foi realizada a análise de resíduos para validar a utilização do teste estatístico seguida da análise para verificação da influência dos parâmetros de entrada (velocidade de corte e avanço por dente) sobre os parâmetros de saída (F_x , F_y e F_z) e sua interação.

Para verificação da adequação do modelo foram plotados os seguintes gráficos: probabilidade normal, que verifica se os resíduos seguem a distribuição normal, o histograma, que além de ser uma informação visual da proximidade dos resíduos à distribuição normal, avalia se a média dos mesmos é zero, resíduos versus tempo (checa se os resíduos são independentes no tempo) e resíduos versus valor ajustado (verifica se os resíduos não seguem uma tendência de acordo com o valor ajustado, isto é, se a variância dos resíduos pode ser considerada constante).

A análise descrita acima foi realizada para todos os parâmetros da saída quantitativa, entretanto, a título de ilustração, a Figura 4.1 mostra os gráficos da adequação da força de avanço (F_x) para a lâmina de serra de cermet. O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.1(a), indica que a distribuição dos resíduos está próxima de uma reta, logo estes seguem uma distribuição normal. A Figura 4.1(b) mostra o gráfico dos resíduos versus valor ajustado e indica que não existe tendência dos resíduos em função do valor ajustado. O histograma da Figura 4.1(c) confirma a suposição anteriormente descrita e a média igual a zero. Finalmente, o gráfico de resíduos versus tempo Figura 4.1(d) ilustra que os resíduos são independentes no tempo. Com a análise de resíduos é possível concluir que o modelo selecionado foi satisfatório. Com isto, é possível validar a utilização da análise de variância (ANOVA), já que atende às suposições do modelo de que os resíduos sejam normais com média zero, independentes no tempo e não apresentar tendência de acordo com os valores ajustados.

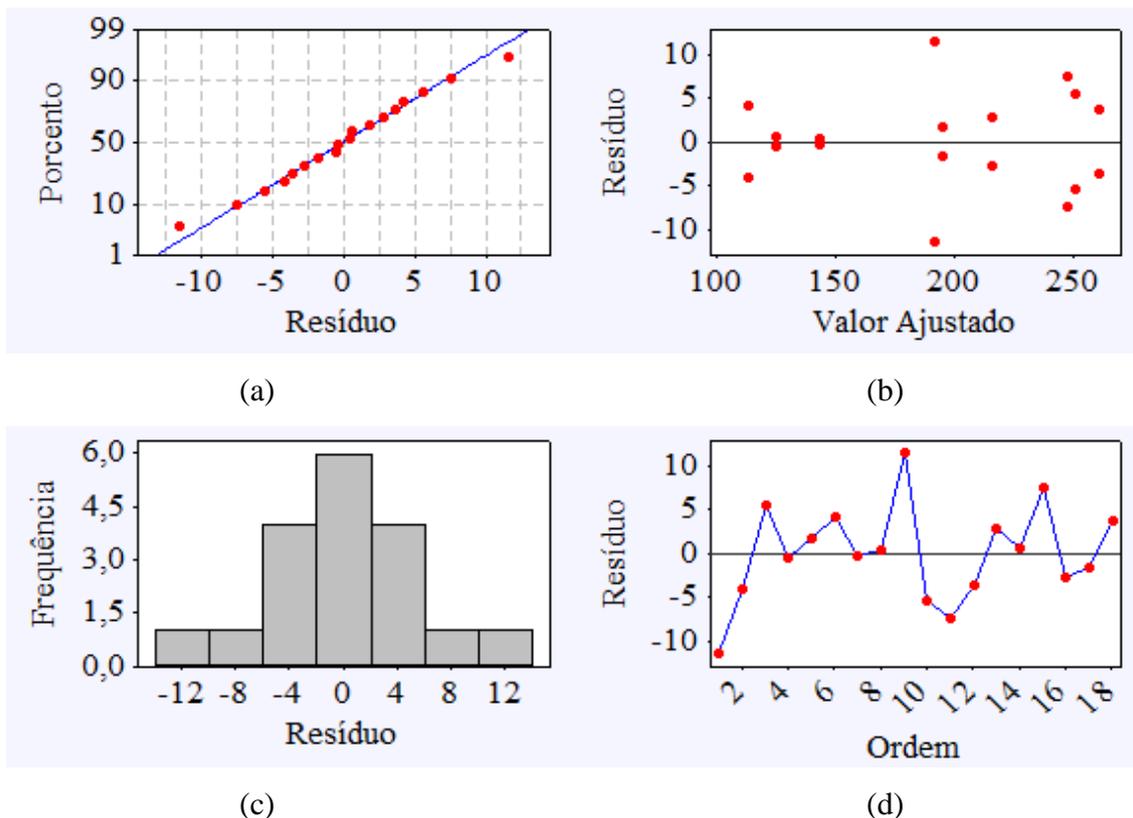


Figura 4.1: Gráfico (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus tempo, para análise residual da força de F_x da serra cermet

Após a comprovação da adequação do modelo, foi realizada a análise de variância (nível de significância $\alpha=5\%$) para verificar a influência dos parâmetros de entrada sobre as componentes de força de serramento. A Tabela 4.1 mostra resumidamente a influência dos parâmetros de entrada (individualmente e sua interação) sobre as forças para a serra cermet. Os parâmetros marcados com “X” são influenciados pelo parâmetro de entrada correspondente, isto é, apresentam P valor menor do que 5%.

Para a serra circular de cermet, as forças de avanço (F_x) e radial (F_y) sofreram a influência dos parâmetros velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z). Porém a combinação dos dois parâmetros de entrada não influenciou o resultado.

Tabela 4.1: Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra cermet

Forças	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	v_c*f_z
F_x	X	X	-
F_y	X	X	-
F_z	-	-	-

Segundo Machado et al. (2009), a força de avanço (F_x) é uma projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço. Sendo assim, é afetada diretamente pela velocidade de corte e pelo avanço.

Já a força radial (F_y), que no caso do serramento é a força principal de corte, é uma projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte. O aumento da velocidade de corte e do avanço têm como consequência o aumento do volume de material a ser removido, tendo como principal efeito a necessidade de uma força maior para a remoção do cavaco.

A força axial (F_z), também pode ser chamada de força passiva, não sofre influência de nenhum parâmetro de entrada, o que não surpreende, já que a força axial está relacionada com a reação ao corte oferecida pela peça na direção vertical. Como o serramento resulta na geração de um canal, ação e reação se anulam.

A mesma análise descrita acima foi realizada para as serras circulares com insertos de metal duro com geometria de sulco alternado (MD S) e pré-cortador cortador (MD VN).

A Tabela 4.2 mostra a influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra circular MD S.

Tabela 4.2: Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra MD S

Forças	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
F_x	X	X	X
F_y	X	X	X
F_z	-	-	-

Como na serra circular cermet, tanto a força de avanço quanto a força radial são influenciadas pelos parâmetros de entrada pelos mesmos motivos da primeira. A força axial também não sofre influência de v_c , f_z e sua interação.

A interação entre v_c e f_z não influencia a força de avanço nem a força radial na serra cermet. Todavia, para a serra MD S esta interação afeta o valor de F_x e F_y . Uma hipótese para isto é a influencia do material do inserto sobre as forças de corte, pois a variação do material do inserto causa variação do coeficiente de atrito no contato ferramenta/cavaco e essa variação pode influir nos valores da pressão específica de corte.

A Tabela 4.3 apresenta a influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra circular MD VN. Neste caso a força radial não depende da velocidade de corte, mas depende do avanço.

Tabela 4.3: Influência dos parâmetros de entrada sobre forças para a serra MD VN

Forças	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
F_x	X	X	X
F_y	-	X	X
F_z	-	-	-

Este fenômeno pode ter ocorrido em função da geometria do inserto, pois como para remover o mesmo volume de material em relação à geometria sulco alternado, são necessários dois insertos (pré-cortador e cortador). Quanto à força axial, o comportamento foi o mesmo em relação as demais serras.

A análise estatística dos dados da forças de corte para a serra cermet constatou que nenhuma das forças foi influenciada pelos parâmetros de corte combinados. Com isto, foram plotados os gráficos de efeito principal, que relacionam o valor médio da respectiva força com os parâmetros de entrada. A Figura 4.2 mostra o gráfico de efeito principal para (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y .

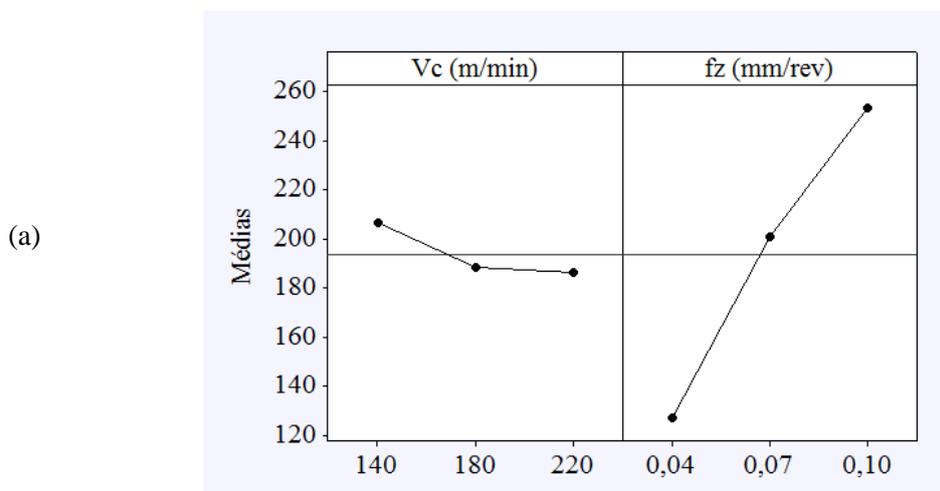


Figura 4.2: Gráfico de efeito principal para: (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y , serra cermet

(b)

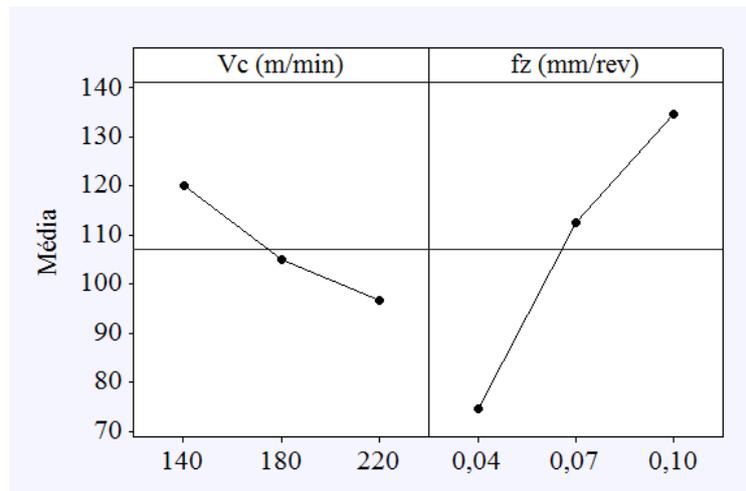
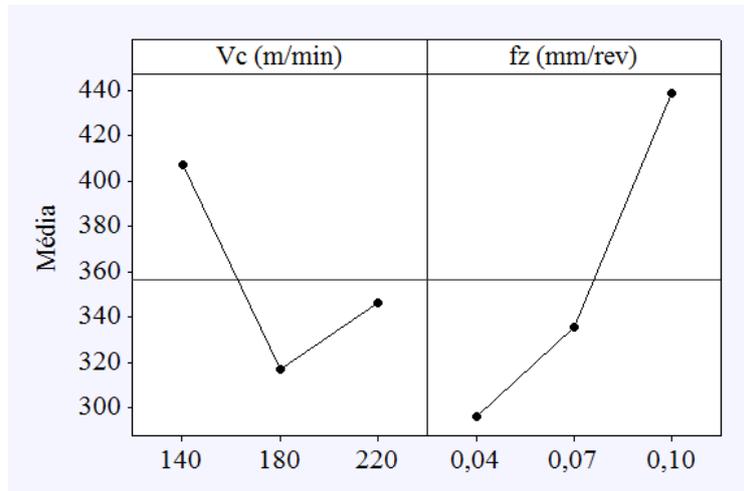


Figura 4.2: Gráfico de efeito principal para: (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y , serra cermet (cont.)

Tanto a força de avanço quanto a força radial diminuem com o aumento da velocidade de corte. Os valores da pressão específica de corte tendem a diminuir levemente com o crescimento da velocidade de corte devido à elevação da temperatura na região do corte e a redução do coeficiente de atrito. Além disso, F_x e F_y aumentam com o aumento do avanço por dente devido ao maior volume de cavaco removido, tendo como consequência a necessidade um valor maior de força para realizar esta operação.

No caso da serra MD S, a análise de variância mostrou que para as forças de avanço e axial, além dos parâmetros de entrada influenciaram isoladamente, a combinação destes afeta F_x e F_y . Assim, foram plotados os gráficos de efeito principal, que relacionam o valor médio da respectiva força com o parâmetro de entrada (Figura 4.3).

(a)



(b)

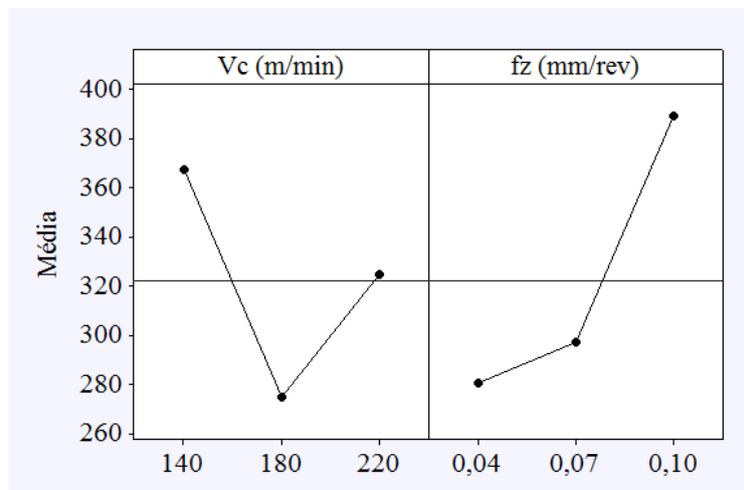


Figura 4.3: Gráfico de efeito principal para força de avanço F_x (a) e força radial F_y (b) axial F_z para a serra MD S

Tanto para as forças de avanço (F_x) e radial (F_y), quando se aumenta a velocidade de corte a força diminui até chegar a um valor mínimo para $v_c=180$ m/min. A partir deste valor a força aumenta com a elevação da velocidade de corte. Uma possível explicação é o fato de quando a velocidade de corte aumenta de 140 para 180 m/min, há um aumento da temperatura na região de corte, com isto, reduzindo a resistência ao cisalhamento gerando a redução de F_x e F_y . Porém, quando v_c aumenta de 180 para 220 m/min, com a elevação da temperatura na região de corte, eleva-se a dilatação térmica da serra e do corpo de prova, tendo como consequência o aumento das forças de avanço e radial. Como na serra cermet, com o aumento do avanço por dente as forças de avanço e radial também aumentam. Novamente este comportamento ocorre em função do aumento do volume do material a ser removido.

Como a interação entre os parâmetros de entrada influencia as forças de avanço e radial, as Figura 4.4 e 4.5 ilustram a interação entre os parâmetros de entrada para a força avanço (F_x) e radial (F_y), respectivamente.

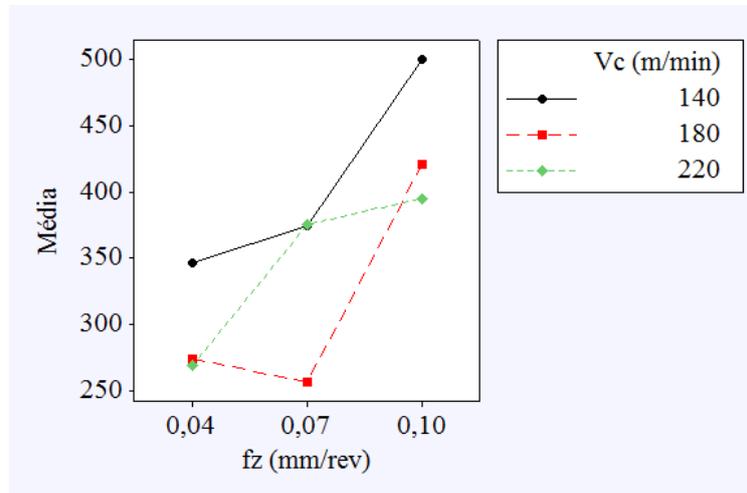


Figura 4.4: Gráfico de interação entre os resultados para a força de avanço para a serra MD S

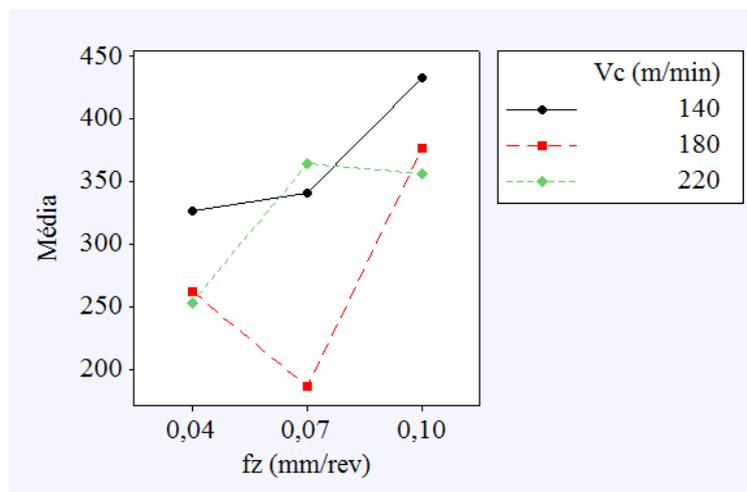


Figura 4.5: Gráfico de interação entre os resultados para a força radial para a serra MD S

Tanto para a Figura 4.4 quanto para a Figura 4.5, para se obter o menor valor da força de avanço e radial é necessário que a velocidade de corte seja igual a 180 m/min e que o avanço por dente seja 0,07 mm/rev. Para as velocidades de 140 e 220 m/min há uma tendência de elevação de F_x e F_y com aumento do avanço.

No caso da serra circular MD VN, para a força de avanço foi afetada tanto pelos parâmetros de entrada isoladamente, quanto pela sua combinação. No caso da força radial (F_y) apenas o avanço e a interação $v_c \cdot f_z$ são influentes para o nível de

significância de 5%. A Figura 4.6 apresenta os gráficos de efeito principal para (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y .

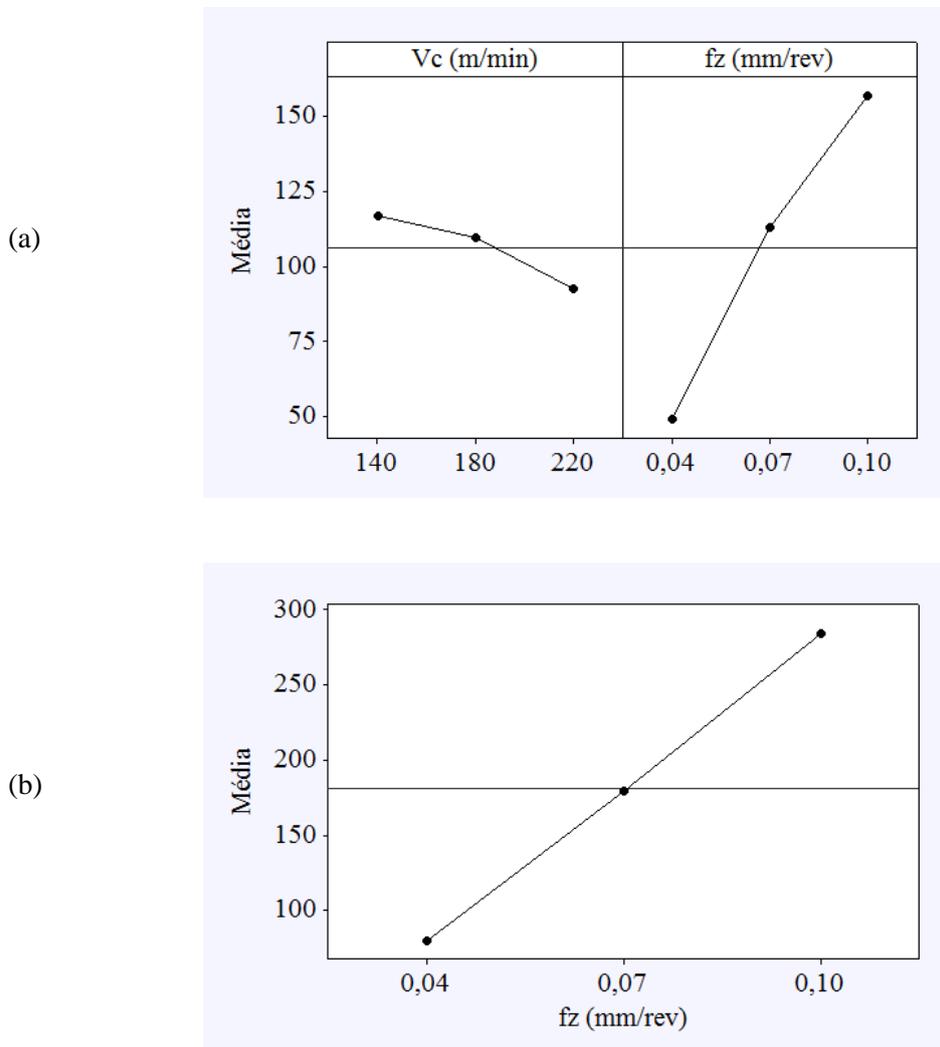


Figura 4.6: Gráfico de efeito principal para (a) força de avanço F_x e (b) força radial F_y para serra MD VN

Quando se aumenta a velocidade de corte, a força de avanço diminui. Como na serra cermet, isto se deve à elevação da temperatura de corte e redução do coeficiente de atrito. Com o aumento do avanço por dente, aumenta-se o valor das forças F_x e F_y , devido ao maior o volume de material removido.

Ainda para a serra circular MD VN, a interação entre os parâmetros de entrada influencia as forças de avanço e radial. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os gráficos de interações para a força de avanço e força radial, respectivamente.

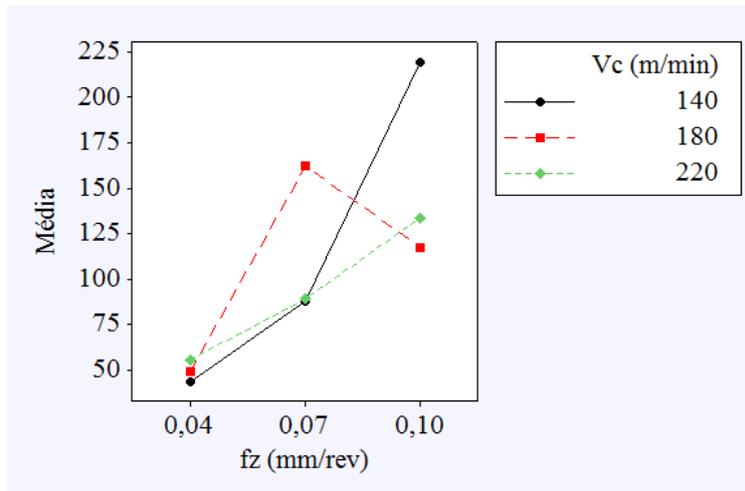


Figura 4.7: Gráfico de interação entre os resultados para a força de avanço para a serra MD VN

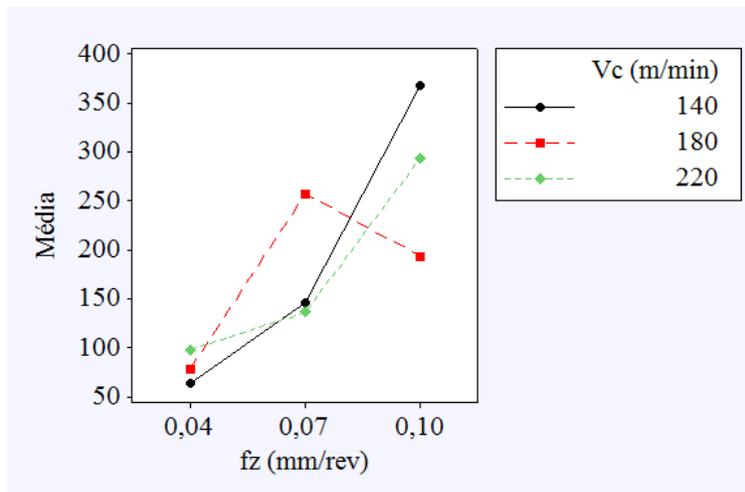


Figura 4.8: Gráfico de interação entre os resultados para a força radial para a serra MD VN

As Figura 4.7 e 4.8 ilustram que para se obter o menor valor da força de avanço e radial é necessário que a velocidade de corte e o avanço por dente sejam os menores possíveis. Isto sugere que o avanço é o fator mais influente em se tratando de F_x e F_y .

Em seguida serão feitas comparações entre os valores de força obtidos pelas serras. Para isto serão utilizadas duas ferramentas estatísticas: o gráfico *box plot*, que é uma comparação visual entre os valores apresentados pelas diferentes serras e o gráfico de intervalo, que plota a média de cada serra e constrói um intervalo com 95% de confiança, por meio do qual é possível concluir se os valores médios apresentados pelas serras podem ser considerados estatisticamente diferentes ou não. A Figura 4.9 mostra o gráfico *box plot* para as forças de avanço (F_x) obtidas pelas três serras.

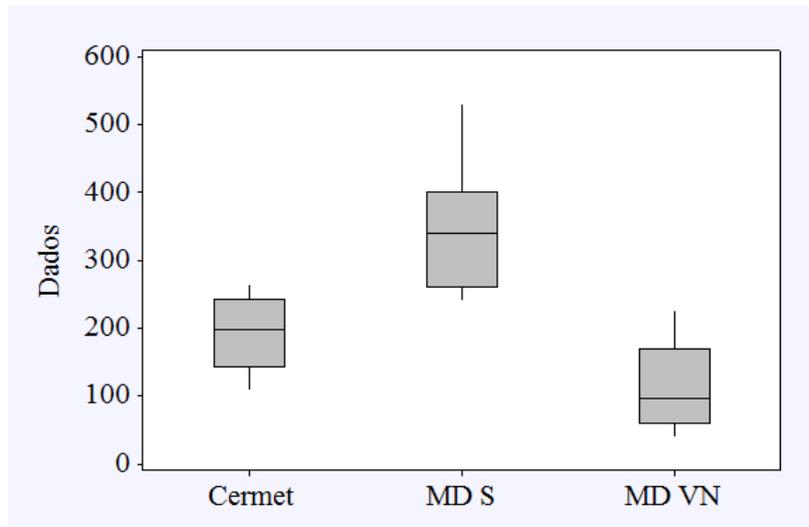


Figura 4.9: Gráfico *box plot* para forças de avanço (F_x)

Observa-se que a serra circular que possui maior dispersão dos dados é a MD S, seguida da MD VN e por último da cermet. Ao verificar a mediana da força de avanço, percebe-se que o maior valor é a serra MD S. Já o valor intermediário de mediana é da serra cermet. Finalmente, o menor valor é o da serra circular MD VN. A Figura 4.10 mostra o gráfico do valor médio da força de avanço e o intervalo de confiança a 95%.

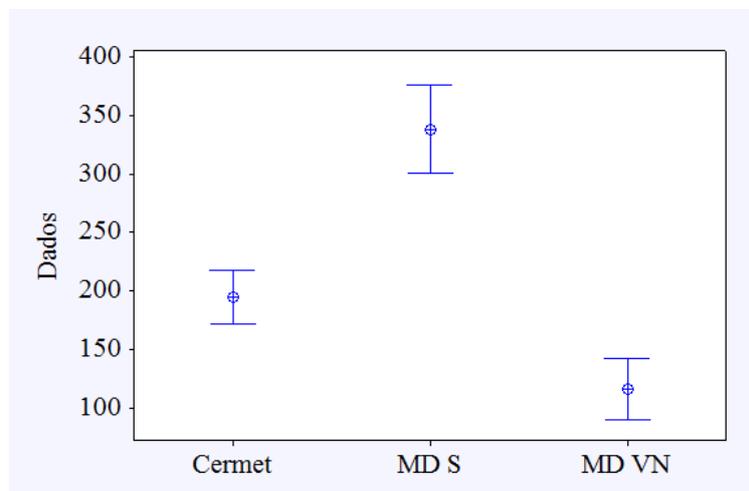


Figura 4.10: Gráfico do valor médio da força de avanço e o intervalo de confiança a 95%

A serra cermet possui um valor médio de força de avanço de 194,28 N com um intervalo de confiança de 171,33 a 217,24 N. Já para a serra circular MD S o valor médio de F_x é 338,41 N com intervalo de confiança de 300,93 a 375,89 N. Por fim, o valor médio da força de avanço para a serra circular MD VN é 115,69 N (intervalo de confiança de 89,17 N a 142,21 N). Como o intervalo de confiança para as diferentes

serras não se sobrepõem é possível perceber que há diferenças estatisticamente significativas entre o valor médio da força de avanço para as três serras circulares.

As serras MD S e cermet possuem a geometria sulco alternado e a MD VN a geometria pré-cortador cortador. Isto indica que a geometria sulco alternado exigem uma força de avanço maior do que a pré-cortador cortador. De acordo com Klocke & König (2007), um dente com geometria sulco alternado consegue remover o mesmo volume de material que os dentes pré-cortador e cortado juntos. Porém este fato acarreta a necessidade de maior potência para realizar o corte, logo é necessário uma maior força de avanço.

Observa-se também que a média da força de avanço da MD S foi maior do que a da cermet. Uma hipótese para este fenômeno é a diferença de material dos insertos, pois a serra circular MD S possui insertos de metal duro e a outra insertos de cermet, os quais possuem maior dureza, maior solubilidade em ferro e menor condutividade térmica do que o metal duro (conforme indica Tabela 2.4), propriedades que podem contribuir para a redução da força de avanço. Outra hipótese pode ser o fato da serra cermet possuir quebra cavaco na superfície de saída, o que auxilia o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída do inserto.

Comparando a serra circular MD S e MD VN nota-se que as duas possuem o mesmo inserto (metal duro classe P40), entretanto com geometrias diferentes. Como a geometria sulco alternado consegue remover o mesmo volume de material que os dentes pré-cortador e cortado juntos, a força média proporcionada pela serra MD S foi cerca de três vezes maior do que da serra circular MD VN.

A seguir será realizada a mesma análise para a força radial (F_y): a Figura 4.11 apresenta o gráfico *box plot* e a Figura 4.12 mostra o gráfico de valores médios para um intervalo de confiança de 95%.

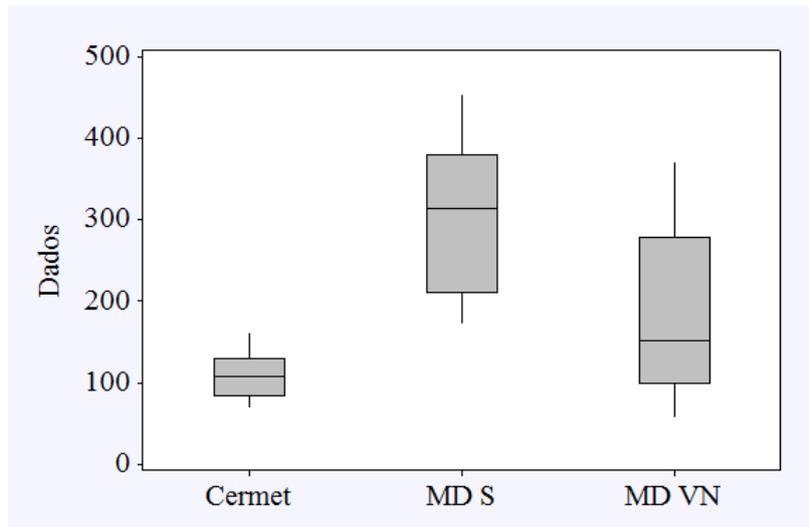


Figura 4.11: Gráfico *box plot* para força radial (F_y)

As serras circulares MD S e MD VN apresentam grande variação de F_y . Como na força de avanço, a mediana da força radial, é maior para serra MD S. Entretanto, o valor intermediário da mediana é a serra circular MD VN e o menor valor é da serra circular cermet.

Ao comparar o valor da força de avanço e força radial para cada serra, observa-se que o valor de F_x é maior que F_y para as serras cermet e MD S e que ocorre um comportamento exatamente ao contrário para a serra MD VN. Isto tem novamente como explicação a geometria das serras. Para a força de avanço, o valor de F_x é menor para a geometria pré-cortador e cortador devido ao fato de dividir para dois dentes a quantidade de cavaco a ser removido. Entretanto, para a força radial, um giro da serra com geometria sulco alternado remove o dobro de material se comparado com um giro com a geometria pré-cortador e cortador, então para remover o mesmo volume de material que a geometria sulco alternado, a geometria pré-cortador e cortador requer um valor mais alto de F_y .

A Figura 4.12 mostra que a serra cermet possui menor valor médio de força radial (107,27 N) com um intervalo de confiança de 95,00 a 119,54 N. No caso da serra MD S, o valor médio é 301,36 N (intervalo de confiança de 260,85 a 341,88 N) e o valor médio da força radial para a serra circular MD VN é 190,68 N com intervalo de confiança de 144,15 a 237,21 N. Observa-se que as três serras possuem valores estatisticamente distintos, pois não há sobreposição entre os intervalos de confiança.

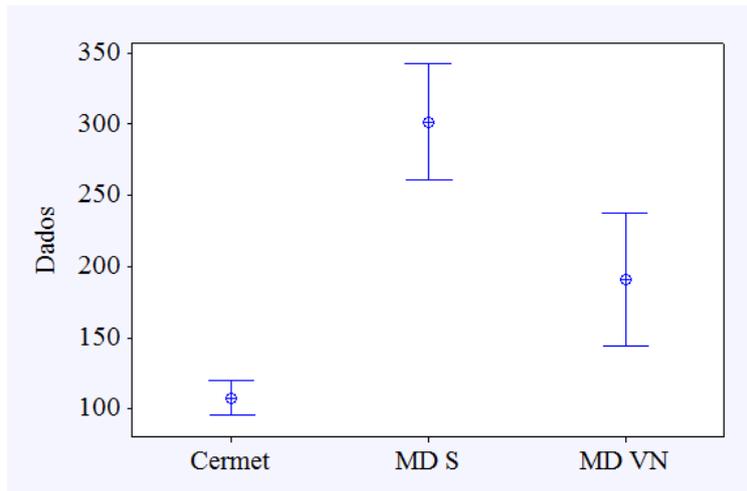


Figura 4.12: Gráfico do valor médio da força radial e o intervalo de confiança a 95%

O menor valor médio da força radial para serra circular cermet pode ser atribuído às propriedades citadas anteriormente.

Percebe-se também que a diferença entre as serras MD S e MD VN se dá pela diferença de geometria, pois as duas serras são do mesmo material. Novamente, para remover o mesmo volume de material que de um dente da geometria sulco alternado, são necessários dois dentes da geometria pré-cortador e cortador (em média a força radial da MD S foi 1,5 vezes maior do que a MD VN).

Por fim, será realizada a mesma análise para a força axial (F_z). O gráfico *box plot* é mostrado na Figura 4.13 e o gráfico de valores médios na Figura 4.14.

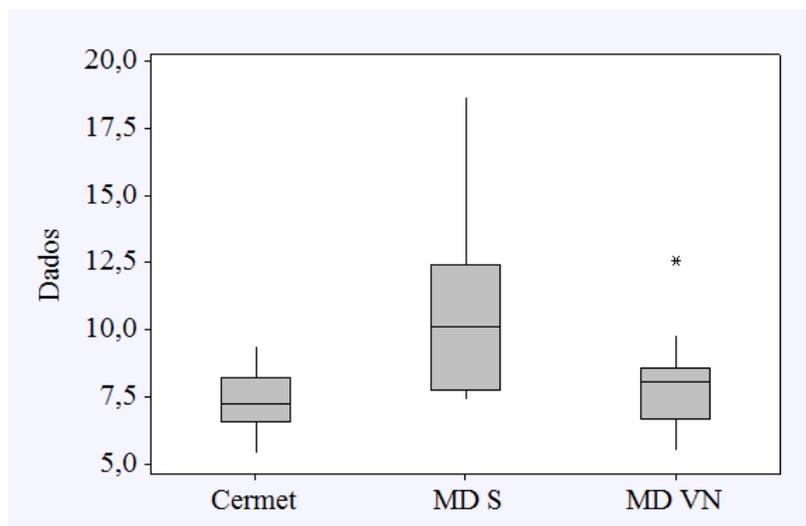


Figura 4.13: Gráfico *box plot* para força axial (F_z)

Novamente, a serra MD S apresentou maior dispersão dos dados. Como na força de avanço e radial, ao verificar a mediana da força axial, percebe-se o maior valor é a

serra MD S. Entretanto o valor intermediário da mediana é a serra circular MD VN e o menor valor é da serra cermet.

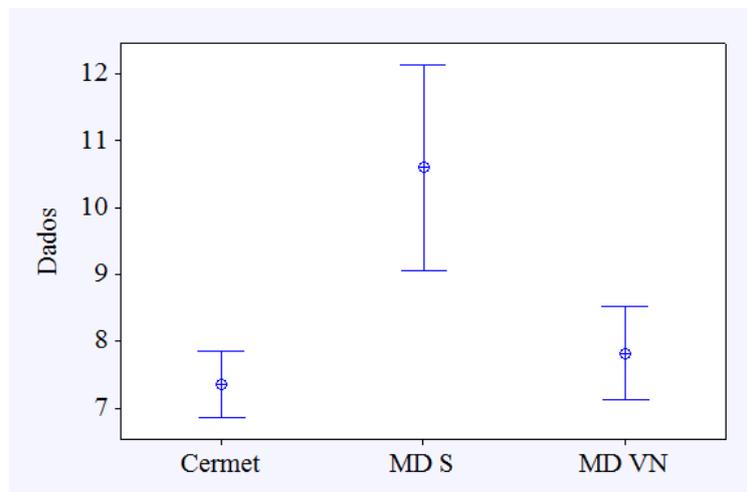


Figura 4.14: Gráfico do valor médio da força axial e o intervalo de confiança a 95%

A serra cermet possui menor valor médio, seguida pela serra MD VN e MD S (7,34 N, 7,81 N e 10,60 N, respectivamente). Com relação ao intervalo de confiança, ele é de 6,84 a 7,84 N para a serra cermet, de 7,11 a 8,52 N para MD VN e de 9,05 a 12,15 N para MD S. O valor médio da força axial da serra circular MD S é estatisticamente diferente das outras duas, enquanto as serras cermet e MD VN não têm diferença significativa entre si (o intervalo de confiança se sobrepõe). Observa-se que além de v_c , f_z e $v_c * f_z$, não influenciarem no valor de F_z , este valor também não sofre influência da geometria do inserto nem do material do inserto.

Comparando as três serras, observa-se que a serra MD VN apresentou os menores valores das forças de avanço e radial, seguida da serra cermet e por fim da serra MD S. Conclui-se que mesmo o material do inserto sendo um fator de grande relevância para F_x e F_y , o fator mais importante é a sua geometria, ou seja, a geometria pré-cortador e cortador gera menores forças de avanço e radial em comparação com a geometria de sulco alternado.

4.2. Rugosidade de Superfícies Serradas

Após a realização dos testes, os corpos de prova foram cortados, em seguida foi realizada a medição dos seguintes parâmetros de rugosidade: desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q), altura total do perfil (R_t) e altura máxima do perfil (R_z). Estas medições foram realizadas na parede lateral da fenda, pois considerando uma

situação real de serramento, o material é dividido em duas partes, sendo esta a superfície de maior importância. Os dados referentes a cada teste encontram-se no Apêndice I.

De forma análoga às forças de corte, também será verificada a adequação do modelo para cada lâmina de serra. Foram plotados, para parâmetro de rugosidade R_t e serra cermet, os seguintes gráficos (Figura 4.15): probabilidade normal dos resíduos, histograma, resíduos versus valor ajustado e resíduo versus tempo.

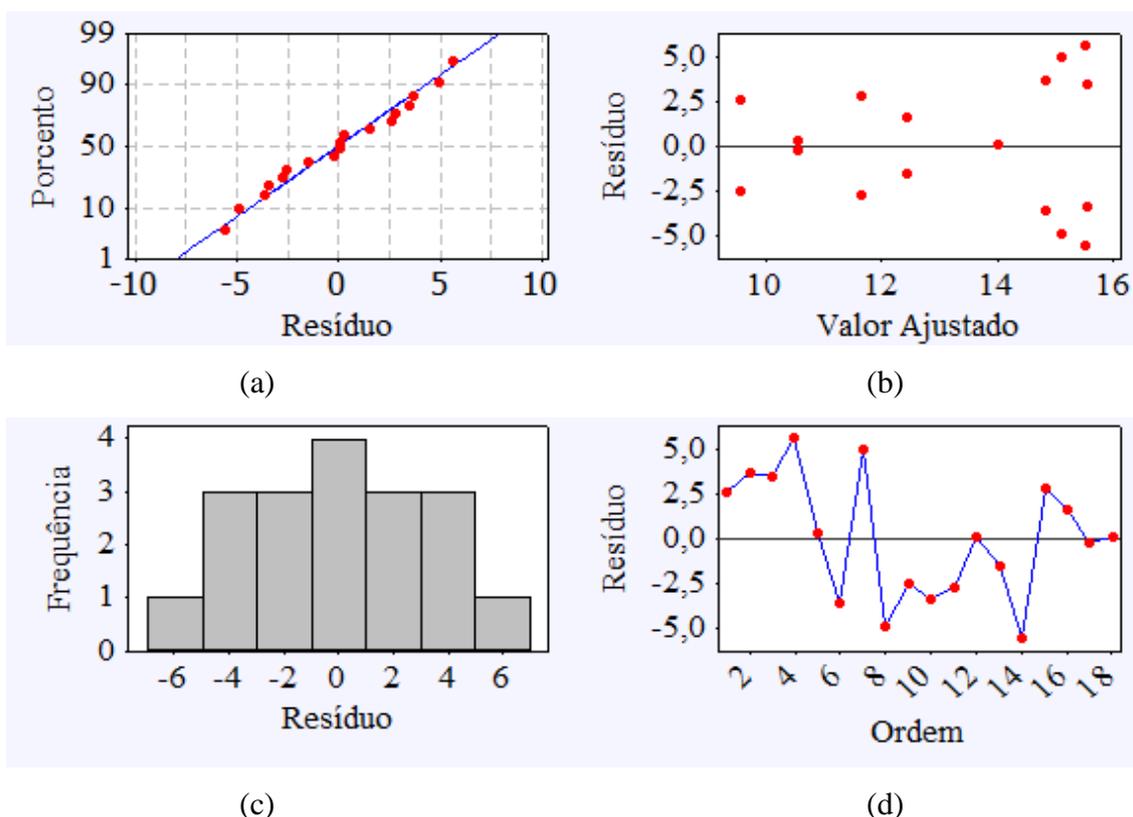


Figura 4.15: Gráficos para análise residual de R_t para serra cermet: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus tempo

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.15(a), indica que a distribuição dos resíduos está próxima de uma reta, logo os mesmos seguem a distribuição normal. A Figura 4.15(b) mostra o gráfico dos resíduos versus valor ajustado e indica que não existe tendência dos resíduos em função do valor ajustado. O histograma da Figura 4.15(c) confirma a suposição anteriormente descrita e com média igual a zero. Por fim, o gráfico de resíduos versus tempo da Figura 4.15(d) mostra que os resíduos são independentes da ordem da coleta.

Comprovada a adequação do modelo, foi realizada a análise de variância para verificar a influência dos parâmetros de entrada sobre a rugosidade com um nível significância a 5%. Foi verificada a influência de cada parâmetro separadamente e sua

interação. O resultado completo da análise encontra-se no Apêndice II. As Tabela 4.4 a 4.6 mostram de forma resumida a influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade gerada pelas serras cermet, MD S e MD VN, respectivamente.

Tabela 4.4: Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para as serras cermet

Rugosidade	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
R_a	-	-	-
R_q	-	-	-
R_t	-	-	-
R_z	-	-	-

Tabela 4.5: Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para as serras MD S

Rugosidade	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
R_a	-	-	-
R_q	-	-	-
R_t	-	-	-
R_z	-	-	-

Tabela 4.6: Influência dos parâmetros de entrada sobre rugosidade para a serra MD VN

Rugosidade	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
R_a	X	X	X
R_q	X	X	X
R_t	X	X	X
R_z	X	X	X

Tanto para a serra cermet quanto para a MD S, nenhum parâmetro de rugosidade foi influenciado pelos parâmetros de entrada nem pela combinação destes. Entretanto, para a serra MD VN todos os parâmetros de entrada e a combinação entre eles influenciaram todos os parâmetros de rugosidade. A serra cermet e MD S possuem a geometria sulco alternado. Já a circular MD VN possui a geometria pré-cortador cortador, que promove a quebra do cavaco por meio da diferença de altura entre os dois tipos de dente, ou seja, o dente pré-cortador é mais alto em relação ao cortador. Com

isto, quando o primeiro dente entra no material remove um terço do volume do material (mais especificamente no centro da fenda) deixando os outros dois terços (nas laterais da fenda) a cargo do próximo dente. Já na geometria sulco alternado, um único dente remove o volume de cavaco equivalente aos dentes pré-cortador e cortador juntos. Como a medição da rugosidade ocorreu na parede da fenda, observa-se que o processo da quebra do cavaco interferiu de maneira significativa sobre R_a , R_q , R_t e R_z .

Como a serra MD VN foi a única em que os parâmetros de corte e suas interações afetaram a rugosidade, apenas para ela serão apresentados os gráficos das médias.

A Figura 4.16 apresenta o gráfico de efeito principal para R_a . Nota-se que R_a reduz com o aumento da velocidade de corte. Uma explicação para este comportamento é a elevação da temperatura, que provoca a redução da resistência ao cisalhamento da peça, promovendo a redução das forças de corte e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento. Além disso, R_a é mínimo para $f_z = 0,04$ mm/rev porque a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a diminuir com a redução do avanço. Entretanto, maior rugosidade está associada ao avanço ($f_z=0,07$ mm/rev) intermediário e não ao avanço máximo.

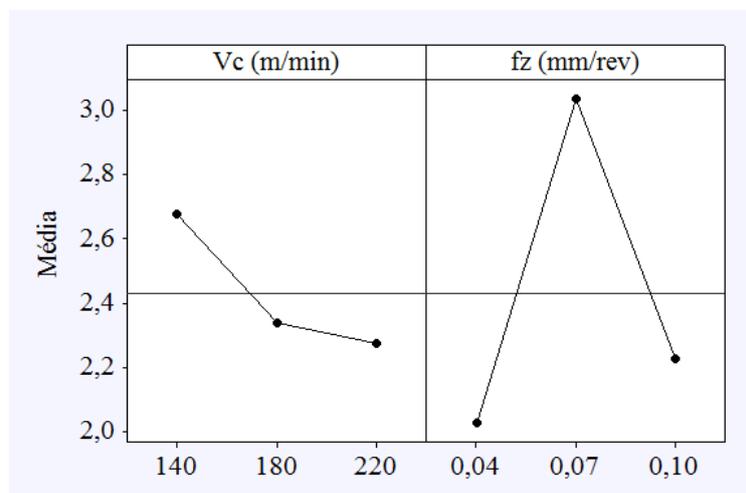


Figura 4.16: Gráfico de efeito principal para R_a (serra MD VN)

Com relação ao desvio médio quadrático (R_q), altura total do perfil (R_t) e altura máxima do perfil (R_z), as Figuras 4.17 a 4.19 mostram, respectivamente, as mesmas tendências registradas para R_a .

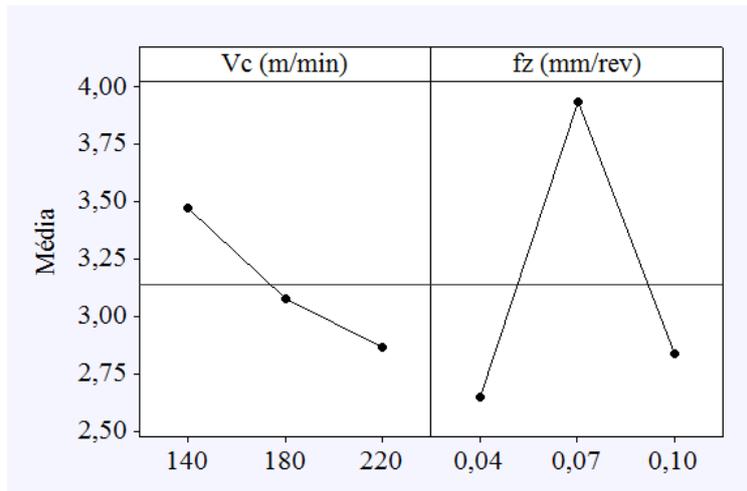


Figura 4.17: Gráfico de efeito principal para R_q (serra MD VN)

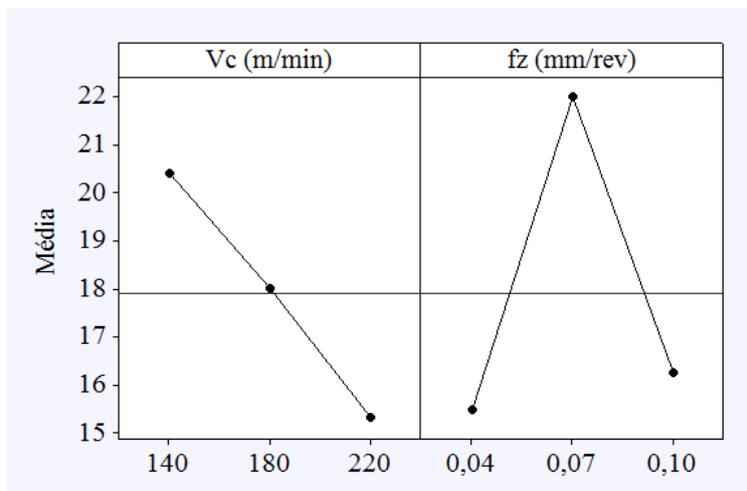


Figura 4.18: Gráfico de efeito principal para R_t (serra MD VN)

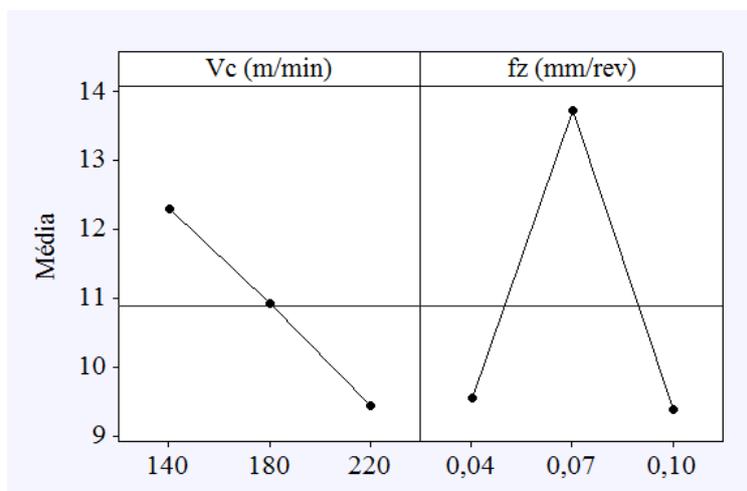


Figura 4.19: Gráfico de efeito principal para R_z (serra MD VN)

Para a serra circular MD VN, a interação entre os parâmetros de entrada afetou os quatro parâmetros de rugosidade. As Figuras 4.20 a 4.23 ilustram os gráficos de interação para R_a , R_q , R_t e R_z , respectivamente. Nos quatro casos a mesma tendência é observada, isto é, menores rugosidades são obtidas pela combinação de alta velocidade de corte e menor avanço.

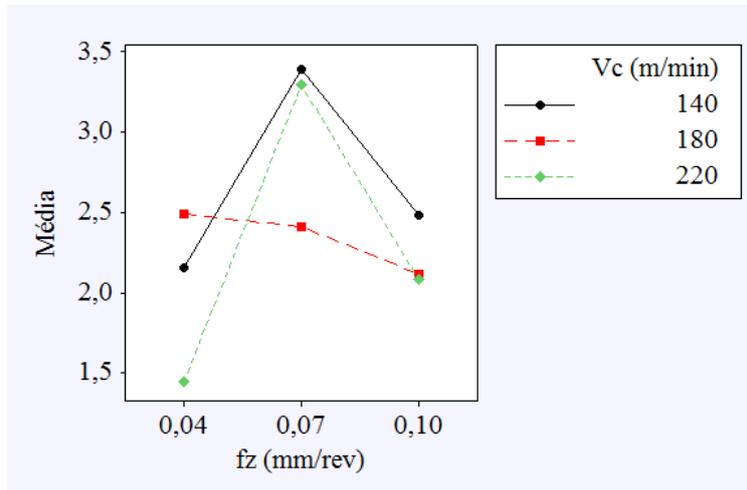


Figura 4.20: Gráfico de interação rugosidade R_a (serra MD VN)

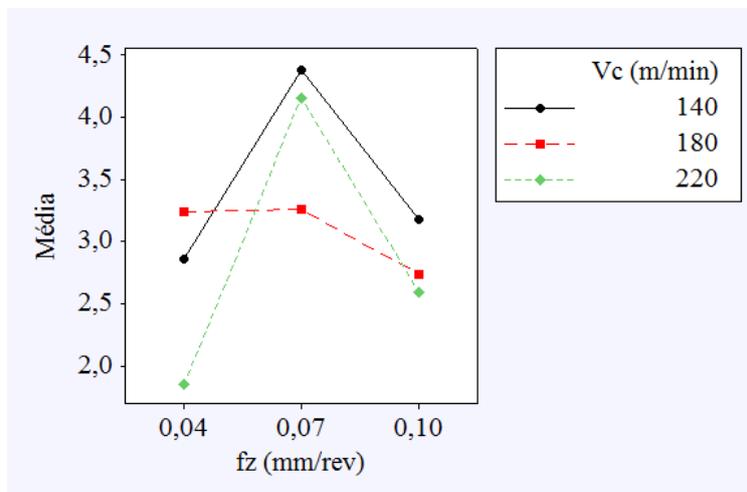


Figura 4.21: Gráfico de interação rugosidade R_q (serra MD VN)

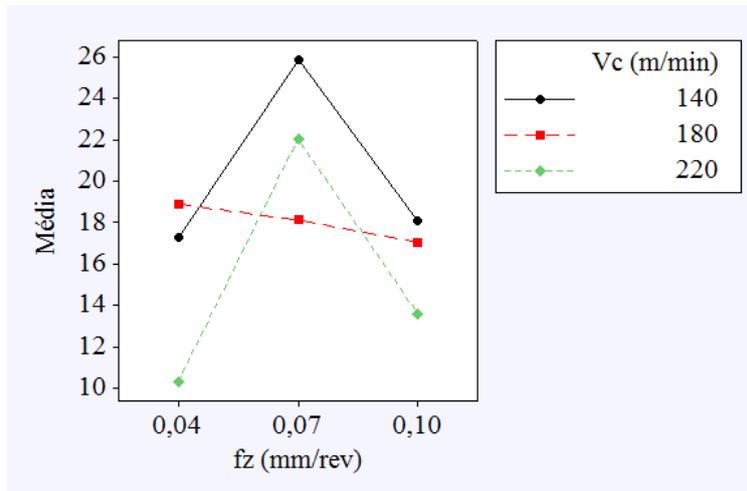


Figura 4.22: Gráfico de interação rugosidade R_t (serra MD VN)

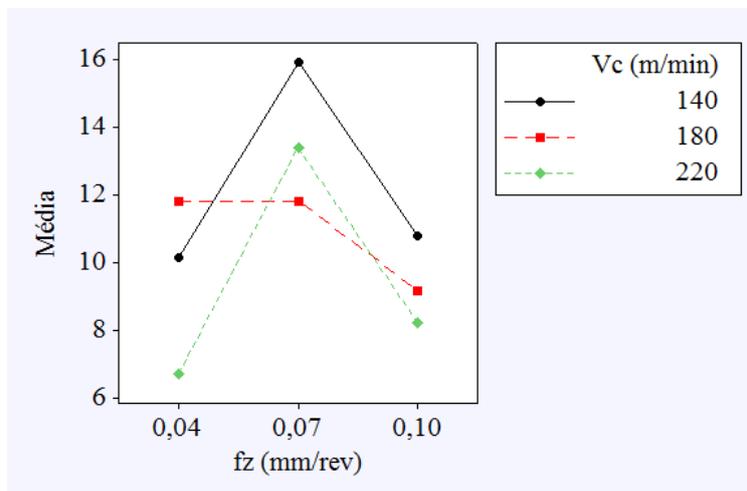


Figura 4.23: Gráfico de interação rugosidade R_z (serra MD VN)

A seguir serão feitas as comparações entre as serras por meio dos gráficos *box plot* e de valores médios para um intervalo de confiança a 95%. A Figura 4.24 mostra o gráfico *box plot* para R_a . Observa-se que a serra circular que possui maior variação dos dados é a MD S. *Outliers* apareceram nas serras cermet e MD VN. Ao verificar a mediana do parâmetro de rugosidade R_a , percebe-se que a serra MD VN apresenta maior valor, enquanto o valor intermediário da mediana é para a serra MD S e o menor valor é para a serra cermet.

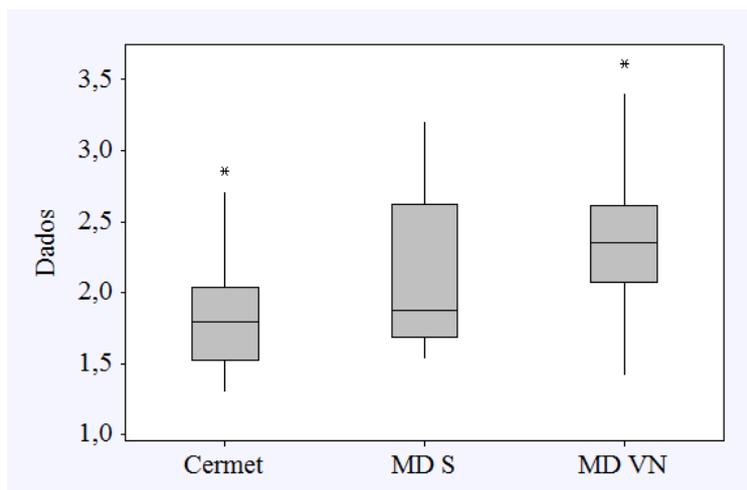


Figura 4.24: Gráfico *box plot* para comparação da rugosidade R_a

A Figura 4.25 mostra o gráfico de valores médios R_a . A serra cermet possui menor valor médio ($R_a=1,83 \mu\text{m}$) com um intervalo de confiança de 1,63 a 2,03 μm . Já a serra circular MD S apresenta valor médio de $R_a=2,10 \mu\text{m}$ com intervalo de confiança de 1,87 a 2,33 μm e o valor médio de R_a para a serra circular MD VN é 2,40 μm (intervalo de confiança de 2,13 a 2,66 μm). Com isto, conclui-se que não há diferenças significativas entre a serra MD S e as demais, pois os intervalos de confiança entre elas se sobrepõem. Entretanto existem diferenças entre a serra cermet e MD VN. Um fator responsável por esta diferença é o material do inserto: o cermet é mais resistente ao desgaste em relação ao metal duro por possuir dureza superior (isto deve ao fato do TiC tem maior dureza em relação ao WC, possibilitando sua utilização sob velocidades de corte mais altas), menor solubilidade no ferro a temperaturas elevadas (o que inibe a dissolução do TiC reduzindo o desgaste por difusão) e alta temperatura de oxidação. Por consequência, o cermet suporta maiores velocidades de corte, permitindo a eliminação da aresta postiça de corte (APC). Além disso, a condutividade térmica do cermet ser menor que a do metal duro, portanto a temperatura na interface inserto/cavaco será maior para o cermet, o que reduz a possibilidade do aparecimento de aresta postiça de corte, contribuindo para a redução da rugosidade. Outro efeito é a diferença de geometria do inserto. A geometria pré-cortador e cortador (MD VN) quebra o cavaco por meio da diferença de altura, o que acarreta o aumento da rugosidade da parede da fenda em relação à geometria sulco alternado.

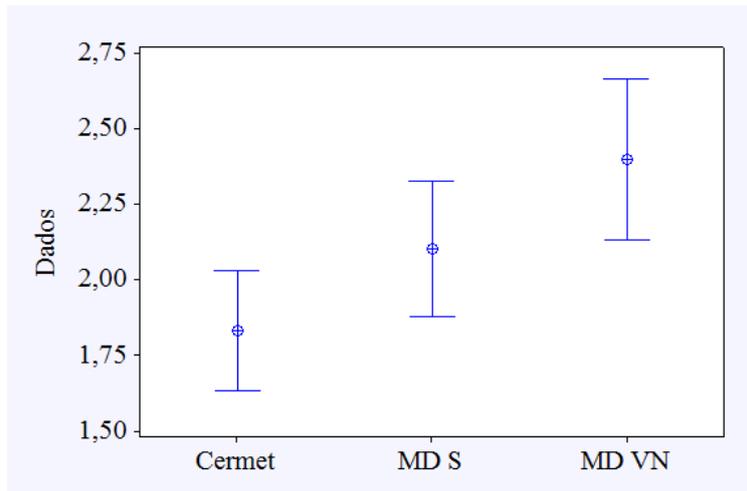


Figura 4.25: Gráfico do valor médio de R_a (intervalo de confiança a 95%)

As Figuras 4.26, 4.28 e 4.30 apresentam os gráficos *box plot* para comparação de R_q , R_t e R_z e as Figuras 4.27, 4.29 e 4.31 mostram os valores médios de R_q , R_t e R_z obtidos com as três serras. De maneira geral, o mesmo comportamento observado por R_a se repete para R_q , R_t e R_z .

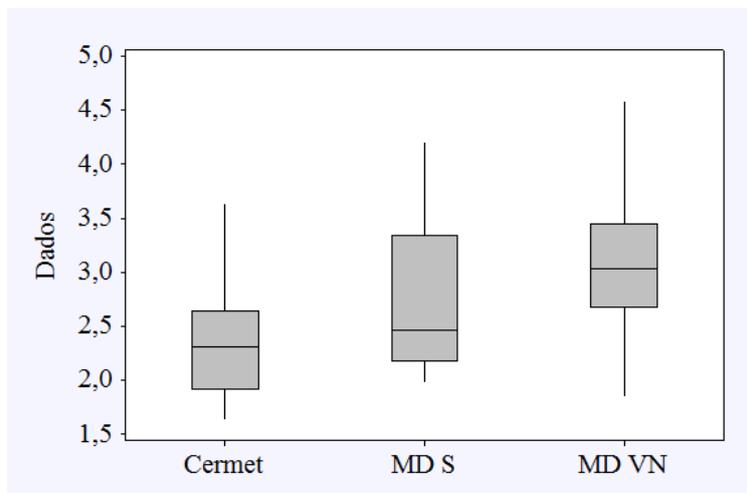


Figura 4.26: Gráfico *box plot* para comparação da rugosidade R_q

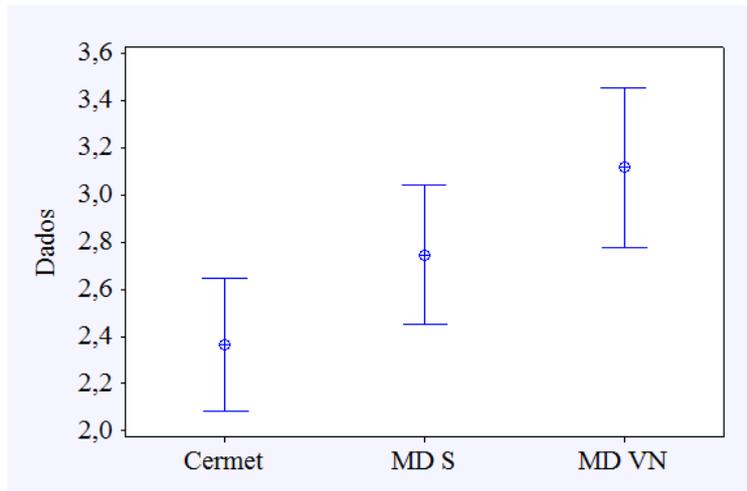


Figura 4.27: Gráfico do valor médio de R_q (intervalo de confiança a 95%)

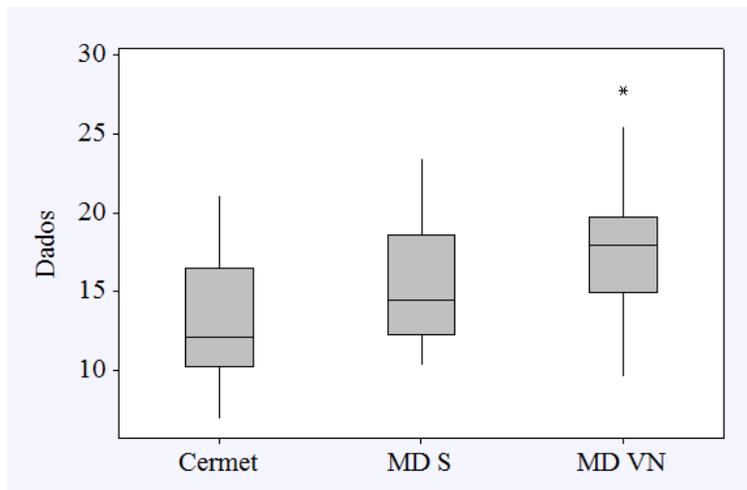


Figura 4.28: Gráfico *box plot* para comparação da rugosidade R_q

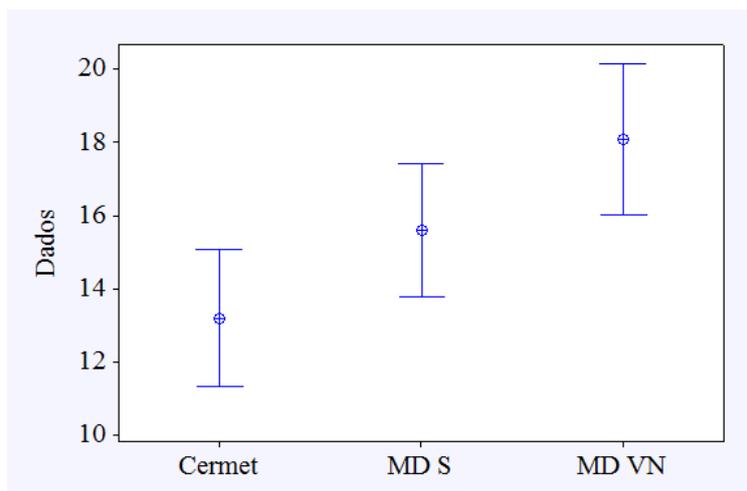


Figura 4.29: Gráfico do valor médio de R_i (intervalo de confiança a 95%)

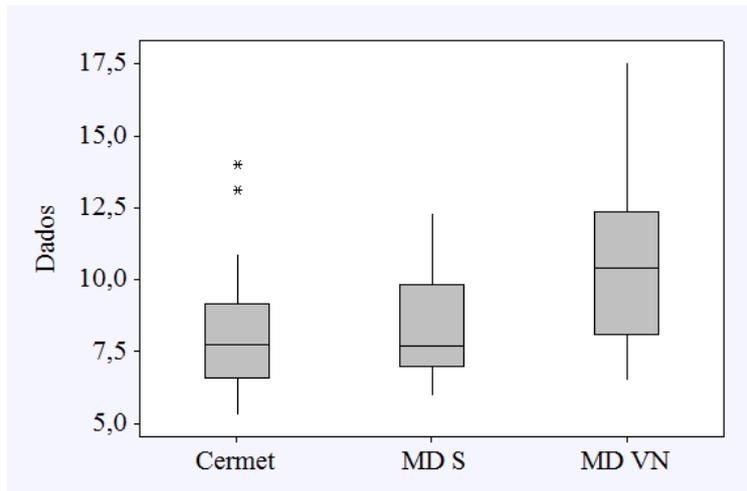


Figura 4.30: Gráfico *box plot* para comparação da rugosidade R_z

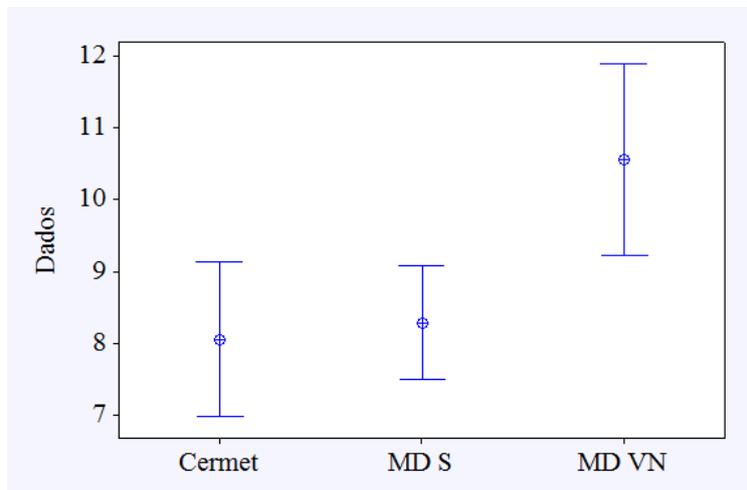


Figura 4.31: Gráfico do valor médio de R_z (intervalo de confiança a 95%)

Conclui-se que a serra que apresentou menor valor de rugosidade foi a serra cermet e o maior foi a serra MD VN.

4.3. Largura da Fenda

Agora serão apresentados os resultados referentes à largura da fenda. Os dados referentes a cada teste encontram-se no Apêndice I. Como nos parâmetros anteriores, inicialmente será verificada a adequação do modelo (Figura 4.32).

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.32(a), indica que os resíduos mesmos seguem uma distribuição normal. A Figura 4.32(b) mostra o gráfico dos resíduos versus valor ajustado onde indica uma tendência dos resíduos estarem com o valor 2,13 mm. O histograma da Figura 4.32(c) informa que a média da distribuição normal não é igual a zero e o gráfico de resíduos versus tempo da Figura 4.32(d) indica

que os resíduos são independentes no tempo. Mesmo com o modelo não atendendo a todas as suposições, foi considerado satisfatório.

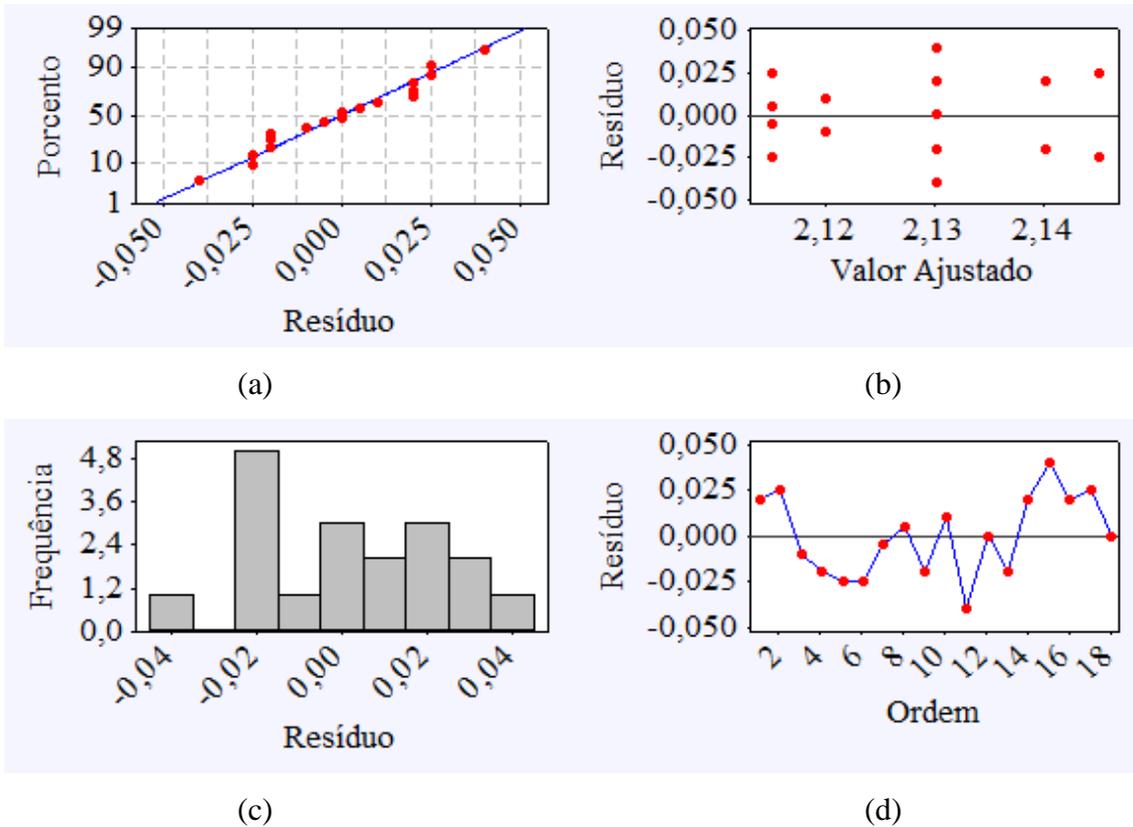


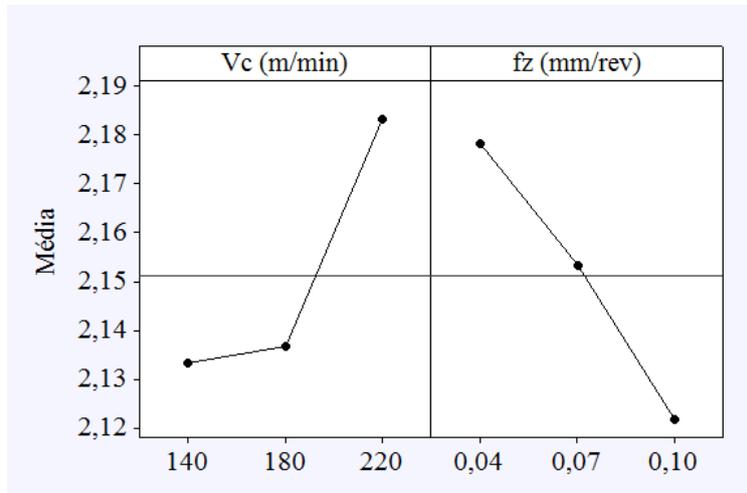
Figura 4.32: Gráficos de análise residual para largura da fenda (serra cermet)

A Tabela 4.7 mostra o resultado da análise de variância (o resultado completo encontra-se no Apêndice II).

Tabela 4.7: Influência dos parâmetros de entrada sobre o parâmetro de saída

Serras	Parâmetros de entrada		
	v_c	f_z	$v_c * f_z$
Cermet	-	-	-
MD S	X	X	X
MD VN	-	X	-

(a)



(b)

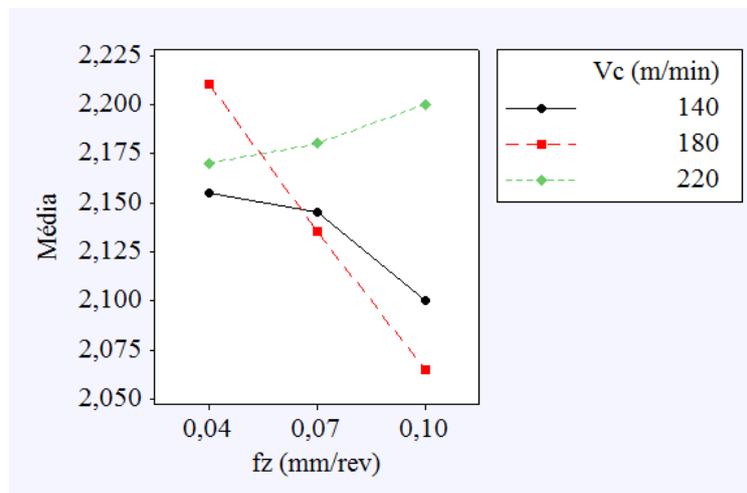


Figura 4.33: Gráfico de (a) efeitos principais e (b) interação para a largura da fenda (MD S)

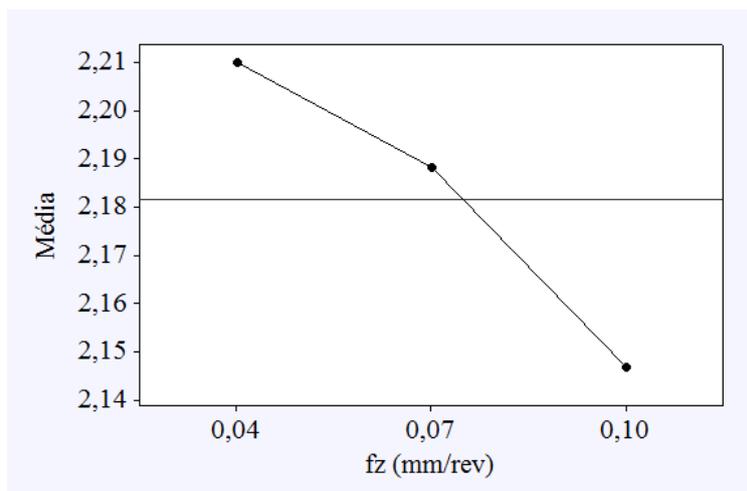


Figura 4.34: Gráfico de efeito principal para a largura da fenda da serra MD VN

Observa-se que para a serra cermet nenhum parâmetro de entrada nem a combinação entre ambos influenciam a largura da fenda. Porém, para a serra circular

MD S todos os parâmetros, incluindo a combinação entre eles, influenciam a largura da fenda. Já a serra circular MD VN, apenas o avanço por dente afeta a largura da fenda. Assim sendo, a Figura 4.33 mostra os gráficos de efeito principal e interação para as serras MD S e a Figura 4.34 ilustra a influência do avanço por dente sobre a largura da fenda para a serra MD VN

Para a serra MD S, o aumento da velocidade de corte provoca a elevação da largura da fenda. Isto pode ter ocorrido pelo fato de que quando se aumenta a velocidade de corte, pode provocar um aumento das vibrações do sistema máquina/ferramenta. As vibrações podem ser provocadas pelo desalinhamento do disco, causando o desalinhamento da aresta de corte. Tanto para a serra MD S quanto para a MD VN, quando se aumenta o avanço, reduz-se o valor da largura da fenda devido à maior a estabilidade da serra circular durante a operação.

Conforme mencionado anteriormente, para a serra MD S, o valor da largura da fenda é influenciado pela combinação dos parâmetros de entrada. Nota-se que para se obter o menor valor da largura de corte, é necessária a combinação do valor intermediário da velocidade de corte e maior avanço.

A Figura 4.35 mostra o gráfico *box plot* para comparação das larguras das fendas geradas pelas três serras (intervalo de confiança a 95%). Observa-se que as serra circular possui maior dispersão é a MD S.

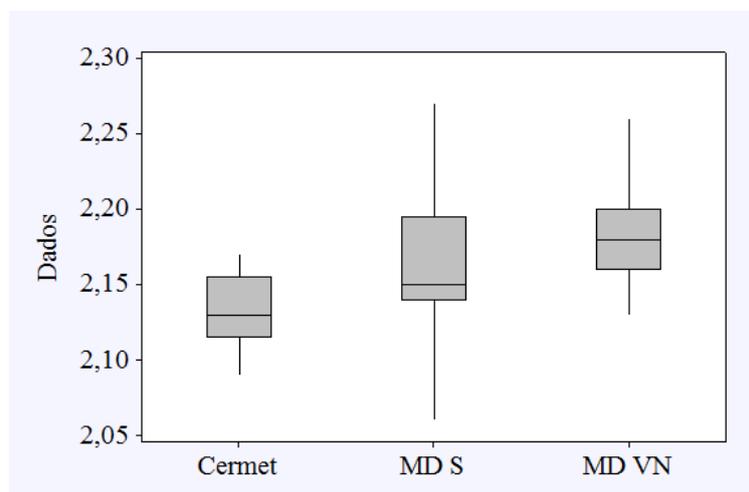


Figura 4.35: Gráfico *box plot* para comparação das larguras das fendas

A Figura 4.36 mostra o gráfico do valor médio da largura da fenda (intervalo de confiança a 95%). A serra cermet possui menor valor médio da largura da fenda de 2,13

mm com um intervalo de confiança de 2,12 a 2,14 mm, enquanto a serra MD S tem valor médio da largura da fenda é 2,15 mm com intervalo de confiança de 2,14 a 2,18 mm. Finalmente, o valor médio da largura da fenda para a serra MD VN é 2,18 mm (intervalo de confiança de 2,17 a 2,20 mm). Observa-se que não há diferença significativa entre o valor médio da serra MD S e as demais, entretanto, existem diferenças significativas entre a serra cermet e MD VN. O principal motivo deste efeito é geometria de sulco alternado da serra cermet, que gera um perfil quadrado no corpo de prova, pois não há diferença de altura entre os insertos. Com os resultados obtidos, conclui-se que a serra que gera menor largura de corte é a cermet e a maior é a MD VN.

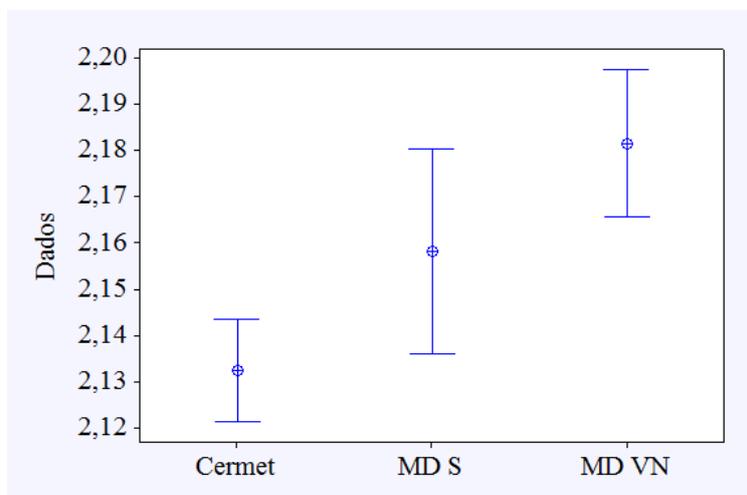


Figura 4.36: Gráfico do valor médio da largura da fenda (intervalo de confiança de 95%)

4.4 Otimização dos Parâmetros de Corte

Nesta parte do trabalho será realizada a otimização dos parâmetros de corte para cada serra circular. A otimização tem o intuito de determinar os parâmetros de corte que propiciem menores forças de avanço (F_x) e radial (F_y) e menor altura total do perfil (R_t).

As Figuras 4.37 a 4.39 mostram, respectivamente, os gráficos de otimização da velocidade de corte e avanço para as serras cermet, MD S e MD VN. No caso da serra cermet, os valores ótimos são $v_c=205,4545$ m/min e $f_z=0,0412$ mm/rev e resultou em um D ótimo composto de 0,7164. Segundo Kwon et al. (2008), o D composto representa a média geométrica dos valores individuais de “d”, que são as funções conveniência para cada parâmetro que se deseja otimizar. A função conveniência representa a otimização dos parâmetros de entrada por meio do desempenho de equilíbrio. Portanto, quanto mais próximo da unidade for o valor de D composto, indica que o desempenho dos componentes de resposta é mais aceitável. Para a serra MD S,

$v_c=195,7576$ m/min, $f_z=0,0721$ mm/rev e D ótimo composto de 0,68623. Finalmente, para a serra MD VN, $v_c=220$ m/min, $f_z=0,04$ mm/rev e D ótimo composto 0,89878.

Observa-se que tanto para a serra cermet quando para a serra MD VN, para se obter os menores valores de F_x , F_y e R_t são necessário altos valores da velocidade corte e baixo avanço. No caso da serra MD S, são necessários os valores intermediários dos parâmetros de corte para se conseguir valores reduzidos das forças de avanço e radial além de menores altura total do perfil.

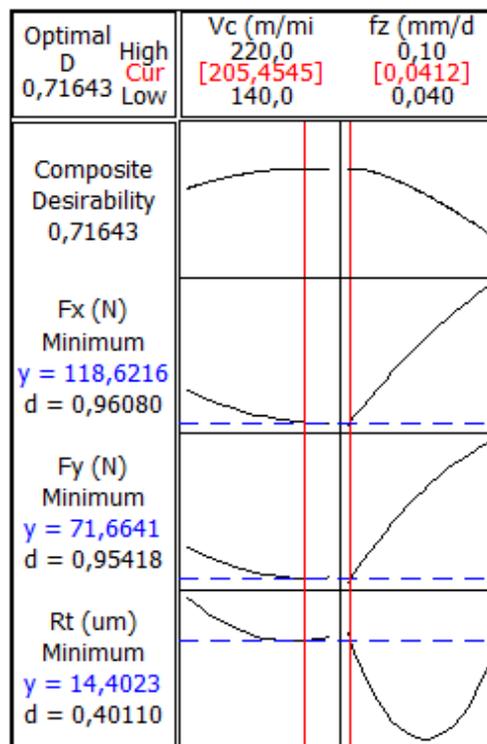


Figura 4.37: Otimização da v_c e f_z para a serra cermet

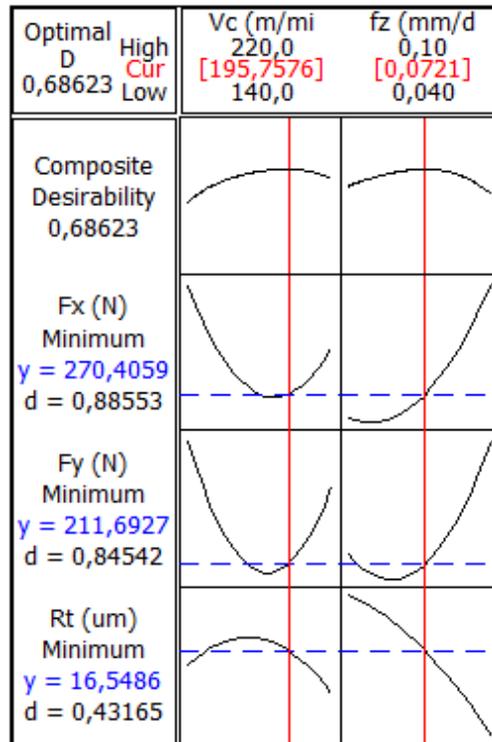


Figura 4.38: Otimização da v_c e f_z para a serra MD S

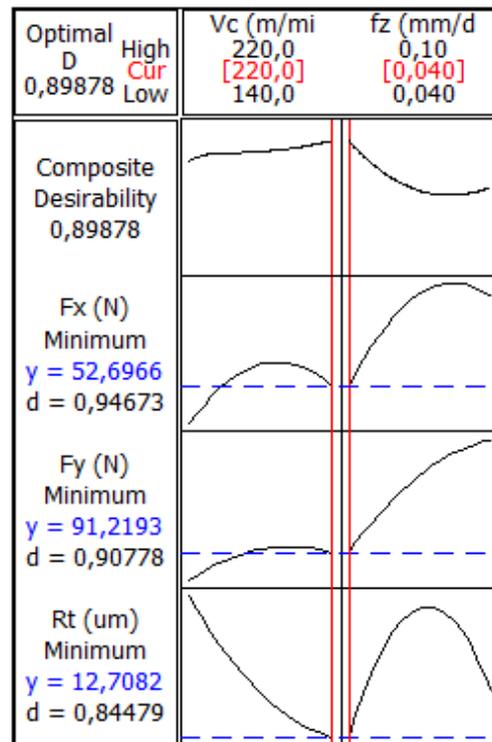


Figura 4.39: Otimização da v_c e f_z para a serra MD VN

Na indústria em geral, quando se realiza a otimização do processo de usinagem procura-se por parâmetros de corte que proporcionam o melhor acabamento da peça (dentro das especificações de cliente) aliado ao menor tempo de produção. Dentro deste

conceito, calculando-se os tempos de corte para um comprimento de 101,6 mm a partir dos parâmetros de corte otimizados, tem-se: 23 s para a serra cermet, 14 s para a serra MD S e 22 s para a serra MD VN. Conclui-se, portanto, que a serra que proporciona melhor otimização é a MD S, seguida da MD VN e cermet.

4.5. Formação de Rebarbas

Durante os testes foi observada a formação de rebarbas na saída das serras. Embora tenham sido observadas diferenças entre as rebarbas geradas por cada serra, não houve diferença significativa em função dos parâmetros de corte empregados. A Figura 4.40 ilustra as rebarbas aderidas ao final do corte das serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN, para uma velocidade de corte 140 m/min e avanço por dente de 0,07 mm/rev.

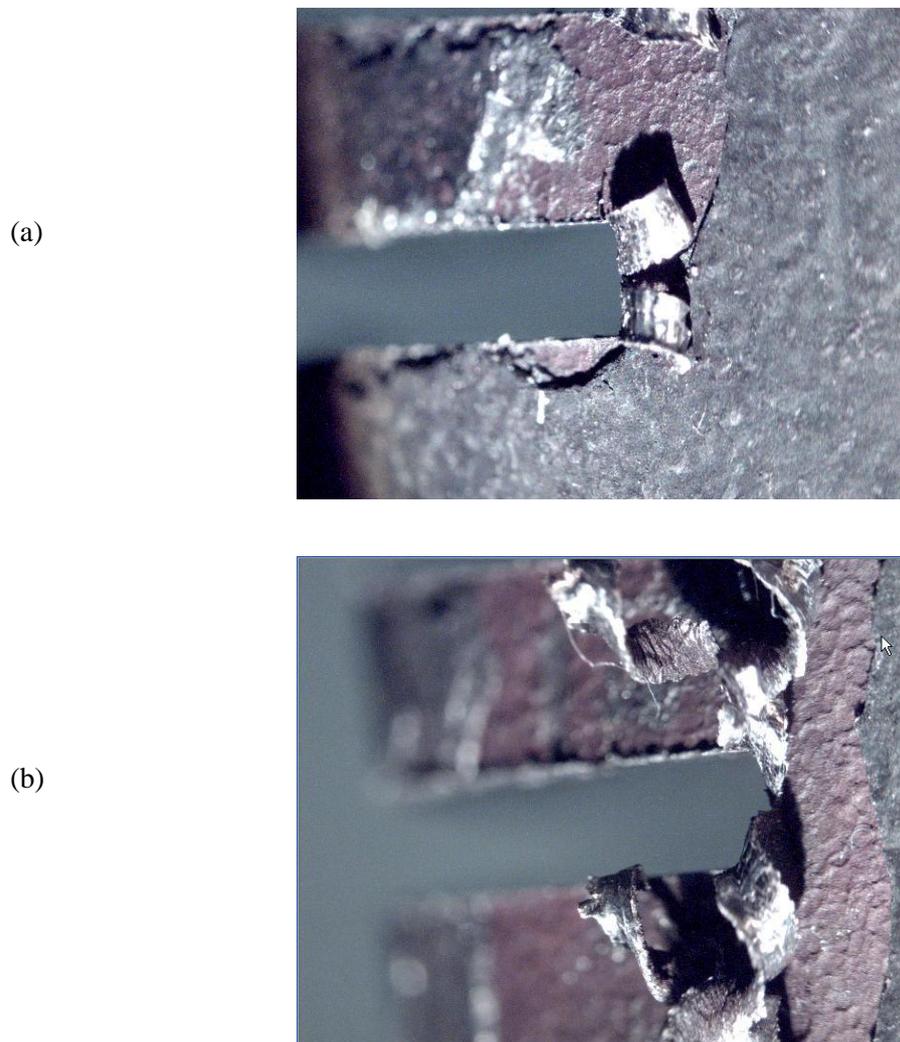


Figura 4.40: Rebarbas aderidas ao final do corte geradas pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN ($v_c = 140$ m/min e $f_z = 0,07$ mm/rev). Largura das fendas de aproximadamente 2 mm

(c)



Figura 4.40: Rebarbas aderidas ao final do corte geradas pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN ($v_c= 140$ m/min e $f_z= 0,07$ mm/rev). Largura das fendas de aproximadamente 2 mm (cont.)

A serra circular cermet (Figura 4.40a) apresenta rebarba bipartida de pequeno comprimento, em decorrência da geometria de sulco alternado e presença de quebra cavaco na superfície de saída, o qual guia o cavaco além de promover a sua quebra periódica.

Por sua vez, a serra MD S (Figura 4.40b) promove rebarbas bipartidas mais longas, pois possui sulcos alternados, entretanto como não existe quebra cavaco na superfície de saída.

Finalmente, a serra MD VN (Figura 4.40c), gera rebarbas curtas. Este tipo de geometria é destinado a cortes onde existem limitações na potência do equipamento, uma vez que durante o corte o cavaco é dividido em três partes. Há uma diferença de altura de aproximadamente 0,3 mm entre os dentes pré-cortador e cortador e o mecanismo de corte pode ser representado da seguinte forma: o dente pré-cortador remove apenas um terço do volume de cavaco (parte central), logo em seguida o dente cortador remove os dois terços remanescentes nas laterais da largura da fenda.

Conclui-se que a serra que gera a menor rebarba é a MD VN, seguida das serras cermet e MD S. Vale à pena destacar que para as três serras, as rebarbas existentes desprendiam-se facilmente dos corpos de prova.

4.6. Desgaste das Serras

Embora não tenham sido realizados testes de vida que permitissem avaliar os mecanismos de desgaste envolvidos, o fato de cada serra ter sido utilizada em um

número idêntico de ensaios permitiu uma avaliação qualitativa do desgaste apresentado por cada uma delas.

As fotografias das vistas das três serras antes do corte encontram-se no Apêndice I. A Figura 4.41 apresenta as vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal do inserto de cermet após a realização dos testes.

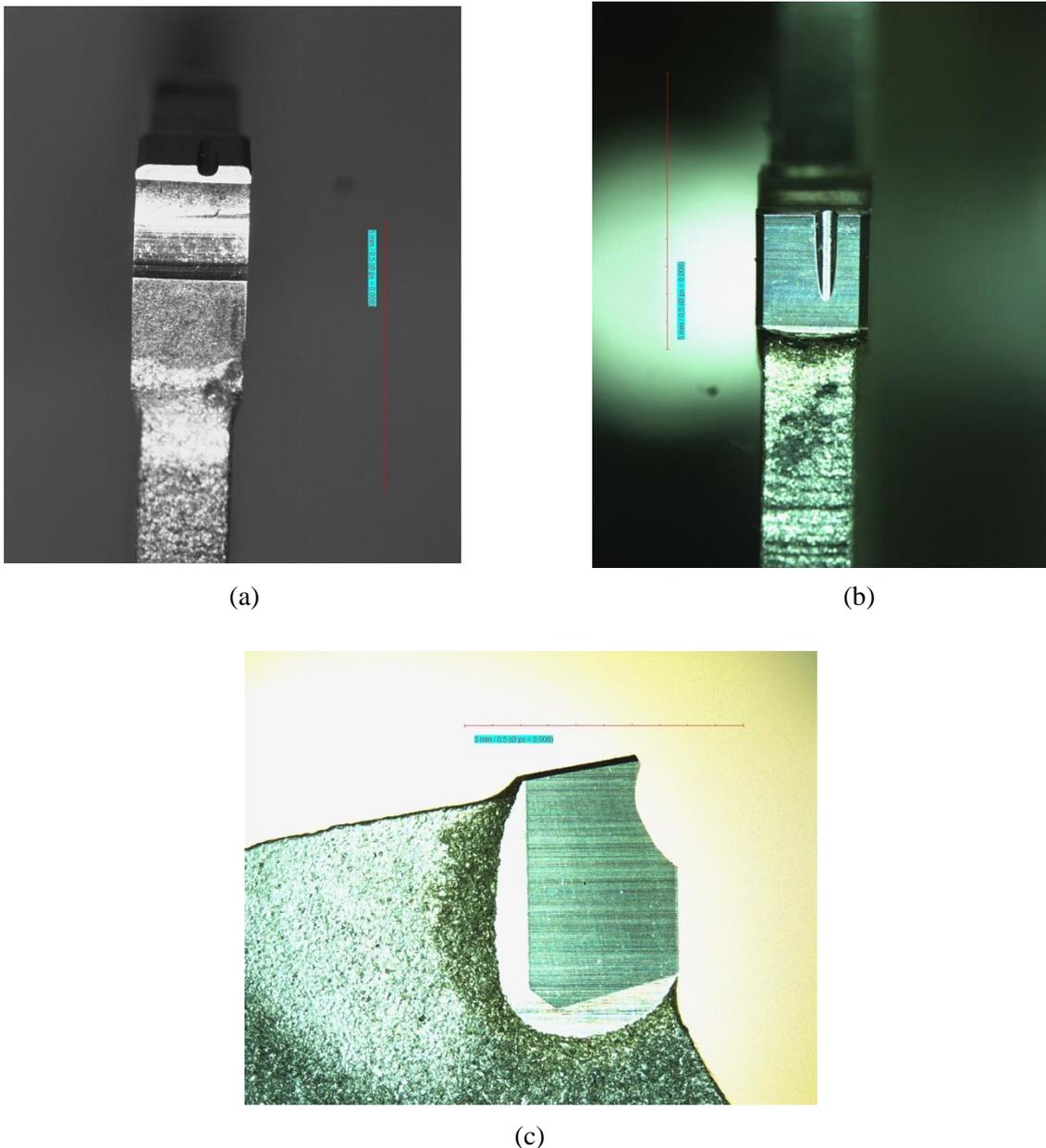


Figura 4.41: Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal do inserto cermet após a realização dos testes

Nota-se que o inserto de cermet praticamente não apresentou desgaste ao final dos testes. Conforme discutido anteriormente, isto pode ser explicado pelas propriedades deste material (alta resistência ao desgaste devido à dureza superior,

menor solubilidade no ferro a temperaturas elevadas e alta temperatura de oxidação). A Figura 4.42 mostra uma aplicação da superfície de folga principal, onde se observa o início do desgaste de flancos.

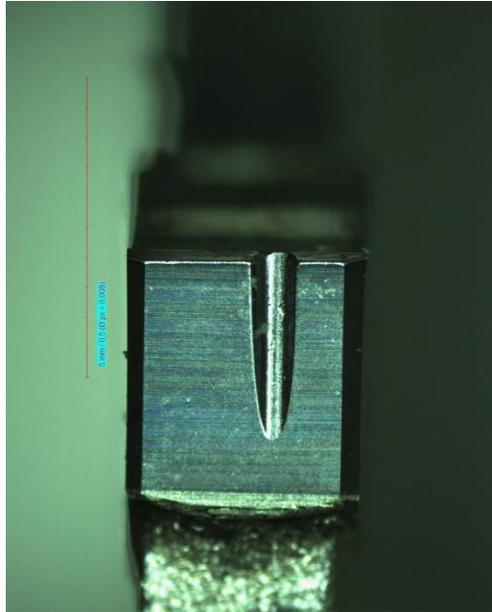
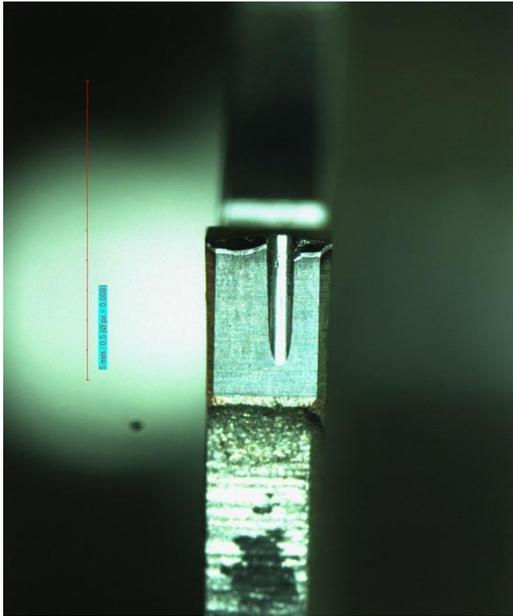
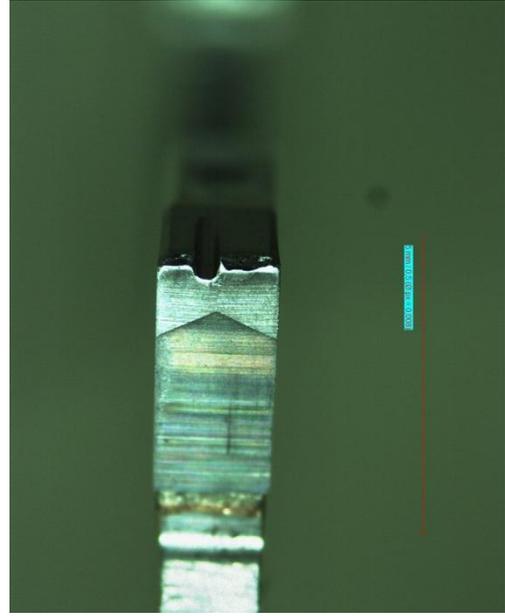


Figura 4.42: Detalhe da superfície de folga principal do inserto cermet após realização dos testes

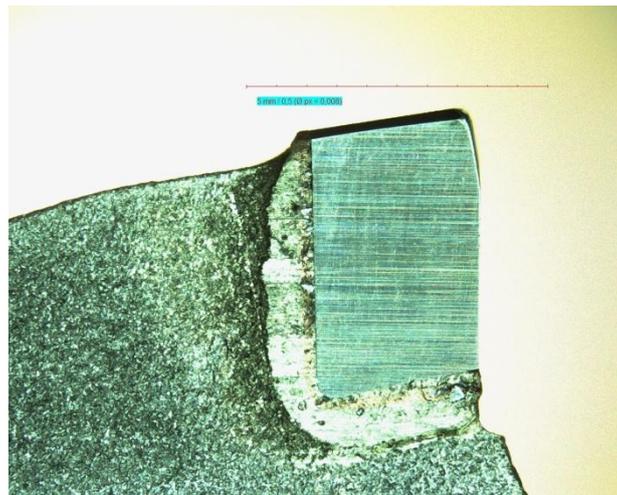
A Figura 4.43 apresenta as vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para um inserto da serra MD S após os testes. Diferentemente do caso anterior, estes insertos apresentam desgaste mais acentuado da aresta de corte. Observa-se nas Figuras 4.43(a) e 4.43(b) o lascamento da aresta de corte. O lascamento é um tipo de avaria da ferramenta. Representa uma falha acidental e prematura da ferramenta devido a solicitações térmicas ou mecânicas excessivas em sua cunha de corte. Normalmente ocorre quando a ferramenta entra bruscamente em contato com parte da máquina ferramenta ou peça. A Figura 4.44 apresenta uma aplicação da aresta de corte do inserto da serra MD S após os testes. Nesta imagem é possível visualizar o lascamento.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.43: Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto MD S

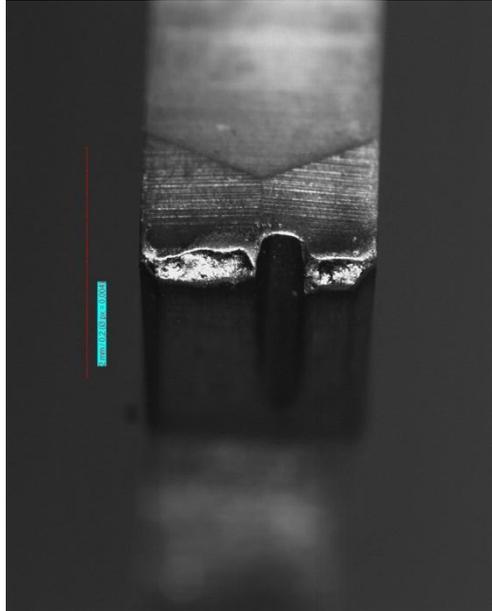
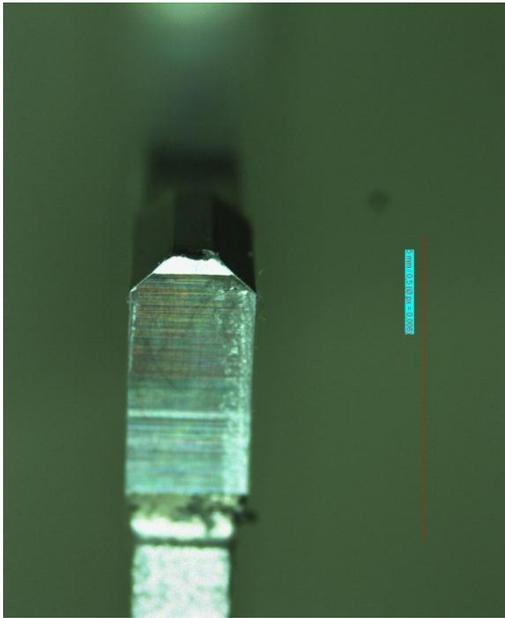


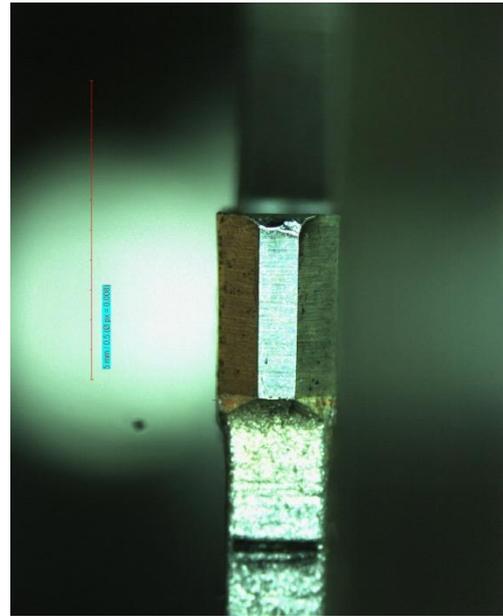
Figura 4.44: Detalhe da aresta de corte do inserto MD S

As vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal do inserto com geometria pré-cortador da serra MD VN são mostradas na Figura 4.45. De modo similar à serra MD S, a serra MD VN apresentou desgaste da aresta de corte mais acentuado. Nota-se que como o dente pré-cortador remove um terço do material na posição central da fenda, o lascamento ocorre exatamente na parte central do inserto. A Figura 4.46 ilustra o detalhe da aresta de corte do inserto pré-cortador da serra MD VN, onde se observa o lascamento desta.

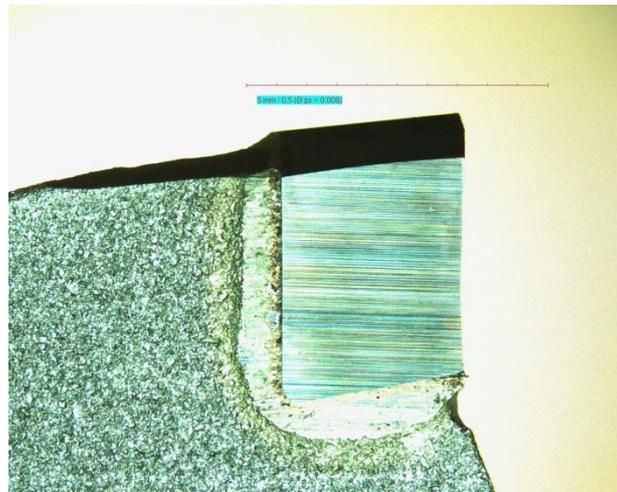
Por fim, a Figura 4.47 apresenta as vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal do inserto com geometria cortador da serra MD VN. Como na geometria pré-cortador, ocorre o lascamento da aresta de corte do inserto, porém em suas laterais onde dois terços do material são removidos. A Figura 4.48 mostra o detalhe da aresta de corte do inserto cortador da serra MD VN.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.45: Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto pré-cortador da serra MD VN

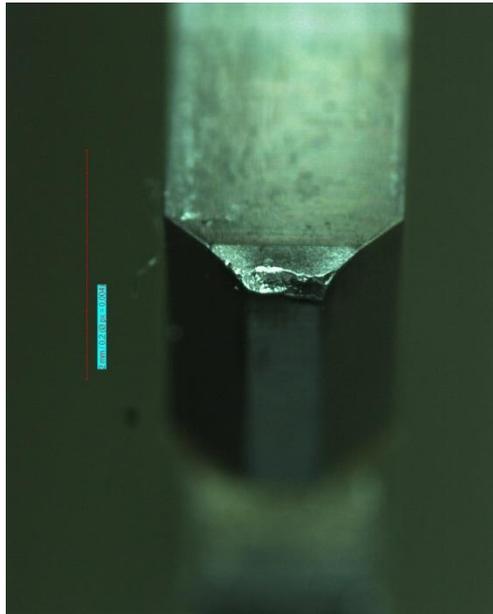
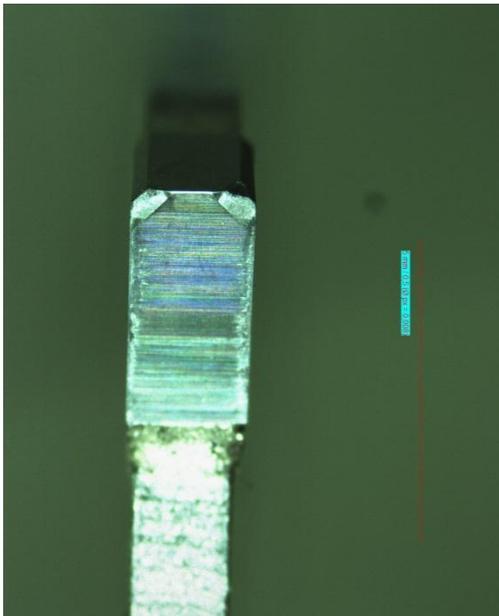
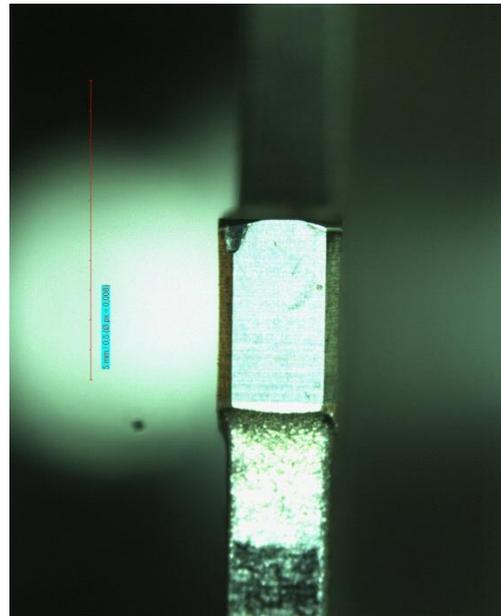


Figura 4.46: Detalhe da aresta de corte do inserto pré-cortador da serra MD VN



(a)



(b)

Figura 4.47: Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto cortador MD VN



(c)

Figura 4.47: Vistas dos planos: (a) de referência, (b) de corte e (c) ortogonal para o inserto cortador MD VN (cont)

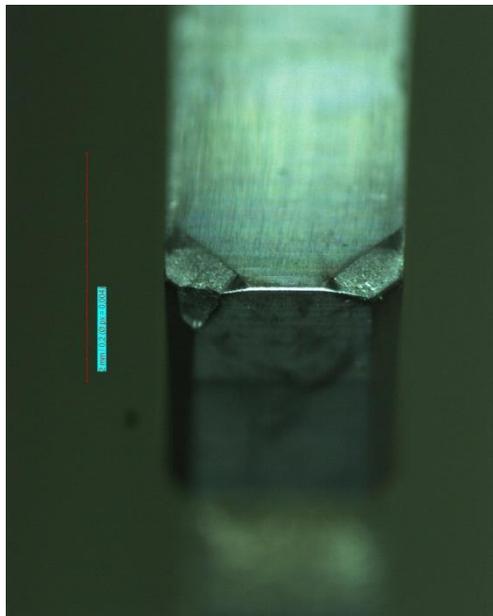


Figura 4.48: Detalhe da aresta de corte do inserto cortador da serra MD VN

Conclui-se que o cermet é mais resistente ao desgaste do que o metal duro, mesmo se tratando de uma operação de corte interrompido, onde se espera um pior desempenho do cermet devido à baixa resistência aos choques térmicos e mecânicos.

Outro fator para o desgaste prematuro do metal duro é o fato dos experimentos serem realizados sob velocidades de corte acima da recomendada pelos fabricantes de serras circulares (vide Figura 2.26).

4.7 Forma dos Cavacos

De maneira geral, a operação de serramento gera cavacos curtos e em forma de arco. A Figura 4.49 mostra os cavacos gerados pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN, sob uma velocidade de corte de 140 m/min e avanço por dente de 0,04 mm/rev.

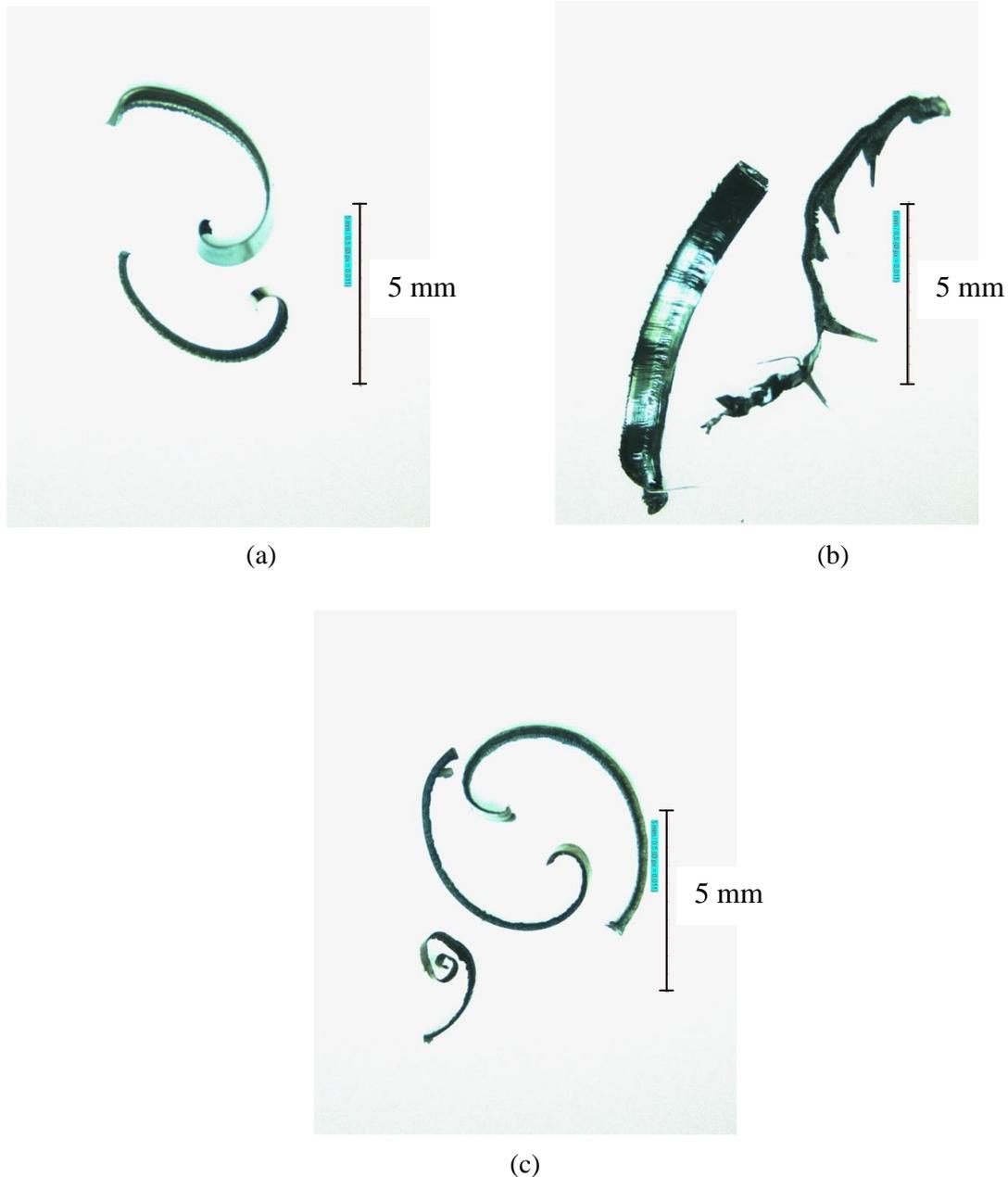


Figura 4.49: Cavacos gerados pelas serras (a) cermet, (b) MD S e (c) MD VN ($v_c= 140$ m/min e $f_z= 0,04$ mm/rev)

Foram encontradas diferenças entre os cavacos em função da geometria dos insertos, mas não em função dos parâmetros de corte. Para a serra cermet, durante o corte foram formados dois cavacos com o mesmo formato de arco porque existe na

superfície de saída o quebra cavaco que auxilia no escoamento do cavaco sobre esta superfície além de garantir a quebra periódica deste. Entretanto são gerados cavacos com larguras distintas devido à existência de um sulco na aresta de corte.

A serra MD S, como a serra cermet, forma dois cavacos em função do sulco existente na aresta de corte. Todavia, a geometria deste inserto não possui quebra cavaco na superfície de saída e por isso são produzidos cavacos com maior raio de curvatura.

Finalmente, para a serra MD VN foram formados três cavacos com formato de arco. Este fenômeno ocorreu devido ao fato do primeiro dente pré-cortador entrar no material e remover um terço do volume de material no centro da fenda, logo em seguida entra no material o dente cortador, que remove o material remanescentes nas laterais da fenda, ou seja, remove os outros dois terços do material.

5. CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios de serramento do aço ABNT 1045 utilizando serras circulares de cermet e metal duro (MD S e MD VN) pode-se concluir que:

No que se refere às forças de avanço (F_x) e radial (F_y), com o aumento da velocidade de corte os valores de F_x e F_y diminuíram para as serras cermet e MD VN. No caso da serra MD S, as forças de avanço e radial mínimas foram obtidas para uma velocidade de corte intermediária de 180 m/min. Com o aumento do avanço, elevaram-se os valores de F_x e F_y para as três serras. Os menores valores das forças de avanço e radial foram proporcionados pela serra MD VN seguida da cermet e MD S. A força axial (F_z) não foi considerada relevante para a operação de serramento.

Com relação à rugosidade das paredes geradas, nenhum dos parâmetros de rugosidade foi afetado de forma significativa pelos parâmetros de entrada (v_c e f_z) ou sua interação quando foram empregadas as serras cermet e MD S. Entretanto, para a serra circular MD VN, os quatro parâmetros de rugosidade foram afetados de forma significativa por v_c e f_z e sua interação. Com o aumento a velocidade de corte, os valores rugosidade diminuíram. No caso do avanço, o valor máximo da rugosidade foi observado para $f_z=0,07$ mm/rev. Para a interação dos parâmetros, nos quatro casos a mesma tendência foi observada, isto é, menores rugosidades foram obtidas pela combinação de alta velocidade de corte e baixo avanço. A serra que apresentou menor valor de rugosidade foi a serra cermet, e a pior foi a MD VN.

A largura de corte produzida pela serra cermet não foi afetada pelos parâmetros de entrada ou sua interação. Com o aumento de v_c também aumentou a largura da fenda gerada pela serra MD S. Quando se aumentou o valor de f_z , diminuiu-se a largura da fenda gerada pelas serras MD S e MD VN. Ainda com relação à serra MD S, menor largura da fenda foi obtida para $v_c=180$ m/min e $f_z=0,1$ mm/rev. Com os resultados obtidos, conclui-se que a serra que gerou menor largura de corte foi a cermet, e a maior a MD VN.

No que se refere à otimização dos parâmetros de corte (usando menores forças de corte e menor rugosidade), a serra que proporcionou melhor resultado é foi a MD S, seguida da MD VN e cermet.

Não houve influência significativa dos parâmetros de corte sobre a formação da rebarba. Além disso, a serra cermet produziu rebarbas bipartidas curtas, a serra MD S gera rebarbas bipartidas longas e a serra MD VN gera rebarbas curtas.

Com relação ao desgaste das serras, a serra cermet apresentou desgaste de flanco gradual. As serras de metal duro (MD S e MD VN) apresentaram lascamento mais acentuado.

Finalmente, não houve influência dos parâmetros de corte sobre as formas dos cavacos. Para a serra cermet, foram formados dois cavacos com pequeno raio de curvatura e em forma de arco, porém com larguras distintas devido à posição do sulco. Já para a serra MD S, foram formados dois cavacos com o raio de curvatura maior, sendo um mais largo e outro mais estreito. Por fim, a serra MD VN produziu três formas distintas de cavacos com o formato arco devido à geometria dos insertos (pré-cortador e cortador).

6. PROPOSTA DE CONTINUIDADE

O serramento empregando serras circulares com insertos de metal duro e cermet é muito importante para a indústria metal-mecânica. Para que se tenha o melhor aproveitamento da operação em questão é essencial o conhecimento da influência dos parâmetros de corte, do material da peça e da ferramenta. Diante disso, as seguintes sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:

- Estudar o mecanismo de formação do cavaco e os mecanismos de desgaste associados às diferentes geometrias de insertos de cermet e metal duro.
- Utilizar *softwares* de simulação numérica para verificação dos esforços de corte, tipos de cavaco gerados, temperatura de corte e posteriormente comparar estes resultados com dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS), *NBR 6162 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem de Metais: Terminologia*, São Paulo, 1989.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS), *NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia*, São Paulo, 1980.
- ALBUQUERQUE, C. E. C., *Informações Serras Circulares*, 2010, 15 f. Notas de Aula (Engenharia Industrial Madeireira) Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasprofcamargo/>>, Acesso em: 08 fev 2011.
- ARSHINOV, V.; ALEKSEEVICH, G. *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. 4th ed. Tradução de Nicolas Weinstein. Moscow: Mir Publishers, 1979. 568 p. Original em russo.
- BELJO – LUCIC, R.; GOGLIA, V. Some possibilities for reducing circular saw idling noise. *J. Wood Sci*, Zagred, v. 47, 2001. p. 389 – 393.
- BOSETTI, P.; BRUSCHI, S. In-line monitoring of cut surfaces in interrupted machining operations. *Int J. Mater Form*, França: Springer-Verlag, v. 3, 2010. p. 487 – 490.
- BRADBURY, S. R.; LEWIS, D. B. A comparasion of the performance and wear characteristics of high-speed steel circular saw blades machining Nimonic PK31, AISI O1 tool steel, Inconel 600L and AISI 1018 carbon steel. *Journal of Materials Science*, v. 35, 2000. p. 1511 – 1524.
- CECCONELLO, E. L. S., *Metodologia para levantamento de curvas de vida e intervalo de máxima eficiência de ferramentas de corte*. 1996. 56 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CHILDS, T., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T., YAMANE, Y., *Metal Machining: Theory and Applications*, 1nd ed. Londres: Arnold, 2000. 400 p.
- CIMINI, V. M., CASTRO, A. P. *Otimização do Tempo de Corte em Serras Circulares de Tubos Utilizando Controle de Força*, Contribuição Técnica ao 15º Seminário de Automação de Processos, São Paulo, 2011. 12 p.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 5 ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 253 p.

DOS SANTOS, B. B. *Estudo sobre o serramento de metais*. 2010. 95 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DOYLE, L. E., MORRIS, J. L.; SCHRADER, G. F.; LEACHS, J. L. *Processos de fabricação e materiais para engenheiros*. Tradução de Roberto Rocha Veira; Edmond Daberlay; Horst L. A. Daar; Rosalvo Tiago Ruffino; Wolfgang Lucas. São Paulo: Editora Blücher, 1962. 639 p. Título Original: *Manufacturing processes and materials for engineers*.

DRUMOND, F. B., WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. *Análise de Variância: Comparação de Várias Situações*. Belo Horizonte. Fundação Cristiano Ottoni. 1996. 302 p.

FERES, F. Operação com Serras é Essencial em Processos de Usinagem. *O Mundo da Usinagem*, São Paulo, v. 72 , p. 6 – 12, dez. 2010.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 12 ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1977. 751 p.

FRANHO. *Serra de fita mecânica FM 1600*. São Paulo: Produtos. Disponível em: <<http://www.franho.com.br/produto.php?codigo=4668>> Acesso em: 03 fev. 2011.

FREIRE, J. M. *Tecnologia mecânica: máquinas de serrar e furar*. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1976. 233 p.

GRIMSHAW, R. *Saws: the history, development, action, and comparison of saws of all kinds*. Philadelphia: Claxton, Remsen & Haffelfinger, 1880. 212 p.

HAGE SONDERMACHINENBAU GMBH & CO KG. *Sawing: sawing center for compound cuts (multi-angle)*. Obdach, Áustria: Produtos. Disponível em: <http://www.hage.at/GB/saegeanlage_fuer_shifterschnitte_45_GB.html> Acesso em: 04 mar 2011.

HEERMANN MASCHINENBAU GMBH. *Band saws*. Frickenhausen, Alemanha: Produtos. Disponível em: <<http://www.hema-saegen.de/home/produkte/bandsaegetechnik/>> Acesso em: 03 fev. 2011.

HORTHON, C., *Women's Inventions: the circular saw, invented by Tabitha Babbitt*, Ask Cathy, USA, 17 mai. 2009: Disponível em: <<http://www.askcathyblog.com/?p=808>> Acesso em 17 jan 2011.

KAMPMANN DO BRASIL LTDA. *Treinamento: serras circulares*, Brasil: Treinamento. Sem Ano. 64 p.

KAMPMANN GMBH. *Improve your cutting performance*, Alemanha: Catálogo. 2010. 52 p.

- KANEFUSA CORPORATION, *Catalogue 0 – 30 – 5*, Japão: Catálogo. Sem ano. 138 p.
- KLOCKE, F.; KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren 1: drehen, fräsen, bohren*. 8 Aufl. Aachen, Alemanha: Springer, 2007. 547 p.
- KOETHER, R.; RAU, W. *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure*, 3 Aufl. München, Alemanha, Carl Hanser Verlag, 2008. 474 p.
- KÖTTER, D. *Herstellung von schneidkantenverrundung und deren einfluss auf das einatzverhalten von zerspanwerkzeugen*. Dortmund, Alemanha: ISF. 2006. 100 p.
- KWON, Y. J., KIM, Y. J., CHA, M.S., *Desirability function modeling for dual response surface approach to robust desing*, IEMS, Volume 7, 2008. 197 – 203 p.
- LENNARZT, *Carbide Tipped Circular Saw Blades*, Alemanha: Catálogo, 2008, 12 p.
- LEWIS, D. B., BRADBURY, S.R., SAWAR, M. Analysis of the wear and failure mechanisms that develop in high speed steel circular saw blade when machining nickel – based alloys. *Wear*, v. 197, 1996. p. 74 – 81.
- LOCHMANN, K. *Formelsammlung Fertigungstechnik*, 2 Aulf. München, Alemanha, Carl Hanser Verlag, 2009. 478 p.
- MACIEL, A. J. S.; *Estudo do corte do colmo da cana de açúcar, através de serras circulares*. 1989. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1 ed. Revisão de Rosalvo Tiago Ruffino. São Paulo; Editora Blücher, Primeira Edição, 2009. 371 p.
- MACHADO, C., MENDES, J., FONSECA, J. *Intelligent Cutting-off of Pipes and Bars*. Internetal Symposium on Industrial Eletronic, ISIE, vol. 1, 2003, p. 460 – 465.
- MACHADO, C. M. R., *Sistema Inteligente para Autoparametrização em Tempo Real da Serra Circular para o Corte de Tubos Metálicos*. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Eletrônica Industrial, Portugal.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4 ed. Tradução de Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2009. 493 p. Original em inglês.
- NORDSTRÖM, J.; BERGSTRÖM, J. Wear testing of saw teeth in timber cutting. *Wear*, Karlstad, v. 250, p. 19 – 27, 2001.

ORLOWSKI, K.; SANDAK, J.; TANAKA, C. The critical speed of circular saw: simple measurement method and its practical implementations. *J Wood Science*, v. 53, 31 mar 2007, p. 388 – 393.

POLLACK, H. W. *Tool design*. 2nd ed. New Jersey: Prentice – Hall International Editions, 1988. 548 p.

RATTUNDE & CO GMBH, *Foto Ludwigslust*, Alemanha: Produtos.Sem Ano. Disponível em: <<http://rattunde.com/uk/products/acs-cfmcurve/photo/1.htm>> Acesso em: 08 mar 2011.

RIBEIRO, J.L.S. *Fresamento do aço VHsuper nos estados recozidos temperado com metal duro e cermet*. 2007. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

RULINSKAS, F.; RULINSKAS, E. *Uso de lâminas metal duro: dicas de utilização e conceitos para prorrogar a vida útil de sua ferramenta*. São Paulo: Treinamento Wagner Lennartz, Sem Ano. Disponível em: <<http://www.wagnerlennartz.com/download/Microsoft%20PowerPoint%20-%20METAL%20DURO.pdf>> Acesso em: 17 jan. 2011.

SANTHANAM, A. T.; TIERNEY, P. Cemented Carbides. In: ASM. *Metals Handbook*. 9nd ed. Nova York: ASM International, 1989. Volume 16, 71 – 89 p.

SAWAR, M., HAIDER, J. *Impact of advanced coatings on multipoint cutting tools*. IMC, 28th International Manufacturing Conference, Dublin, Irlanda. 2010. 8 p.

SAWAR, M., HAIDER, J., PERSSON, M., HELLBERG, H. *Material behavior at the extreme cutting edge in bandsawing*. International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, 2010, Paris: American Institute of Science, 1059 – 1064 p.

SAWAR, M., HAIDER, J., PERSSON, M., HELLBERG, H. *Forces, wear modes, and mechanisms in bandsawing steel workpieces*. Journal Engineering Manufacture, JEM 1842, Volume 224, Parte B, 2009a. 1655 – 1662 p.

SAWAR, M., PERSSON, M., HELLBERG, H., HAIDER, J. *Measurement of specific cutting energy for evaluating the efficiency of bandsawing different workpiece material*. International Journal of Machine Tool & Manufacture, Volume 49, 2009b. 958 – 965 p.

SAWAR, M., PERSSON, M., HELLBERG, H. *Wear and failure modes in the bandsawing operation when cutting ball-bearing steel*. Wear, Volume 259, 2005. 1144 – 1150 p.

- SAWAR, M., ZHANG, X., GILLIBRAND, D. *Performance of titanium nitride-coated carbide-tipped circular saws when cutting stainless steel and mild steel*. Surface and Coatings Technology, Volume 94 – 95, 1997. 617 – 621 p.
- SCHNEIDER, G. *Principles of tungsten carbide engineering*: expanded and up-dated to include ceramics. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1989. 148 p.
- SILVA, A. L. V. C, MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 646 p.
- SHAW, M. C.; *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1982. 672 p.
- STAKNIEV, Y. M. Coordination of saw blade tensioning with rotation speed: myth or reality? *Holz Roh Werkst*, v. 62, Archangelsk: Springer – Verlag, 29 mai 2004. 313 - 315 p.
- STAKNIEV, Y. M. Reasearch on circular saws vibration in Russia: from theory and experiment to the needs of industry. *Holz als Roh und Werkstoff*, v. 56, Archangelsk: Springer – Verlag, 1998. p. 131 – 137.
- TILLMANN, M.; DÜLTGEN P. O corte de perfis pode ser feito com velocidade e qualidade mais elevada. Tradução de Werner S. Rothschild e Alexandre Tadeu Simon, *Máquinas e Metais*, v. 544, Aranda, São Paulo, 2011, p. 72 – 74.
- TILLMANN, M. *Schlussbericht: Schnellsttrennen von Stahl mit hochharten Schneidstoffen*. 15958 N, Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), Remscheid, Alemanha, 2011, 73 p.
- TOOLS OF THE TRADE, *Logger's tools and local history*. California: [s.n.], 2001. Disponível em: <http://www.moah.org/exhibits/archives/tools/exhibit_guide_tools.html> Acesso em 17 jan. 2011, Museum of American Heritage, IV Fireplace Room.
- TRENT, E.M. “*Metal Cutting*”, 2nd Edition, Londres: Butterworths & Co., 1984. 245 p.
- TSCHÄTSCH, H.; DIETRICH, J. *Praxis der zerpantechnik: verfahren, werzeuge, berechnung*. 9 Aufl. Wiesbaden, Alemanha: Vieweg + Teubner, 2008. 394 p.
- ZIMBARDI MÁQUINAS. *Serra Alternativa*. São Paulo: Produtos. Disponível em: <http://www.zimbardi.com.br/maquinas_serra_alternativa.html> Acesso em: 17 jan. 2011.

APÊNDICE I
TABELAS DOS DADOS ANALISADOS

Tabela I.1: Serra circular com insertos de cermet e geometria sulco alternado (cermet) – Planejamento Experimental Fatorial Completo

StdOrder	RunOrder	V _c (m/min)	f _z (mm/rev)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	Largura (mm)	R _a (um)	R _q (um)	R _t (um)	R _z (um)
14	1	180	0,07	180,17	105,79	6,5	2,15	1,87	2,37	12,15	7,98
16	2	220	0,04	108,63	67,88	5,4	2,17	2,71	3,36	18,48	14
9	3	220	0,1	256,55	137,86	7,78	2,11	2,45	3,11	18,98	8,98
4	4	180	0,04	124,28	73,24	7,34	2,12	2,15	3,64	21,08	9,28
17	5	220	0,07	196,69	109,3	6,86	2,09	1,79	2,17	10,8	6,92
7	6	220	0,04	116,89	67,4	7,03	2,12	1,54	1,97	11,16	7,72
10	7	140	0,04	142,88	84,01	6,17	2,11	2,86	3,6	20	13,1
1	8	140	0,04	143,6	83,8	6,66	2,12	1,67	2,04	10,18	7,02
5	9	180	0,07	203,18	111,61	6,61	2,11	1,34	1,7	6,94	5,55
18	10	220	0,1	245,43	90,49	6,74	2,13	1,79	2,31	12,1	7,08
15	11	180	0,1	240,38	134,21	6,02	2,09	1,3	1,63	8,86	5,26
3	12	140	0,1	257,63	160,74	8,29	2,13	1,79	2,31	14	7,78
2	13	140	0,07	218,84	116,91	5,93	2,12	1,55	1,97	10,9	7
13	14	180	0,04	125,48	71,02	8,61	2,16	1,32	1,65	9,9	5,28
6	15	180	0,1	255,48	134,21	9,39	2,17	2,07	2,65	14,43	10,9
11	16	140	0,07	213,31	124,49	7,94	2,16	2,01	2,6	13,98	8,38
8	17	220	0,07	193,14	106,59	8,17	2,14	1,53	1,91	10,3	6,46
12	18	140	0,1	264,91	150,19	8,12	2,13	1,86	2,42	14	9

Tabela I.2: Serra circular com insertos de metal duro e geometria sulco alternado (MD S) – Planejamento Experimental Fatorial Completo

StdOrder	RunOrder	V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	Largura (mm)	R_a (um)	R_q (um)	R_t (um)	R_z (um)
15	1	180	0,1	401,42	345,5	10,14	2,07	1,77	2,21	11,1	7,03
11	2	140	0,07	346,8	306,09	7,66	2,15	1,86	2,32	12,1	7,48
14	3	180	0,07	256,62	185,78	7,61	2,14	2,65	3,31	16,73	9,53
13	4	180	0,04	272,49	241,29	18,08	2,27	2,61	3,37	18,1	10,08
7	5	220	0,04	263,17	236,12	12,52	2,15	2,75	3,75	23,43	9,85
2	6	140	0,07	402,19	375,54	13,46	2,14	1,67	2,15	12,6	7,03
16	7	220	0,04	273,14	270,35	10,26	2,19	1,63	2,25	13,9	6,05
6	8	180	0,1	440,12	409,35	10,56	2,06	1,57	2,05	10,88	6,53
9	9	220	0,1	374,04	313,8	9,44	2,2	1,92	2,43	12,03	7,13
3	10	140	0,1	469,56	413,62	10,12	2,09	1,87	2,75	18,7	8,38
4	11	180	0,04	274	283,06	8,82	2,15	1,84	2,46	14,45	7,33
12	12	140	0,1	530,83	453,71	12,26	2,11	1,85	2,38	14,25	7,7
18	13	220	0,1	416,07	399,33	10,11	2,2	1,65	2,13	12,7	6,88
17	14	220	0,07	350,4	345	7,8	2,19	1,94	2,54	15,48	8,88
10	15	140	0,04	338,66	319,82	7,96	2,15	1,53	1,98	12,38	6,6
8	16	220	0,07	400,02	384,2	7,5	2,17	1,7	2,11	10,3	5,93
5	17	180	0,07	255,47	185,61	7,36	2,13	2,63	3,38	19,26	10,22
1	18	140	0,04	354,54	334,16	7,65	2,16	3,21	4,21	23,28	12,33

Tabela I.3: Serra circular com insertos de metal duro e geometria pré-cortador cortador (MD VN) – Planejamento Experimental Fatorial Completo

StdOrder	RunOrder	Vc (m/min)	fz (mm/rev)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Largura (mm)	Ra (um)	Rq (um)	Rt (um)	Rz (um)
7	1	220	0,04	44,51	69,5	8,54	2,26	1,47	1,85	9,6	6,88
17	2	220	0,07	83,17	130,8	12,5	2,22	3,61	4,59	25,45	14,55
2	3	140	0,07	81,8	141,1	9,77	2,2	3,41	4,5	27,78	17,58
11	4	140	0,07	93,24	151,1	8,06	2,2	3,38	4,27	23,95	14,33
8	5	220	0,07	94,91	141,4	8,54	2,17	2,99	3,73	18,65	12,25
13	6	180	0,04	52,88	100,5	8,32	2,25	2,47	3,19	17,95	12,18
10	7	140	0,04	38	57,39	6,88	2,21	2,07	2,75	16,65	9,9
1	8	140	0,04	48,61	68,84	6,87	2,19	2,24	2,96	17,9	10,4
5	9	180	0,07	148,4	247,9	9,07	2,18	2,35	3,24	16,68	10,95
3	10	140	0,1	213,1	364,6	8,41	2,13	2,32	2,98	17,18	10,15
4	11	180	0,04	44,71	56,34	6,34	2,16	2,51	3,29	19,8	11,43
9	12	220	0,1	127	290,4	6,83	2,16	2,29	2,8	14,15	8,93
6	13	180	0,1	95,93	97,27	8,18	2,14	2,15	2,87	19,4	9,85
18	14	220	0,1	140,5	296,1	8,22	2,16	1,87	2,39	13,03	7,5
15	15	180	0,1	138,6	289,4	7,57	2,13	2,08	2,6	14,68	8,45
12	16	140	0,1	226,3	371,4	8,55	2,16	2,65	3,37	19	11,4
16	17	220	0,04	66,26	126,2	6,49	2,19	1,41	1,84	10,98	6,5
14	18	180	0,07	176,3	266,3	6,88	2,16	2,47	3,28	19,55	12,7

APÊNDICE II ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

II.1 Forças de Corte

II.1.1 Serra circular com insertos de cermet e geometria sulco alternado (Cermet)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Fx (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1558,9	1558,9	779,5	13,39	0,002
fz (mm/rev)	2	48417,5	48417,5	24208,8	416,00	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	280,8	280,8	70,2	1,21	0,372
Error	9	523,7	523,7	58,2		
Total	17	50781,0				

S = 7,62850 R-Sq = 98,97% R-Sq(adj) = 98,05%

Unusual Observations for Fx (N)

Obs	Fx (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	180,170	191,675	5,394	-11,505	-2,13 R
9	203,180	191,675	5,394	11,505	2,13 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Fy (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1691,2	1691,2	845,6	6,19	0,020
fz (mm/rev)	2	11068,2	11068,2	5534,1	40,51	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	501,3	501,3	125,3	0,92	0,494
Error	9	1229,5	1229,5	136,6		
Total	17	14490,2				

S = 11,6883 R-Sq = 91,51% R-Sq(adj) = 83,97%

Unusual Observations for Fy (N)

Obs	Fy (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	137,860	114,175	8,265	23,685	2,87 R
10	90,490	114,175	8,265	-23,685	-2,87 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Fz (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,518	0,518	0,259	0,21	0,818
fz (mm/rev)	2	2,539	2,539	1,270	1,00	0,404

Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	5,025	5,025	1,256	0,99	0,458
Error	9	11,373	11,373	1,264		
Total	17	19,455				

S = 1,12412 R-Sq = 41,54% R-Sq(adj) = 0,00%

Unusual Observations for Fz (N)

Obs	Fz (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	6,02000	7,70500	0,79487	-1,68500	-2,12 R
15	9,39000	7,70500	0,79487	1,68500	2,12 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

II.1.2 Serra circular com insertos de metal duro e geometria sulco alternado (MD S)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Fx (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	25514	25514	12757	17,80	0,001
fz (mm/rev)	2	65185	65185	32593	45,47	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	13029	13029	3257	4,54	0,028
Error	9	6452	6452	717		
Total	17	110181				

S = 26,7744 R-Sq = 94,14% R-Sq(adj) = 88,94%

Analysis of Variance for Fy (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	25478	25478	12739	10,20	0,005
fz (mm/rev)	2	41031	41031	20516	16,43	0,001
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	25121	25121	6280	5,03	0,021
Error	9	11241	11241	1249		
Total	17	102871				

S = 35,3408 R-Sq = 89,07% R-Sq(adj) = 79,36%

Analysis of Variance for Fz (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	2,143	2,143	1,071	0,15	0,864
fz (mm/rev)	2	18,146	18,146	9,073	1,26	0,330
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	44,492	44,492	11,123	1,54	0,271
Error	9	64,974	64,974	7,219		
Total	17	129,754				

S = 2,68689 R-Sq = 49,93% R-Sq(adj) = 5,41%

Unusual Observations for Fz (N)

Obs	Fz (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	18,0800	13,4500	1,8999	4,6300	2,44 R
11	8,8200	13,4500	1,8999	-4,6300	-2,44 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

II.1.3 Serra circular com insertos de metal duro e geometria pré-cortador cortador (MD

VN)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Fx (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1830,3	1830,3	915,1	4,25	0,050
fz (mm/rev)	2	35217,8	35217,8	17608,9	81,81	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	17726,3	17726,3	4431,6	20,59	0,000
Error	9	1937,1	1937,1	215,2		
Total	17	56711,5				

S = 14,6708 R-Sq = 96,58% R-Sq(adj) = 93,55%

Unusual Observations for Fx (N)

Obs	Fx (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	95,930	117,260	10,374	-21,330	-2,06 R
15	138,590	117,260	10,374	21,330	2,06 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Fy (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1073	1073	537	0,23	0,803
fz (mm/rev)	2	126175	126175	63088	26,50	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	48881	48881	12220	5,13	0,020
Error	9	21430	21430	2381		
Total	17	197559				

S = 48,7961 R-Sq = 89,15% R-Sq(adj) = 79,51%

Unusual Observations for Fy (N)

Obs	Fy (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	97,270	193,355	34,504	-96,085	-2,78 R
15	289,440	193,355	34,504	96,085	2,78 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Fz (N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1,925	1,925	0,963	0,51	0,618
fz (mm/rev)	2	11,083	11,083	5,541	2,92	0,105
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	6,178	6,178	1,544	0,81	0,547
Error	9	17,083	17,083	1,898		
Total	17	36,269				

S = 1,37774 R-Sq = 52,90% R-Sq(adj) = 11,03%

Unusual Observations for Fz (N)

Obs	Fz (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	12,5400	10,5400	0,9742	2,0000	2,05 R
5	8,5400	10,5400	0,9742	-2,0000	-2,05 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

II.2 Rugosidade

II.2.1 Serra circular com insertos de cermet e geometria sulco alternado (Cermet)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Ra (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,3310	0,3310	0,1655	0,59	0,575
fz (mm/rev)	2	0,3897	0,3897	0,1948	0,69	0,525
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,2000	0,2000	0,0500	0,18	0,944
Error	9	2,5337	2,5337	0,2815		
Total	17	3,4544				

S = 0,530587 R-Sq = 26,65% R-Sq(adj) = 0,00%

Analysis of Variance for Rq (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,1732	0,1732	0,0866	0,14	0,869
fz (mm/rev)	2	1,0447	1,0447	0,5223	0,86	0,455
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,2749	0,2749	0,0687	0,11	0,975
Error	9	5,4658	5,4658	0,6073		
Total	17	6,9586				

S = 0,779305 R-Sq = 21,45% R-Sq(adj) = 0,00%

Analysis of Variance for Rt (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	9,29	9,29	4,64	0,21	0,811
fz (mm/rev)	2	57,35	57,35	28,68	1,32	0,314
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	15,20	15,20	3,80	0,18	0,946
Error	9	195,12	195,12	21,68		
Total	17	276,97				

S = 4,65622 R-Sq = 29,55% R-Sq(adj) = 0,00%

Analysis of Variance for Rz (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	6,305	6,305	3,152	0,41	0,673
fz (mm/rev)	2	16,604	16,604	8,302	1,09	0,377
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	9,212	9,212	2,303	0,30	0,870
Error	9	68,667	68,667	7,630		
Total	17	100,787				

S = 2,76218 R-Sq = 31,87% R-Sq(adj) = 0,00%

II.2.2 Serra circular com insertos de metal duro e geometria sulco alternado (MD S)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Ra (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,1954	0,1954	0,0977	0,36	0,707
fz (mm/rev)	2	0,7339	0,7339	0,3670	1,35	0,306
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,8384	0,8384	0,2096	0,77	0,569
Error	9	2,4385	2,4385	0,2709		
Total	17	4,2062				

S = 0,520529 R-Sq = 42,03% R-Sq(adj) = 0,00%

Unusual Observations for Ra (um)

Obs	Ra (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	1,53000	2,37000	0,36807	-0,84000	-2,28 R
18	3,21000	2,37000	0,36807	0,84000	2,28 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Rq (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,2101	0,2101	0,1050	0,22	0,805
fz (mm/rev)	2	1,3838	1,3838	0,6919	1,46	0,282
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	1,5381	1,5381	0,3845	0,81	0,548
Error	9	4,2611	4,2611	0,4735		
Total	17	7,3930				

S = 0,688081 R-Sq = 42,36% R-Sq(adj) = 0,00%

Unusual Observations for Rq (um)

Obs	Rq (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	1,98000	3,09500	0,48655	-1,11500	-2,29 R
18	4,21000	3,09500	0,48655	1,11500	2,29 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Rt (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	2,49	2,49	1,25	0,08	0,923
fz (mm/rev)	2	59,99	59,99	29,99	1,95	0,198
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	74,78	74,78	18,70	1,22	0,369
Error	9	138,37	138,37	15,37		
Total	17	275,63				

S = 3,92100 R-Sq = 49,80% R-Sq(adj) = 5,18%

Analysis of Variance for Rz (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	3,360	3,360	1,680	0,47	0,642
fz (mm/rev)	2	6,290	6,290	3,145	0,87	0,451
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	9,400	9,400	2,350	0,65	0,641
Error	9	32,496	32,496	3,611		
Total	17	51,545				

S = 1,90017 R-Sq = 36,96% R-Sq(adj) = 0,00%

Unusual Observations for Rz (um)

Obs	Rz (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	6,6000	9,4650	1,3436	-2,8650	-2,13 R
18	12,3300	9,4650	1,3436	2,8650	2,13 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

II.2.3 Serra circular com insertos de metal duro e geometria pré-cortador cortador (MD

VN)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Ra (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	0,56770	0,56770	0,28385	7,06	0,014
fz (mm/rev)	2	3,41223	3,41223	1,70612	42,42	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	1,96527	1,96527	0,49132	12,22	0,001
Error	9	0,36200	0,36200	0,04022		
Total	17	6,30720				

S = 0,200555 R-Sq = 94,26% R-Sq(adj) = 89,16%

Unusual Observations for Ra (um)

Obs	Ra (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	3,61000	3,30000	0,14181	0,31000	2,19 R
5	2,99000	3,30000	0,14181	-0,31000	-2,19 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Rq (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	1,1311	1,1311	0,5655	8,20	0,009
fz (mm/rev)	2	5,8105	5,8105	2,9053	42,13	0,000
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	2,7291	2,7291	0,6823	9,89	0,002
Error	9	0,6207	0,6207	0,0690		
Total	17	10,2914				

S = 0,262615 R-Sq = 93,97% R-Sq(adj) = 88,61%

Unusual Observations for Rq (um)

Obs	Rq (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	4,59000	4,16000	0,18570	0,43000	2,32 R
5	3,73000	4,16000	0,18570	-0,43000	-2,32 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Rt (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	78,120	78,120	39,060	6,83	0,016
fz (mm/rev)	2	153,023	153,023	76,511	13,39	0,002
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	87,486	87,486	21,871	3,83	0,044
Error	9	51,440	51,440	5,716		
Total	17	370,069				

S = 2,39073 R-Sq = 86,10% R-Sq(adj) = 73,74%

Unusual Observations for Rt (um)

Obs	Rt (um)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	25,4500	22,0500	1,6905	3,4000	2,01 R
5	18,6500	22,0500	1,6905	-3,4000	-2,01 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Analysis of Variance for Rz (um), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc (m/min)	2	24,526	24,526	12,263	8,68	0,008
fz (mm/rev)	2	72,761	72,761	36,380	25,74	0,000

Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	26,813	26,813	6,703	4,74	0,025
Error	9	12,720	12,720	1,413		
Total	17	136,819				

S = 1,18882 R-Sq = 90,70% R-Sq(adj) = 82,44%

II.3 Largura de Corte

II.3.1 Serra circular com insertos de cermet e geometria sulco alternado (Cermet)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Largura (mm), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
P					
Vc (m/min)	2	0,0001444	0,0001444	0,0000722	0,08
0,926					
fz (mm/rev)	2	0,0001444	0,0001444	0,0000722	0,08
0,926					
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,0016556	0,0016556	0,0004139	0,45
0,773					
Error	9	0,0083500	0,0083500	0,0009278	
Total	17	0,0102944			

S = 0,0304594 R-Sq = 18,89% R-Sq(adj) = 0,00%

II.3.2 Serra circular com insertos de metal duro e geometria sulco alternado (MD S)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Largura (mm), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
P					
Vc (m/min)	2	0,0093778	0,0093778	0,0046889	4,91
0,036					
fz (mm/rev)	2	0,0096778	0,0096778	0,0048389	5,06
0,034					
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,0157222	0,0157222	0,0039306	4,11
0,036					
Error	9	0,0086000	0,0086000	0,0009556	
Total	17	0,0433778			

S = 0,0309121 R-Sq = 80,17% R-Sq(adj) = 62,55%

Unusual Observations for Largura (mm)

Obs	Largura (mm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
-----	--------------	-----	--------	----------	----------

4	2,27000	2,21000	0,02186	0,06000	2,74 R
11	2,15000	2,21000	0,02186	-0,06000	-2,74 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

II.3.3 Serra circular com insertos de metal duro e geometria pré-cortador cortador (MD

VN)

Factor	Type	Levels	Values
Vc (m/min)	fixed	3	140; 180; 220
fz (mm/rev)	fixed	3	0,04; 0,07; 0,10

Analysis of Variance for Largura (mm), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
P					
Vc (m/min)	2	0,0016333	0,0016333	0,0008167	0,85
0,459					
fz (mm/rev)	2	0,0124333	0,0124333	0,0062167	6,47
0,018					
Vc (m/min)*fz (mm/rev)	4	0,0007333	0,0007333	0,0001833	0,19
0,937					
Error	9	0,0086500	0,0086500	0,0009611	
Total	17	0,0234500			

S = 0,0310018 R-Sq = 63,11% R-Sq(adj) = 30,32%

Unusual Observations for Largura (mm)

Obs	Largura (mm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	2,25000	2,20500	0,02192	0,04500	2,05 R
11	2,16000	2,20500	0,02192	-0,04500	-2,05 R

R denotes an observation with a large standardized residual.