



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

**“RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO ABNT 1045  
TEMPERADO E REVENIDO UTILIZANDO DIFERENTES  
REBOLOS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS”**

**EDUARDO GONÇALVES MAGNANI**

Belo Horizonte

**2013**

EDUARDO GONÇALVES MAGNANI

**“RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO ABNT 1045  
TEMPERADO E REVENIDO UTILIZANDO DIFERENTES  
REBOLOS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS”**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito parcial à obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Mecânica.  
**Área de concentração:** Processos de Fabricação  
**Orientador:** Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão

**Belo Horizonte**

**Escola de Engenharia da UFMG**

**2013**



Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Minas Gerais



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

Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário. CEP 31270-901 – Belo Horizonte – MG  
Fones: (31) 3499-5145 – Fax: (31) 3443-3783 – e-mail:cpgmec@demec.ufmg.br

---

## **“RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO ABNT 1045 TEMPERADO E REVENIDO UTILIZANDO DIFERENTES REBOLOS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS”**

**EDUARDO GONÇALVES MAGNANI**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".

Dissertação aprovada em: 07 de fevereiro de 2013

Por

---

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

---

**Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio**  
Professor Associado – UFMG

---

**Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva**  
Professor Doutor – CEFET-MG

Dedico este trabalho à Liliana, minha esposa,  
e a todos os familiares.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 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.

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

Aos Professores Juan Carlos Campos Rubio (Departamento de Engenharia Mecânica) e Paulo Eustáquio Faria (Departamento de Engenharia de Produção) da EE.UFMG pelas contribuições ao projeto, além de apoio nos momentos difíceis.

Ao Prof. Meinhard Sesselmann, do Departamento de Engenharia Mecânica da EE.UFMG, pelo apoio prestado à medição dos desvios dimensionais e geométricos dos corpos de prova.

À empresa Saint-Gobain Abrasivos Ltda., em especial aos Srs. Rodolfo Fischer Moreira Oliveira e Geraldo Aroldo Oliveira Campos, pelas ricas discussões e pelo fornecimento dos rebolos utilizados no trabalho experimental.

Aos colegas Eduardo Martins, Marcelo Araújo Câmara, Leandro José, Bruno Silvano Costa, Gabriel Moreno Britto e Eduardo Rodrigues Ferreira pelo apoio ao longo do trabalho experimental.

**“Bendize, ó minha alma, ao Senhor, e não te esqueças de nem um só de seus benefícios”.**  
Salmo de Davi

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS	xiii
NOMENCLATURA	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Operação de retificação	20
2.2 Rebolo	22
2.2.1 Tipo do abrasivo	23
2.2.2 Tamanho do grão abrasivo (granulometria)	25
2.2.3 Dureza do rebolo	26
2.2.4 Estrutura do rebolo	26
2.2.5 Ligante	27
2.3 Relações Cinemáticas	28
2.3.1 Comprimento de contato	30
2.3.2 Espessura de corte máxima	31
2.3.3 Espessura de corte equivalente	32
2.4 Dressagem	33
2.4.1 Os efeitos da dressagem	36
2.5 Forças e potência de retificação	37
2.6 Fluidos de corte	39
2.7 Acabamento superficial	41
2.8 Emissão acústica	42

3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.1	Materiais	44
3.2	Equipamentos	45
3.3	Métodos	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Corrente elétrica	53
4.2	Emissão acústica	57
4.3	Rugosidade	60
4.4	Desvio de batimento	69
4.5	Diâmetro do corpo de prova retificado	73
4.6	Otimização dos parâmetros de entrada	77
5	CONCLUSÃO	83
6	PROPOSTA DE CONTINUIDADE DE TRABALHO	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Retificação longitudinal com movimento oscilante e avanço simples	21
Figura 2.2 Ilustração em duas dimensões da operação de retificação cilíndrica externa	29
Figura 2.3 Geometria do arco da área de contato na retificação externa	30
Figura 2.4 Espessura máxima do cavaco não deformado na retificação cilíndrica externa	31
Figura 2.5 Representação esquemática da espessura de corte equivalente	32
Figura 2.6 Esquema de dressagem de rebolos convencionais	35
Figura 2.7 Forças atuantes na operação cilíndrica externa	37
Figura 3.1 Dressador de ponta única	45
Figura 3.2 Retificadora cilíndrica externa WMW modelo SWPO80	46
Figura 3.3 Sistema de aplicação de MQF	46
Figura 3.4 Transdutor de emissão acústica	48
Figura 3.5 Medição de rugosidade	48
Figura 3.6 Medição do batimento	49
Figura 3.7 Fluxograma do procedimento experimental	50
Figura 4.1 Gráficos de resíduos para corrente: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	54
Figura 4.2 Gráfico de Pareto para corrente elétrica consumida pelo motor principal	55
Figura 4.3 Gráfico de efeitos principais para a corrente elétrica	56
Figura 4.4 Gráfico de interações para a corrente	56
Figura 4.5 Gráficos de resíduos para emissão acústica: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	57
Figura 4.6 Gráfico de Pareto para emissão acústica	58

Figura 4.7 Gráfico de efeitos principais para a emissão acústica	59
Figura 4.8 Gráfico de interações para a emissão acústica	59
Figura 4.9 Gráfico de resíduos para rugosidade $R_a$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	60
Figura 4.10 Gráfico de resíduos para a rugosidade $R_q$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	61
Figura 4.11 Gráfico de resíduos para a rugosidade $R_t$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	61
Figura 4.12 Gráfico de resíduos para a rugosidade $R_z$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	62
Figura 4.13 Gráfico de Pareto para a rugosidade $R_a$	63
Figura 4.14 Gráfico de Pareto para a rugosidade $R_q$	63
Figura 4.15 Gráfico de Pareto para a rugosidade $R_t$	64
Figura 4.16 Gráfico de Pareto para a rugosidade $R_z$	64
Figura 4.17 Gráfico de efeitos principais para a rugosidade $R_a$	65
Figura 4.18 Gráfico de efeitos principais para a rugosidade $R_q$	65
Figura 4.19 Gráfico de efeitos principais para a rugosidade $R_t$	66
Figura 4.20 Gráfico de efeitos principais para a rugosidade $R_z$	66
Figura 4.21 Gráfico de interações para $R_a$	67
Figura 4.22 Gráfico de interações para $R_q$	68
Figura 4.23 Gráfico de interações para $R_t$	68
Figura 4.24 Gráfico de interações para $R_z$	69
Figura 4.25 Gráfico de resíduos para o desvio de batimento: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	70
Figura 4.26 Gráfico de Pareto para o desvio de batimento	71
Figura 4.27 Gráfico de efeitos principais para o desvio de batimento	71

Figura 4.28 Gráfico de interações para o desvio de batimento	73
Figura 4.29 Gráfico de resíduos para o diâmetro do corpo de prova retificado: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem	74
Figura 4.30 Gráfico de Pareto para o diâmetro do corpo de prova retificado	75
Figura 4.31 Gráfico de efeitos principais para o diâmetro do corpo de prova retificado	76
Figura 4.32 Gráfico de interações para o diâmetro do corpo de prova retificado	76
Figura 4.33 Gráfico da otimização dos parâmetros de entrada	77
Figura 4.34 Gráfico da corrente elétrica versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	78
Figura 4.35 Gráfico de emissão acústica versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	79
Figura 4.36 Gráfico da rugosidade $R_a$ versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	79
Figura 4.37 Gráfico da rugosidade $R_q$ versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	80
Figura 4.38 Gráfico da rugosidade $R_t$ versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	80
Figura 4.39 Gráfico da rugosidade $R_z$ versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	81
Figura 4.40 Gráfico do batimento versus tipos de rebolo (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	81
Figura 4.41 Gráfico do diâmetro do corpo de prova retificado versus tipos de rebolos (para $v_s = 24,0$ m/s, $v_w = 8,20$ m/min e $v_t = 39,0$ mm/min)	82

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 Chave de códigos para a seleção de rebolos (SALMON, 1992)	23
Tabela 2.2 Algumas propriedades dos materiais abrasivos (MALKIN 1989)	24
Tabela 3.1 Tipos de rebolo de corte	45
Tabela 3.2 Fatores e respectivos níveis empregados nos Experimentos	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>a. C.</b>	Antes de Cristo
<b>AIISI</b>	Instituto Americano de Ferro e Aço ( <i>American Iron and Steel Institute</i> )
<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>B</b>	Ligante resinóide
<b>CNC</b>	Comando Numérico Computadorizado
<b>EA</b>	Emissão Acústica
<b>ISO</b>	Organização Internacional para Padronização ( <i>International Organization for Standardization</i> )
<b>M</b>	Ligante metálico
<b>MQF</b>	Mínima Quantidade de Fluido
<b>MQL</b>	Mínima Quantidade de Lubrificante
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>R</b>	Ligante elástico
<b>RMS</b>	Desvio Médio Quadrático ( <i>Root Mean Square</i> )
<b>SG</b>	Gel de semente ( <i>Seeded gel</i> )
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Minas Gerais
<b>V</b>	Ligante Vitrificado

## LISTA DE ABREVIATURAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de alumínio
<b>D</b>	Diamante
<b>cBN</b>	Nitreto cúbico de boro
<b>SiC</b>	Carboneto de silício

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$a_e$	penetração de trabalho	[mm]
$d_s$	diâmetro do rebolo	[mm]
$d_w$	diâmetro da peça	[mm]
$l_c$	comprimento do arco de contato	[mm]
$R_a$	rugosidade aritmética ou média	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	rugosidade quadrática média	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	rugosidade máxima	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	rugosidade total	[ $\mu\text{m}$ ]
$v_s$	velocidade do rebolo	[m/s]
$v_t$	velocidade da mesa	[mm/min.]
$v_w$	velocidade da peça	[mm/min.]
$U_d$	grau de recobrimento	[mm/mm]
$b_d$	largura do dressador	[mm]
$S_d$	passo de dressagem	[mm]

### Letras Gregas

$\alpha$	nível de significância	[%]
$\beta$	intervalo de confiança ( $100 - \alpha$ )	[%]

## RESUMO

O desenvolvimento da indústria metal-mecânica está intimamente relacionado à sua capacidade de utilizar materiais cerâmicos de forma eficiente. Uma importante área de aplicação destes materiais é a indústria de bens de consumo, na qual as cerâmicas à base de óxido de alumínio são amplamente empregadas na fabricação de rebolos utilizados como ferramentas de corte em operações de retificação de aços em geral. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento de diferentes classes de rebole à base de óxido de alumínio na operação de retificação cilíndrica externa do aço carbono ABNT 1045 temperado e revenido para uma dureza média de 30 HRC (dureza Rockwell). Foram testados rebolos com características distintas em termos de material abrasivo (óxido de alumínio convencional e gel de semente – “seeded gel”), granulometria, dureza e estrutura. Durante os testes foi avaliada a influência do tipo de rebole e das condições de operação sobre a corrente elétrica consumida pela operação, sinal de emissão acústica e qualidade do componente retificado (rugosidade e desvios diametral e de batimento). O rebole de óxido de alumínio seeded gel apresentou desempenho superior em termos de consumo de corrente elétrica, rugosidade e desvio diametral. Por sua vez, o rebole de óxido de alumínio convencional propiciou menor desvio de batimento nos componentes retificados. O sinal de emissão acústica se mostrou sensível à variações na velocidade do rebole e tipo de rebole.

**Palavras chave:** retificação, óxido de alumínio; seeded gel; aço ABNT 1045 endurecido.



## ABSTRACT

The development of the metal-working industry is closely related to its ability to efficiently utilize ceramic materials. An important field of application of these materials is the goods industry, where aluminum oxide based ceramics are widely used in the manufacture of wheels grinding of steels. The aim of this study is to evaluate the behavior of different types of aluminum oxide based wheels cylindrical grinding of AISI 1045 steel quenched and to an average hardness 30 HRC (hardness Rockwell). The grinding wheels tested presented different characteristics in terms of abrasive grain (conventional or seeded gel aluminium oxide), particle size, hardness and structure. During the tests the influence of the type of grinding wheel and conditions of operation on the electric current consumed by the main spindle, acoustic emission signal and ground component quality (surface roughness and diametral deviation and run-out) was investigated. The results showed that the seeded gel aluminum oxide grinding wheel showed superior performance in terms of consumed electric current, roughness and diametral deviation. On the other hand, the conventional  $Al_2O_3$  grinding wheel provided lower run-out in the ground component. The acoustic emission signal was affected by wheel speed and wheel type.

**Keywords:** grinding; aluminum oxide; *seeded gel*; AISI 1045 hardened steel.

## 1 INTRODUÇÃO

O descobrimento do ferro, seguramente procedente de meteoritos, ocorreu cerca de quatro milênios a.C., pelos sumérios e egípcios. Com o passar do tempo, cada vez mais objetos de ferro, datados entre o segundo e terceiro milênio a.C., foram encontrados na Mesopotâmia, Anatólia e Egito. Entre os séculos XII e X a.C., ocorreu uma rápida transição no Oriente Médio com substituição das armas de bronze para as de ferro. A produção de artefatos de ferro era difícil e passam pelas seguintes etapas: localizar o mineral, extraí-lo, proceder a sua fundição a temperaturas altas e depois forjá-lo.

Na Europa Central, surgiu no século IX a.C. a "cultura de Hallstatt" em substituição a "cultura dos campos de urnas", que se denominou "Primeira Idade do Ferro", pois coincide com a introdução do uso deste metal. Aproximando-se do ano 450 a.C. ocorreu o desenvolvimento da "cultura da Tène", também denominada "Segunda Idade do Ferro". O ferro era usado em ferramentas, armas e joias, embora segue-se encontrando objetos de bronze.

Da Idade Média até finais do século XIX, muitos países europeus empregavam como método siderúrgico a "farga catalana". Obtinha-se ferro e aço de baixo carbono empregando-se carvão vegetal e o minério de ferro. Este sistema já estava implantado no século XV, conseguindo-se obter temperaturas de até 1200 °C. Este procedimento foi substituído pelo emprego de altos fornos. No princípio se usava carvão vegetal para a obtenção de ferro como fonte de calor e como agente redutor. No século XVIII, na Inglaterra, o carvão vegetal começou a escassear e tornar-se caro, iniciando-se a utilização do coque, um combustível fóssil, como alternativa. O coque foi utilizado pela primeira vez por Abraham Darby, no início do século XVIII. Mesmo assim, o coque só foi empregado como fonte de energia na Revolução Industrial. Neste período a procura foi se tornando cada vez maior devido a sua utilização, como por exemplo, em estradas de ferro (WAGNER, 2003).

O alto forno evoluiu ao longo dos anos. Em 1784 Henry Cort aplicou novas técnicas que melhoraram a produção. Em 1826 o alemão Friedrich Harkot construiu o primeiro alto forno e no final do século XVIII e início do século XIX começou-se a empregar amplamente o ferro como elemento estrutural em pontes e edifícios. Os materiais

contendo ferro trazem grandes contribuições em muitos aspectos da vida moderna, porém não são frequentemente reconhecidos. Podem ser citadas aplicações na construção civil, produção química, comunicações, fornecimento de energia, proteção ambiental, preparação de alimentos e tratamento de água (WILLIAN et al., 2002).

No Brasil, em novembro de 2012 as exportações de produtos siderúrgicos atingiram 789 mil toneladas com valor de 502 milhões de dólares. Com esses resultados, as exportações em 2012 totalizaram 9,0 milhões de toneladas e 6,5 bilhões de dólares, representando declínio de 9,6 % em volume e de 15,5 % em valor, quando comparados ao mesmo período do ano anterior. No que se refere às importações, registrou-se em novembro volume de 279 mil toneladas (US\$ 349 milhões) totalizando, desse modo, 3,5 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos importados no ano, 2,7% acima do mesmo período do ano anterior. O consumo nacional aparente de produtos siderúrgicos em novembro foi de 2,1 milhões de toneladas, totalizando 23,4 milhões de toneladas em 2012 (AÇO BRASIL, 2013).

## **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do tipo de rebolo e dos parâmetros operacionais (velocidade do rebolo, velocidade da peça e velocidade da mesa) sobre o consumo de corrente elétrica pelo motor principal, sinal de emissão acústica e qualidade do componente produzido durante a retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 temperado e revenido para uma dureza média de 30 HRC. As análises são fundamentadas em conceitos técnicos e estatísticos (análise de variância) e também será feita a otimização da operação em função dos parâmetros analisados.

Para se atingir tal objetivo, este trabalho está organizado da seguinte forma: inicialmente a revisão bibliográfica apresentará a operação de retificação com a descrição dos tipos de rebolos, as relações cinemáticas, operação de dressagem, forças de retificação, fluido de corte, qualidade da peça retificada e emissão acústica. O planejamento experimental indicará os materiais e equipamentos a serem utilizados para execução dos testes e para medição das variáveis que se deseja estudar, além dos métodos de trabalho. Posteriormente, os resultados encontrados são discutidos. Para finalizar são apresentadas as

principais conclusões obtidas, proposta de continuidade de trabalho e referências bibliográficas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira: a operação de retificação, descrevendo o processo e suas variantes; o rebolo, relatando os principais tipos, a sua evolução e aplicações; as relações cinemáticas na retificação; a operação de dressagem; as forças de retificação; o fluido de corte; o acabamento superficial e a emissão acústica na retificação.

### **2.1 Operação de retificação**

O processo de retificação é considerado um processo de usinagem de precisão, muito utilizado na indústria metal mecânica e que, nas últimas décadas, obteve grande desenvolvimento tecnológico devido à utilização de novos compostos cerâmicos para fabricação de rebolo, novas máquinas ferramentas com tecnologia avançada e também na utilização deste processo em substituição de outras operações de usinagem. A retificação visa a garantia de altos níveis de qualidade geométrica, dimensional e superficial da peça, mantendo a integridade física do material, isto é, não causando estados críticos de tensão e danos térmicos, de forma a se obter vida mais longa da peça produzida. Na retificação, uma superfície abrasiva (rebolo) gira a alta velocidade (20 - 140 m/s) enquanto é pressionada contra a peça, aplicando uma força perpendicular à área de contato. Desta forma, material é removido da peça e do rebolo (MALKIN, 1989).

A retificação é um dos processos de usinagem mais complexos pois envolve uma gama de parâmetros e variáveis que podem influenciar drasticamente no processo (ALVES et al., 2008). O processo de retificação é normalmente o menos dominado e conhecido, ficando o seu desempenho extremamente dependente da habilidade e experiência do operador. Esta grande dependência de mão de obra é mais crítica na produção de pequenos e médios lotes, nos quais as frequentes mudanças nas condições de operação exigem montagens previsíveis, rápidas e corretas (OLIVEIRA et al., 2001). Além disso, a otimização de um processo demanda alto conhecimento sobre o mesmo, principalmente no que diz respeito às relações entre os parâmetros de entrada e as características de saída. (SILVA et al., 2007).

As principais operações de retificação são:

- Retificação cilíndrica externa entre pontas: método de retificação de superfícies cilíndricas externas em rotação, onde a peça está fixada por meio de duas pontas, através de seus centros. Pode ainda ser subdividida em longitudinal com movimento oscilante, longitudinal com avanço a corte único, mergulho com largura total do rebolo, mergulho de perfilamento e mergulho automático. A operação longitudinal com movimento oscilante (operação empregada neste trabalho), a superfície a ser retificada é sempre maior que a largura do rebolo e o avanço ocorre de modo intermitente, ou seja, a cada movimento oscilante da mesa. A Figura 2.1 mostra a retificação longitudinal com movimento oscilante com avanço simples (LANZA, 1988).

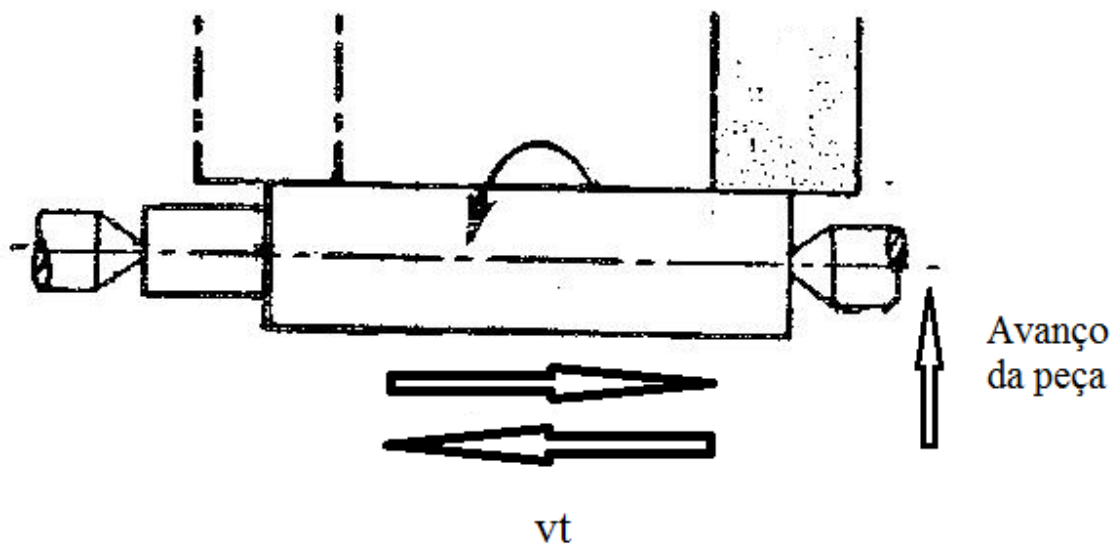


Figura 2.1 Retificação longitudinal com movimento oscilante e avanço simples.  
(LANZA, 1988).

- Retificação cilíndrica interna: método de retificação de superfícies cilíndricas internas (furos) de peças em rotação ou estacionárias, fixadas através de pinças,

mandris ou dispositivos especiais. Pode ser longitudinal ou oscilante, de mergulho ou de entalhe, axial ou de face e longitudinal automática.

- Retificação sem centros (“centerless”): método onde a peça é retificada sem o emprego de qualquer meio de fixação, ou seja, a peça permanece livre até o fim da operação apenas apoiada sobre uma régua. Subdivide-se em: longitudinal, de mergulho e de mergulho automática.
- Retificação plana: executada em peças de superfícies planas, com ou sem perfil, por meio de rebolos com contato radial ou axial. É dividida em seis processos principais, quais sejam: plana de mesa longitudinal com eixo horizontal, plana de mesa longitudinal com eixo vertical, plana de mesa longitudinal com eixo angulável, plana de mesa circular com eixo horizontal, plana de mesa circular com eixo vertical e plana com duplo eixo horizontal.

## **2.2 Rebolo**

A ferramenta de corte empregada na retificação é constituída de abrasivos e material ligante. Além disso, o rebolo deve ser relativamente poroso de modo a permitir o alojamento do fluido de corte e de cavacos. Os rebolos são reconhecidos pela classificação padronizada, em que constam dados sobre suas principais características. A Tabela 2.2 mostra a chave de código utilizada na seleção de rebolos (SALMON, 1992).

Tabela 2.1 - Chave de códigos para a seleção de rebolos (SALMON, 1992).

Abrasivo	Granulometria	Dureza	Estrutura	Ligante
38 <sup>a</sup>	60	K	2	V
A: óxido de alumínio	8-14: muito grosseiro	A: macio Z: duro	0-3: denso 4-6: médio 7-9: poroso 10+: altamente poroso	V: vitrificado B: resinoide R: elástico M: metálico
C: carboneto de silício: preto e verde	16-36: grosseiro 46-80: médio 90-220: fino			
B: cBN	240-1200:			
D: diamante	muito fino			

### 2.2.1 Tipo do abrasivo

Deve ser determinado em função do material a ser retificado. É indicado pelas letras A, C, B e D, como segue: A para óxido de alumínio, B para nitreto cúbico de boro (cBN), C para carboneto de silício (SiC) preto e verde e D para diamante. O número colocado à frente da letra identifica o tipo particular de abrasivo. Por exemplo, o tipo A, óxido de alumínio, tem vários graus diferentes de dureza e tenacidade (no caso de rebolos, alta tenacidade não é uma propriedade desejável, uma vez que, se forem frágeis, provocam o efeito de auto-afiação, mantendo sempre as partículas abrasivas afiadas e prontas para uso). Os abrasivos de carboneto de silício e diamante não são adequados para a retificação de materiais ferrosos devido à afinidade química com o ferro. Assim, o  $Al_2O_3$  e o cBN são recomendados para a retificação de aços e ferros fundidos, enquanto carboneto de silício e diamante são indicados para a retificação de não ferrosos e não metálicos.

AGARWAL et al.(2010) afirmam que a maioria dos estudos sobre retificação de cerâmicas foram realizados em alta velocidade e baixa taxa de remoção de material, e estas investigações foram principalmente concentradas apenas em rebolo de nitreto de silício , óxido de zircônio e alumina.

Algumas propriedades físicas dos principais materiais abrasivos são apresentadas na Tabela 2.2. Observa-se que a estrutura cúbica confere maior dureza ao grão abrasivo e conseqüentemente, maior resistência ao desgaste. De acordo com TAPIWA et al.



(2004), o desgaste abrasivo está associado com a energia dissipada na zona de retificação.

Tabela 2.2 – Algumas propriedades dos materiais abrasivos (MALKIN, 1989)

	Material			
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Carbeto de silício (SiC)	Nitrito cúbico de boro (CBN)	Diamante (D)
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbico	Cúbico
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,98	3,22	3,48	3,52
Ponto de fusão (°C)	2040	~2830	~3200	~3700
Dureza Knoop* (kg/mm <sup>2</sup> )	2100	2400	105kbar (triplo ponto) 4700	130kbar (triplo ponto) 8000

\* valor aproximado – depende da orientação do cristal e pureza.

Óxido de alumínio na forma de gel de semente (“seeded gel”) é produzido por um processo químico no qual as partículas são sinterizados para formar abrasivos microcristalinos. Uma partícula de “seeded gel” com granulometria 60 contém milhões de cristais individuais. Agrupados seeded gel é mais puro, mais duro (porque não é moído, após a sinterização), e mantém a sua nitidez maior que o óxido de alumínio fundido. Rebolos vitrificados de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> “seeded gel” foram introduzidos em 1987 e comercializados a partir em 1988. Eles demonstraram um grande potencial para materiais de difícil retificação na qual tolerâncias estreitas e nenhum dano metalúrgico são especificados. Sob condições ideais seu desempenho supera o do óxido de alumínio fundido (convencional) em termos de vida do rebolo (de 3 a 5 vezes superior) e de taxa de remoção (de 1,5 a 2 vezes). Para a retificação de precisão de aços e ligas, rebolos com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> “seeded gel” são usados sob altas pressões de corte e com elevadas penetrações, sem danos metalúrgicos à peça (MARINESCU et al., 2004).

BRAHIM et al. (2008) comparou o rebolo de óxido de alumínio convencional com o “seeded gel” e observou um desempenho superior deste no que se refere às componentes de força de retificação, nível de tensão residual e taxa de remoção.

Rebolos superabrasivos (cBN e diamante) são amplamente usados em acabamento para diferentes materiais. Estes rebolos têm características tais como alta união dos ligantes e elevada razão de retificação, o que torna este adequado para ultraprecisão na retificação (FATHIMA et al. 2003).

### 2.2.2 Tamanho do grão abrasivo (granulometria)

O tamanho do grão abrasivo deve ser determinado em função da rugosidade desejada para a peça retificada. Para aços não beneficiados recomendam-se granulometria mais grosseiras e para aços tratados granulometrias mais finas. O número indica a classificação de peneiras correspondente ao tamanho, conforme tabelas de Classificação Internacional de Peneiras. A medida é feita em “mesh” (número de fios da peneira por polegada linear) variando de 8 (grosseira) até 400 (fina). Em geral, para aços ferramentas, o tamanho varia de 24 até 100. As classes mais grosseiras são utilizadas para taxas de remoção de material mais elevadas, particularmente na retificação de peças de grande porte, materiais de dureza mais baixa (aços recozidos, por exemplo) ou mesmo quando a superfície de contato entre o rebolo e a peça é grande. As granulações mais finas são recomendadas quando se deseja elevada qualidade de acabamento em materiais duros (como aços temperados) e pequena área de contato (retificação de perfil). Algumas empresas e organizações classificam o tamanho de grão pela medida direta do diâmetro médio em micrometros (LANZA, 1988).

Os grãos abrasivos devem ser sempre mais duros que o material a ser usinado porque o processo requer que cada grão retire uma pequena quantidade de material, se desgastando ao longo do tempo. Ao perder a afiação, a pressão de corte aumenta, fazendo com que o grão se desprenda, dando lugar a um novo abrasivo. Isso só é possível caso se tenha um ligante macio.

### 2.2.3 Dureza do rebolo

Define-se dureza de rebolo como sendo a sua resistência ao arrancamento das partículas abrasivas, ou seja, à resistência à tração do ligante que a priori, não tem relação com a dureza das partículas abrasivas. Deve ser determinada em função da dureza do material a ser retificado. A quantidade de ligante é diretamente proporcional à dureza do rebolo, isto é, quanto mais ligante, menos poros, maior superfície ligada e maior resistência ao arrancamento das partículas abrasivas. Assim, os rebolos ditos duros mantêm bem a sua forma, mas tendem a queimar a peça pois as partículas abrasivas não se soltam durante o trabalho, havendo perda da afiação. Por outro lado, os rebolos considerados macios tendem a perder rapidamente a forma, mas têm baixa tendência à queima da peça, pois perdem partículas abrasivas com maior facilidade, mantendo a afiação do rebolo. A dureza dos rebolos é representada qualitativamente por letras que vão de A (rebolos macios) a Z (duros). Na prática, utilizam-se mais constantemente rebolos com durezas intermediárias. Rebolos de maior dureza devem ser escolhidos para a retificação de materiais mais macios, para pequenas áreas de contato (maiores pressões), para baixas velocidades periféricas do rebolo e quando a retificadora não propicia boa rigidez. Os rebolos de baixa dureza são mais adequados para materiais mais duros, que não podem sofrer danos térmicos, para áreas de contato maiores e para maiores velocidades periféricas do rebolo (DINIZ, 1992).

### 2.2.4 Estrutura do rebolo

A estrutura do rebolo, também chamada de porosidade representa na verdade, a relação entre o volume de grãos abrasivos, volume de ligante e o volume de espaços vazios (poros). A estrutura classifica o espaçamento entre os grãos abrasivos no rebolo. Quanto menor o número, maior a quantidade de partículas abrasivas e menor o espaçamento entre elas, portanto mais fechada é a estrutura. Conseqüentemente, quanto maior o número, menor quantidade de partículas e mais aberta a estrutura. Este número é opcional na identificação, pois há fabricantes que usam um padrão fixo para o espaçamento entre as partículas no seu processo de fabricação de rebolos. Nota-se que, quanto mais aberta a estrutura, mais facilmente se acumulam os cavacos, o que torna essa estrutura adequada para remoção de grandes quantidades de material com mais

rapidez. Uma estrutura fechada determina um aumento do número de arestas cortantes na periferia do rebolo.

### 2.2.5 Ligante

Os ligantes podem ser divididos basicamente em vitrificados, orgânicos e metálicos:

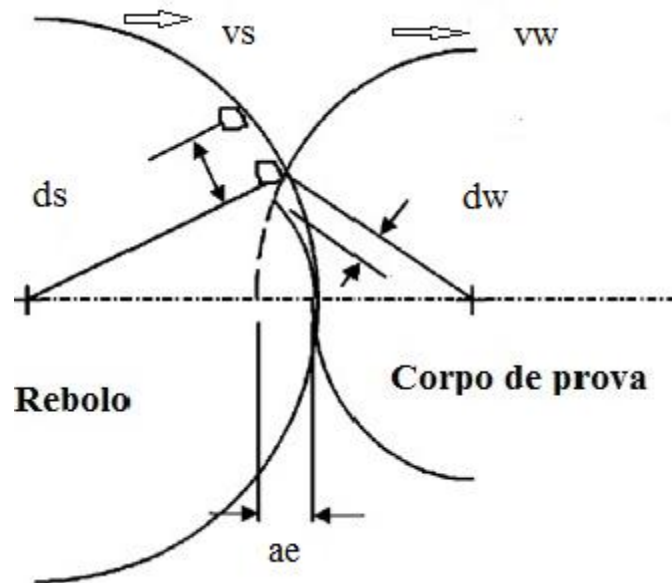
- Vitrificado (V): São as mais comuns para retificação de precisão. Sua rigidez facilita a manutenção do perfil do rebolo, permitindo trabalhos de maior qualidade, porém não resistem a grandes impactos e pressões. Possuem alta estabilidade frente a ácidos, água, fluidos de corte, óleo e gases. Historicamente, a velocidade periférica máxima do rebolo com ligante vitrificado é de aproximadamente  $v_s = 33$  m/s em função da sua limitada resistência à tração. No entanto, com o auxílio de reforços é possível chegar-se a  $v_s = 80-90$  m/s. Jackson et al. (2001) estudaram o desempenho de rebolos com ligantes vitrificados e afirmam que dois fatores são importantes ao considerar esse tipo de ligante: a expansão térmica e a estabilidade química em relação aos fluidos de corte. Quanto à expansão térmica, é desejável que ligante e abrasivos tenham comportamentos semelhantes a fim de evitar tensões induzidas pelo próprio processo de retificação. Em relação à estabilidade química, esta deve ser a mais alta possível para minimizar a perda excessiva dos grãos do ligante e, conseqüentemente, evitar um desgaste prematuro do rebolo.
- Orgânicos: incluem os ligantes resinóide (B), borracha (R) e goma-laca (E) e apresentam como principais características maior elasticidade (resiliência), maior resistência mecânica, maior capacidade de suportar impactos, menor resistência a altas temperaturas e menor resistência ao ataque químico quando comparados aos vitrificados. Os ligantes resinóides podem operar até  $v_s = 100$  m/s dependendo da construção do rebolo. O ligante resinóide é mais comum entre rebolos superabrasivos, principalmente com abrasivos de diamantes para a retificação de materiais não ferrosos duros e com cBN para a retificação de aços endurecidos.
- Metálicos (M): é mais resistente ao calor que os orgânicos e mais resistente ao impacto que o vitrificado. Este ligante é utilizado basicamente com superabrasivos, como por exemplo na fabricação de rebolos de diamante para

retificação de cerâmica. São usados também na confecção de rebolos condutores para a retificação eletrolítica (STEMMER, 1982).

O projeto do rebolo é tão crítico para o sucesso do processo abrasivo e inclui: as dimensões físicas, a forma produzida sobre a superfície do abrasivo, o material do cubo para suportar as rotações, o desvio de batimento, a estabilidade dinâmica e a resistência química (BONNER, 2003). A qualidade geométrica, dimensional e de superfície de peças retificadas exigem tolerâncias bem apertadas para essas ferramentas. No entanto, a remoção de material na retificação induz a geração de forças e fluxos de calor que pode ter efeitos prejudiciais sobre a integridade do rebolo se não forem bem controlados. Por estas razões, os parâmetros de retificação precisam ser trabalhados para otimizar a integridade da superfície da peça e a taxa de remoção de material (BRAHIM et al., 2008).

### **2.3 Relações cinemáticas**

As operações abrasivas são realizadas por uma infinidade de arestas cortantes com geometria desconhecida e distribuídas de forma irregular sobre a superfície do rebolo. Para as operações bidimensionais de (mergulho), tem-se as grandezas indicadas na Figura 2.2 (MARINESCU et al., 2004):



Grandezas relativas ao rebolo:

diâmetro do rebolo ( $d_s$ )

velocidade do rebolo ( $v_s$ )

Grandezas relativas à peça:

diâmetro da peça ( $d_w$ )

velocidade da peça ( $v_w$ )

Figura 2.2 Ilustração da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (MARINESCU et al, 2004).

Nas operações longitudinais (tridimensionais) a velocidade de avanço é paralela ao eixo de rotação da peça e tem-se ainda a penetração de trabalho ( $a_e$ ), definida como a penetração do rebolo na peça na direção perpendicular ao avanço. Na retificação cilíndrica  $a_e$  varia de 0,02 a 0,10 mm. A relação entre velocidade do rebolo e a velocidade da peça varia de 50 a 100 na retificação cilíndrica e de 100 a 200 na retificação plana (LANZA, 1988).

### 2.3.1 Comprimento de contato

O comprimento do arco de contato na retificação externa, representado por  $l_c$ , na Fig. 2.3, pode ser expresso pela Equação 2.1, desde que sejam desprezadas as deformações do rebolo e peça.

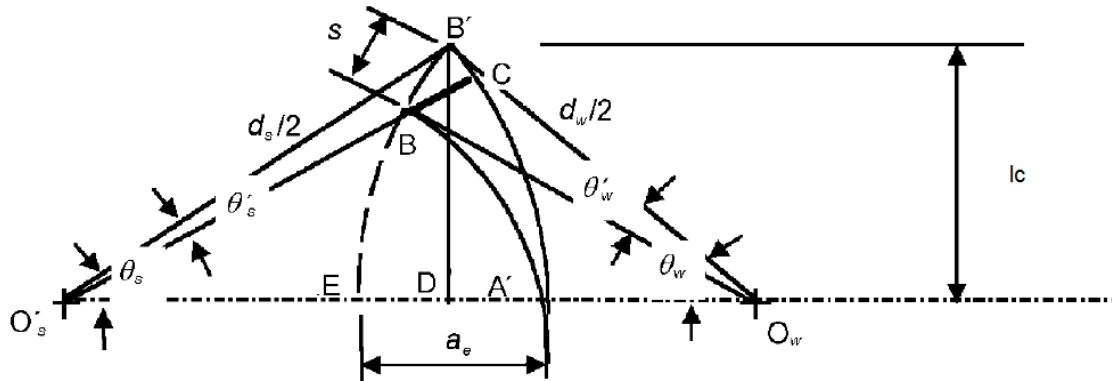


Figura 2.3 Geometria do arco da área de contato na retificação externa (MALKIN, 1989).

$$l_c \approx B'D' = \sqrt{d_s A'D'} = \sqrt{d_w ED'} \quad (2.1)$$

Para a retificação interna,  $l_c$  é dado pela Equação 2.2:

$$l_c = \frac{a}{1 + \frac{d_s}{d_w}} \quad (2.2)$$

Portanto, o comprimento de contato pode ser simplificado pelas Equações 2.3 e 2.4:

$$l_c = (a \cdot d_e)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (2.4)$$

Onde  $d_e$  representa o diâmetro equivalente do rebolo. No caso da retificação externa usa-se o sinal positivo, enquanto que na retificação interna usa-se o sinal negativo. Para a retificação plana  $d_e = d_s$  ( $d_w = \infty$ ). Em geral, o valor do comprimento de contato varia de 0,1 a 10 mm, dependendo da operação (MALKIN, 1989).

### 2.3.2 Espessura de corte máxima

Considerando a trajetória do abrasivo ( $l_k$ ) como um arco circular, a espessura de corte máxima do cavaco não deformado para retificação cilíndrica externa ( $h_m$ ) é representado na Figura 2.4:

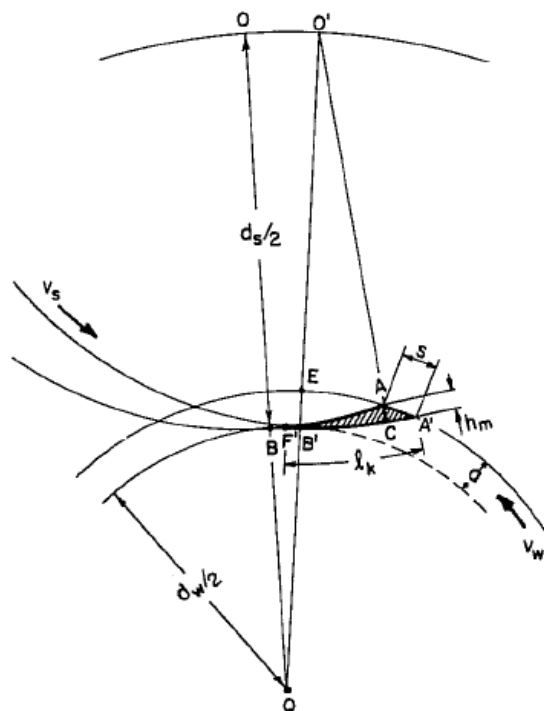


Figura 2.4 Espessura máxima do cavaco não deformado na retificação cilíndrica externa (MALKIN, 1989).

A espessura de corte máxima do cavaco não deformado ( $h_m$ ) pode ser determinada pela Equação 2.5 e corresponde à força máxima de retificação.



$$h_m = 2L \left( \frac{v_w}{v_s} \right) \left( \frac{a}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{L^2}{d_e} \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^2$$

Considerando

$$h_m \ll l_c$$

$$h_m = 2L \left( \frac{v_w}{v_s} \right) \left( \frac{a}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2.5)

### 2.3.3 Espessura de corte equivalente

Este parâmetro está relacionado ao mecanismo de desgaste da ferramenta e à otimização das condições de trabalho. Peters e Decneut (1975), criaram este parâmetro a partir da compilação de diversos estudos feitos sobre o processo de retificação. A espessura equivalente ( $h_e$ ) representa a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo com a velocidade periférica deste e cujo volume específico equivale àquele retirado na peça no tempo (MALKIN, 1989). Isto é, trata-se da espessura que teria uma fita de cavaco caso fosse possível retirá-la continuamente, conforme ilustra a Figura 2.5.

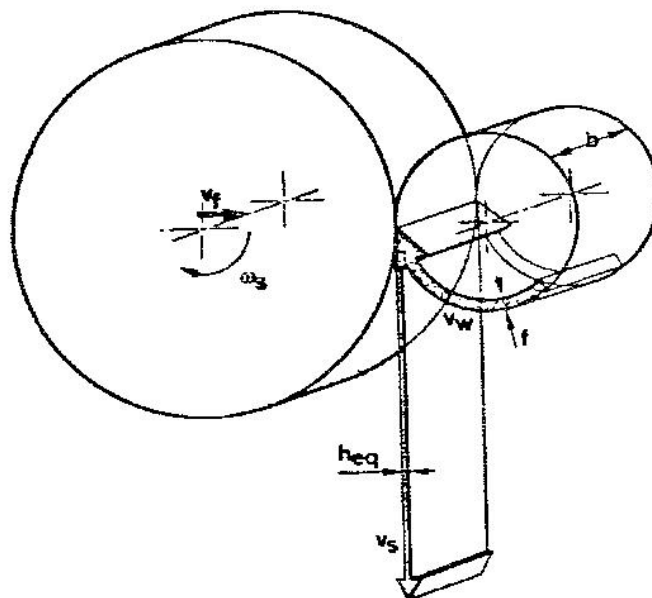


Figura 2.5 Representação esquemática da espessura de corte equivalente (MALKIN, 1989).

O parâmetro definido pela Equação 2.6 pode ser aplicado a qualquer um dos diferentes tipos de processos de retificação, permitindo estabelecer comparações e transferências de resultados entre eles.

$$h_e = v_w \frac{a_e}{v_s} = \frac{Q'_w}{v_s} \quad (2.6)$$

O aumento de  $h_e$  (causado pela elevação de  $v_w$  ou  $a_e$  ou ainda pela redução de  $v_s$ ) provoca a elevação das forças de retificação e também da rugosidade da superfície retificada.

## 2.4 Dressagem

Consiste em preparar o rebolo através da usinagem da superfície de trabalho, normalmente utilizando uma ferramenta de diamante (dressador). A dressagem é realizada sobre um rebolo de corte na preparação para a retificação. Os aspectos da dressagem incluem a eliminação dos erros de forma, proporcionar uma superfície de corte afiada (SHUANG et al., 2009). A dressagem de um rebolo tem três finalidades principais:

- Obtenção de concentricidade da face de trabalho com o eixo de rotação;
- Perfilamento da face de trabalho (reestabelecimento da forma);
- Arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho.

A operação de dressagem é de extrema importância para a retificação. O processo de condicionamento do rebolo (dressagem e limpeza) determina a taxa de remoção de material, as forças de retificação, a qualidade da superfície e as propriedades materiais da zona de subsuperfície (WEGENER et al., 2011).

A agressividade de um rebolo determina sua capacidade de remoção de material em uma operação de retificação. Do original em inglês, a palavra dressagem possui dois significados: “*truing*”, que significa o perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma, (isto é, a obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo) e “*dressing*”, que visa a remoção dos abrasivos

desgastados e preparação do rebolo para se obter o desempenho desejado. Em rebolos convencionais, “*truing*” e “*dressing*” são realizados simultaneamente, ao passo que em rebolos superabrasivos estas operações são conduzidas de forma independente (OLIVEIRA e PURQUÉRIO, 1989). Bianchi et al. (1992) relacionou alguns critérios utilizados na retificação para definir o fim da vida de rebolos, isto é, a necessidade de realização de dressagem:

- Integridade superficial da peça: a temperatura na interface rebolo-peça aumenta com a perda da agressividade (perda de afiação). Tal elevação de temperatura pode provocar transformações na estrutura do material da peça, o aparecimento de queimas ou trincas na superfície da peça ou até a elevação de tensões residuais;
- Erros de forma: o aumento da temperatura no contato rebolo peça, associada a falta de homogeneidade do material e rigidez não uniforme do sistema máquina ferramenta peça dispositivo resultam em variações na profundidade de corte que levam aos erros de forma. Os erros de forma também podem ocorrer nas operações de mergulho, devido ao desgaste volumétrico do rebolo. Estes ocorrem de forma mais acentuada nos cantos do rebolo e em pequenos raios de curvatura;
- Vibrações: as vibrações do sistema peça-dispositivo estão relacionadas com fenômenos de auto-excitação que ocorrem principalmente quando a força de retificação aumenta. O rebolo gira a altas rotações e sofre desgaste diferenciado ao longo de seu perímetro devido à falhas de fabricação, o que provoca também variações das forças de corte ao longo da vida do rebolo. Tais variações dinâmicas excitam o sistema que começa a vibrar. A vibração pode chegar a tais níveis que inviabiliza a continuidade da operação.
- Acabamento da peça: em operações de mergulho a perda de agressividade leva ao aumento de temperatura e provoca um maior fluxo lateral do material durante a passagem do grão abrasivo. Este fenômeno gera o aumento da rugosidade da peça. Nas operações de passagem o desgaste volumétrico do rebolo provoca mudanças na geometria da área de trabalho, o que faz com que a rugosidade aumente;

- Erros dimensionais: a dressagem pode ser feita como uma forma de ter uma referência da posição da superfície do rebolo. Isto é comum em retificadoras de comando numérico;
- Forças elevadas: apesar de não ser uma grandeza normalmente utilizada como critério de fim de vida do rebolo, a força de retificação é a causadora de diversos problemas que exigem a dressagem do rebolo. Sistemas de monitoramento de potência podem ser utilizados para determinar o momento de dressagem do rebolo.

A dressagem normalmente é executada por meio de avanço longitudinal do dressador ( $S_d$ ) com uma profundidade ( $a_d$ ), enquanto o rebolo gira conforme a Figura 2.6.

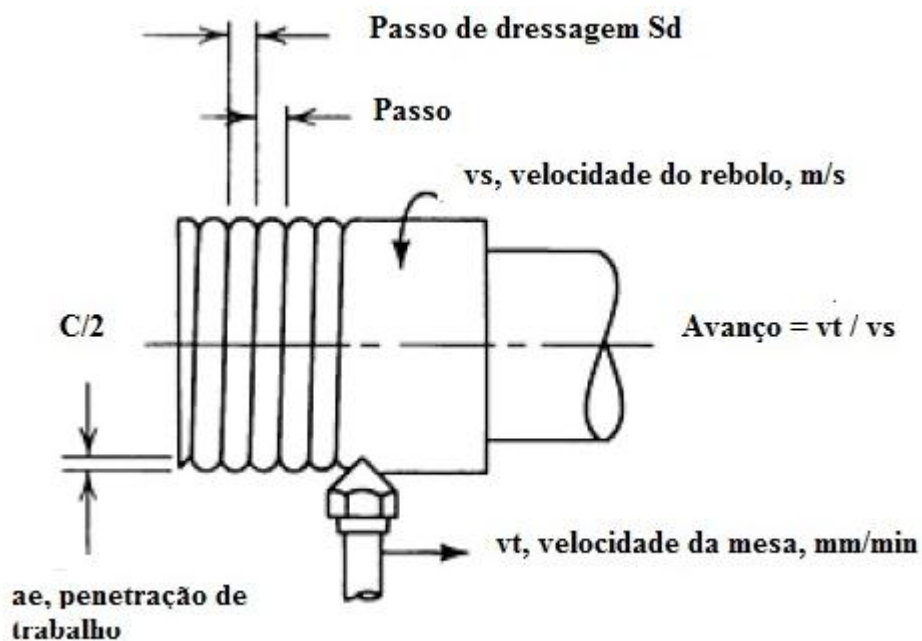


Figura 2.6 Esquema de dressagem de rebolos convencionais (OLIVEIRA e PURQUÉRIO, 1989).

As ferramentas de dressagem são classificadas em dois grupos, segundo seu princípio de atuação cinemática: dressadores estáticos (só possuem movimento de avanço) e dressadores rotativos (possuem também movimento de rotação). No grupo dos dressadores estáticos, há dois tipos de ferramentas de: ponta única e conglomerada. O dressador de ponta única é constituído de um suporte rígido para evitar vibrações, tendo um único diamante fixado na extremidade e que pode ser bruto (para produção de perfis

retilíneos) ou lapidado (para a obtenção de perfis complexos). No dressador conglomerado, diversos diamantes são posicionados sobre uma liga metálica e, de acordo com a configuração do diamante, têm-se alguns tipos característicos, como por exemplo: bastão dressador, “fliese”, etc. No grupo de dressadores rotativos destacam-se o rolo dressador (fabricado em aço sinterizado ou diamantado) e o rebolo dressador (composto de um disco de liga metálica impregnada com diamantes), utilizado principalmente para perfilhamento (OLIVEIRA e DORNFELD, 2001).

#### 2.4.1 Os efeitos da dressagem

A operação de dressagem gera a fratura e a remoção de grãos abrasivos e também produz uma rosca na superfície do rebolo. Os dois efeitos da dressagem são classificados como (OLIVEIRA, 1992):

- Macroefeito: é causado pelo formato do dressador e das condições de dressagem. Durante a dressagem os grãos abrasivos são fraturados e removidos pelo dressador e a combinação de movimentos entre o rebolo e o dressador forma uma rosca na superfície daquele. Este tipo de superfície pode ser visualizada na dressagem de um rebolo com granulometria muito fina e estrutura fechada.
- Microefeito: é causado pela fratura das partículas dos abrasivos quando novas arestas de corte são criadas pelo dressador. A agressividade das arestas depende da friabilidade do grão e também das condições de dressagem. Na dressagem fina partículas muito pequenas são removidas ou fraturadas, o que causa a criação de planos nas superfícies de corte dos grãos tornando-os menos agressivos. Na dressagem grosseira grandes partes do grão são fraturadas e arestas afiadas maiores se formam.

A operação de dressagem pode ser mais facilmente quantificada em função do grau de recobrimento ( $U_d$ ). Conforme mostrado na Equação 2.8, o grau de recobrimento é a razão entre a largura do dressador ( $b_d$ ) e o passo de dressagem ( $S_d$ ):

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (2.8)$$

Quando  $U_d = 1$ , produz-se na superfície de trabalho do rebolo uma rosca com largura igual ao passo.  $U_d < 1$  representa uma largura do dressador inferior ao passo de dressagem, portanto, regiões do rebolo não são atingidas pelo dressador. Por fim, quando  $U_d > 1$ , a largura do dressador é superior ao passo de dressagem, produzindo uma rosca fina na superfície de trabalho. Em geral, o valor de  $U_d$  varia de 1 a 20 em aplicações industriais. Valores mais elevados conferem rugosidade mais baixa à superfície da peça e temperaturas mais altas de retificação.

## 2.5 Forças e potência de retificação

O conhecimento das forças atuantes na retificação é de extrema importância tanto na área de projeto como na área de processo. Na área de projeto, as forças de corte são parâmetros que determinam tanto a potência motriz do rebolo como as necessidades estruturais da máquina. Na área de processo, as forças de corte causam influenciam a qualidade dimensional e geométrica do produto acabado, sua rugosidade, o desgaste do rebolo e também o tempo de retificação.

A força de retificação pode ser decomposta em uma componente normal e outra tangente à superfície que está sendo retificada, entretanto, por se tratar de uma situação na qual se tem apenas a condição de escorregamento, a força tangencial pode ser facilmente obtida quando se conhece a força normal e o coeficiente de atrito entre o rebolo e a peça (LINDSAY, 1995).

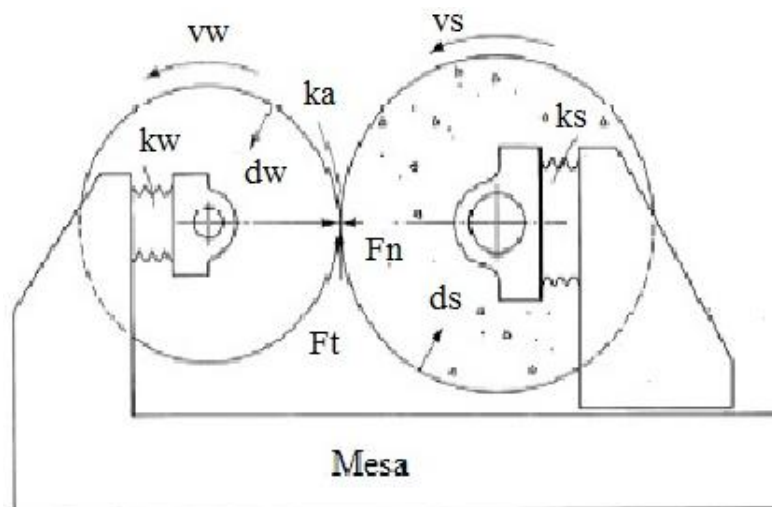


Figura 2.7 Forças atuantes na operação cilíndrica externa (MARINESCU et al., 2004).

Conhecendo-se a força tangencial e as velocidades do rebolo e da peça, é possível determinar a potência de retificação requerida pelo motor de acionamento do eixo principal por meio da Equação 2.9, na qual emprega-se o sinal positivo para a retificação discordante e o sinal negativo para a operação concordante. Entretanto, como  $v_s$  é muito maior que  $v_w$ , frequentemente este é desprezado sem grande prejuízo para a determinação exata da potência de retificação.

$$P = F_t (v_s \pm v_w) \quad (2.9)$$

As forças de retificação desempenham um papel importante no processo, uma vez que são indicadores importantes para caracterizar o modo de remoção de material (a energia específica de retificação e os danos de superfície são fortemente dependentes das forças de retificação). Portanto, o conhecimento das forças de retificação é essencial. As tensões residuais são o resultado de alterações na camada superficial, transformação microestrutural e deformações. A camada superficial é modificada por meio da introdução de grande quantidade de calor na zona de retificação. Transformações microestruturais podem ser induzidas por altas temperaturas e taxas de resfriamento e as deformações pode ser causada por compressão ou cisalhamento (ALI et al., 2003).

Quando o rebolo toca a peça a primeira vez, todo o conjunto máquina-rebolo-peça se deforma elasticamente devido a ação da componente normal da força de retificação. A primeira passagem do rebolo não remove a penetração de trabalho previamente estabelecida. Assim, cada nova passagem do rebolo tem-se o alívio progressivo das deformações elásticas, até que a penetração de trabalho inicialmente programada seja atingida. Este alívio progressivo causado por sucessivas passagens do rebolo sobre a peça é chamado faiscamento ou centelhamento (“sparkout”). O faiscamento garante à operação de retificação a capacidade de remover quantidades infinitesimais de material, assegurando tolerâncias dimensionais e geométricas inatingíveis por operações de usinagem com ferramentas de geometria definida (SILVA et al., 2005).

## 2.6 Fluidos de corte

Os fluidos de corte tem duas propriedades distintas primordiais e que são exigidos simultaneamente durante a operação: lubrificação e refrigeração. A função lubrificante confere ao rebolo um melhor poder de corte, isto é, reduz o atrito entre o grão do rebolo e o material que está sendo removido, portanto o rebolo passa a ter um poder de remoção de material maior, com vida mais longa. A função refrigerante impede que o inevitável calor gerado pelo atrito entre rebolo e peça permaneça de forma acumulativa na peça. Sua função é, portanto, a de conduzir esse calor o mais rápido possível para fora da zona de retificação. Outras propriedades desejáveis são a remoção de cavacos e a proteção da peça e máquina da oxidação.

O emprego de fluidos de corte na retificação deve atender aos requisitos descritos anteriormente, de acordo com as necessidades específicas de cada operação. As principais funções do fluido de corte são: lubrificação mecânica do contato abrasivo-peça, lubrificação físico-química do contato abrasivo-peça, refrigeração da interface rebolo-peça, refrigeração da peça e a remoção de resíduos. Operações com elevada área de contato rebolo-peça e que produzam cavacos mais longos exigem fluidos de corte com ação predominantemente lubrificante (óleo integral), ao passo que em operações com áreas de contatos menos extensas ou que produzam cavacos na forma de pó devem ser empregados fluidos refrigerantes. As funções de refrigeração e de remoção de cavacos exigem elevada vazão de fluido, entretanto, a função lubrificante pode ser alcançada com baixas vazões, desde que o fluido tenha acesso à interface rebolo-peça. Fluidos de corte com elevado poder lubrificante reduzem o atrito entre rebolo e peça, evitando assim a elevação da temperatura da peça e tornando a operação mais eficiente. Além disso, óleos integrais possuem ponto de ebulição superior ao da água em aproximadamente 200°C, portanto, suportam temperaturas mais elevadas. Entretanto, além do custo desfavorável, fluidos de corte com alto poder lubrificante apresentam viscosidade elevada, o que dificulta seu acesso à interface cavaco-ferramenta, mesmo empregando bombas potentes (MARINESCU et al., 2004).

Os fluidos de corte podem ser classificados nas seguintes categorias: gasosos (ar, CO<sub>2</sub> ou gases inertes), óleos integrais, soluções (miscíveis em água) e emulsões. Os fluidos



gasosos raramente são empregados na indústria devido às limitações técnicas e econômicas. Óleos integrais consistem de um óleo base ao qual são adicionados aditivos específicos. De acordo com o tipo de óleo base são classificados como naturais (vegetais), minerais e sintéticos (estes divididos em dois grupos, um com estrutura de hidrocarboneto e o outro com estrutura complexa). As soluções podem ser a base de sais minerais ou soluções que utilizam compostos orgânicos e sintéticos. As emulsões podem ser a base de óleo integral, semissintéticas ou sintéticas (SALMON, 1992).

A aplicação de fluidos em processos de retificação está se tornando cada vez mais importante com a crescente elevação da taxa de remoção de material, da maior exigência de qualidade e de vida mais longa para o rebolo. A seleção do fluido ideal passa pelo tipo e pela forma de aplicação, que são duas maneiras de cumprir as metas de produtividade e podem ser tão importantes quanto a seleção do rebolo. A correta aplicação de fluido reduzirá a temperatura da zona de contato e o risco de queima da peça. Na ausência do fluido de corte a superfície da peça é temperada, gerando tensões residuais indesejáveis (de tração) na superfície da peça. As Tensões residuais são o resultado de alterações na camada superficial, transformação microestrutural e deformações. A camada superficial é modificada por meio da introdução de grande quantidade de calor na zona de retificação. Transformações microestruturais podem ser induzidas por altas temperaturas e taxas de resfriamento e as deformações podem ser causadas por compressão ou cisalhamento (ALI et al., 2003).

O fluido de corte tem um papel significativo na remoção do calor da zona de retificação. Fluidos à base de óleo integral (lubrificantes) são usados na maioria dos países europeus, por propiciarem melhor acabamento superficial à peça, entretanto, um problema adicional dos óleos puros é o risco de incêndio, especialmente em superligas retificadas sob altas velocidades do rebolo e conseqüentemente (altas pressões de fluido de corte), (WEBSTER et al., 1995).

Uma alternativa atrativa para o uso de fluidos de corte e processos de retificação é a aplicação de mínima quantidade de fluido (MQF), também chamada de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Neste processo, gotículas de óleo dispersas em um jato de ar são transportadas diretamente para a zona de contato entre rebolo e peça, proporcionando refrigeração e lubrificação. Tawakoli et al. (2009) investigaram os

efeitos da dureza do material da peça e dos parâmetros de retificação sobre o processo de retificação com MQF do aço endurecido 100Cr6. Com base nos resultados das suas investigações, melhorias significativas podem ser obtidas para retificação com MQF em grãos de gel de semente, estes apresentaram um desempenho superior utilizando óleo integral. Brunner (1998) mostrou que a retificação com MQF do aço 16MnCr5 equivalente ao ABNT 5115, com a aplicação de 4 ml/min éster de óleo, (em comparação com 11 ml/min de óleo mineral), reduz as forças normal e tangencial a um terço, mas aumenta a rugosidade da superfície em 50%. Estes resultados foram confirmados por Tawakoli et al. (2010) e demonstraram adicionalmente que o tipo de fluido empregado pode influenciar o acabamento superficial da peça.

## **2.7 Acabamento superficial**

O acabamento de uma superfície usinada é o resultado da combinação de vários fatores os quais podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas. 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 granulometria do rebolo, condições de operação, máquina ferramenta, condições de dressagem, propriedades do material da peça e fluido de corte (tipo e forma de aplicação). Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície.

Os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade estão descritos na Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002). A rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ) é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. A rugosidade quadrática média ( $R_q$ ) é a raiz quadrada da média de valores das ordenadas no comprimento de amostragem e a rugosidade máxima ( $R_t$ ) é a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação. Por fim, a rugosidade total ( $R_z$ ) é a soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.

Ao contrário das operações com ferramentas de geometria definida, a determinação teórica da rugosidade não é simples nas operações abrasivas devido à aleatoriedade na distribuição dos abrasivos na superfície do rebolo (MALKIN, 1989). Condições de dressagem mais finas resultam em rugosidade mais baixa da peça, entretanto, tem-se a elevação da potência e energia específica de retificação e o conseqüente risco de danos térmicos. A granulometria do abrasivo tem influência sobre a rugosidade da peça, uma vez que os grãos são deformados e fraturados durante a operação de dressagem. Somente após os efeitos da dressagem serem eliminados da superfície do rebolo é possível observar valores de rugosidade mais baixos em peças retificadas com rebolos de granulometria mais fina.

Lindsay et al. (1971), verificou que a rugosidade  $R_a$  é diretamente proporcional a força de retificação para  $(F'_n)^{1/3}$ ; para menores intensidades de forças são produzidas menores rugosidades. A velocidade do rebolo ( $v_s$ ) afeta a rugosidade  $R_a$  apenas quando a força de retificação é reduzida durante o avanço. Alves et al. (2008) comprovou que para uma velocidade de mergulho 0,25 mm/min, a rugosidade atingiu baixos valores, próximos de 0,21  $\mu\text{m}$ , utilizando óleo solúvel a base vegetal devido a sua melhor capacidade de lubrificação.

## **2.8 Emissão Acústica (EA)**

Emissão acústica (EA) são ondas acústicas geradas dentro do material a partir de excitações externas em alta pressão. As frequências da EA (50 kHz a 1000 kHz) estão muito acima dos ruídos convencionais de usinagem (ruído de rolamento, atrito de metais, etc.) não relacionados ao corte de material, sendo assim, é possível utiliza-la para descrever o fenômeno de corte de material na retificação (DORNFELD, 1992).

Segundo (DORNFELD et al., 1984), a EA é muito eficiente para a detecção de contato entre o rebolo e a peça, uma vez que esses sinais apresentam sensibilidade superior àqueles obtidos através de medições de força do processo. O ajuste da sensibilidade do sinal é de fundamental importância para que os valores apresentados mostrem com precisão os dados do processo de retificação.

Atualmente a EA é utilizada principalmente para detecção de contato entre o rebolo e a peça, para controle do tempo de faiscamento e o controle da qualidade da dressagem, do

desgaste e da condição topográfica do rebolo. Sabe-se que o sinal de EA carrega informações potencialmente valiosas sobre o processo de retificação, podendo ser utilizadas no monitoramento de operações automáticas ou comandadas numericamente. No entanto, este sinal é produzido na zona de retificação onde geralmente é muito mais complicada e difícil a obtenção de informações úteis diretamente a partir do sinal bruto de EA. Yang (2012) comparou o comportamento de diferentes tipos de rebolos por meio do monitoramento do sinal de emissão acústica e conclui que o método de recebimento do sinal possui baixa sensibilidade às mudanças dos parâmetros de retificação. Tonshoff et al. (2001) implementaram a miniaturização de sensores de EA permitindo a combinação de diferentes sensores de EA para a medição de temperatura e força de retificação em regiões próximas do sensor (Alves et al., 2008).

### **3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Este capítulo apresenta o planejamento experimental para realização dos testes. Foram descritos os materiais e equipamentos a serem utilizados e métodos empregados. Os experimentos foram 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 que possui a seguinte faixa de composição química básica: carbono (0,43 – 0,50%), manganês (0,60 – 0,90%), fósforo (máximo de 0,03%) e enxofre (máximo de 0,05%). Este aço é amplamente utilizado para a fabricação de eixos e peças para as indústrias agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, entre outros. O material recebeu tratamento térmico de têmpera e revenimento na empresa Traterminas Ltda (Contagem, MG), o que resultou em uma dureza média de 30HRC. Para os testes de retificação foram preparados vinte corpos de prova com 150 mm de comprimento e 31,30mm de diâmetro, os quais posteriormente foram torneados (para eliminar os erros de forma do tratamento térmico) para 150 mm de comprimento e 30,80 mm de diâmetro. Os corpos de prova possuem um furo de centro em cada face para fixação no contra-ponta da máquina retificadora. Os rebolos utilizados neste trabalho foram fornecidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos (Guarulhos, SP). Os rebolos, especificados na Tabela 3.1, possuem diâmetro externo de 152,40 mm, largura de 12,70 mm e furo central com diâmetro de 31,80 mm. As denominações utilizadas durante os experimentos também estão indicados na Tabela 3.1, bem como as seguintes características: tipo de abrasivo, granulometria, dureza, estrutura e ligante.

Tabela 3.1 Rebolo usados no trabalho experimental

Tipo	Denominação	Abrasivo	Granulometria	Dureza	Estrutura	Ligante
1	5SG120 K8VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Seeded gel)	Fina (120)	Baixa (K)	Aberta (8)	Vitrificado (V)
2	38A120 K4VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Convencional)	Fina (120)	Baixa (K)	Fechada (4)	Vitrificado (V)
3	5SG60 I4VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Seeded gel)	Média (60)	Baixa (I)	Fechada (4)	Vitrificado (V)
4	5SG60 K8VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Seeded gel)	Média (60)	Baixa (K)	Aberta (8)	Vitrificado (V)
5	5SG60 K4VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Seeded gel)	Média (60)	Baixa (K)	Fechada (4)	Vitrificado (V)
6	38A60 K8VH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Convencional)	Média (60)	Baixa (K)	Aberta (8)	Vitrificado (V)

A preparação (dressagem) dos rebolos antes de cada experimento foi realizada com um dressador de diamante de ponta única com um raio de 1,1 mm, vide Figura 3.1. Durante os testes foi aplicada lubrificação por mínima quantidade de fluido (MQF). O fluido utilizado é semissintético de base vegetal (Blaser Vasco 1000).



Figura 3.1 Dressador de ponta única

### 3.2 Equipamentos

Os testes foram executados em uma retificadora cilíndrica externa WMW, modelo SWPO80 (Figura 3.2). Esta máquina possui potência de 2,4kW no eixo principal, velocidades de rotação do rebolo de 1500 e 3000 rpm e velocidades de rotação da peça de 85 e 170 rpm. O método de trabalho foi a retificação cilíndrica externa entre pontas longitudinal com movimento oscilante.



Figura 3.2 Retificadora cilíndrica externa WMW modelo SWPO80

Foi instalado um bico para aplicação de MQF sobre o rebolo próximo à peça, (Figura 3.3) e junto ao bico uma mangueira de 4mm foi conectada a um reservatório na parte superior da máquina. O reservatório é conectado ao bico por um tubo de aço inoxidável. Neste tubo também é conectada a mangueira de ar comprimido. No bico de refrigeração ocorre a mistura do ar comprimido com o fluido para aplicação de MQF. 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 1,5 mL/h. A distância entre o bocal de saída do MQF e a interface rebolo-peça é de 60mm.

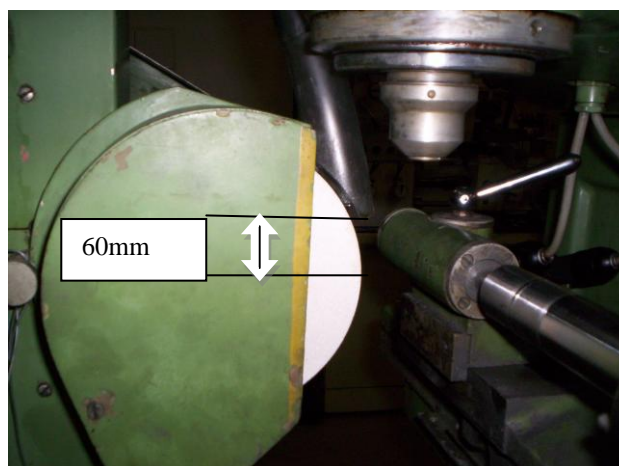


Figura 3.3 Sistema de aplicação de MQF

Como a máquina retificadora originalmente possui sistema manual de avanço longitudinal da peça, foi feita uma adaptação para a introdução de um sistema automático. Para tanto o fuso responsável pelo movimento do avanço foi conectado a um redutor (1:23) e este a um motor elétrico trifásico (1500W e 1800rpm). Por sua vez, o acionamento deste motor foi realizado por um inversor de frequência Voges modelo COMMANDER SK 1100037. Desta forma foi possível variar a velocidade de avanço longitudinal da peça de 39 a 78 mm/min. Este sistema também foi utilizado para a realização da dressagem do rebolo com um grau de recobrimento constante ( $U_d = 9$ ), onde a largura de contato ( $b_d$ ) foi de 0,540 mm e o passo de dressagem ( $S_d$ ) foi de 0,06 mm.

Para a medição da corrente elétrica consumida pelo motor principal foi utilizado um amperímetro de alicate Polimed modelo 30C ligado a um multímetro Polimed modelo 4650.

Durante os experimentos foi medido o sinal de emissão acústica. Para tal, um transdutor Mc Wade Monitoring System (Figura 3.4) foi fixado na parte traseira do entre-pontas. O sensor tem sensibilidade para captar sinais em uma faixa de frequências bem definida e sinais de frequências fora dessa faixa irão gerar ruídos de alta intensidade, que podem comprometer a interpretação dos resultados obtidos, portanto junto ao sensor foi instalado um filtro passa-alta de 150 kHz. Para eliminar folgas e garantir que os corpos de prova fossem montados sempre na mesma posição no entre-pontas, foi feita uma marcação na mesa. O transdutor de emissão acústica foi conectado a um osciloscópio TEKTRONIX modelo TDS 1001C-EDU, utilizado para coleta e armazenamento dos dados.





Figura 3.4 Transdutor de emissão acústica.

Ao final dos experimentos a rugosidade dos corpos de prova foi medida por meio de um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 301 com comprimento de amostragem de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4,0 mm, ilustrado na Figura 3.5. Os seguintes parâmetros foram avaliados: rugosidade aritmética ou média ( $R_a$ ), rugosidade quadrática média ( $R_q$ ), rugosidade máxima ( $R_t$ ) e rugosidade total ( $R_z$ ).



Figura 3.5 Medição de rugosidade.

O desvio de batimento dos corpos de prova foi medido por meio de um sensor de deslocamento LVDT Mitutoyo modelo MU-CHECKER com escala de  $\pm 5\mu\text{m}$  e resolução de  $1\mu\text{m}$ , conforme ilustrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 Medição do batimento.

A medição do diâmetro dos corpos de prova foi feita com um micrômetro Mitutoyo com faixa de medição de 25 a 50 mm e com resolução de  $1\mu\text{m}$ . Finalmente, a medição das dimensões do dressador de diamante foi feita com um microscópio ótico Mitutoyo modelo TM500 (Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais), equipado com micrômetro de resolução milesimal.

### 3.3 Métodos

O fluxograma da Figura 3.7 mostra a sequência de trabalho empregada para realização do procedimento experimental.

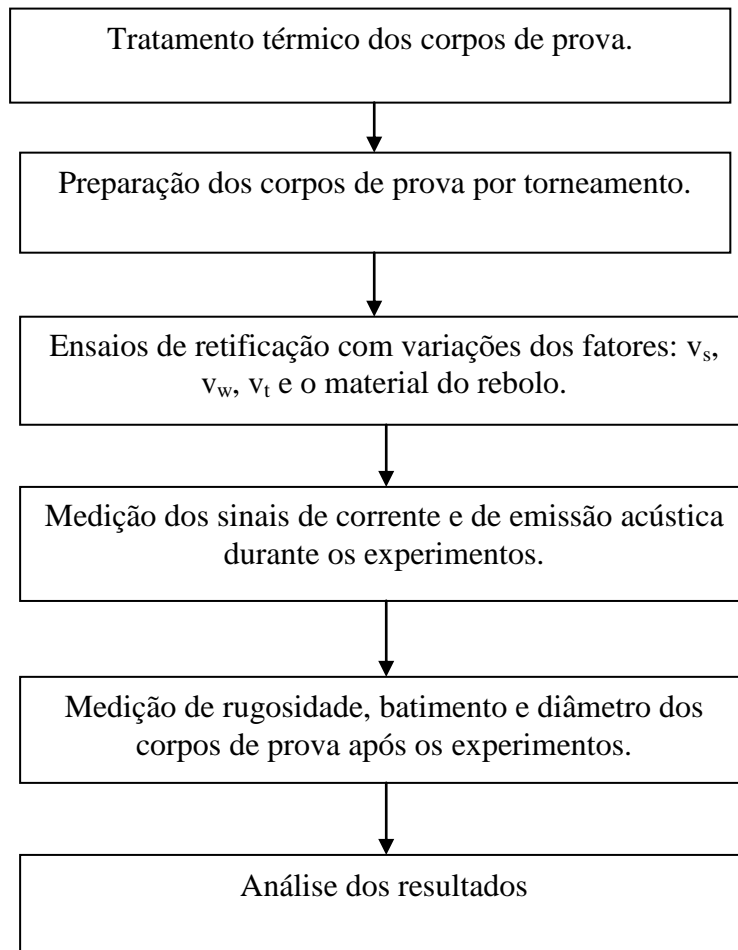


Figura 3.7 Fluxograma do procedimento experimental.

A influência dos fatores velocidade do rebolo ( $v_s$ ), velocidade da peça ( $v_w$ ), velocidade de avanço longitudinal da peça ( $v_t$ ) e rebolo sobre a corrente consumida pelo eixo principal, sinal de emissão acústica e a qualidade dos corpos de prova (rugosidade, desvio de batimento e desvio de diâmetro) foi investigada em dois níveis, conforme representado na Tabela 3.2. Foram realizados duas réplicas para cada experimento, totalizando 32 testes ( $2 \times 2^4$ ) realizados aleatoriamente.

Tabela 3.2 Fatores e respectivos níveis empregados nos experimentos.

Nível	Velocidade do rebolo $v_s$ (m/s)	Velocidade da peça $v_w$ (m/min)	Velocidade longitudinal da mesa $v_t$ (mm/min)	Rebolo
-1	12	8,2	39	1 (5SG120 K8VH)
+1	24	16,4	78	2 (38A120 K4VH)

Para fins de simplificação, o rebolo 5SG120 K8VH foi denominado “rebolo 1” e o rebolo 38A120 K4VH, “rebolo 2”, conforme indicado na Tabela 3.1. Desta forma inicialmente foram testados apenas os rebolos 1 e 2 com o intuito de se avaliar a influência do tipo de abrasivo e a estrutura do rebolo de corte. Os demais foram utilizados em testes complementares.

Cada experimento foi realizado adotando-se a seguinte sequência de trabalho:

- a) O rebolo é posicionado no cubo e parafusado à flange e é feito o balanceamento estático sob a mesa de desempenho.
- b) O rebolo é fixado à retificadora e é feita a dressagem com  $Ud = 9$ .
- c) O corpo de prova é posicionado no entre-pontas de forma que o comprimento retificado em cada experimento seja de 30 mm. São feitos dois ensaios em cada corpo de prova em posições diferentes. O rebolo é posicionado até o centelhamento de forma que o sensor de emissão acústica acuse o contato. Inicialmente usa-se uma profundidade  $a_e = 0,02$  mm e retifica-se com passe único o comprimento de 30 mm. A cada dois movimentos oscilantes ocorre um avanço de mergulho e no retorno o movimento em vazio tem a função de aliviar a pressão entre rebolo e peça.
- d) O rebolo é deslocado radialmente por meio de 10 passes de 0,02mm para cada teste de forma que a penetração de trabalho total seja de  $a_e = 0,2$  mm
- e) Após a remoção dos erros de forma no corpo de prova é feita uma nova dressagem do rebolo removendo 0,36 mm de material ao longo de seis passes.
- f) O rebolo avança radialmente cinco passes de 0,02 mm para cada teste com o objetivo de se obter um diâmetro final de 30,530mm.
- g) As medições do sinal de emissão acústica e corrente é feita no último passe.
- h) Ao término de cada experimento a rugosidade (parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ ), o desvio de batimento e o diâmetro do corpo de prova são medidos.

Terminada a coleta de dados foi utilizado o “software” Minitab 15 para análise estatística dos resultados dos experimentos. A verificação da adequação do modelo a uma distribuição normal é realizada por meio do estudo do gráficos de resíduos. Para validar a análise de variância, os resíduos têm que atender às seguintes suposições: ser normalmente distribuídos com média igual a zero, independentes no tempo e não apresentar tendência de acordo com o valor ajustado. Portanto realizou-se a análise de variância (ANOVA) para verificar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída empregando-se um nível de confiança de 95%. Finalmente, foi feita a otimização dos parâmetros usando menor consumo de corrente elétrica e menor rugosidade  $R_a$ , desvio de batimento e diâmetro do corpo de prova retificado (MONTGOMERY, 2009).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A seguir os resultados serão apresentados obedecendo-se a seguinte sequência: corrente elétrica, emissão acústica, rugosidade (parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ ), o desvio de batimento e o diâmetro do corpo de prova retificado. Por fim foi feita a otimização dos parâmetros de entrada.

### **4.1 Corrente elétrica**

A Figura 4.1 apresenta os gráficos de resíduos para a corrente consumida pelo motor principal. 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) apresenta o gráfico dos resíduos versus valores ajustados e indica que os resíduos estão agrupados em dois blocos, o que não é desejável. O histograma da Figura 4.1(c) confirma a suposição anteriormente descrita de distribuição normal com média igual a zero e a Figura 4.1(d) mostra que os resíduos são independentes da ordem de coleta. Com isto, é possível validar a utilização da análise de variância, já que as suposições do modelo de que os resíduos apresentam distribuição normal com média zero e são independentes da sequência de testes satisfeitas, apesar de não apresentarem tendência esperada para os valores ajustados.

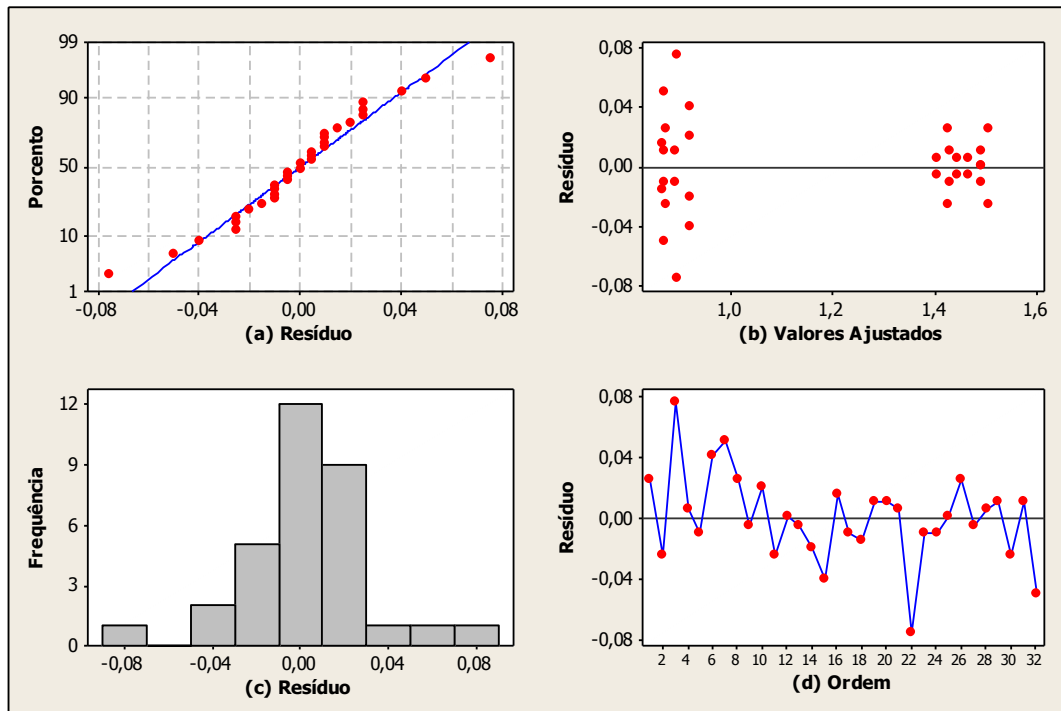


Figura 4.1 Gráficos de resíduos para corrente elétrica: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

Comprovada a adequação do modelo, foi realizada a análise de variância para verificar a influência dos parâmetros de entrada (velocidade do rebolo de corte ( $v_s$ ), velocidade da peça ( $v_w$ ), velocidade da mesa ( $v_t$ ) e o tipo de rebolo sobre a corrente elétrica. A Figura 4.2 apresenta o gráfico de Pareto, no qual a linha vertical indica o valor crítico de  $t$ . Observa-se que, dentro da faixa testada, a corrente é influenciada apenas pela velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e pelo tipo de rebolo utilizado, isto é, ambos apresentam P valor menor do que 5%. Neste caso, os valores da corrente, não foram estatisticamente afetados pela velocidade da peça ( $v_w$ ) e velocidade da mesa ( $v_t$ ) e pelas interações entre os parâmetros de entrada.

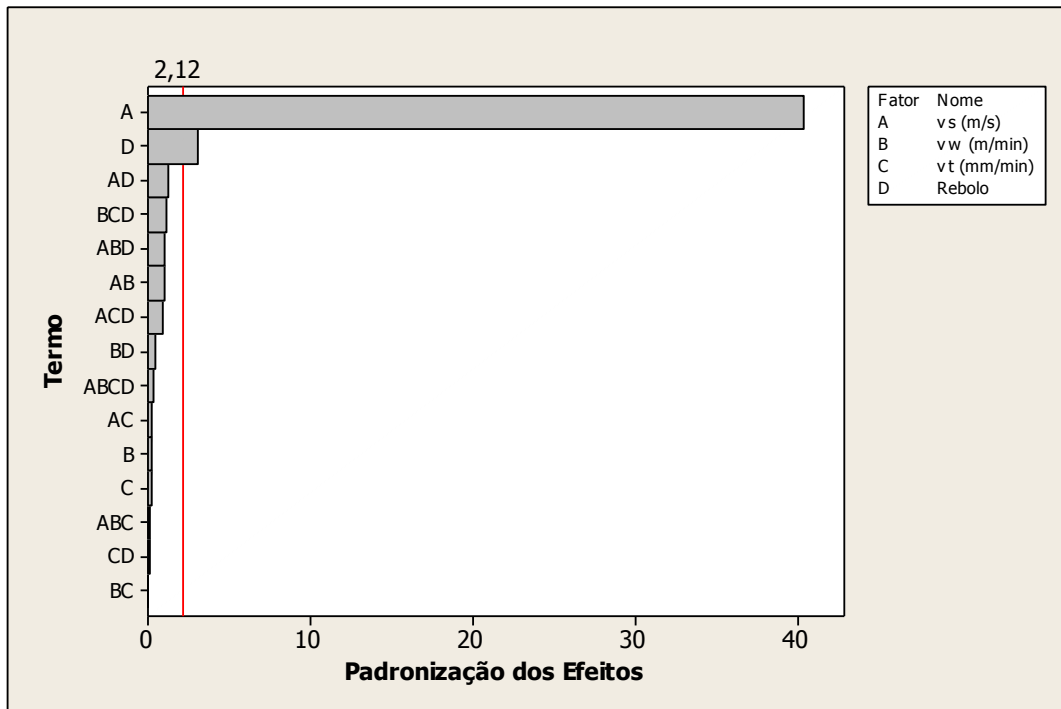


Figura 4.2 Gráfico de Pareto para corrente elétrica consumida pelo motor principal.

A Figura 4.3 mostra o gráfico de efeitos principais, entretanto, somente as influências da velocidade de corte ( $v_s$ ) e do tipo de rebolo devem ser consideradas. Nota-se que o valor de corrente consumida pelo motor principal diminui com a elevação da velocidade de corte. Com a elevação de corte ( $v_s$ ) a corrente elétrica diminui porque o número de grãos ativos aumenta, reduzindo as forças normal e tangencial de retificação. Em outras palavras, o aumento da velocidade de corte ( $v_s$ ) causa a redução da espessura de corte equivalente ( $h_e$ ) e, conseqüentemente, das forças e potência de retificação. A velocidade da peça ( $v_w$ ) e a velocidade da mesa ( $v_t$ ) permanecem aproximadamente constantes e não são significativas na análise de resultados.

A Figura 4.3 também mostra que o rebolo 1 (“seeded gel”) teve um desempenho ligeiramente inferior (maior corrente consumida). Isto pode ser explicado pelo fato de o grão cerâmico convencional ser obtido por meio do processo de simples fusão é composto de um único cristal de óxido de alumínio. Por outro lado, o abrasivo “seeded gel” é um aglomerado de bilhões de microcristais (estrutura microcristalina), o que proporciona maior friabilidade na operação de retificação do que o grão de óxido de alumínio convencional.



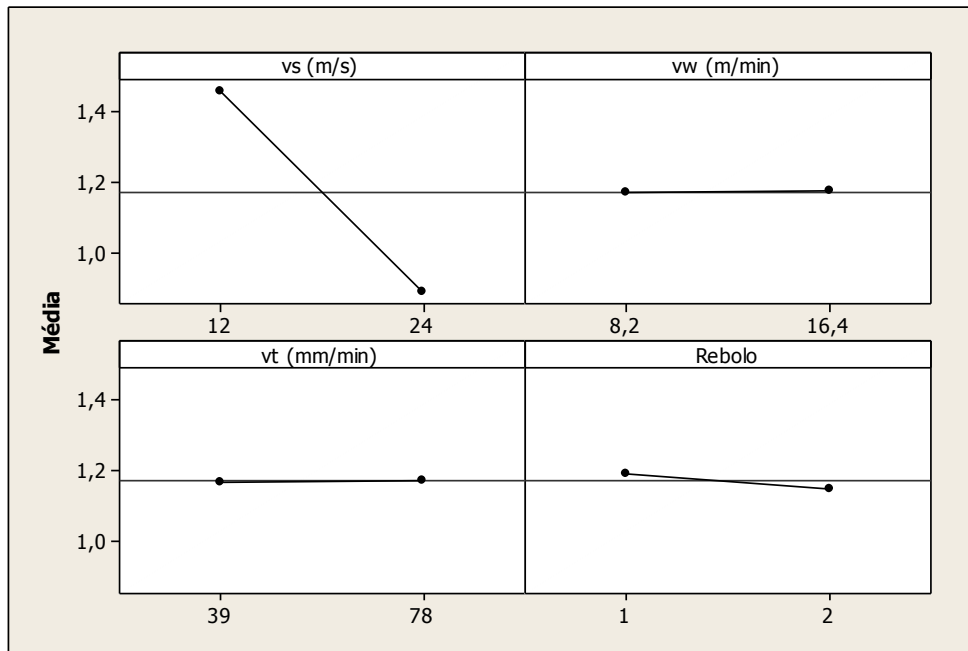


Figura 4.3 Gráfico de efeitos principais para corrente elétrica.

A Figura 4.4 mostra os gráficos de interações para corrente elétrica consumida pelo motor principal, entretanto, tais influências não são significativas considerando-se  $\beta = 0,95$ .

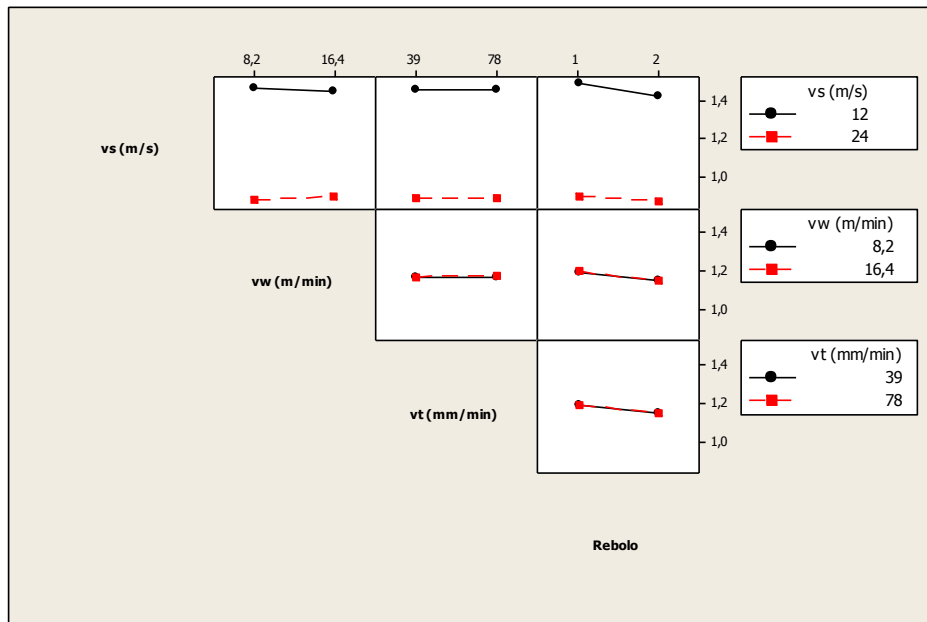


Figura 4.4 Gráfico de interações para corrente elétrica.

## 4.2- Emissão acústica

Os resíduos obtidos na medição do sinal de emissão acústica (valores médios quadráticos) são apresentados nos gráficos da Figura 4.5. O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.5(a), indica que a distribuição dos resíduos está próxima de uma reta na região central, logo estes seguem uma distribuição normal. A Figura 4.5(b) apresenta o gráfico dos resíduos versus valor ajustado e indica uma tendência dos resíduos em função do valor ajustado, o que não é desejável. O histograma da Figura 4.5(c) confirma a suposição de normalidade. A Figura 4.5(d) indica que os resíduos são independentes da sequência de testes. Com isto, é possível validar a utilização da análise de variância, já que a maioria das suposições de um modelo de distribuição normal são atendidas.

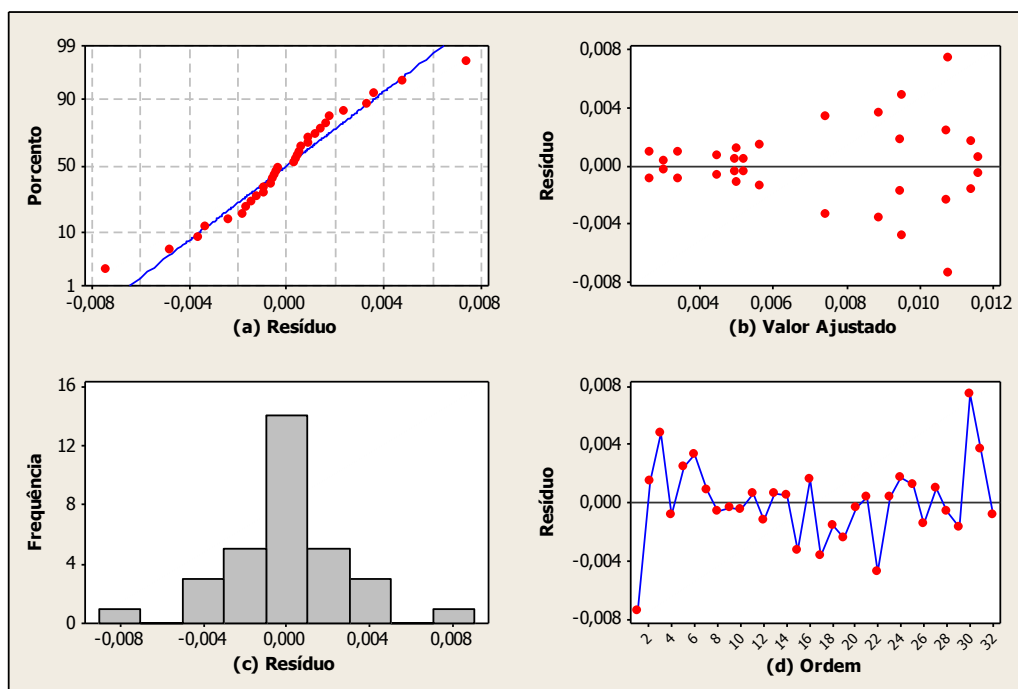


Figura 4.5 Gráficos de resíduos para emissão acústica: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

O gráfico de Pareto da Figura 4.6 mostra que apenas a interação entre velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e o tipo de rebolo afeta o sinal de emissão acústica de forma significativa.

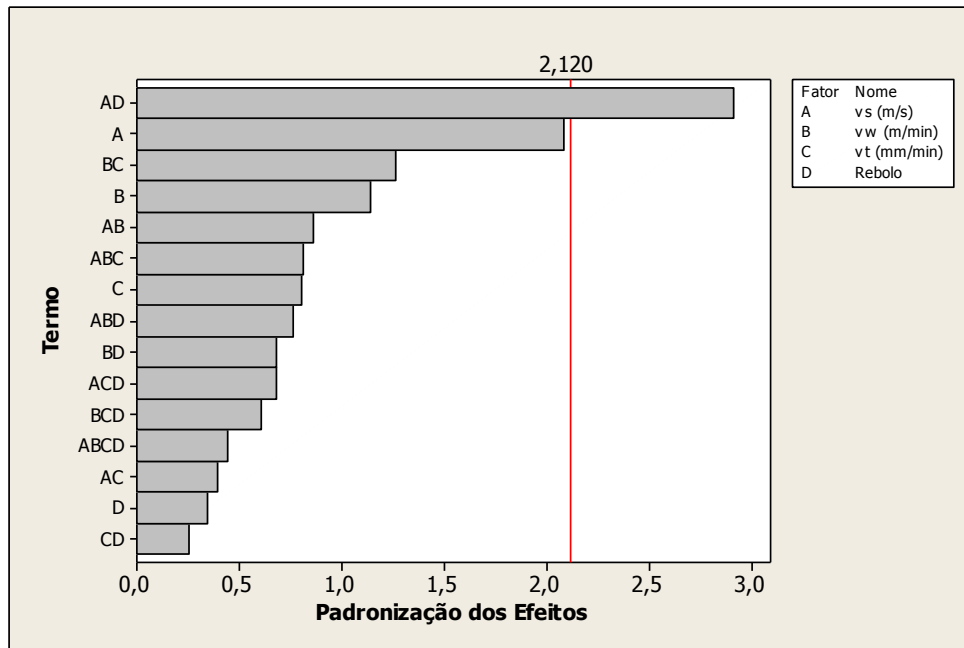


Figura 4.6 Gráfico de Pareto para emissão acústica.

De acordo com a Figura 4.7, os valores de emissão acústica tendem a subir com o aumento da velocidade de corte ( $v_s$ ) e com o emprego do rebolo 2 (convencional), entretanto, o gráfico de interações da Figura 4.8 mostra efeitos distintos para os dois rebolos utilizados: no caso do rebolo 1 (“seeded gel”), a elevação da velocidade de corte ( $v_s$ ) causou uma ligeira queda no sinal de emissão acústica, ao passo que utilizando o rebolo 2 (“convencional”), a elevação da velocidade de corte ( $v_s$ ) causou um aumento considerável neste sinal. Isto pode ser explicado pelo fato da estrutura do rebolo 2 (“convencional”) ser fechada, possuindo um volume de grãos abrasivos, o que favorece o entupimento dos poros pelos cavacos e o aumento da força de corte (naqueles grãos) até que os mesmos se desprendam dando lugar a novos grãos afiados, aumentando assim o sinal de emissão acústica. O sinal de emissão acústica também é influenciado pela vibração gerada com o aumento da velocidade do rebolo ( $v_s$ ). O sinal de emissão acústica diminui com o aumento da velocidade da peça ( $v_w$ ) e o mesmo aumenta o sinal quando a velocidade da mesa ( $v_t$ ) aumenta.

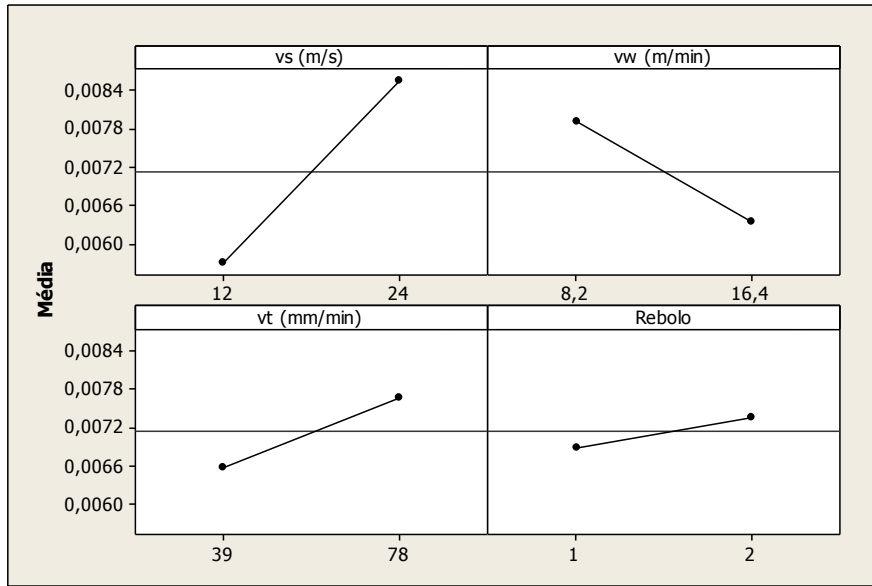


Figura 4.7 Gráfico de efeitos principais para a emissão acústica.

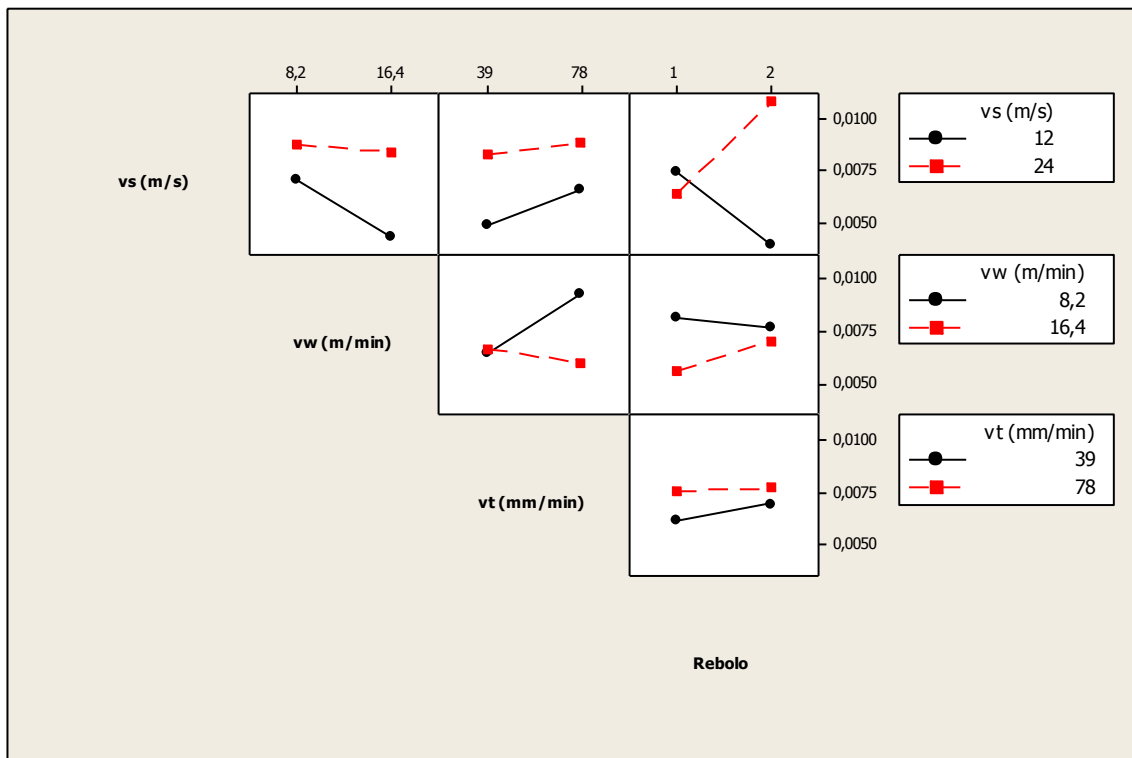


Figura 4.8 Gráfico de interações para a emissão acústica.

### 4.3- Rugosidade

Os gráficos de resíduos para os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$  são mostrados, respectivamente, nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12. De forma geral, os resíduos mostram tendências de distribuição normal, com as curvas de resíduos se aproximando de linhas retas na região central (Figuras 4.9a, 4.10a, 4.11a e 4.12a), resíduos distribuídos em torno de zero contra os valores ajustados (Figuras 4.9b, 4.10b, 4.11b e 4.12b) e frequências próximas de uma distribuição gaussiana (Figuras 4.9c, 4.10c, 4.11c e 4.12c). Além disso, os resíduos não apresentam qualquer tendência em relação à sequência de testes (Figuras 4.9d, 4.10d, 4.11d e 4.12d).

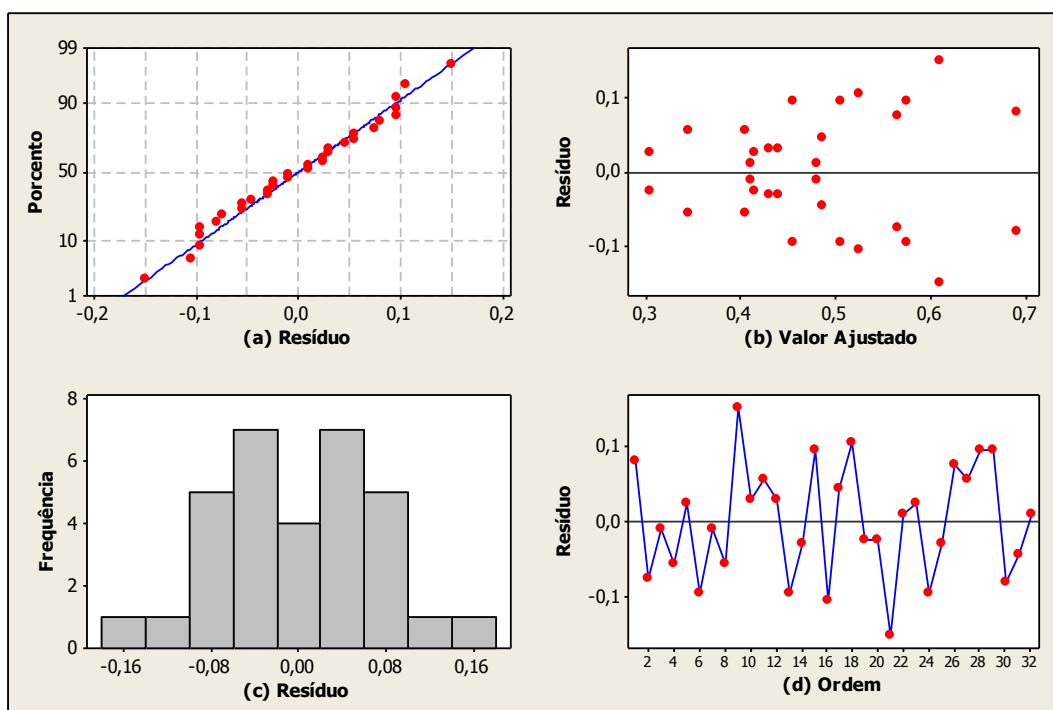


Figura 4.9 Gráfico de resíduos para rugosidade  $R_a$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

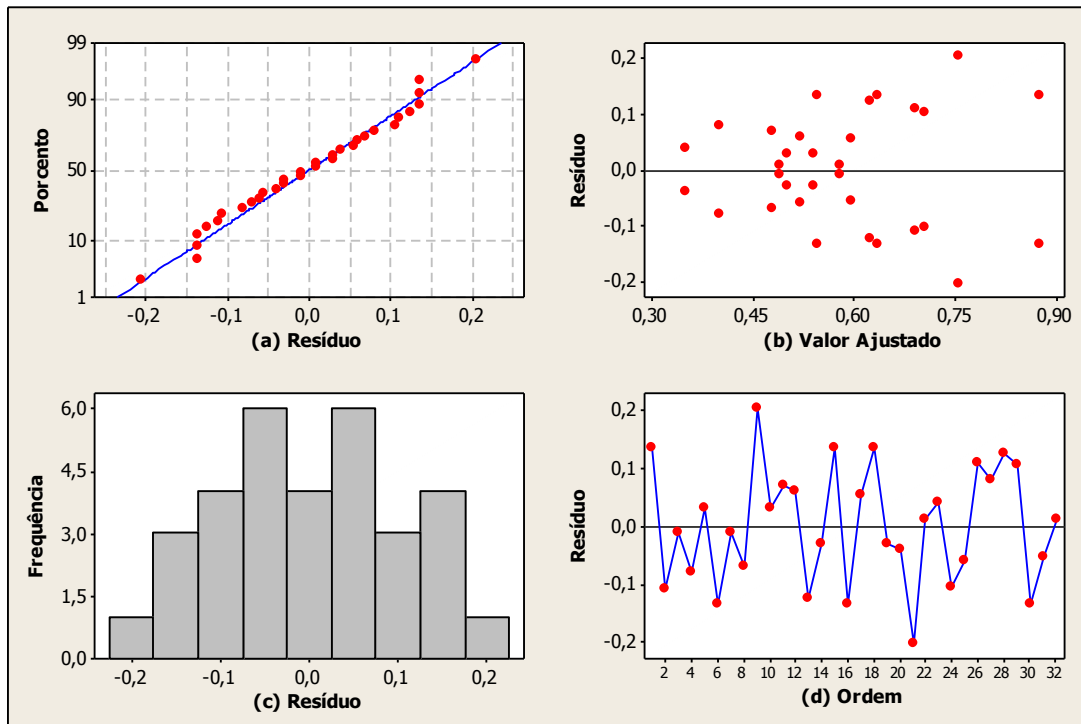


Figura 4.10 Gráfico de resíduos para a rugosidade  $R_q$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

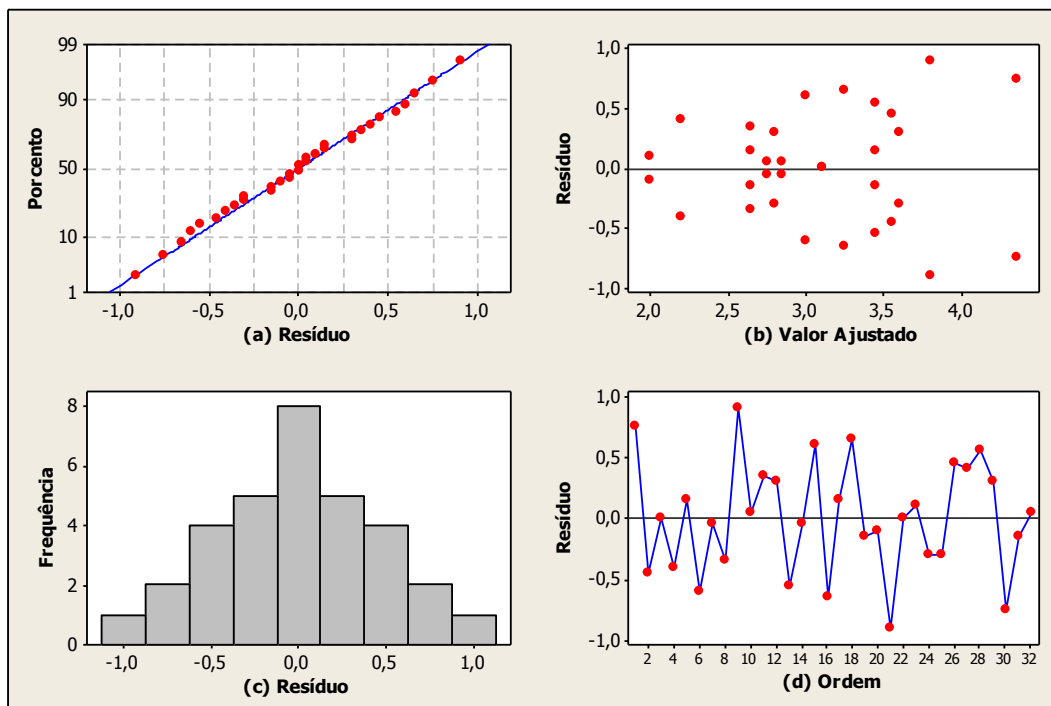


Figura 4.11 Gráfico de resíduos para a rugosidade  $R_t$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

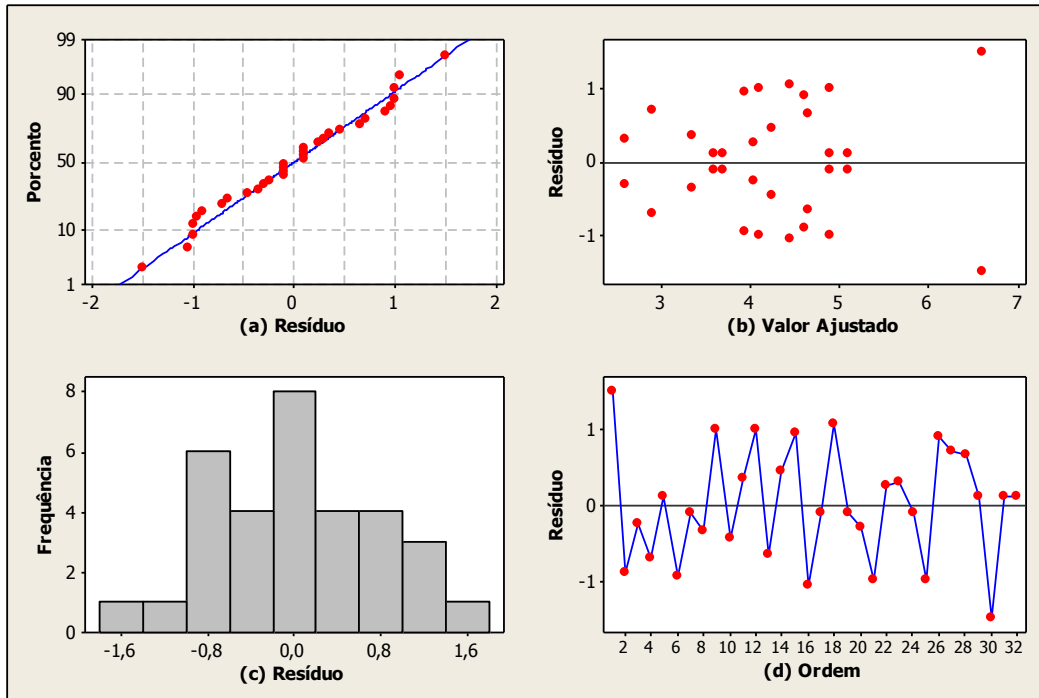


Figura 4.12 Gráfico de resíduos para a rugosidade  $R_z$ : (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

Comprovada a adequação dos modelos, foi realizada a análise de variância para se verificar a influência dos parâmetros de entrada velocidade do rebolo de corte ( $v_s$ ), velocidade da peça ( $v_w$ ), velocidade da mesa ( $v_t$ ) e rebolo sobre a rugosidade.

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam, respectivamente os gráficos de Pareto para  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ . Nota-se que, dentro da faixa testada, todos os parâmetros de rugosidade são afetados significativamente pela velocidade longitudinal da mesa ( $v_t$ ) e que à exceção de  $R_t$  (Figura 4.15), os demais parâmetros de rugosidade são afetados pela interação entre velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e tipo de rebolo, porém em menor intensidade comparada a velocidade da mesa ( $v_t$ ). O fato de  $R_t$  não seguir a mesma tendência registrada para os outros parâmetros pode ser explicado pela natureza deste parâmetro, que considera o pico mais alto e o vale mais profundo encontrados ao longo do comprimento de avaliação.

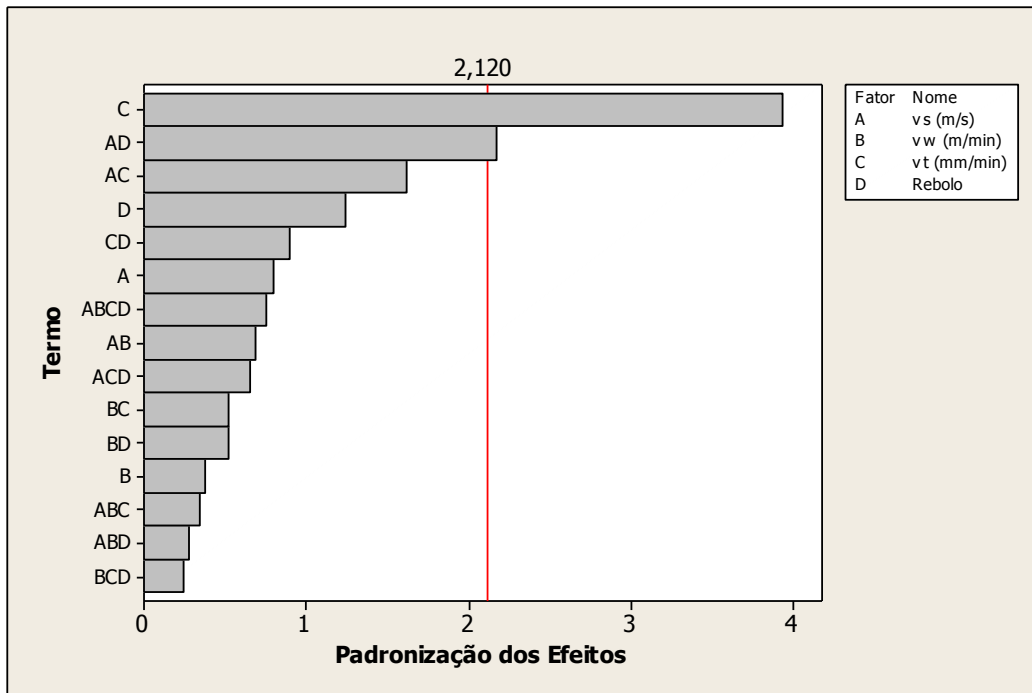


Figura 4.13 Gráfico de Pareto para rugosidade  $R_a$ .

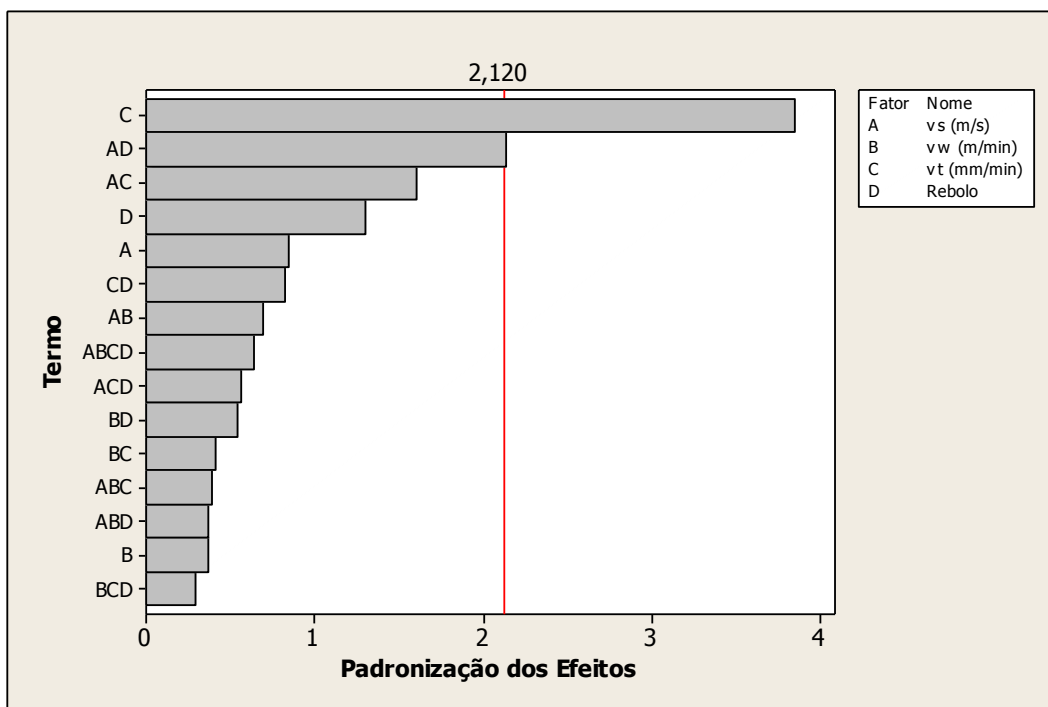


Figura 4.14 Gráfico de Pareto para rugosidade  $R_q$ .



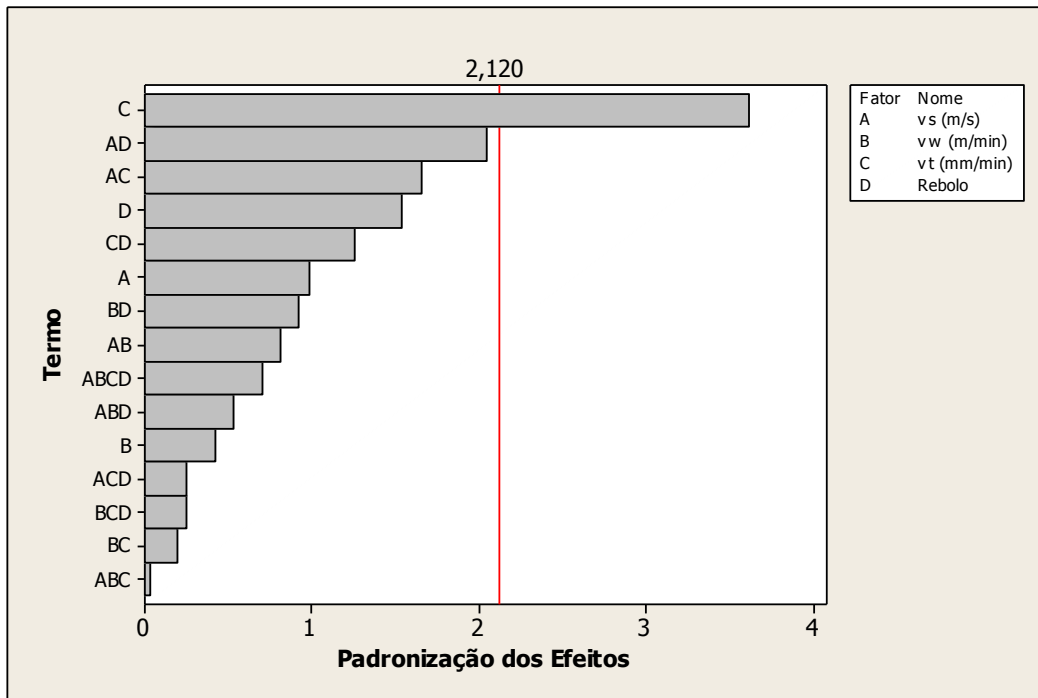


Figura 4.15 Gráfico de Pareto para rugosidade  $R_t$ .

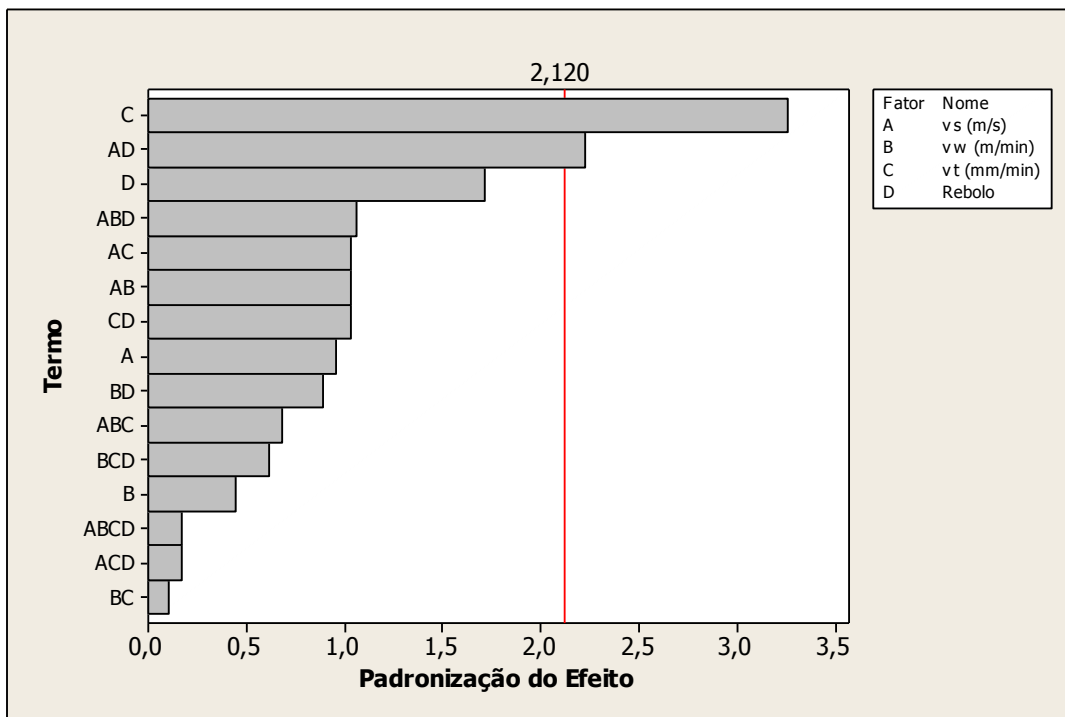


Figura 4.16 Gráfico de Pareto para rugosidade  $R_z$ .

As influências dos fatores sobre as rugosidades  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$  são mostrados, de forma isolada, nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20. Em todos os casos, a elevação da velocidade da mesa ( $v_t$ ) provoca uma elevação drástica em todos os parâmetros de rugosidade, o que pode ser explicado pela redução na quantidade de grãos abrasivos ativos quando trabalhamos com a velocidade da mesa com 78 mm/min. Para a velocidade da peça ( $v_w$ ) e para os tipos de rebolo utilizados não foram significativos pelo gráfico de pareto, mas tendem a diminuir a rugosidade com o aumento da velocidade da peça e para o rebolo tipo 2.

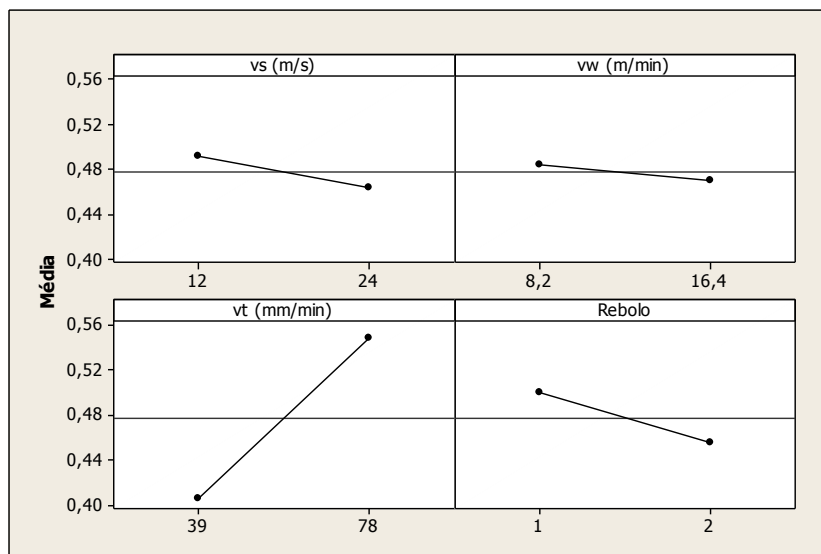


Figura 4.17 Gráfico de efeitos principais para rugosidade  $R_a$ .

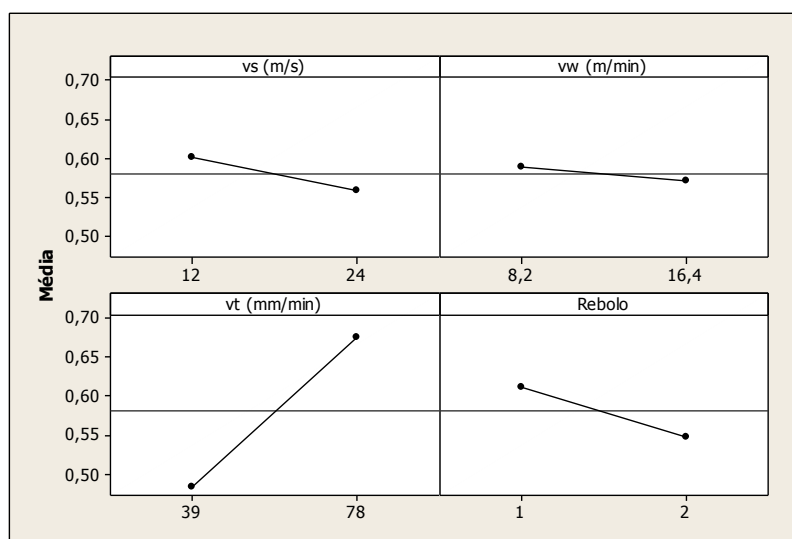


Figura 4.18 Gráfico de efeitos principais para rugosidade  $R_q$ .

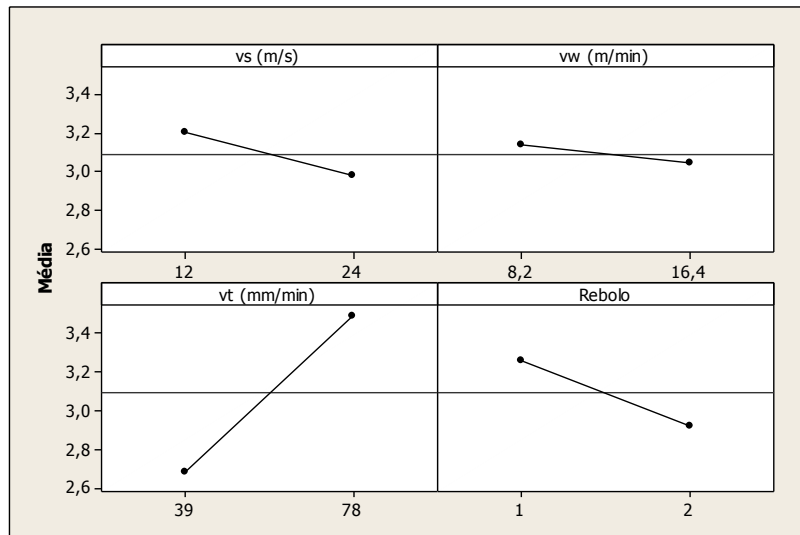


Figura 4.19 Gráfico de efeitos principais para rugosidade  $R_t$ .

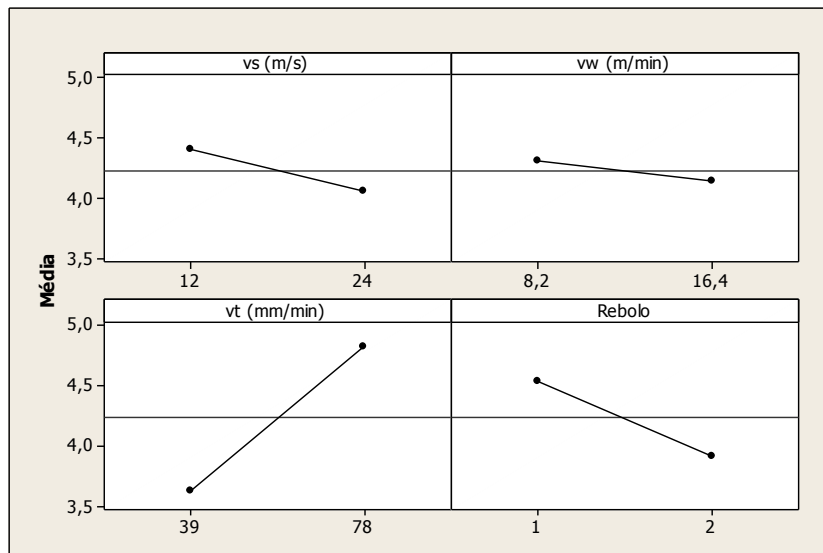


Figura 4.20 Gráfico de efeitos principais para rugosidade  $R_z$ .

Os gráficos das Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam, respectivamente, as influências das interações entre os parâmetros estudados sobre  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ , entretanto, a Figura 4.23 não deve ser considerada visto que nenhuma interação afetou  $R_z$  de forma significativa. Nos demais casos, a interação entre a velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e o tipo de rebolo é significativa e aponta para a mesma tendência, isto é, sob a velocidade do rebolo ( $v_s$ ) mais baixa de 12 m/s o rebolo 2 (convencional) propicia menores valores de rugosidade, porém, com a elevação da velocidade do rebolo ( $v_s$ ) para 24 m/s o rebolo 1 (“seeded gel”) apresenta uma sutil redução na rugosidade dos corpos de prova. Isto se explica porque após algum tempo de retificação, os grãos

abrasivos perdem a capacidade de corte, mas o rebolo 1 (seeded gel) tem uma capacidade maior de produção de uma fratura frágil, de forma que novas arestas de corte afiadas sejam geradas.

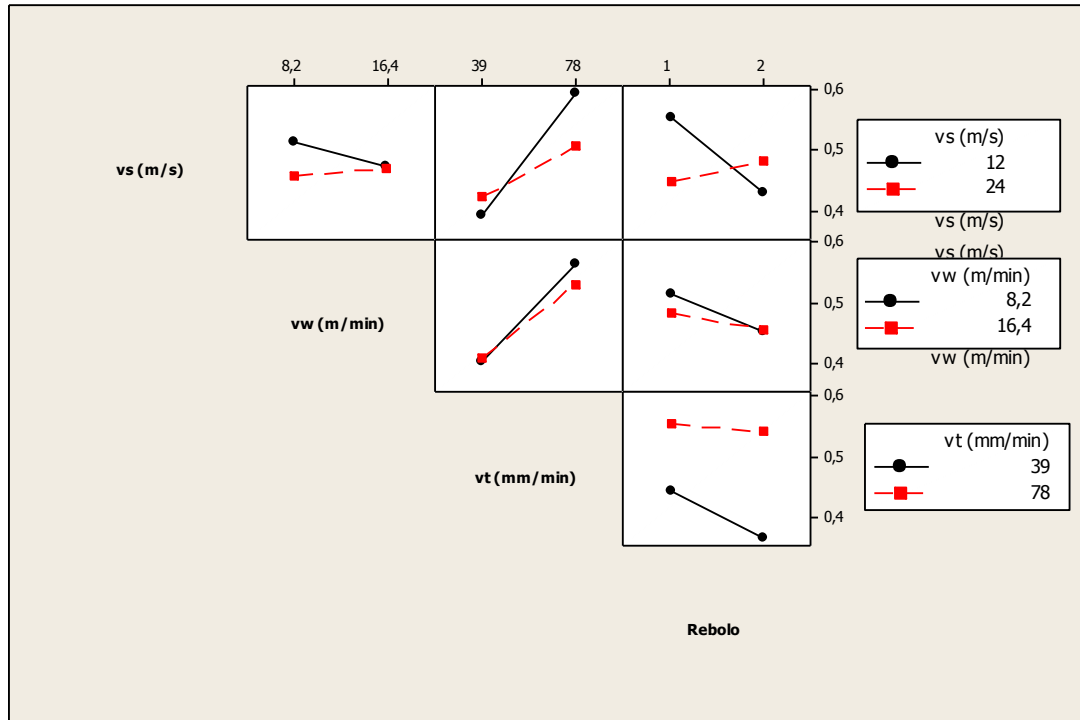


Figura 4.21 Gráfico de interações para rugosidade  $R_a$ .

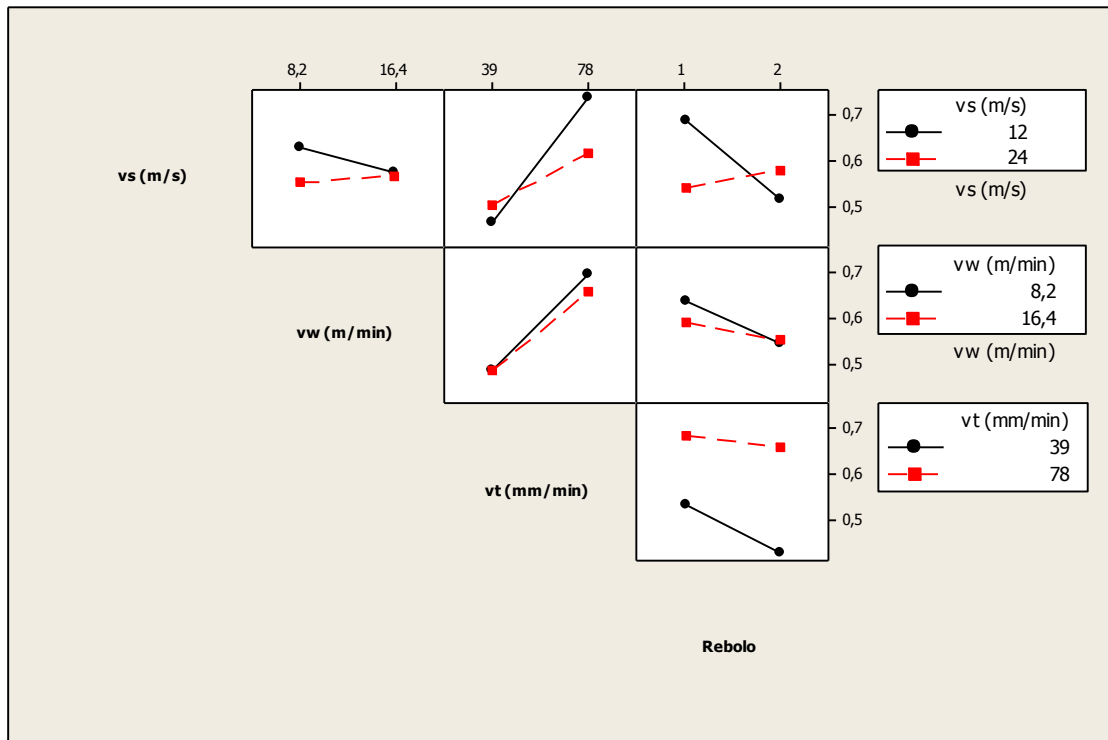


Figura 4.22 Gráfico de interações para rugosidade  $R_q$ .

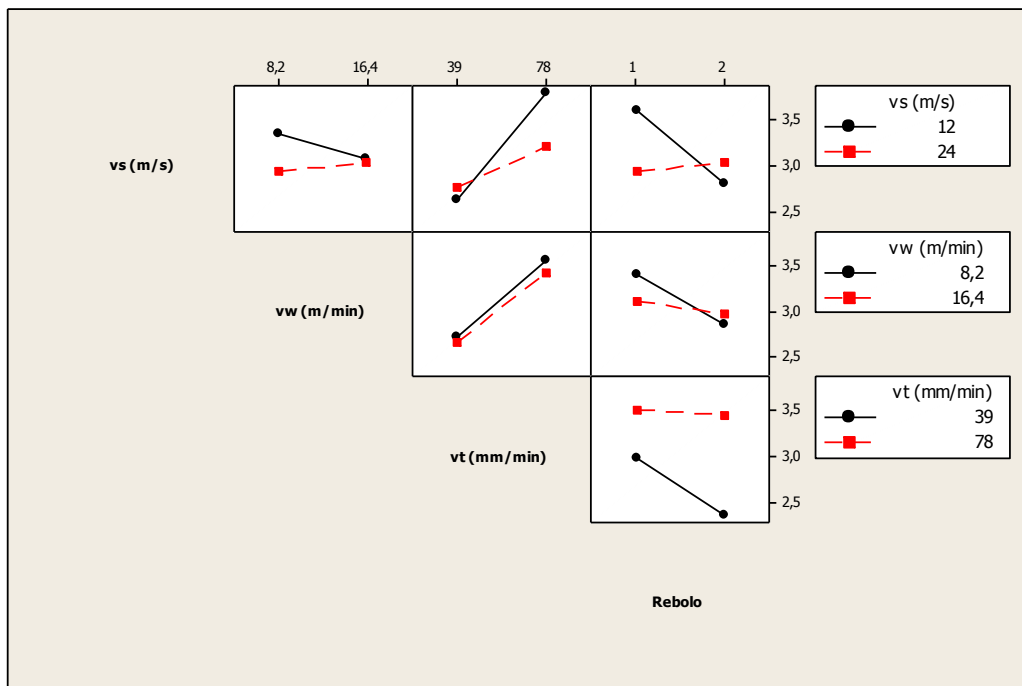


Figura 4.23 Gráfico de interações para rugosidade  $R_t$ .

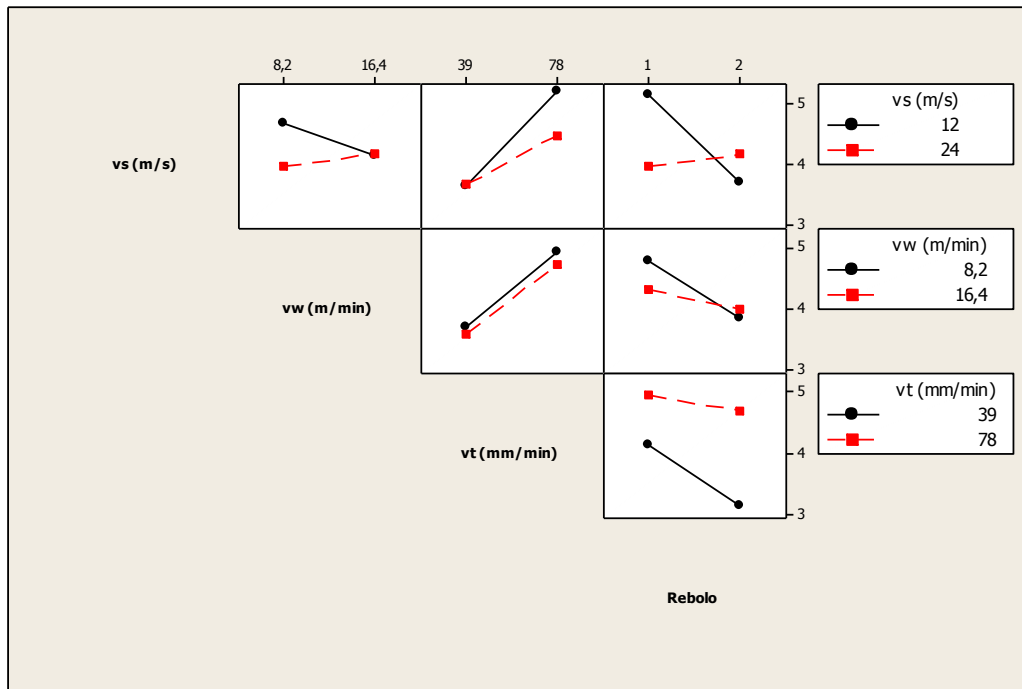


Figura 4.24 Gráfico de interações para rugosidade  $R_z$ .

Além do grão abrasivo ( $Al_2O_3$  “seeded gel” para o rebolo 1 e  $Al_2O_3$  “convencional” para o rebolo 2), têm-se também diferenças na estrutura dos dois rebolos testados (aberta para o rebolo 1 e fechada para o rebolo 2), o que significa que a relação entre o volume de grãos, volume de liga e o volume de poros difere para os dois rebolos.

#### 4.4 Desvio de batimento

Os dados obtidos na medição de desvio de batimento foram primeiramente utilizados para geração dos gráficos de resíduos (Figura 4.25). O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, Figura 4.25(a), indica que a distribuição dos resíduos está próxima de uma reta, o que sugere que estes seguem uma distribuição normal. A Figura 4.25(b) apresenta o gráfico dos resíduos versus valor ajustado e indica que não existe tendência dos resíduos em função do valor ajustado. O histograma da Figura 4.25(c) entretanto, mostra um certo distanciamento da distribuição gaussiana. Finalmente, a Figura 4.25(d) indica que os resíduos são independentes em relação à ordem dos testes.

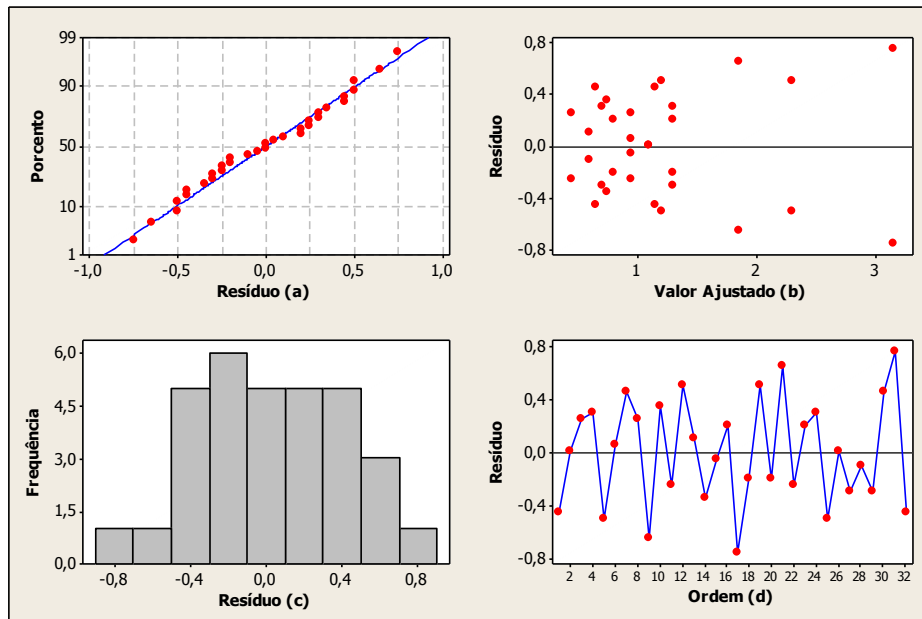


Figura 4.25 Gráfico de resíduos para o desvio de batimento: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

Comprovada a adequação do modelo, foi realizada a análise de variância (nível de significância  $\alpha=0,05$ ) para se verificar a influência dos parâmetros de entrada sobre o desvio de batimento. O gráfico de Pareto da Figura 4.26 mostra que o desvio de batimento é influenciado pelos parâmetros velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e rebolo e pelas interações entre velocidade do rebolo ( $v_s$ ) e tipo de rebolo e entre velocidade da mesa ( $v_t$ ) e tipo de rebolo.

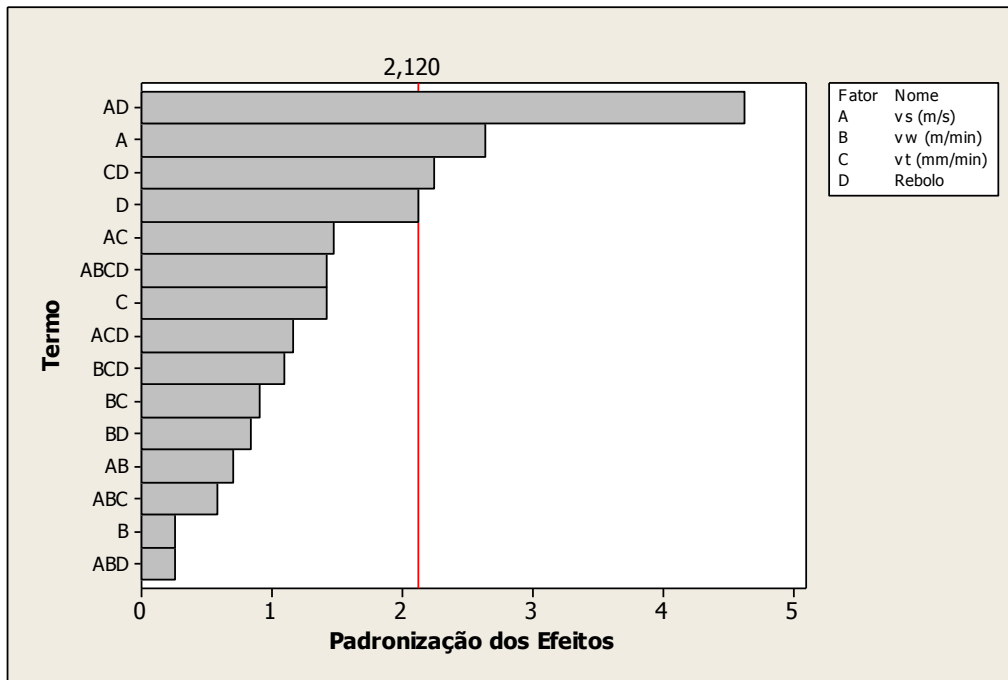


Figura 4.26 Gráfico de Pareto para o desvio de batimento.

Os valores do desvio de batimento tem uma redução drástica com o aumento da velocidade do rebolo e com a utilização do rebolo 2, conforme representado na Figura 4.27 .A velocidade da peça ( $v_w$ ) e a velocidade da mesa ( $v_t$ ) não foram significativos de acordo com o gráfico de pareto, mas tendem a diminuir o valor do batimento.

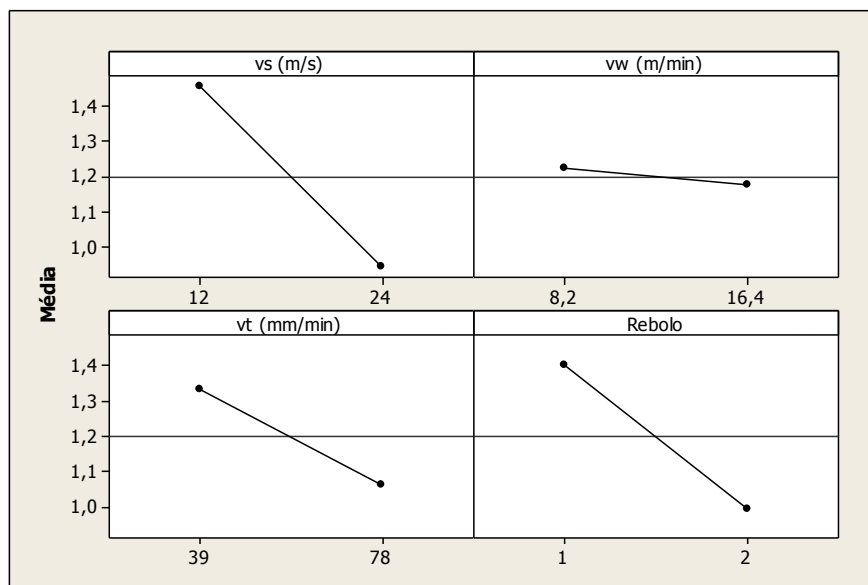


Figura 4.27 Gráfico de efeitos principais para o desvio de batimento ( $\mu\text{m}$ ).



Com o aumento da velocidade de corte ( $v_s$ ), o desvio de batimento tende a diminuir devido à elevação do número de grãos ativos favorecer a remoção de cavaco e a eliminação dos erros de forma dos corpos de prova.

Considerando que os corpos de prova são retificados no entre-pontas, existe uma relação entre o erro de forma (batimento) da peça e o erro de forma dos furos de centro da peça e o erro de forma das pontas de fixação. Como a pressão nos entre-pontas tem influência no resultado final da retificação, mantendo-se o mesmo posicionamento de fixação da peça durante o experimento espera-se que essa influência seja desprezível. Portanto, a principal fonte de erros de forma na retificação é o desgaste do rebolo, provocado por uma baixa velocidade de corte ( $v_s$ ), velocidade da peça ( $v_w$ ), velocidade da mesa ( $v_t$ ) e pela escolha do “rebolo 1”. Como o “rebolo 1” possui uma estrutura aberta, isto facilita a entrada de cavaco e o empastamento do rebolo, provocando, conseqüentemente, maior desvio de batimento. Além disso, pelo fato de ser menos friável e possuir estrutura fechada, o “rebolo 2” proporciona uma menor força de retificação, o que contribui para a redução do desvio de batimento. Toda vez que troca o corpo de prova sempre ocorre um erro de fixação devido ao furo de centro não ser o mesmo em todos os corpos de prova, variando o desvio de batimento.

A Figura 4.28 apresenta o gráfico de interações para o desvio de batimento. A interação entre a velocidade de corte ( $v_s$ ) e o tipo de rebolo mostra que para  $v_s=12\text{m/s}$  menor batimento é registrado quando a operação é realizada com o rebolo 2, ao passo que para  $v_s =24\text{m/s}$ , menor desvio de batimento é obtido com o rebolo 1. Isso se deve ao fato da maior velocidade do rebolo e a maior quantidade de grãos ativos favorecer a remoção de cavaco. Ambos os rebolos têm a mesma granulometria, porém, o “rebolo 1” possui uma maior friabilidade que o “rebolo 2”, devido ao “rebolo 1” possuir grãos de seeded de gel.

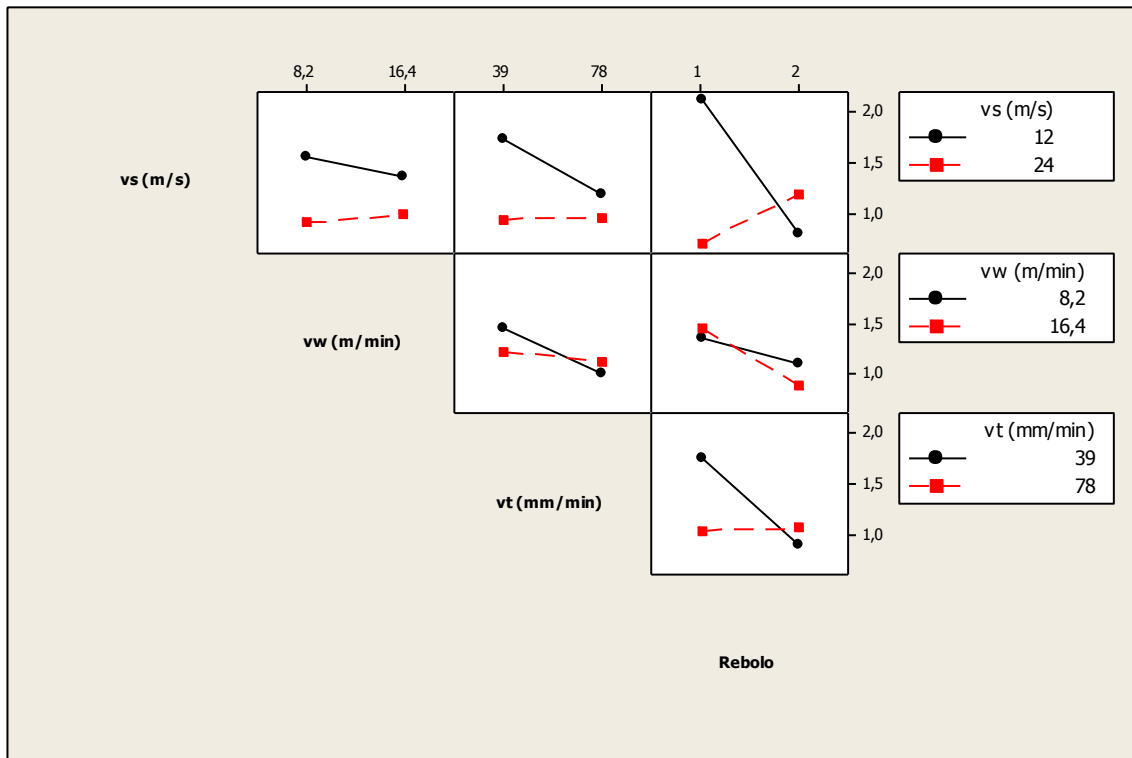


Figura 4.28 Gráfico de interações para o desvio de batimento.

#### 4.5 Diâmetro do corpo de prova retificado

Primeiramente, é importante destacar que nenhum corpo de prova atingiu o diâmetro nominal pré-estabelecido (30,530 mm), porque toda vez que dressava o rebolo de corte era necessário remover o parafuso de fixação da mesa aumentando a conicidade da máquina fazendo remover mais material da peça, portanto, a análise dos resultados considerará como meta e obtenção do menor diâmetro para os corpos de prova retificados. Os gráficos de resíduos para o diâmetro do corpo de prova são mostrados na Figura 4.29. A Figura 4.29(a), indica que a distribuição dos resíduos está próxima de uma reta, logo estes seguem uma distribuição normal e a Figura 4.29(b) sugere que não existe tendência dos resíduos em função do valor ajustado. O histograma da Figura 4.29(c) entretanto, não apresenta o comportamento esperado e por fim, a Figura 4.29(d) indica que os resíduos são independentes em relação a ordem dos experimentos.

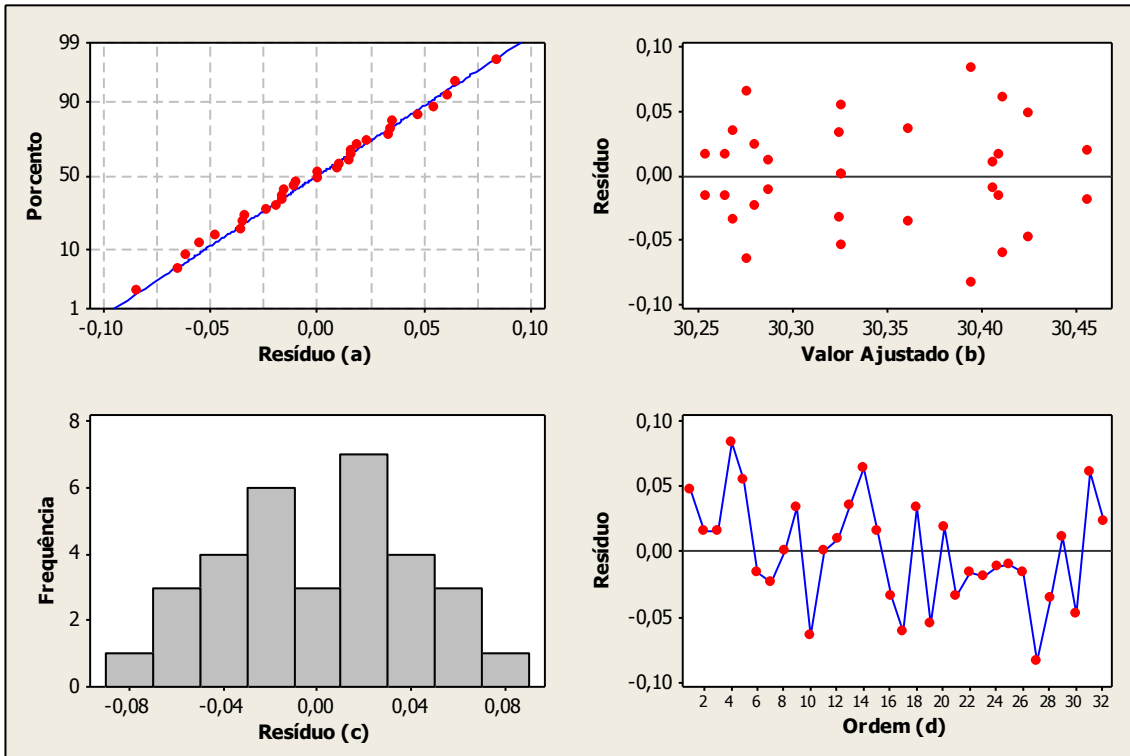


Figura 4.29 Gráfico de resíduos para o diâmetro do corpo de prova: (a) probabilidade normal dos resíduos, (b) resíduos versus valor ajustado, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem.

O gráfico de Pareto para o diâmetro final do corpo de prova representado na Figura 4.30 mostra que somente a velocidade do rebolo ( $v_s$ ) é influente considerando-se  $\beta = 0,95$ .

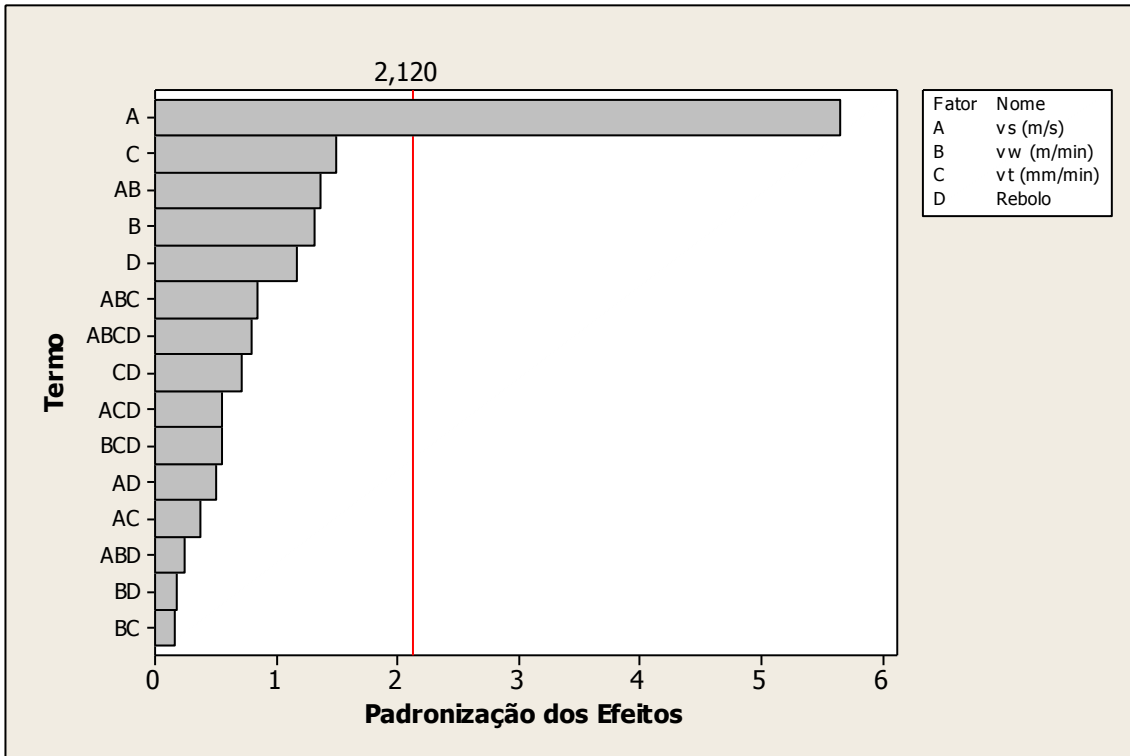


Figura 4.30 Gráfico de Pareto para o diâmetro do corpo de prova retificado.

Os valores de diâmetro da peça diminuem com o aumento da velocidade do rebolo ( $v_s$ ), vide Figura 4.31 . Fato de o aumento da velocidade do rebolo ( $v_s$ ) proporcionar uma menor espessura de corte equivalente ( $h_e$ ), força de retificação e o diâmetro do corpo de prova retificado.

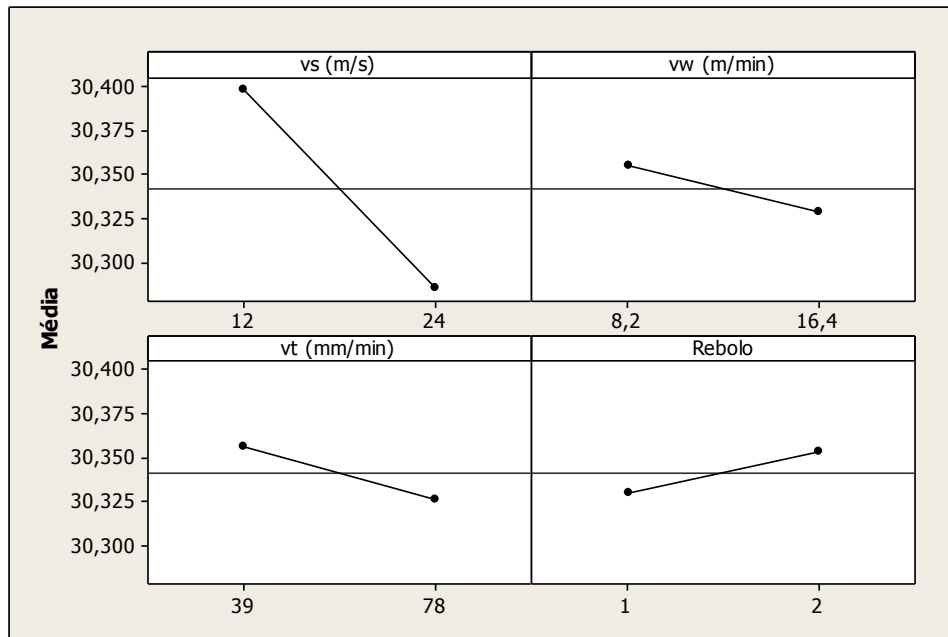


Figura 4.31 Gráfico de efeitos principais para o diâmetro do corpo de prova retificado.

A Figura 4.32 apresenta a influência das interações entre o diâmetro final dos corpos de prova, entretanto, este resultado não deve ser considerado uma vez que o gráfico de Pareto indica que não houve influência significativa das vibrações sobre o diâmetro final dos corpos de prova.

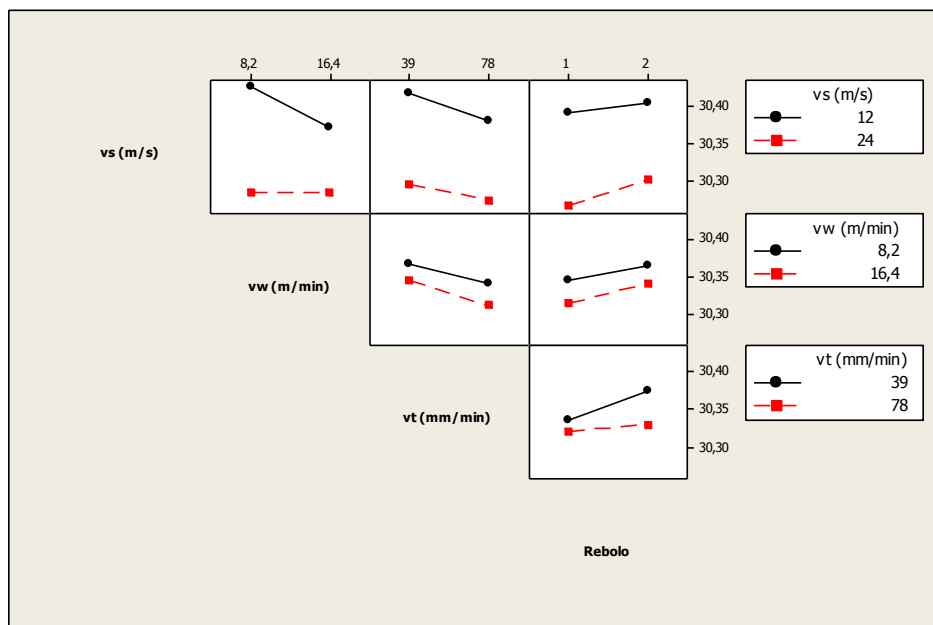


Figura 4.32 Gráfico de interações para o diâmetro do corpo de prova retificado.

#### 4.6 Otimização dos parâmetros de entrada

Após a análise dos resultados foi gerado um gráfico de otimização dos parâmetros de entrada (velocidade do rebolo, velocidade da peça, velocidade da mesa e o tipo de rebolo) usando valores mínimos de corrente elétrica consumida pelo motor principal, rugosidade  $R_a$ , desvio de batimento e diâmetro do corpo de prova.

Para tanto, foi empregada a técnica conhecida como “Desirability Functions”, disponível no “Software” Minitab 15. Nesta técnica, o valor de D (“composite desirability”) indica o ajuste do modelo e é calculado como a média geométrica dos valores de d, individuais encontrados na otimização de cada parâmetro. No presente caso foi obtido  $D = 0,8172$  (Figura 4.33), que pode ser considerado satisfatório. Observa-se ainda na Figura 4.33 que os parâmetros ótimos encontrados foram:  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min,  $v_t = 39,0$  mm/min e o rebolo 1 (5SG120 K8VH).

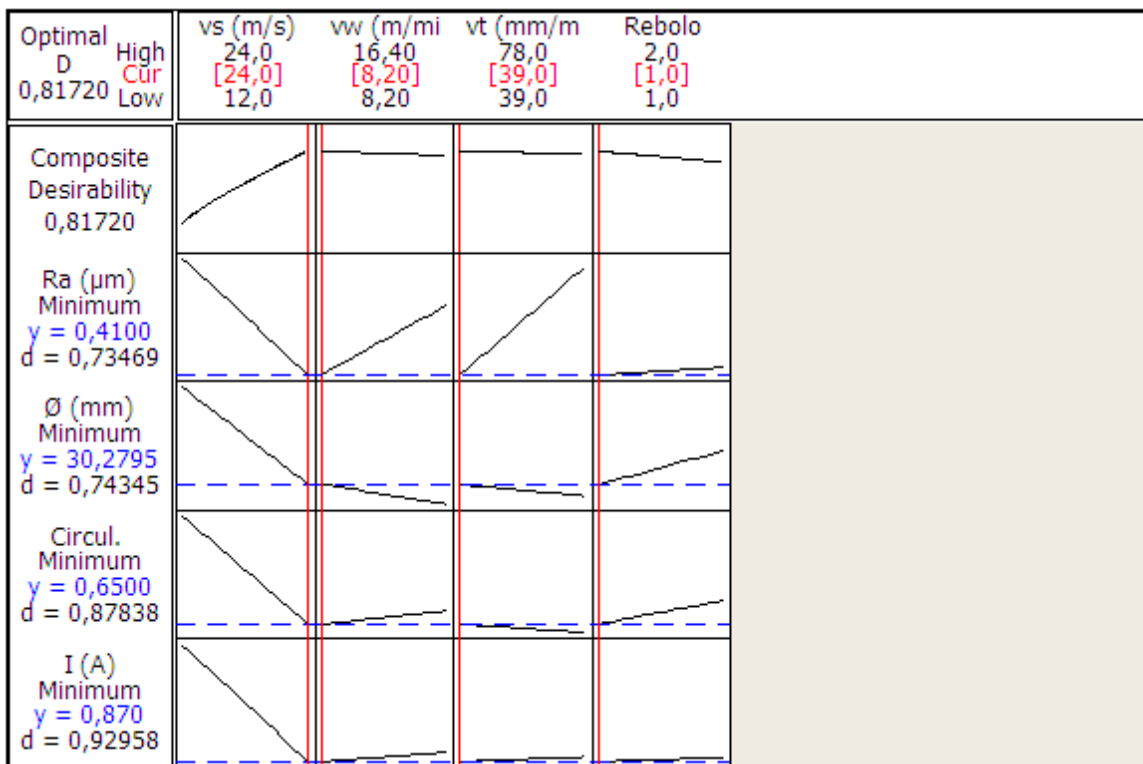


Figura 4.33 Gráfico da otimização dos parâmetros de entrada.

Após a obtenção dos parâmetros de entrada ótimos foram testados os demais rebolos indicados na Tabela 3.1 para fins de comparação. A Figura 4.34 compara os valores de corrente elétrica obtidos com os seis rebolos utilizados e conclui-se que apresentou o reboło 1 exigiu menor consumo de corrente elétrica, seguido de perto pelo reboło 2. Isso pode ser explicado pelo menor tamanho dos abrasivos empregados nestes rebolos (“mesh 120”) que têm menor capacidade de remoção de material.

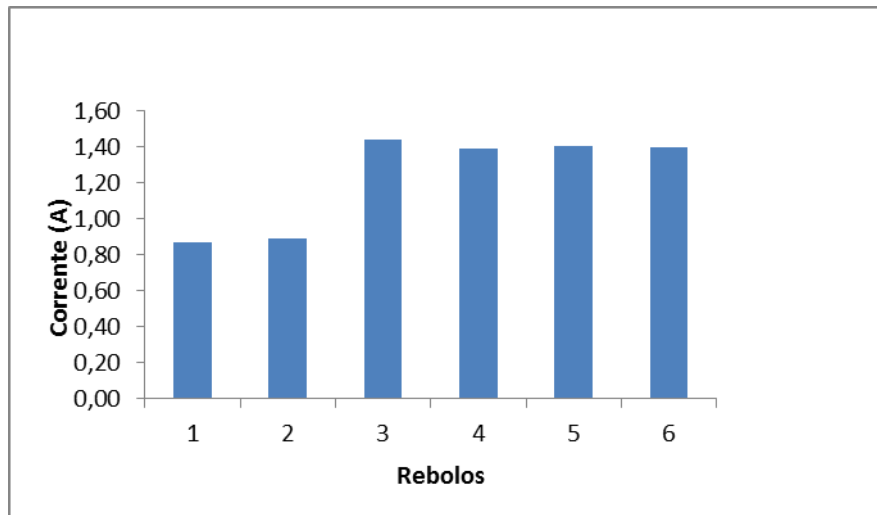


Figura 4.34 Gráfico da corrente versus tipos de reboło (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

A Figura 4.35, indica que o reboło 2 fornece sinal de emissão acústica de maior intensidade, provavelmente como resultado da combinação de granulometria fina e estrutura fechada. Este comportamento torna o reboło 2 o mais indicado quando se deseja monitorar o processo por meio do sinal de emissão acústica.

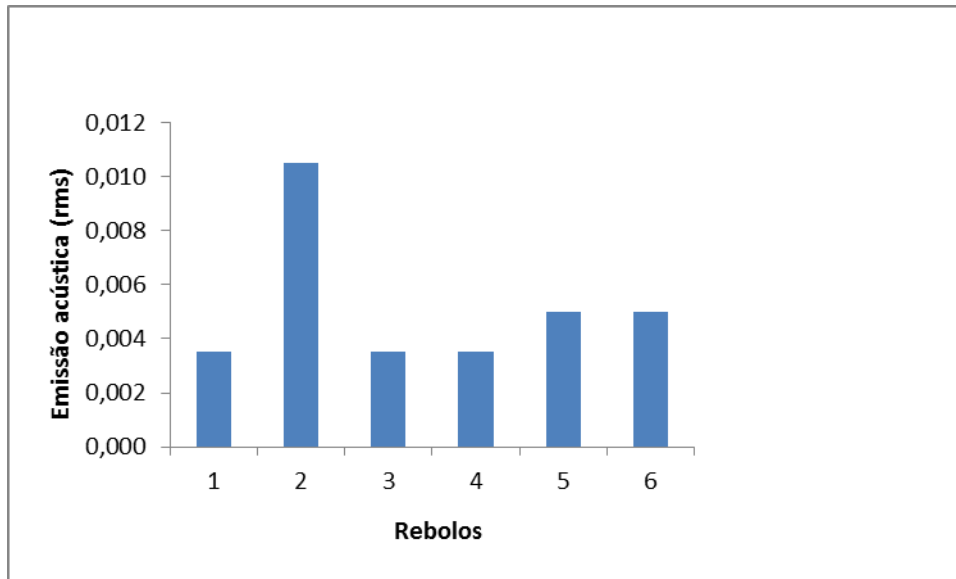


Figura 4.35 Gráfico de emissão acústica versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

Pode-se perceber por meio dos gráficos de rugosidade para os parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$  são mostrados, respectivamente, nas Figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39. Que a granulometria, isto é, o tamanho médio dos grãos abrasivos é o principal responsável pela rugosidade baixa dos corpos de prova retificados pelos rebolos 1 e 2.

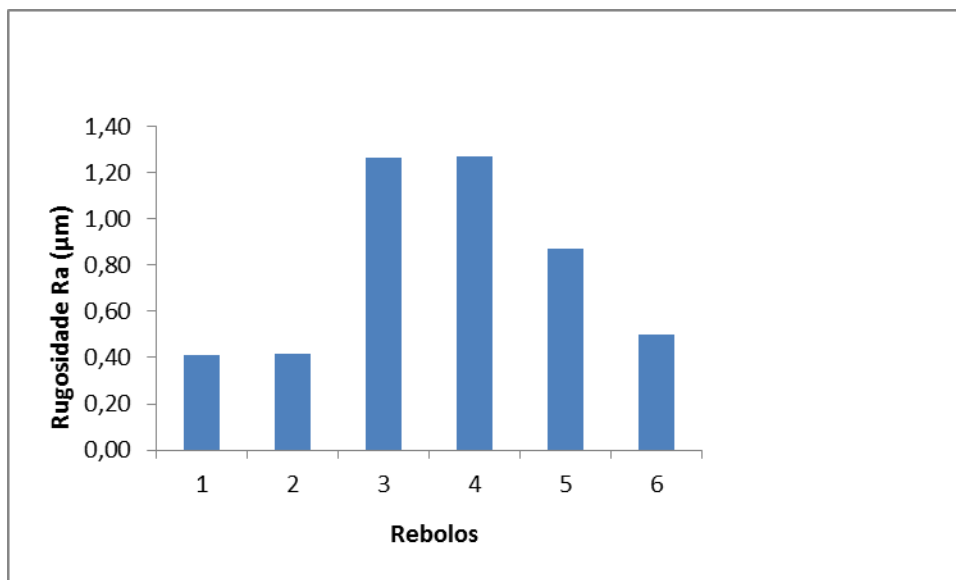


Figura 4.36 Gráfico da rugosidade  $R_a$  versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).



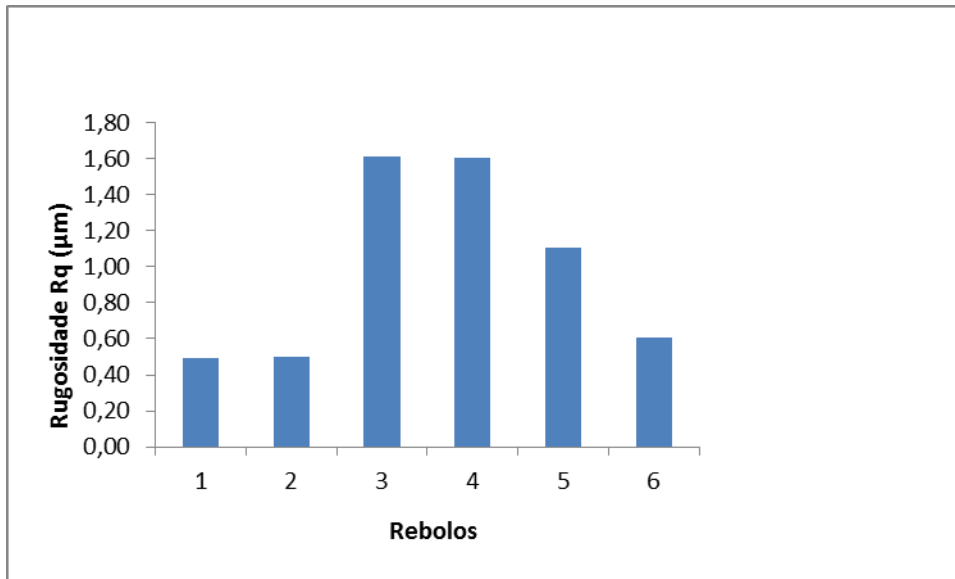


Figura 4.37 Gráfico da rugosidade  $R_q$  versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

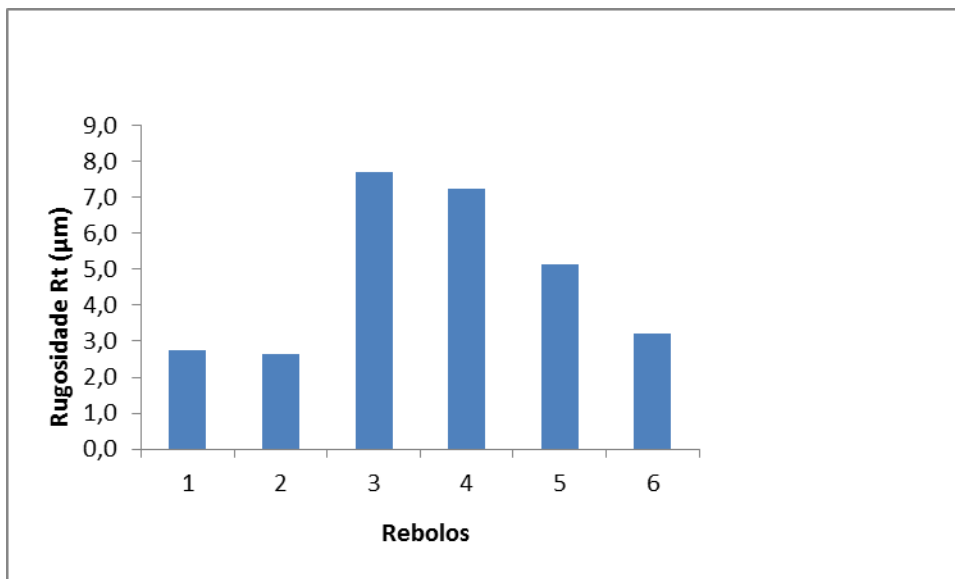


Figura 4.38 Gráfico da rugosidade  $R_t$  versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

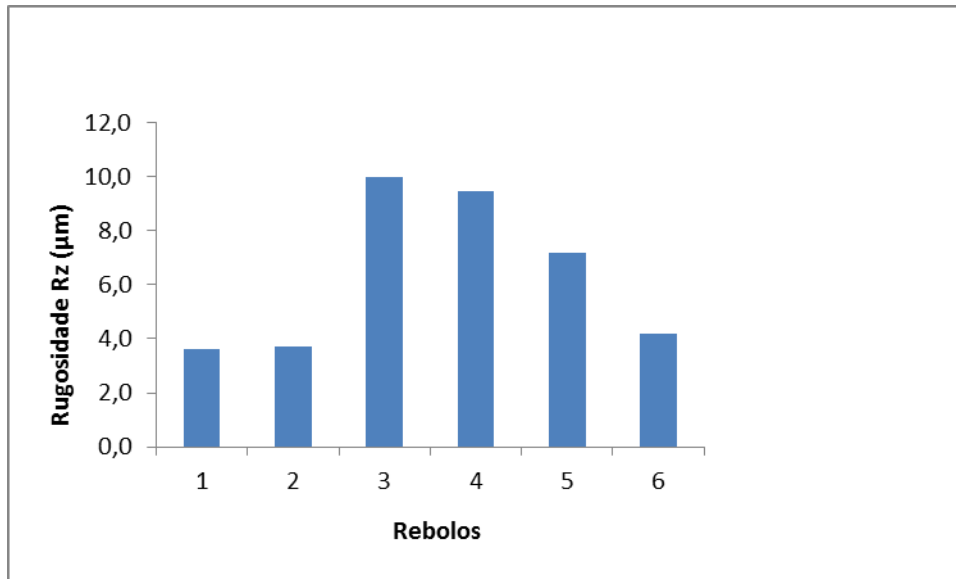


Figura 4.39 Gráfico da rugosidade  $R_z$  versus tipo de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

A Figura 4.40 mostra os resultados de batimento comparando os tipos de rebolo testados. O menor batimento apresentado foi para o rebolo 6 seguido pelos rebolos 4, 5 e 3, devido a granulometria do rebolo favorecer a remoção de maior volume de material, sendo utilizada principalmente em operações de desbaste. Lembrando que a dureza do rebolo 3 é menor do que a dos rebolos 1, 2, 4, 5 e 6. Uma dureza menor favorece o desprendimento dos abrasivos, permitindo que novos abrasivos afiados entrem em ação.

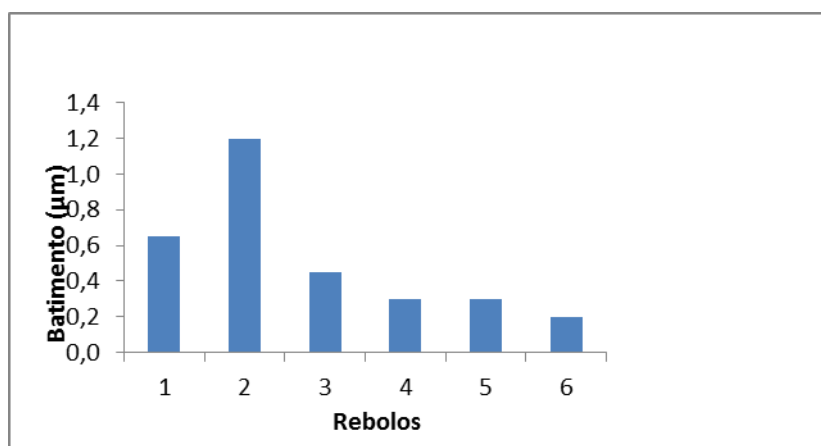


Figura 4.40 Gráfico do batimento versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

Finalmente, a Figura 4.41 apresenta os valores de diâmetro final dos corpos de prova para os diferentes rebolos utilizados. O rebolo que apresentou o menor diâmetro, foi o rebolo 1, devido a sua capacidade de produção de uma fratura frágil, na qual novas arestas de corte afiadas são geradas “seeded de gel”. O rebolo que apresentou o valor mais próximo do valor nominal foi o rebolo 2 devido a sua capacidade de produção de uma fratura frágil, na qual novas arestas de corte afiadas são geradas “seeded de gel”. Quanto maior a agressividade do rebolo, maior é a sua capacidade de remoção de cavaco à custa de baixa força normal de retificação. O rebolo 3 pelo fato de apresentar menor dureza do que os outros rebolos com mesma granulometria, possui uma menor capacidade de manter a tolerância dimensional.

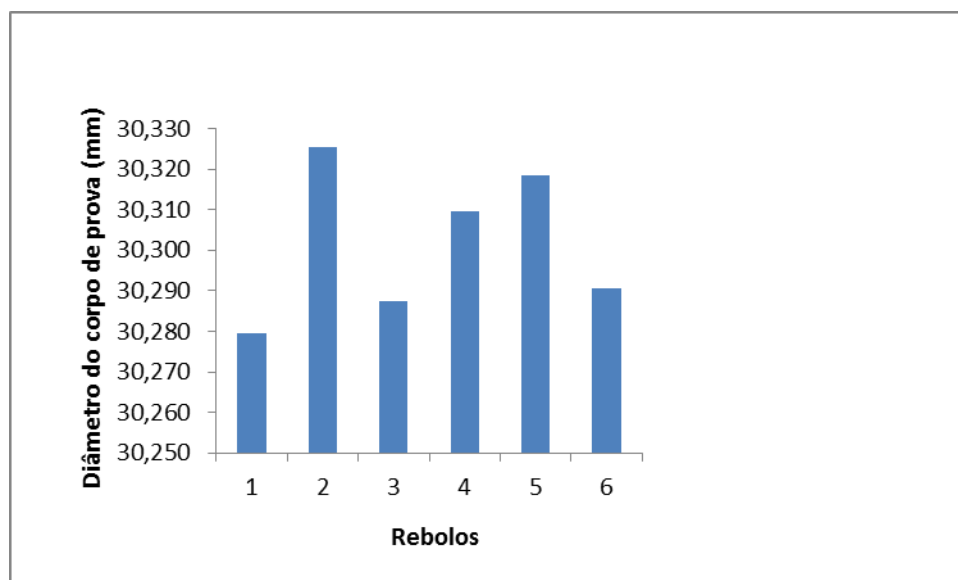


Figura 4.41 Gráfico do diâmetro do corpo de prova retificado versus tipos de rebolo (para  $v_s = 24,0$  m/s,  $v_w = 8,20$  m/min e  $v_t = 39,0$  mm/min).

## 5 CONCLUSÃO

Após a realização dos testes de retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 temperado e revenido (30HRC) utilizando diferentes condições operacionais e diferentes tipos de rebolo de óxido de alumínio, pode-se concluir que:

Quanto à corrente elétrica consumida pelo motor principal:

- Com a elevação da velocidade do rebolo ( $v_s$ ) a corrente elétrica consumida diminui porque o número de grãos ativos aumenta, (menor  $h_c$ ). A velocidade da peça ( $v_w$ ) e a velocidade da mesa ( $v_t$ ) permanecem aproximadamente constantes e não são significativas na análise de resultados.
- O rebolo 1 (“seeded gel”) teve um desempenho ligeiramente inferior (maior corrente consumida), porque proporciona uma maior friabilidade na operação de retificação do que o grão de óxido de alumínio convencional.

Quanto ao sinal de emissão acústica:

- Os valores do sinal de emissão acústica tendem a subir com o aumento da velocidade de corte ( $v_s$ ) e com o emprego do rebolo 2 (convencional). O sinal de emissão acústica diminui com o aumento da velocidade da peça ( $v_w$ ) e o mesmo aumenta o sinal quando a velocidade da mesa ( $v_t$ ) aumenta.

Quanto à rugosidade dos corpos de prova retificados ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ ):

- Todos os parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$ ) são afetados significativamente pela velocidade longitudinal da mesa ( $v_t$ ) e que à exceção de  $R_t$ , os demais parâmetros de rugosidade são afetados pela interação entre velocidade do rebolo e o tipo de rebolo. A elevação da velocidade da mesa ( $v_t$ ) provoca uma elevação drástica em todos os parâmetros de rugosidade, o que pode ser explicado pela redução na quantidade de grãos abrasivos ativos quando trabalhamos com uma velocidade da mesa maior. Para a velocidade da peça ( $v_w$ ) e para os tipos de rebolo utilizados não foram significativos pelo gráfico de pareto, mas tendem a diminuir a rugosidade com o aumento da velocidade da peça e para o rebolo 2. A rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte ( $v_s$ ).

Quanto ao desvio de batimento dos corpos de prova retificados:

- O desvio de batimento é influenciado pela velocidade do rebolo, tipo de rebolo e pelas interações entre velocidade do rebolo e o tipo de rebolo e entre a velocidade da mesa e o tipo de rebolo. A velocidade de corte ( $v_s$ ), a velocidade da peça ( $v_w$ ) e a velocidade da mesa ( $v_t$ ) tendem a diminuir o valor do batimento com o aumento destes parâmetros.

Quanto ao diâmetro dos corpos de prova retificados:

- O diâmetro do corpo de prova é influenciado somente pela velocidade do rebolo, não havendo a influência das interações entre os parâmetros de entrada. A velocidade de corte ( $v_s$ ), a velocidade da peça ( $v_w$ ) e a velocidade da mesa ( $v_t$ ) tendem a diminuir o valor do diâmetro do corpo de prova retificado com o aumento destes parâmetros.

O menor batimento apresentado foi para o rebolo 6 seguido pelos rebolos 4, 5 e 3, devido a granulometria do rebolo favorecer a remoção de maior volume de material, sendo utilizada principalmente em operações de desbaste. Lembrando que a dureza do rebolo 3 é menor do que a dos rebolos 1, 2, 4, 5 e 6. Uma dureza menor favorece o desprendimento dos abrasivos, permitindo que novos abrasivos afiados entrem em ação.

## **6 PROPOSTA DE CONTINUIDADE DE TRABALHO**

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 do tipo de abrasivo. Os resultados apresentados neste trabalho podem ser complementados investigando os tópicos citados a seguir:

- Analisar o desempenho da retificação longitudinal em aço ABNT 1045 sob altas velocidades do rebolo, obtidos por meio da introdução de um inversor de frequência para o acionamento do motor principal.
- Estudar o comportamento da retífica em operações de precisão e de perfis, trabalhando com uma granulometria de 150 à 280 “mesh”. Isso permitirá descobrir valores menores de corrente, emissão acústica, rugosidade , batimento do corpo de prova retificado e diâmetro do corpo de prova retificado.
- Estudar o comportamento de rebolos utilizando materiais tais como carboneto de silício (SiC) e cBN tendo como objetivo investigar os parâmetros de usinagem.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ABNT NBR ISO 4287. *Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade*, 2002.
- 2- AÇO BRASIL <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas-detalhe.asp?id=51>> acesso em: 20 jan. 2013.
- 3- AGARWAL S.; RAO P. V. *Grinding characteristics, material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.50, p. 1077-1087, 2010.
- 4- ALI, R. H.; KURFESS, T. R.; DANYLUK, S. *Force control grinding of gamma titanium aluminide*. International Journal of Machine Tools & Manufacture v.43 p. 185–191, 2002.
- 5- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. *Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados*. Revista Matéria, v. 13, n. 4, p. 636 – 642, 2008.
- 6- ASM International, *Metals Handbook – Vol. 16 Machining*, 1995.
- 7- BIANCHI, E.C.; OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUERIO, B. D. M.; COELHO, R. T. *Grinding process dominance by means of the dressing operation* Twenty-ninth International Matador Conference, p. 547-550, 1992.
- 8- BRAHIM, B. F.; NABIL, B. F.; HABIB, S.; CHEDLY, B.; YOSHIO I. *Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 49 p. 261 – 272, 2008.

- 9- BRUNNER, G. *Schleifen mit mikrokristallinem aluminiumoxid*, dr.-Ing. diss., Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2, Nr. 464, Düsseldorf, VDI-Verlag 1998.
- 10-BONNER, A. *Abrasive Articles with Novel Structures and Methods for Grinding*, World Patent Filed 2003.
- 11-DINIZ, A. E. *Processos de retificação*. Campinas: Unicamp, s/d. 1992.
- 12-DORNFELD, D. *Application of acoustic emission techniques in manufacturing*, 25 v.6, 260, 1992.
- 13-DORNFELD, D.; CAI, H. *An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission*, ASME Journal of Engineering and Industry, v. 106, N° 1, p. 29 – 33, 1984.
- 14-FATHIMA, K. KUMAR, A. S. RAHMAN M. LIM, H. S. *A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding* Wear Science@Direct, v.254, p. 1247-1255, 2003.
- 15-INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. Disponível em: <[http://www.worldsteel.org/statistics/crude-steel production.html](http://www.worldsteel.org/statistics/crude-steel%20production.html)> Acesso em 09 jan. 2013.
- 16-JACKSON, M. J.; DAVIS, C. J.; HITCHINER, M. P.; MILLS, P. *High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology*. Journal of Materials Processing Technology, n. 110, p. 78-88, 2001.



- 17-LANZA, A. V. *Curso Avançado Sobre Tecnologia de Retificação*, AVL Representações e Assessoria Técnica em Abrasivos S/C Ltda, 189p, 1989.
- 18-LINDSAY, R. P.; HAHN, R. S. *On the Basic Relationships between Grinding Parameters*, Annals of the C.I.R.P., v.19, p. 657-666, 1971.
- 19-LINDSAY, R. P. *“Principles of grinding”*. Metals handbook: machining. 9 ed. Nova York: ASM International, 1995.
- 20-MALKIN, S. *Grinding Technology – theory and applications of machining with abrasives*, Ellis Horwood Ltd., 1989.
- 21-MARINESCU, D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. *Tribology Of Abrasive Machining Processes*, William Andrew, 2004.
- 22-MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4 ed. Tradução de Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC Editora, 493 p. Original em ingles, 2009.
- 23-OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A. *Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring*. CIRP Annals, v. 50, n. 1, p. 217-220, 2001.
- 24-OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUÉRIO, B. M. *Dressagem controlada: uma solução para os problemas*. Revista Máquinas e Metais, nº 283, 1989.
- 25-PETERS, J. DECNEUT, A. *L’ Epaisseur de coupe equivalente, parameter determinant en retificacion*. Mecanique materiaux eletricité, October, 1975.
- 26-SALMON, S. C. *Modern grinding process technology*. Nova York: McGraw-Hill, 1992.
- 27-SHUANG-XI, W.; LIN, G.; XUE-JING, L.; BIAO, G.; SHI-CHAO, N. *Manufacture of a new kind diamond grinding wheel with Al-based bonding agent*. Journal of Materials Processing Technology v.209 p. 1871 – 1876, 2009.

- 28-SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y., CATAI, R. E.; FRANCA, T. V.; AGUIAR, P. R. *Study on the behavior of the minimum quantity lubricant–MQL technique under different lubrication and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel*, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. XXVII p. 192 – 199, 2005.
- 29-SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; CATAI, R. E.; FRANCA, T. V.; AGUIAR P. R. *Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant–MQL in grinding*, Int. J. Mach. Tools Manuf. v.47, p. 412 – 418, 2007.
- 30-STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos*, Ed. da UFSC, Florianópolis, SC, p.314, 1992.
- 31-TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H.; DANESHI, A.; STOCKERT, S.; RASIFARD, A. *An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding*, Int. J. Mach. Tools Manuf. v. 49, p. 924 – 932, 2009.
- 32-TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H. *Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 50, p. 521 – 531, 2010.
- 33-TONSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J. C. *Process Monitoring in Grinding*, Institute of Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Germany, 2001.
- 34-YANG, J.; ZHANG, Z.-N.; CHENG J.-C.; LIU X.-X. *A grinding acoustic emission monitoring method using wavelet transforms and fuzzy logic*, v.131, p. 3463, 2012.
- 35-WAGNER, D. B. *Chinese blast furnaces from the 10th to the 14th century*. Historical Metallurgy 37, p. 25–37, 2003.

- 36-WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK, JR. R. B. *Grinding Fluid Application System Design*. Annals of the CIRP v. 44, 1995.
- 37-WEGENER, K.; HOFFMEISTER, W. H.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W. C.; RABIEY, M. *Conditioning and monitoring of grinding wheels*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* v.60 p. 757 – 777, 2011.
- 38-WILLIAM, D.; CALLISTER, J. R. *Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução*, Quinta Edição 2002, Editora LTC.