

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MARCOS VIEIRA DE SOUZA

**PROJETO ROBUSTO DE PARÂMETROS (PRP) APLICADO
NA OTIMIZAÇÃO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA COM
MÚLTIPLAS RESPOSTAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Outubro de 2012

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB_6/1702

S729p

Souza, Marcos Vieira de

Projeto robusto de parâmetros (PRP) aplicado na otimização de retificação cilíndrica com múltiplas respostas. / por Marcos Vieira de Souza. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2012.

132 p.: il.

Orientador : Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva.

Coorientador : Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. DOE. 2. Experimento fatorial. 3. Retificação cilíndrica. 4. Otimização de operações. I. Paiva, Anderson Paulo de, orient. II. Ferreira, João Roberto, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MARCOS VIEIRA DE SOUZA

**PROJETO ROBUSTO DE PARÂMETROS (PRP) APLICADO
NA OTIMIZAÇÃO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA COM
MÚLTIPLAS RESPOSTAS**

Dissertação aprovada por banca examinadora em
09 de outubro de 2012, conferindo ao autor o título de
Mestre em Ciências em Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Mendes Abrão, Dr. (UFMG)

Prof. Emerson José de Paiva, Dr. (UNIFEI)

Prof. João Roberto Ferreira, Dr. (UNIFEI)

Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr. (UNIFEI)

Itajubá

2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Osvaldo e Judite, à minha avó Josefa que me apoiou num momento importante da minha vida. Em especial a minha esposa Selma e filhas Giovanna e Letícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e perseverança que me levaram a realização deste objetivo.

À minha família, mas principalmente a minha esposa e filhas por entenderem as várias horas que estive ausente e pelo apoio incondicional, e também aos meus pais que sempre acreditaram em mim e de onde tudo começou.

À empresa MAHLE Metal Leve S.A. na figura dos profissionais competentes que me incentivam e participam do meu crescimento profissional e que acreditam na tecnologia e ciência, que também dispôs dos equipamentos e materiais aplicados nesta pesquisa.

Aos Professores Dr. Anderson Paulo de Paiva e Dr. João Roberto Ferreira pelas horas dedicadas na orientação e no incentivo para a produção deste trabalho.

Aos demais professores da UNIFEI que repassaram seus conhecimentos e experiências para nós alunos.

“Theory guides, Experiment decides”

Izaak Maurits Kolthoff

(Pai da Química Analítica)

RESUMO

Na indústria automobilística, o processo de retificação cilíndrica é amplamente aplicado na produção seriada de peças com geometrias específicas e, muitas vezes, de materiais não convencionais, sendo este processo complexo e com vários fatores que influenciam suas saídas, como qualidade dos produtos, produtividade e custo, por exemplo. Portanto, este trabalho apresenta a aplicação do PRP (Projeto Robusto de Parâmetros) por meio do arranjo cruzado, aliado à MSR (Metodologia de Superfície de Resposta), utilizada na otimização do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em anéis de pistão de ferro fundido recobertos com cromo duro, numa indústria multinacional de autopeças, visando à redução de custo do processo sem comprometer a qualidade do produto, que é observada especificamente em três dimensões de sua geometria, denominadas como T_1 , T_2 e T_3 , bem como na vida útil do dressador, medida em número de dressagens. Como variáveis controláveis do processo foram consideradas a velocidade de avanço de mergulho do rebolo (V_a), a velocidade de avanço da dressagem (V_{fd}), a velocidade periférica do rebolo (V_s) e a profundidade de dressagem (a_d), bem como dois ruídos do processo, sendo as posições das peças na máquina (Z_1) e os dois mandris aplicados na fixação das peças (Z_2). Auxiliando no processo de otimização são aplicados o método do EQM (Erro Quadrático Médio), o MCG (Método do Critério Global) e o algoritmo GRG (Gradiente Reduzido Generalizado). Finalmente a otimização propôs os parâmetros $V_a = 0,190$ mm/min, $V_{fd} = 59$ mm/min, $V_s = 39$ m/s e $a_d = 0,016$ mm, com os quais foram realizados experimentos de confirmação, que validam a eficácia dos métodos aplicados, mostrando a capacidade do processo antes e após a otimização, bem como os ganhos monetários auferidos.

Palavras-chave: Retificação Cilíndrica, Anéis de Pistão, Cromo Duro, Projeto Robusto de Parâmetros, Arranjo Cruzado.

ABSTRACT

In the automotive industry the cylindrical grinding process is widely applied in series production for auto parts with specific geometries and often with unconventional materials. The grinding operation is a complex process and many factors influence the output of this process, such as product quality, productivity and costs, for example. Then, this paper presents the application of RPD (Robust Parameter Design) based on the cross array allied with MSR (Response Surface Methodology) and MSE (Mean Squared Error), involving a matrix of 30 experiments, carried out in optimizing the process of plunge cylindrical grinding in hard chrome, at a multinational auto parts company, in order to increase the single point dresser life, which has its impact on costs and productivity, without jeopardize the product quality, which is observed specifically in three dimensions related to its geometry, named as T_1 , T_2 and T_3 , as well as the dresser's life time, measured through dressing cycles. As controlled process variables were studied the plunge infeed rate (V_a), the dressing speed (V_{fd}), the grinding wheel surface speed (V_s), in addition to the dressing depth (d), besides two process noises, being the positions of the work pieces in the machine (Z_1) and the two mandrels used to clamp the work pieces (Z_2). Supporting the optimization the GCM (Global Criterion Method) as well as the GRG (Generalized Reduced Gradient) algorithm was applied. Finally, the optimization proposed the parameters setup $V_a = 0,190$ mm/min, $V_{fd} = 59$ mm/min, $V_s = 39$ m/s and $a_d = 0,016$ mm, that were applied in the experiments to confirm the results, in order to validate the effectiveness of the applied methods, presenting the process capability before and after optimization, as well as the economic gains.

Keywords: *Plunge Cylindrical Grinding, Piston Rings, Diamond Wear, Hard Chrome, Robust Parameter Design, Cross Array.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Retificação Tangencial de Passagem.....	6
Figura 2.2 - Retificação Tangencial de Mergulho.....	6
Figura 2.3 - Retificação Tangencial combinada entre passagem e mergulho	7
Figura 2.4 - Retificação Sem Centros (Centerless)	7
Figura 2.5 - Rebolos para Retificação Cilíndrica Externa.....	9
Figura 2.6 - Al ₂ O ₃ Cinza , Al ₂ O ₃ Branco e Al ₂ O ₃ Cerâmico, respectivamente.....	11
Figura 2.7 - SiC Preto e SiC Verde, respectivamente	13
Figura 2.8 - CBN Preto, CBN Ambar e CBN Marron Escuro	14
Figura 2.9 - Diamante Monocristalino e Policristalino respectivamente	14
Figura 2.10 - Estrutura Fechada x Estrutura Aberta.....	18
Figura 2.11 - Representação dos grãos, ligante e poros de um rebolo	19
Figura 2.12 - Descrição do rebolo	21
Figura 2.13 - Mecanismo de Formação do Cavaco	22
Figura 2.14 - Tipos de Desgaste do Rebolo	23
Figura 2.15 - Diferentes tipos de Dressadores.....	25
Figura 2.16 - Pedras de diamante - cúbico, octaedro e dodecaedro, respectivamente.	26
Figura 2.17 - Macro Efeito da Dressagem.....	27
Figura 2.18 - Relação de Velocidade (q_r) x Rugosidade do Rebolo	29
Figura 2.19 - Dressador novo x dressador desgastado (ampliação 6x).....	31
Figura 2.20 - Entradas e Saídas do Processo de Retificação.....	33
Figura 2.21 - Sentido de giro da peça e rebolo compondo a velocidade de corte.....	34
Figura 3.1 - Superfície de Resposta.....	45
Figura 3.2 - Arranjo Composto Central para dois fatores	49
Figura 3.3 - Tipos de CCD	50
Figura 3.4 - PRP com Arranjo Cruzado	57
Figura 3.5 - Controle do Processo x Interação com Ruído no PRP – Montgomery (2001).....	58
Figura 4.1 - Histograma de uma distribuição normal.....	67
Figura 4.2 - Histograma – (a) processo com média fora de centro. (b) processo com variabilidade excessiva.	67
Figura 4.3 - Distribuição das áreas de uma distribuição normal	68
Figura 5.1 - Ilustração da célula de potência de um motor de ciclo Otto.....	73
Figura 5.2 - Anel de Pistão	74

Figura 5.3 - Ampliação: 500x – Ataque: Nital 3%.....	75
Figura 5.4 - Cromo Duro sobre Fofó Nodular – ampliação 200x – ataque NaOH 1%.....	75
Figura 5.5 - Cromo Duro – ampliação 500x – Sem Ataque.....	76
Figura 5.6 - Retificadora Cilíndrica.....	76
Figura 5.7 - Fixação das Peças e Posição de Dressagem.....	77
Figura 5.8 - Dressador Ponta Única.....	78
Figura 5.9 - Método Experimental	79
Figura 5.10 - Perfil do Diâmetro Externo dos Anéis de Pistão	80
Figura 5.11 - Posição dos Pacotes de Anéis na Árvore.....	81
Figura 5.12 - Mandris de Fixação dos Anéis.....	82
Figura 5.13 - Boxplot do Resultado das Posições dos Pacotes	83
Figura 5.14 - Boxplot do Resultado dos Diferentes Mandris.....	84
Figura 5.15 - Testes de Normalidade para os Resíduos de V	90
Figura 5.16 - Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_1$	90
Figura 5.17 - Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_2$	91
Figura 5.18 - Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_3$	91
Figura 5.19 - Interação entre V_{fd} x a_d para Vida do Dressador.....	92
Figura 5.20 - Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_1$	92
Figura 5.21 - Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_2$	92
Figura 5.22 - Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_3$	92
Figura 6.1 - Dressador Exp. 1 – 6,3X.....	96
Figura 6.2 - Dressador Exp. 2 – 6,3X.....	96
Figura 6.3 - Dressador Exp. 3 – 6,3X.....	96
Figura 6.4 - Dressador Exp. 4 – 6,3X.....	96
Figura 6.5 - Dressador Exp. 5 – 6,3X.....	96
Figura 6.6 - Tendência de EQM T1 no intervalo entre 700 e 889 dressagens	98
Figura 6.7 - Tendência do $EQM T_2$ no intervalo entre 700 e 889 dressagens	99
Figura 6.8 - Tendência de $EQM T_3$ no intervalo entre 700 e 889 dressagens	99
Figura 6.9 - Gráfico Xbar para T_1 Antes e Após Otimização.....	103
Figura 6.10 - Gráfico Xbar para T_2 Antes e Após Otimização.....	104
Figura 6.11 - Gráfico Xbar para T_3 Antes e Após Otimização.....	104
Figura 6.12 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T_1	105
Figura 6.13 - Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T_1	105
Figura 6.14 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T_2	106

Figura 6.15 - Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T_2	106
Figura 6.16 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T_3	107
Figura 6.17 - Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T_3	107
Figura 6.18 - Comparativo de custos com dressadores e rebolos antes e após otimização....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Anéis revestidos com cromo duro e com diâmetro externo retificado.....	4
Tabela 2.1 - Características Principais dos Grãos Abrasivos	10
Tabela 2.2 - Tamanho e granulometria dos grãos de óxido de alumínio e carbeto de silício ..	15
Tabela 2.3 - Tamanho e granulometria dos grãos para Diamante e CBN.....	16
Tabela 2.4 - Classificação de Dureza dos Rebolos.....	17
Tabela 2.5 - Número x Tipo da Estrutura dos Rebolos	18
Tabela 2.6 - Estrutura dos Rebolos x Percentual Volumétrico de Grãos Abrasivos.....	19
Tabela 2.7 - Massa do diamante em função do diâmetro do rebolo.....	27
Tabela 2.8 - Grau do Recobrimento em função do acabamento	30
Tabela 3.1 - Publicações Envolvendo Retificação e Métodos Experimentais	41
Tabela 3.2 - Parâmetros Aplicados nos Processos de Retificação das Publicações Estudadas	42
Tabela 3.3 - Níveis dos Fatores dos Processos de Retificação das Publicações Estudadas	43
Tabela 3.4 - Frequência dos Parâmetros dos Processos de Retificação das Publicações.....	44
Tabela 4.1 - Peças fora da especificação em função da capacidade do processo.....	71
Tabela 4.2 - Desempenho do Processo x Interpretação dos Valores.....	72
Tabela 5.1 - Principais dimensões do anel de pistão aplicado nos experimentos	74
Tabela 5.2 - Características do Ferro Fundido Nodular	74
Tabela 5.3 - Composição Química do Material Base.....	75
Tabela 5.4 - Características Cromo Duro	76
Tabela 5.5 - Forma e Dimensões do Rebolo	77
Tabela 5.6 - Características do Rebolo.....	77
Tabela 5.7 - Valores do Perfil do Diâmetro Externo dos Anéis.....	80
Tabela 5.8 - Ruído da Posição dos Pacotes	82
Tabela 5.9 - Análise de Variância para Posição dos Pacotes – Ruído 1.....	83
Tabela 5.10 - Parâmetros de Processo e Níveis.....	84
Tabela 5.11 - Parâmetros Fixos de Processo.....	85
Tabela 5.12 - Variáveis de Respostas para os Experimentos	85
Tabela 5.13 - Matriz de Experimentos PRP	86
Tabela 5.14 - Valores da dimensão T_l do experimento 1 nas condições de ruído	87
Tabela 5.15 - Análise de Significância Individual	88
Tabela 5.16 - Coeficientes dos Modelos Quadráticos para V , $EQM1$, $EQM2$ e $EQM3$	89
Tabela 5.17 - Análise dos Resíduos	89

Tabela 6.1 - Solução das Funções Objetivos.....	94
Tabela 6.2 - Aplicação do Método do Critério Global.....	95
Tabela 6.3 - Intervalo de Confiança para os Experimentos de Confirmação.....	95
Tabela 6.4 - Quantidade de Peças Coletadas nos Experimentos de Confirmação.....	96
Tabela 6.5 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para $EQM T_1$	97
Tabela 6.6 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para $EQM T_2$	97
Tabela 6.7 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para $EQM T_3$	98
Tabela 6.8 - EQM's e Intervalos de Confiança - Valores Teóricos x Valores Experimentais	100
Tabela 6.9 - Capacidade do Processo de Retificação para as dimensões da peça.....	101
Tabela 6.10 - Comparativo Processo Antes da Otimização x Após Otimização.....	101
Tabela 6.11 - Capacidade do Processo Antes e Após Otimização.....	103
Tabela 6.12 - Potencial de redução de custos com dressadores e rebolos.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>a</i>	Profundidade total de mergulho
<i>a</i>	Avanço por volta na retificação cilíndrica de mergulho – mm
A	Óxido de Alumínio Cinza
A	Ampere
AA	Óxido de Alumínio Branco
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Anderson Darling
AG	Algoritmo Genético
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
<i>b_d</i>	Largura de Atuação do Dressador
C	Carbeto de Silício Preto
CBN	Nitreto cúbico de boro
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou Box-Wilson – <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CI	Intervalo de Confiança
cm	Centímetro
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Cr ₂ O ₃	Óxido de Cromo
ct	Carat (quilate) – unidade de peso usada para diamantes 1 [ct] = 0,2 [g]
D	Diamante
<i>d</i>	Profundidade de dressagem
DOE	Delineamento de Experimentos - <i>Design of Experiments</i>
DR	Óxido de Alumínio Rosa
<i>d_s</i>	Diâmetro do Rebolo
<i>d_w</i>	Diâmetro da Peça
EQM	Erro Quadrático Médio
FEPA	<i>Federation of European Producer of Abrasive</i>

GC	Carbeto de Silício Verde
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
HK	Dureza Knoop
HRC	Dureza Rockwell C
HSS	Aço Rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HV	Dureza Vickers
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
LI	Limite Inferior
LIE	Limite Inferior de Especificação
LS	Limite Superior
LSE	Limite Superior de Especificação
mesh	Unidade relacionadas ao número de malhas das peneiras granulométricas
m/s	Metros por Segundo
mm/min	Milímetro por Minuto
mm/rev	Milímetro por Revolução
MCG	Método do Critério Global
MgO ₂	Óxido de magnésio
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
N	Newton
NaOH	Hidróxido de sódio
NLP	Problema de Otimização Não-Linear – <i>Nonlinear Problem</i>
n _s	Rotação do Rebolo
n _w	Rotação da peça
OICA	<i>Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles</i>
OLS	Método dos Mínimos Quadrados Ordinários - <i>Ordinary Least Squares</i>
P	Percentual da especificação usada pelo processo
P1...P10	Peça 1... Peça 10
PRP	Projeto Robusto de Parâmetros
ppm	partes por milhão
r	Coefficiente de Correlação de Pearson
R ²	Coefficiente de Determinação
R ² (adj.)	Coefficiente de Determinação Ajustado
R ² (Pred.)	Coefficiente de Determinação Previsto
Ra	Rugosidade Média

R_d	Raio da Ponta do Dressador
rpm	Rotações por Minuto
s	Segundos
s	Constante da função do Método de Critério Global
S	Soma dos quadrados dos resíduos
S	Desvio Padrão Amostral
S/N	razão Sinal-Ruído (<i>Signal to-noise ratio</i>)
S_d	Passo de Dressagem
sfp _m	Pés por minuto (<i>Surface Feet per Minute</i>)
SiC	Carbeto de Silício
SMC	Simulação de Monte Carlo
SRD	Superfície de Resposta Dual
T	Valor alvo da dimensão
T_1	Dimensão do abaulamento esquerdo da peça
T_2	Dimensão da cota de centro do abaulamento da peça
T_3	Dimensão do abaulamento direito da peça
U_d	Grau de Recobrimento da Dressagem
u_j	Limite superior do processo
V	Vida do Dressador
V_a	Velocidade de Avanço do Mergulho Rebolo
V_C	Velocidade de Corte
V_{fd}	Velocidade de Avanço do Dressador
V_j	Velocidade de saída do fluido
V_r	Velocidade Periférica do Dressador
V_t	Velocidade de Avanço Axial do Rebolo
V_s	Velocidade Periférica do Rebolo
V_w	Velocidade Periférica da Peça
W	Watts
w_1 e w_2	Constantes pré-definidas de pesos para a equação do EQM
W_t	Ondulação Teórica (Macro Efeito)
Y	variável dependente
ZN	Óxido de Alumínio Zirconado

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Coefficiente polinomial
β_i	Coefficientes de fatores controláveis
β_{ii} e β_{ij}	Coefficientes de interação de fatores controláveis
γ_i	Coefficientes dos fatores de ruídos
δ_{ij}	Coefficientes de interação entre fatores controláveis e ruído.
ρ	Distância dos Pontos Axiais em Relação aos Pontos Centrais da MSR
σ^2	Variância
Σ	Somatório
ε	Erro Experimental
e	Resíduos
μ	Média
$\hat{\mu}$	Média da especificação da característica
ω_μ	Superfície de Resposta Ajustada para a Média
ω_σ	Superfície de Resposta Ajustada para o Desvio Padrão
C_p	Índice de capacidade potencial do processo, sem considerar a centralização do processo
C_{pk}	Índice de capacidade potencial do processo, considerando a centralização do processo
Cr	Cromo
d_2	Constante que varia de acordo com o tamanho da amostra n
$F(\mathbf{x})$	Função objetivo
$f_i(\mathbf{x})$	Funções objetivo
$g_j(\mathbf{x})$	Restrições da função
lj	Limite inferior do processo
k	Número de objetivos da função do Método de Critério Global
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
P_p	Índice de desempenho potencial do processo, sem considerar a centralização do processo
P_{pk}	Índice de desempenho potencial do processo, considerando a centralização do processo
R	Amplitude

\bar{R}	Média das amplitudes de uma série de subgrupos de tamanho constante
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
\bar{X}	Média das médias dos subgrupos das leituras individuais da amostra
$\bar{\bar{X}}$	Média das médias dos subgrupos da amostra
\vec{x}	Vetor de n variáveis do processo
X_1	Variável independente 1
X_2	Variável independente 2
X_i	Leitura individual de uma amostra
x_i	Fatores controláveis
X_i	Soluções ideais para cada resposta de interesse do Método de Critério Global
y_i	Valor observado real de um conjunto de dados
\hat{y}_i	Valor calculado de um conjunto de dados
Z_i	Fatores de ruído

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	3
1.2	Objetivo Específico	3
1.3	Justificativa.....	3
2.	FUNDAMENTOS RETIFICAÇÃO	5
2.1	Retificação Cilíndrica Externa	5
2.2	Rebolos.....	9
2.2.1	Grãos Abrasivos	9
2.2.2	Tamanhos dos Grãos Abrasivos.....	14
2.2.3	Dureza do Rebolo (Grau do Rebolo).....	16
2.2.4	Estrutura dos Rebolos.....	17
2.2.5	Ligante dos Rebolos	19
2.2.6	Descrição dos Rebolos	21
2.3	Mecanismo de Formação do Cavaco	21
2.4	Mecanismos de Desgaste do Rebolo.....	23
2.5	Dressagem	24
2.5.1	Dressagem com Diamantes Naturais.....	26
2.5.2	Influência da Dressagem no Processo de Retificação.....	27
2.5.3	Grau de recobrimento da dressagem	29
2.5.4	Desgaste do Dressador	31
2.6	Principais Parâmetros do Processo de Retificação.....	32
2.6.1	Velocidade de Corte (V_c)	34
2.6.2	Velocidade de Avanço Axial (V_a).....	35
2.6.3	Espessura de Corte Equivalente (h_{eq}).....	35
3.	PROJETO DE EXPERIMENTOS	36
3.1	Aplicação de Projetos de Experimentos nos Processos de Retificação	37
3.2	Metodologia da Superfície de Resposta	45
3.2.1	Arranjo Composto Central	49
3.2.2	Método do Valor P	51
3.2.3	Teste para a Significância do Modelo	52
3.2.4	Coeficiente de determinação múltipla (R^2).....	52

3.2.5	Análise residual	54
3.3	Projeto Robusto de Parâmetros	55
3.3.1	Arranjo Cruzado	57
3.3.2	Arranjo Combinado	59
3.4	Superfície de Resposta Dual	60
3.5	Método do Critério Global	64
3.6	Gradiente Reduzido Generalizado	65
4.	CAPACIDADE DE PROCESSOS	67
4.1	Índices de Capacidade Potencial do Processo (C_p e C_{pk})	69
4.2	Índices de Desempenho Potencial do Processo (P_p e P_{pk})	71
5.	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	73
5.1	Material e Recobrimento dos Anéis de Pistão	73
5.2	Máquina e Ferramental	76
5.3	Método Experimental	78
5.4	Ruídos	81
5.5	Fatores Controláveis	84
5.6	Respostas dos Experimentos	85
5.7	Matriz Experimental	85
5.8	Modelagem das Respostas	87
5.8.1	Ajustes e Significância dos Modelos	88
5.8.2	Análise dos Resíduos	89
5.8.3	Superfície de Resposta	92
6.	OTIMIZAÇÃO	93
6.1	Otimização Individual	93
6.2	Otimização Global	94
6.3	Experimentos de Confirmação	95
6.4	Comparativo do Processo Antes da Otimização e Após Otimização	101
6.4.1	Parâmetros de Processo Antes e Após Otimização	101
6.4.2	Capacidade do Processo Antes e Após Otimização	102
6.5	Custo do Processo	108
7.	CONCLUSÃO	109
7.1	Sugestões para Estudos Futuros	110
8.	APÊNDICE	111
	Apêndice A – Valores das dimensões T_1 , T_2 e T_3 obtidas nos experimentos	111

Apêndice B – Valores das médias, alvos, variâncias e erros quadráticos médios obtidos nos experimentos.....	112
Apêndice C – Gráficos das Superfícies de Resposta para vida do dressador.....	113
Apêndice D – Gráficos das Superfícies de Resposta para EQM T ₁	116
Apêndice E – Gráficos das Superfícies de Resposta para EQM T ₂	119
Apêndice F – Gráficos das Superfícies de Resposta para EQM T ₃	122
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, nos vários ramos da indústria, sendo a automobilística uma das principais, há uma forte pressão por aumento de eficiência, visando o aumento da competitividade que faz parte da luta pela sobrevivência ou liderança em cada ramo de atuação (IRANI *et al.*, 2005).

Dentro dos processos de manufatura, é possível atuar no processo de usinagem de forma a utilizar todo o seu potencial para reduzir a utilização de insumos, na máxima produtividade e atendendo aos níveis de qualidade exigidos. No ramo automotivo, vários produtos, ferramentas e ferramentais utilizam o processo de usinagem, sendo a retificação o mais utilizado para atender às tolerâncias milésimas e formas exigidas (BIANCHI *et al.*, 2011).

Segundo Aguiar (2007), normalmente esta operação está no final da cadeia produtiva onde o custo agregado do produto é elevado e peças fora da especificação oneram mais ainda este custo.

A retificação se dá pelo movimento de rotação do rebolo, pela rotação da peça e pelo movimento de avanço, que pode ser de mergulho e/ou passagem. Outro item importante neste processo é a perfilação e afiação do rebolo, aplicada quando há redução do desempenho, seja por perda do poder de corte ou por erro da geometria do mesmo. Esta perfilação / afiação é executada por dressadores, normalmente produzidos com diamante natural, que removem uma fina camada do rebolo, expondo novos grãos na sua superfície e restabelecendo o seu poder de corte. Dependendo dos parâmetros aplicados durante a dressagem, o diamante pode se degradar mais ou menos rápido, o que influencia em sua vida útil (MARINESCU *et al.* 2006).

Nesta operação, além do rebolo, o dressador também tem impacto significativo no custo desta operação. Para ambos, quanto maior sua vida útil menor seu impacto no custo e, conseqüentemente, menor o custo industrial dos produtos, que está diretamente ligado à competitividade das empresas.

Anéis de pistão para motores de combustão interna constituem-se em um dos itens retificados de alto volume dentro do setor automotivo. Segundo dados da OICA (*Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles*), em 2011 foram fabricados 80 milhões veículos ao redor do mundo, entre carros e veículos comerciais, o que representa cerca de 1 bilhão de anéis de pistão para motores de combustão interna, caracterizando um produto fabricado em alto volume dentro do ramo de autopeças.

Além do alto volume de fabricação, o anel de pistão possui alta tecnologia nos materiais aplicados em sua fabricação, exigindo máquinas específicas e valores específicos para os parâmetros de processo, exemplificada pelas publicações das pesquisas de Picilli *et al.* (2011), aplicada na otimização do processo de nitretação gasosa de anéis de pistão e Severino *et al.* (2012), aplicada na otimização de torneamento vertical de ferro fundido cinzento. Dentre as diferentes etapas de fabricação deste produto, o processo de retificação, é aquele considerado de maior complexidade, sendo definido por algumas variáveis, como velocidade de avanço, velocidade periférica do rebolo, velocidade de dressagem, entre outros, adequados à sua execução. Dentre os materiais utilizados no recobrimento do diâmetro externo dos anéis de pistão há o cromo duro, que visa promover dureza, resistência à corrosão e resistência ao desgaste, mas que exige o processo de retificação para atender às tolerâncias especificadas, porém, evitando danos a sua estrutura metalográfica. O cromo não é um material convencional, quando se trata de retificação e sua dureza gera dificuldades para a retificação, fazendo com que seja necessário frequentes dressagem para restabelecer o poder de corte do rebolo.

Segundo Malkin (1989) cada usuário deve desenvolver seus próprios parâmetros de retificação junto aos fabricantes de máquinas, fabricantes de rebolos e outros fornecedores para obter um processo confiável e previsível. Visto que o processo de retificação é composto por vários parâmetros e que pode haver várias interações entre eles, dependendo da resposta estudada, é necessária a utilização de técnicas adequadas de experimentação, evitando a estratégia de tentativa e erro, que pode ser mais custosa, demorada e não levar a soluções adequadas. Consequentemente, dentro da experimentação, existem métodos consolidados e eficientes para determinar os fatores que influenciam os processos e para sua otimização, mas parte do desafio é determinar qual o mais adequado para o problema proposto.

Experimentos são realizados na tentativa de encontrar a melhor parametrização do processo, chegando a resultados que nem sempre apresentam resultados robustos, devido à falta de observação dos ruídos (PAIVA, 2008). Neste contexto, também devem ser observados os ruídos atuantes no processo, onde um dos métodos conhecidos é o Projeto Robusto de Parâmetros (PRP), proposto por Taguchi em 1980, que consiste em determinar os níveis de alguns fatores controláveis para reduzir a sensibilidade do processo às variações dos ruídos, aumentando sua robustez. Há ainda a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), inicialmente desenvolvida por Box e Wilson em 1951, que atualmente é aplicado na definição dos níveis ótimos dos fatores controláveis que influenciam as respostas. Mesmo o processo sendo robusto é necessário que esteja o mais próximo possível do alvo do valor da

característica e com a menor variância, o que é equacionado pelo Erro Quadrático Médio (EQM). Porém, quando os parâmetros precisam ser otimizados para múltiplas respostas, podem ocorrer conflitos, pois otimizações individuais levam a conjuntos diferentes de soluções e para auxiliar na resolução desta questão pode ser aplicado o Método do Critério Global (MCQ), proposto por RAO (1996).

Neste cenário, este trabalho apresenta a aplicação do PRP para otimização do processo de retificação cilíndrica por mergulho de anéis de pistão, recobertos com cromo duro, na região da face de contato, que possui três dimensões correlacionadas, de forma a torná-lo robusto aos ruídos, buscando atender aos valores alvos das respostas estudadas e ao mesmo tempo reduzir o custo do processo, através do aumento da vida útil do dressador, que consequentemente também tem seus impactos na produtividade.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar o processo de retificação cilíndrica por mergulho, em anéis de pistão, para motores de combustão interna, de ferro fundido nodular martensítico, revestidos no diâmetro externo com cromo duro, visando aumentar a capacidade do processo para as dimensões da face de contato da peça e reduzindo o custo da operação com dressadores.

1.2 Objetivo Específico

O objetivo específico é demonstrar a aplicação do Projeto Robusto de Parâmetros (PRP), com arranjo cruzado, na otimização de múltiplas respostas, para minimizar a variância das dimensões do perfil do diâmetro externo dos anéis, por meio da redução do Erro Quadrático Médio (EQM), auxiliadas pela Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), Método do Critério Global (MCG) e o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

1.3 Justificativa

Segundo Alves (2005) o processo de retificação é um dos mais complexos processos de usinagem, devido ao grande número de variáveis englobadas neste processo. Comumente, os processos de usinagem, principalmente o processo de retificação, por sua complexidade, apresentam correlação entre suas características, fazendo com que, dependendo das medidas tomadas nas decisões dos engenheiros, corpo técnico e administrativo para se aperfeiçoar uma destas características, haja conflito com algum outro aspecto, seja na produtividade, no custo,

na qualidade, ou algum outro indicador de desempenho, principalmente, quando se trata de indústrias manufatureiras de alto volume, onde cada decisão pode ter impacto direto e rápido no resultado econômico da empresa. Deste modo, é necessário que as modificações nos processos sejam executadas por meio de técnicas estruturadas que propiciem o real entendimento da influência dos parâmetros de cada processo.

No caso em questão, o material dos anéis a ser aplicado nos experimentos é o cromo duro, que exige controle rigoroso dos parâmetros de processo para manter os padrões de qualidade, sendo que em uma unidade fabril deste produto são fabricados diariamente cerca de 55.000 peças, apenas considerando os anéis com recobrimento de cromo duro, nos quais é aplicado o processo de retificação, que anualmente representa um volume em torno de 15 milhões de anéis, aplicados em veículos no mercado doméstico e internacional, conforme mostrado na Tabela 1.1.

Nas peças produzidas, existem dimensões que necessitam ser otimizadas simultaneamente, necessitando de um método específico, para tornar o processo robusto, considerando os ruídos e evitando soluções por a tentativa e erro.

Tabela 1.1 - Anéis revestidos com cromo duro e com diâmetro externo retificado

Período	Volume - peças
Diário	55.281
Mensal	1.271.471
Anual	15.257.657

Fonte: Departamento de Logística (MAHLE Metal Leve S.A.)

2. FUNDAMENTOS RETIFICAÇÃO

A retificação é classificada como uma operação na qual uma superfície abrasiva, chamada rebolo, em movimento de rotação entra em contato com uma peça, removendo material desta e desgastando o grão abrasivo do rebolo (HELLMEISTER, 2004). O rebolo é constituído por múltiplos grãos abrasivos, cujas arestas com forma e orientação irregular, são aleatoriamente distribuídos no elemento ligante, que tem a função de uni-las. (SILVA JUNIOR e COELHO, 1998, MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Hassui e Diniz (2003) a retificação é indicada quando a peça demanda uma superfície bem acabada, com boa qualidade dimensional e geométrica. Devido a isto, o processo de retificação é, usualmente, uma das etapas finais do processo, logo, quando a peça atinge este ponto já está com alto valor agregado, tornando uma rejeição muito cara. Apesar de esta operação promover precisão micrométrica, algumas dificuldades, como danos térmicos à peça e vibrações, são comuns, podendo levar à trincas nos materiais e desgaste prematuro da ferramenta abrasiva.

Segundo Malkin (1989), no processo de retificação, para que o material seja removido da peça é necessário o dispêndio de uma quantidade significativa de energia, sendo que parte desta energia se transforma em calor, concentrado principalmente na região do corte, que podem causar tensões residuais, dilatação térmica, trincas e erros dimensionais.

Para Webster (1999), a lubrificação e a refrigeração têm importante papel neste processo. É necessário que o fluido refrigerante penetre na região do corte, com volume adequado e suficiente para remover o excesso de calor, além de remover os cavacos gerados e lubrificar o ponto de contato entre o rebolo e a peça.

2.1 Retificação Cilíndrica Externa

Segundo Marinescu *et al.* (2006), a retificação cilíndrica externa é o processo no qual a remoção de material acontece no diâmetro externo da peça que está sendo trabalhada, normalmente fixada entre pontas ou por castanhas e contra ponto. A retificação cilíndrica também pode ser sem centros, comumente conhecida como *centerless*.

O princípio físico do processo de retificação cilíndrica se dá pela rotação da peça sobre seu próprio eixo. Esta peça fica em contato com a superfície do rebolo, que executa o movimento de avanço sobre a peça removendo um determinado sobremetal. Neste processo a retificação pode ser paralela, de rebaixos, cônica, de roscas ou de perfil, sendo configurada basicamente das seguintes formas:

Tangencial de Passagem: método no qual o rebolo se desloca longitudinalmente em relação ao eixo de rotação da peça, numa determinada profundidade de remoção de material. Este método é aplicado para retificação paralela ou cônica. A Figura 2.1 mostra a retificação tangencial de passagem aplicada às peças com perfis complexos.



Figura 2.1 - Retificação Tangencial de Passagem
Fonte: Grupo Danobat

Tangencial de Mergulho: método no qual o rebolo efetua o movimento de avanço transversal ao eixo de rotação da peça, no sentido radial do rebolo, aplicada para produção de perfis específicos, com rebolos perfilados normalmente por rolos dressadores, ou em rebaixos retos e/ou cônicos, conforme exemplificado na Figura 2.2.

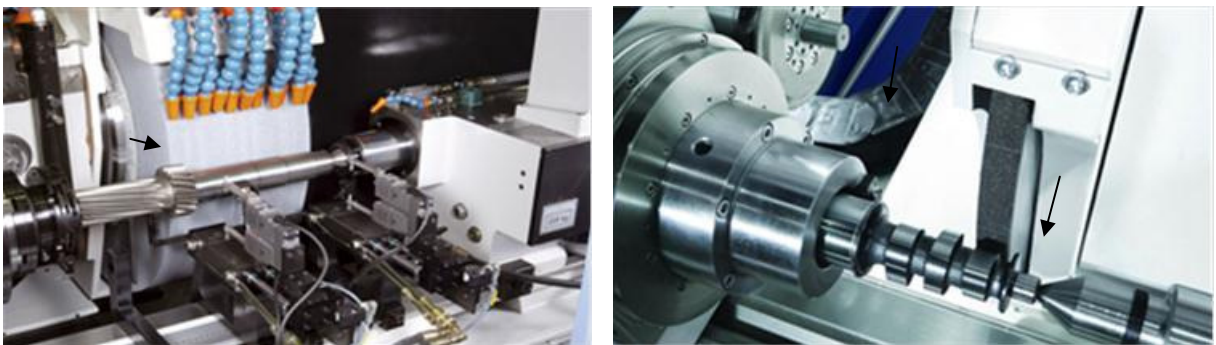


Figura 2.2 - Retificação Tangencial de Mergulho
Fonte: Grupo Danobat

Combinação entre passagem e mergulho: neste método a retificação se dá em ambos os sentidos, onde os eixos da máquina são comandados por Comando Numérico Computadorizado (CNC), de acordo com a programação pré-estabelecida. Normalmente, os rebolos aplicados são de nitreto cúbico de boro (CBN) com velocidades acima de 60 m/s. A Figura 2.3 mostra a retificação de um perfil de rosca com o método descrito.

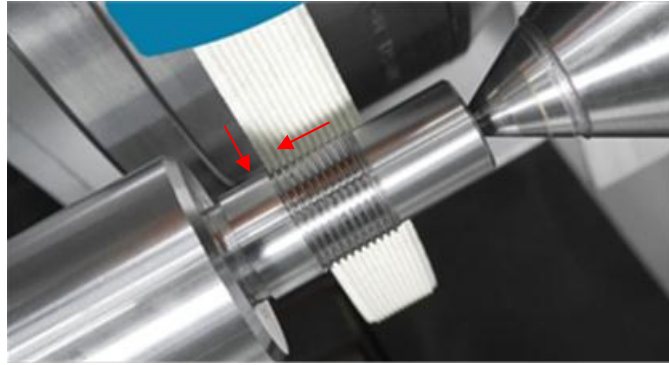


Figura 2.3 - Retificação Tangencial combinada entre passagem e mergulho
Fonte: Grupo Danobat

Sem Centros: este tipo de retificação, amplamente utilizado em produção de peças seriadas, também é comumente conhecido como *Centerless*, conforme Figura 2.4. O processo é composto por um rebolo de arraste com baixa rotação, responsável pelo movimento de rotação da peça e outro, de corte, que remove o material da peça. Entre os dois rebolos há uma régua que serve de apoio para a peça enquanto está sendo retificada.

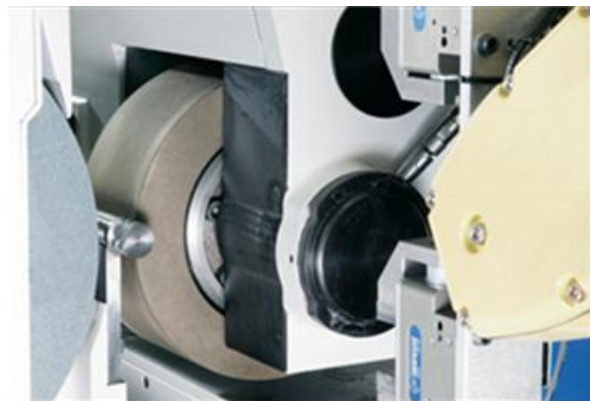


Figura 2.4 - Retificação Sem Centros (Centerless)
Fonte: Grupo Danobat

Segundo Marinescu *et al.* (2006), o processo de retificação possui seis elementos básicos, envolvendo:

- Máquina Retificadora
- Rebolo
- Fluido Refrigerante
- Peça obra
- Atmosfera
- Resíduos da Retificação: Borra

Neste trabalho será considerado também o dressador, que possui suma importância neste processo.

A máquina retificadora tem um papel de suma importância no processo de retificação, pois executa os movimentos da peça, do rebolo e do processo de dressagem para realização da operação, dentre outros. A robustez da máquina tem influência direta na geometria da peça, na rugosidade, ondulações, tolerâncias e, também, para evitar vibrações, além de manter a estabilidade do processo.

O rebolo é a ferramenta que realiza a remoção de material na peça e suas propriedades influenciam diretamente o resultado final, pois precisa ser corretamente especificado para cada aplicação, com tipo e tamanho de grão, ligante, dureza, estrutura e propriedades químicas adequadas, além de ser aplicado com parâmetros de processo adequados (MALKIN, 1989).

De acordo com Webster (1999), o fluido de corte é responsável por lubrificar a região do corte, diminuindo o atrito e conseqüentemente o desgaste do rebolo. Também tem a função de reduzir o calor na superfície da peça e do dressador, evitando danos térmicos à peça e permitindo a obtenção da geometria específica, pois evita a expansão do material da peça e também dos elementos da máquina, auxiliando na manutenção da temperatura adequada. O fluido deve ter volume e pressão suficientes, para evitar espumação do mesmo, além de ser adequadamente especificado para evitar dermatite aos operadores.

As características da peça dependem dos demais itens envolvidos no processo, para que seja produzida corretamente, sem danos térmicos ou mecânicos, e esteja dentro da especificação geométrica e com a rugosidade especificada. Devido ao seu atrito com o rebolo promove o desgaste dos grãos abrasivos gerando a necessidade de afiação e perfilamento constante do rebolo.

Segundo Malkin (1989), o dressador tem a responsabilidade de definir a geometria do rebolo e também promover a correta afiação do mesmo, sendo que sua geometria deve propiciar uma superfície adequada ao rebolo conforme os parâmetros aplicados.

A atmosfera que envolve o processo apesar de comumente deixada de lado, também tem o seu papel no processo, pois facilita a oxidação de alguns materiais, e este óxido pode servir como lubrificante. Este fenômeno acontece principalmente em peças recém-fabricadas a altas temperaturas.

Segundo Damasceno (2010), os resíduos da retificação são formados pelo material da peça, pelas partículas dos grãos abrasivos, ligante do rebolo e óleo refrigerante. Este resíduo gerado no processo deve ser tratado adequadamente para evitar contaminações ao meio ambiente. A borra não necessariamente precisa ser totalmente descartada, pois pode ser reciclada, com a utilização do metal nela contida.

2.2 Rebolos

Os rebolos são ferramentas compostas por grãos abrasivos com as arestas cortantes, que são fixados de forma indefinida pelo elemento ligante, formando um corpo de revolução com geometria circular. Segundo Damasceno (2010), o ligante precisa possuir porosidade para a saída dos cavacos e retenção de fluido de corte, podendo ser vitrificada, resinóide ou metálica. A figura 2.1 mostra exemplos de rebolos aplicados em retificação cilíndrica externa.



Figura 2.5 - Rebolos para Retificação Cilíndrica Externa

Fonte: Alcar Abrasivos

Os rebolos possuem características que devem ser adequadas para que apresente o desempenho esperado durante sua aplicação e que representam sua especificação, formada pelos seguintes itens:

- Tipo de grãos
- Tamanho dos grãos
- Dureza
- Estrutura
- Tipo de Ligante

2.2.1 Grãos Abrasivos

O grão abrasivo, que efetivamente executa a remoção de material, é um material refratário, duro e frágil (SHAW, 1996). Este grão pode ser de diferentes materiais e deve ser escolhido de acordo com o tipo de aplicação, observando a afinidade com o material a ser retificado. Na determinação do tipo de abrasivo, é importante observar sua friabilidade, que é a capacidade do grão em se fraturar e liberar pequenos fragmentos quando sofre uma determinada pressão durante o corte, que depende da forma, pureza e crescimento do cristal durante sua formação.

Segundo Marinescu *et al.* (2006), os abrasivos podem ser classificados em naturais, aqueles encontrados na natureza e os sintéticos, produzidos por processos industriais.

Os principais tipos de abrasivos aplicados no processo de retificação são:

- Óxido de Alumínio (Al_2O_3) (grão sintético)
- Carbetto de Silício (SiC) (grão sintético)
- CBN – Nitreto cúbico de boro (grão sintético)
- Diamante Policristalino (grão sintético)
- Diamante Monocristalino (grão natural)

A Tabela 2.1 mostra as características dos principais grãos abrasivos, por meio da qual é possível realizar um comparativo entre os diferentes tipos, sendo o óxido de alumínio zirconado o de menor dureza e o diamante o mais duro.

Tabela 2.1 - Características Principais dos Grãos Abrasivos

	Clas.	Dureza HK [kg/mm ²]	Estrutura Cristalina	Densidade [g/mm ³]	Ponto de fusão [°C]
Óxido de Alumínio Branco	AA	2.120			
Óxido de Alumínio Rosa	DR	2.260	Hexagonal	3,98	1.900 – 2.040
Óxido de Alumínio Zirconado	ZN	1.960			
Óxido de Alumínio Cerâmico (Seeded Gel)	SG	2.295	Hexagonal	3,80	1.200
Óxido de Alumínio Cerâmico (Cubitron)	CB	2.076	Hexagonal	3,80	1.200
Carbetto de Silício Preto	C	2.680			
Carbetto de Silício Verde	GC	2.840	Hexagonal	3,22	2.400 – 2.830
Nitreto Cúbico de Boro	CBN	4.700	Cúbica	3,48	3.200
Diamante	D	8.000	Cúbica	3,52	3.700

Fonte: Adaptado de Malkin (1989)

O óxido de alumínio é obtido da bauxita, que possui de 85 a 90% de óxido de alumínio (Al_2O_3), de 2 a 5% de dióxido de titânio (TiO_2) e até 10% de óxido de ferro, sílica e óxidos básicos (MARINESCU *et al.*, 2006).

Após passar por um processo de trituração, a bauxita é fundida em fornos elétricos a arco, misturado ao coque, ferro, titânio (Ti) e óxido de magnésio (MgO_2). Esta fusão acontece a altas temperaturas, entre 1900°C a 2040°C, por cerca de 36 horas. Este tipo de grão tem como principal característica a dureza e a tenacidade, sendo aplicada na retificação de

materiais com alta resistência à tração, como aço carbono, aço rápido e outros aços-liga, como também em ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular.

A Figura 2.6, mostra três tipos de óxido de alumínio aplicados na fabricação de rebolos.



Figura 2.6 - Al₂O₃ Cinza , Al₂O₃ Branco e Al₂O₃ Cerâmico, respectivamente
Fonte: Samulewski - 2006

Os principais tipos óxidos de alumínio aplicados na retificação estão descritos a seguir:

Óxido de Alumínio Cinza ou Marrom: designado pela letra A, apresenta de 96% a 97% de Al₂O₃ cristalizado; sua dureza é de 2000 HK e sua coloração é marrom. Devido ao seu formato penetra rapidamente, porém, se desgasta em excesso e, por este motivo, é aplicado a operações de desbaste e fabricação de lixas.

Óxido de Alumínio Branco: designado pelas letras AA, é uma forma mais pura do óxido de alumínio comum, com cerca de 99,5% de Al₂O₃. É altamente friável, e possui pouca resistência ao atrito e ao impacto, devido a sua forma pontiaguda. Segundo Alves (2005), são aplicados em aços temperados e cementados. Este tipo de grão também é aplicado em aço ligado e não ligado, aço nitretado, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido recozido, aço ferramenta e cromo eletrodepositado.

Óxido de Alumínio Rosa e Rubi: especificado pelas letras DR, possui até 95% de óxido de alumínio e mais que 2% de dióxido de titânio (TiO₂). Apresenta a coloração rosa, devido à adição de óxido de cromo (Cr₂O₃) em porcentagens de até 0,50% e a cor rubi se a porcentagem de Cr₂O₃ estiver entre 1% e 5%. Ambos possuem dureza superior ao do óxido de alumínio branco, mas com maior friabilidade, sendo o óxido de alumínio rubi ainda mais friável que o óxido de alumínio rosa. Segundo Alves (2005), é aplicado na remoção de grande quantidade de material em aços sensíveis ao calor. Sua aplicação também se estende ao aço ligado, aço temperado, aço ferramenta e aço rápido (HSS).

Óxido de Alumínio Zirconado: codificado pelas letras ZN, possui de 60% a 75% de óxido de alumínio (Al_2O_3), com teor de zircônio (ZrO_2) que é obtido pela fusão de areia zirconada, entre 10% e 40%, podendo ainda conter dióxido de titânio (TiO_2) em sua composição. Este tipo de grão possui arestas super afiadas, que se renovam durante a aplicação, sendo utilizados em operações de desbaste com alta taxa de remoção de material, e amplamente aplicado em fundição, aciaria e particularmente em aço inoxidável. As composições de óxido de alumínio zirconado utilizado na fabricação de rebolos são:

- a) 75% Al_2O_3 , 25% ZrO_2
- b) 60% Al_2O_3 , 40% ZrO_2
- c) 65% Al_2O_3 , 30% ZrO_2 , 5% TiO_2

Óxido de Alumínio Cerâmico Seeded Gel[®]: codificado pelas letras SG, este tipo de grão foi patenteado pela empresa Norton Abrasivos, atualmente pertencente ao grupo Saint Gobain. Segundo Marinescu *et al.* (2006), é produzido por um processo químico e cerâmico pelo qual o óxido de magnésio (MgO) é precipitado para sementes de cristais com 50 μm em forma de espinélios de alumínio magnésio, resultando num gel, que é secado, granulado e sinterização a 1200°C. Os grãos produzidos são compostos de 94,5% de óxido de alumínio (Al_2O_3), como resultado um grão muito duro mais autoafiável com microfraturas. Este abrasivo é tão duro que é aplicado como mistura em óxido de alumínio branco para evitar excessiva força de retificação. As misturas típicas para rebolos possuem 50%, 30% ou 10% de Seeded Gel (CG). Esta mistura pode aumentar a vida do rebolo em até 10 vezes, em comparação com outro de óxido de alumínio comum, embora os custos também sejam maiores.

São utilizados na retificação de precisão, onde o mais importante é a integridade metalúrgica da peça-obra.

Óxido de Alumínio Cerâmico Cubitron[®]: codificado pelas letras CB, este grão foi desenvolvido pela 3M, produzido pelo processo Sol Gel. Este abrasivo, também produzido por um processo químico e cerâmico, mas ao contrário do Seeded Gel, é formado por uma estrutura multifases, que não utiliza grãos como sementes para controlar o tamanho do cristalino. O valor do material para aplicação em rebolos foi reconhecido após a introdução de SG. Na produção do Cubitron, a alumina é co-precipitada com vários modificadores, como óxido de magnésio (MgO), ítrio, lantânio e neomídia, para controlar sua microestrutura, mediante sinterização subsequente.

Segundo Marinescu *et al.* (2006), a comparação entre o Seeded Gel e o Cubitron é difícil, visto que estes tipos de grãos não são aplicados nos rebolos de forma pura, mas

misturados com óxido de alumínio branco. O Seeded Gel é mais duro (21GPa), do que o Cubitron (19GPa), porém o Cubitron corta de forma mais livre, fazendo com que seja preferido em algumas aplicações.

O Carbeto de Silício (SiC) é obtido por meio da mistura de cerca de 40% de coque de petróleo 60% de areia de sílica. De acordo com Marinescu *et al.* (2006), estes materiais são fundidos em fornos elétricos de resistência, à cerca de 2400°C, com ciclos de até 36 horas. É um grão bastante friável e sua cor varia em função das impurezas, desde o verde até o preto, exemplificado na Figura 2.7. Sua dureza está entre 2500 e 2800 HK.

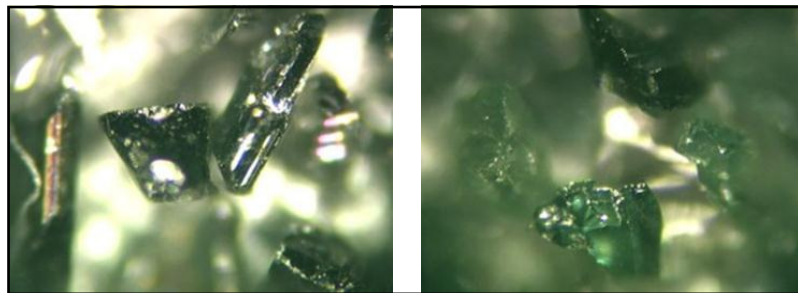


Figura 2.7 - SiC Preto e SiC Verde, respectivamente
Fonte: artigos Técnicos Norton

Carbeto de Silício Preto: designado pela letra C, sua coloração preta se deve ao maior teor de carbono livre. Sua pureza é de 97%, com tenacidade maior que a do carbeto de silício verde. Este tipo de grão é aplicado na retificação de materiais como o ferro fundido, materiais não ferrosos e não metálicos como bronze, cobre, alumínio, aço resistente aos ácidos (alto teor de cromo) e aço nitretado.

Carbeto de Silício Verde: designado pelas letras GC, esta é a forma mais pura do carbeto, com 99% de pureza. Este tipo de grão é mais friável que o carbeto de silício preto devido a sua forma cristalina mais pura, porém, reage quimicamente com materiais que tem afinidade com o carbono, acima de 750°C, como ferro e níquel, limitando sua aplicação. É amplamente aplicado na retificação de carbeto de tungstênio (metal duro), materiais não metálicos que são duros e quebradiços, vidro e cerâmica.

Nitreto Cúbico de Boro (CBN): comumente conhecido como CBN, é obtido do nitreto de boro e nitrogênio, sob temperaturas de 1.537°C a 2.037°C e altas pressões, na ordem de 3,45 a 6,2 MPa (MARINESCU *et al.*, 2004). O CBN é classificado como superabrasivo, devido a sua alta dureza, de 4.700 HK. É o segundo material mais duro que se conhece, abaixo apenas do diamante, e é cerca de duas vezes mais duro que o óxido de alumínio. Apesar de menos duro que o diamante, é mais estável termicamente, pois não apresenta modificação aparente até a temperatura de 1.400°C, enquanto o diamante suporta até 650°C,

quando começa a se grafítizar. É aplicado na retificação de aços endurecidos, entre 55 e 70 HRC, aços ligados e materiais ferrosos, visto que é altamente resistente ao calor e quimicamente menos reativo que o diamante (ALVES, 2005). A Figura 2.8 exemplifica os grãos de CBN preto, CBN âmbar e CBN marrom escuro.



Figura 2.8 - CBN Preto, CBN Âmbar e CBN Marron Escuro
Fonte: Qingdao Hypon International Trade Co., Ltd.

Diamante: assim como o CBN, é classificado como superabrasivos. Este é o material de ferramenta mais duro que se tem conhecimento e está disponível na forma natural com 10.000 HK ou na forma sintética com 8.000 HK, o mais comumente empregado na fabricação de rebolos. Na forma sintética é criado pela conversão de grafite sob temperatura de 2.200°C e pressões acima de 10.35 GPa, podendo ser monocristalino ou policristalino, dependendo do processo de fabricação ao qual é submetido (MARINESCU *et al.*, 2006). É aplicado em materiais não metálicos, mas quando aplicado em materiais ferrosos tem seu desempenho reduzido devido à afinidade química com o carbetto de ferro, pois na temperatura do processo de retificação há uma erosão química, quando suas arestas se arredondam, aumentando a fricção, prejudicando o mecanismo de corte (KING e HAHN, 1986).

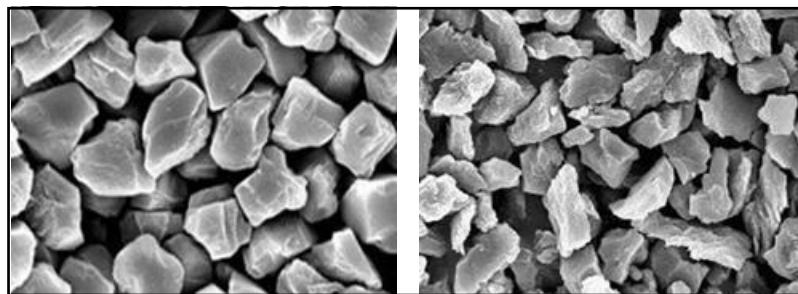


Figura 2.9 - Diamante Monocristalino e Policristalino respectivamente
Fonte: oftechabrasives

2.2.2 Tamanhos dos Grãos Abrasivos

O tamanho do grão abrasivo convencional é definido por diferentes órgãos internacionais como FEPA, ANSI, ISO, JIS, por exemplo. Os macrogrãos são separados por

peneiramento e classificados por meio do número “mesh”, que determina o número de fios por polegada linear da malha da peneira utilizada na classificação dos grãos. Neste método, quanto maior o número da malha, menor o tamanho do grão. Os microgrãos são separados por sedimentação. A Tabela 2.2 mostra as granulometrias e os tamanhos dos grãos para óxido de alumínio e carbetto de silício, de acordo com a FEPA, um dos órgãos padronizadores comentados.

Segundo Malkin (1989), os grãos passam por uma sequência de cinco peneiras, na qual o número de fios da malha aumenta, fazendo com que a abertura seja menor a cada número, num fator de $1/\sqrt{2}$. Em cada peneira uma quantidade de grãos fica retida, indicando uma faixa de tamanho dos grãos.

De acordo com Marinescu *et al.* (2006), os padrões FEPA e ANSI são muito próximos, sendo que o primeiro é mais rigoroso nos limites de grãos maiores e menores, aceitando de 5% a 12%, sem um valor nominal para o tamanho do grão, enquanto o segundo tem um alvo para o tamanho médio do grão permitindo entre 8% e 15% de grãos maiores e menores.

Tabela 2.2 - Tamanho e granulometria dos grãos de óxido de alumínio e carbetto de silício

Designação do Grão Padrão FEPA 42-1:2006		Diâmetro Médio [μm]	Designação do Grão Padrão FEPA 42-2:2006		Diâmetro Médio [μm]				
Desbaste Pesado	Muito Grosso	F 4	4890	Semi Acabamento	Fino	F 100	129		
		F 5	4125			F 120	109		
		F 6	3460			F 150	82		
		F 7	2900			F 180	69		
		F 8	2460			F 220	58		
		F 10	2085			F 230	$53,0 \pm 3,0$		
		F 12	1765			F 240	$44,5 \pm 2,0$		
Desbaste Leve	Grosso	F 14	1470	Acabamento	Extra Fino	F 280	$36,5 \pm 1,5$		
		F 16	1230			F 320	$29,2 \pm 1,5$		
		F 20	1040			F 360	$22,8 \pm 1,5$		
		F 22	885			F 400	$17,3 \pm 1,0$		
		F 24	745			F 500	$12,80 \pm 1,0$		
	F 30	625	F 600			$9,3 \pm 1,0$			
	Médio	F 36	525			Polimento	Pulverulento	F 800	$6,5 \pm 1,0$
		F 40	438					F 1000	$4,5 \pm 0,8$
		F 54	310					F 1200	$3,0 \pm 0,5$
		F 60	260					F 1500	$2,0 \pm 0,4$
		F 70	218					F 2000	$1,2 \pm 0,3$
F 80		185							

Fonte: FEPA-Standard 42-1:2006 / FEPA-Standard 42-2:2006

Já para os grãos de diamante e CBN a designação FEPA especifica o diâmetro do grão, devendo ser incluída a letra D para diamante e B para CBN, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tamanho e granulometria dos grãos para Diamante e CBN

Designação do Grão Padrão FEPA 61/97 [μm]	Designação do Grão ANSI B74.16 1971	Designação do Grão Padrão FEPA 61/97 [μm]	Designação do Grão ANSI B74.16 1971
D/B 1181	16/18	D/B 126	120/140
D/B 1001	18/20	D/B 107	140/170
D/B 851	20/25	D/B 91	170/200
D/B 711	25/30	D/B 76	200/230
D/B 601	30/35	D/B 64	230/270
D/B 501	35/40	D/B 54	270/325
D/B 426	40/45	D/B 46	325/400
D/B 356	45/50	D/B 40	400/500
D/B 301	50/60	D/B 30	500/600
D/B 251	60/70	D/B 25	800
D/B 213	70/80	D/B 20	1000
D/B 181	80/100	D/B 15	1200
D/B 151	100/120	D/B 10	1600

Fonte: FEPA-Standard 61/97/ ANSI B74.16 - 1971

2.2.3 Dureza do Rebolo (Grau do Rebolo)

A dureza do rebolo, também chamada de grau do rebolo, se refere ao quão difícil é remover os grãos abrasivos da superfície do rebolo, ou seja, indica o grau de coesão entre o grão abrasivo e a ligante. De acordo com Malkin (1989), o grau do rebolo pode ser definido como a resistência à tração do aglomerante para que os grãos abrasivos sejam arrancados.

Para Diniz *et al.* (2008), quando a coesão é elevada e o ligante resiste aos esforços de corte da retificação, o rebolo é considerado duro, pois não ocorre a redução da ancoragem, que tende a retirar os grãos do rebolo, caso contrário, se os grão se desprenderem com estes esforços, o rebolo é considerado mole.

A alta resistência do ligante ao desgaste não permite que os grão sejam renovados e os mesmos se tornam desgastados, sem aresta de corte na superfície do rebolo, aumentando a geração de calor devido ao aumento do atrito entre rebolo e peça e também aumentando o esforço de corte. Caso a temperatura não seja controlada, ou seja, suficientemente dissipada pelo fluido de corte, podem ocorrer queimas na peça, com alteração das propriedades na

superfície do material, trincas devido ao esforço excessivo e também a alta temperatura, além de erro dimensional da peça.

Para rebolos moles a autoafiação do rebolo acontece devido ao desprendimento dos grãos da superfície, fazendo com que novos grãos passem a trabalhar, entretanto, isso pode gerar desgaste excessivo do perfil do rebolo, causando desvios dimensionais na peça.

Segundo Malkin (1989), a dureza do rebolo está diretamente relacionada à sua porosidade, pois rebolos com maior dureza possuem menos poros visto que há mais grãos abrasivos no ligante.

Rebolos moles são aplicados na retificação de materiais duros, como os aços temperados e aço rápido, enquanto que rebolos duros são aplicados a materiais macios como aço sem tratamento térmico e rebarbação, por exemplo.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), os rebolos são classificados por sua dureza como muito mole, mole, médio, duro e muito duro. Na codificação dos rebolos, a dureza é classificada por letras que vão de A a Z, conforme mostrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Classificação de Dureza dos Rebolos

Código da Dureza	Dureza
A – B – C – D	Rebolos extra moles
E – F – G	Rebolos muito moles
H – I – J – K	Rebolos moles
L – M – N – O	Rebolos de dureza média
P – Q – R	Rebolos duros
S – T – U – V	Rebolos muito duros
W – X – Y – Z	Rebolos extra duros

Fonte: ABNT NBR 15230:2008

2.2.4 Estrutura dos Rebolos

De acordo com Diniz *et al.* (2008), a estrutura dos rebolos se refere à concentração volumétrica de grão abrasivos no rebolo, sendo que quanto maior a concentração de grãos, mais fechada se torna sua estrutura, pois menor é o número de poros devido ao menor espaçamento entre os grãos.

A porosidade é adequada quando está aberta o suficiente para que o cavaco seja removido e o fluido de corte atinja a região do corte, porém, deve garantir o número mínimo de grãos para realizar a remoção de material da peça.

Numa estrutura fechada, há uma maior quantidade de grãos que ficam em contato com a peça durante o corte. Esta grande quantidade de grãos melhora o acabamento, pois cada grão remove menos material em cada revolução do rebolo, mas, pela pouca área de saída do cavaco, pode acontecer queima da peça ou empastamento do rebolo (MALKIN, 1989). A Figura 2.10 mostra, esquematicamente, a estrutura fechada e a estrutura aberta.

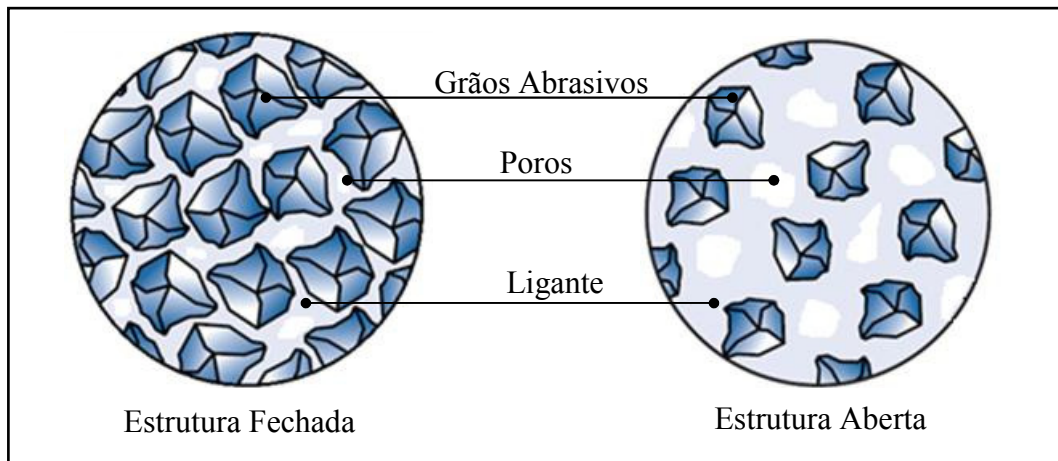


Figura 2.10 - Estrutura Fechada x Estrutura Aberta
Adaptado do Manual Rappold-Winterthur (2010)

Normalmente, uma estrutura aberta gera um acabamento grosseiro e obviamente uma estrutura mais fechada promove um melhor acabamento, que podem ser verificados através do aspecto visual e da rugosidade da superfície.

Para materiais dúcteis e de baixa dureza, aplicam-se estruturas abertas, enquanto que para materiais de elevada dureza, são aplicados rebolos mais duros.

Segundo Diniz *et al.*(2008), as estruturas são classificadas como fechada, média e aberta, tal como descrito na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Número x Tipo da Estrutura dos Rebolos

Número da Estrutura	Tipo da Estrutura	Porosidade
de 1 a 4	Fechada	Natural
de 5 a 7	média	Natural
de 8 a 12	aberta	Natural
de 13 de 20	muito aberta	Induzida

Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* (2008)

De acordo com Marinescu *et al.* (2006), a concentração de grãos abrasivos varia de 30% a 60% do volume do rebolo. A estrutura do rebolo é caracterizada por uma numeração que varia comumente entre 0 e 14 e cada número possui uma referência de volume de

abrasivo no rebolo, porém, cada fabricante pode usar concentrações ligeiramente diferentes por questões de competitividade. A Tabela 2.6 traz uma referência do número da estrutura do rebolo e o percentual de grãos abrasivos.

Tabela 2.6 - Estrutura dos Rebolos x Percentual Volumétrico de Grãos Abrasivos

		Estrutura dos Rebolos														
Número da Estrutura		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Percentual de Abrasivo		62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34

Fonte: Handbook of Machining with Grinding Wheels - MARINESCU *et al.* 2006

2.2.5 Ligante dos Rebolos

O ligante é responsável por manter os grãos abrasivos fixados ao rebolo para manter o poder de corte e deve ser adequada ao tipo de aplicação, porém, deve permitir que os grãos se desprendam a uma determinada pressão de corte para que novos grãos possam entrar em ação, além de resistir às altas rotações do rebolo e aos elementos químicos do fluido de corte. (DAMASCENO, 2010).

Segundo Jackson e Mills (2004), no momento da determinação do ligante a ser aplicada deve ser considerado o tamanho do rebolo, as condições de trabalho e a relação custo/benefício. O ligante irá restringir a velocidade de corte do rebolo, dependendo de sua resistência mecânica.

Conforme Malkin (1989) é necessário que o grão abrasivo e o aglomerante tenham coeficientes de dilatação térmica análogos, para que não haja tensões internas durante a aplicação em altas temperaturas. O ligante também deve ser poroso o suficiente para que haja espaço para saída dos cavacos. A Figura 2.11 representa os grãos, o ligante e os poros de um rebolo.

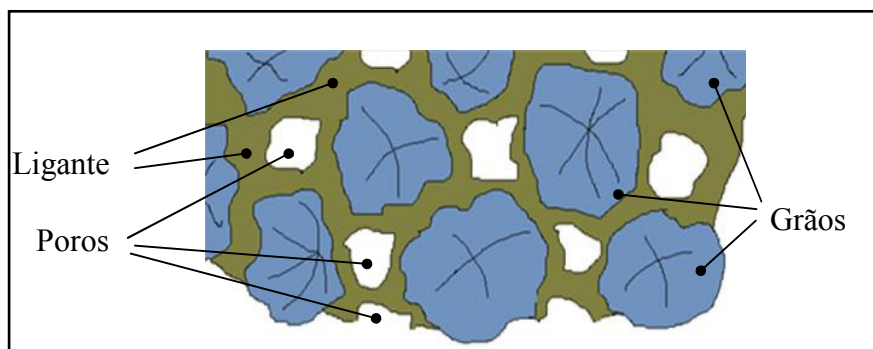


Figura 2.11 - Representação dos grãos, ligante e poros de um rebolo

Fonte: o autor

Os principais ligantes aplicados no ramo metal mecânico são o vitrificado, resinóide e metálico. Além destes três tipos, há ainda ligantes de borracha e elástico. Os ligantes vitrificados são aplicadas em cerca de 50% dos rebolos convencionais, principalmente nas retificações de precisão, devido a sua capacidade de absorver impactos a alta resistência mecânica (MALKIN, 1989).

Bianchi (2011) comenta em sua pesquisa um levantamento realizado pela *GE Company USA*, quanto à utilização dos principais tipos de ligantes em rebolos superabrasivos, mostrando queda na utilização de ligante resinóide de 76% para 31% e aumento na aplicação de ligante vitrificado de 4% para 32%, empatando a aplicação dos dois tipos.

Ligantes Vitrificados: sua identificação é feita pela letra V. São compostas de argila, quartzo e feldspato, que são submetidas a temperaturas de até 1250°C, após combinadas quimicamente, formando uma estrutura vitrificada muito rígida, porém, frágil a impactos. Este ligante permite trabalhos de precisão, visto que devido a sua rigidez mantém o perfil do rebolo, sendo mais dura do que os ligantes resinóides, porém, apresentam custo elevado (ALVES, 2005). Segundo Jun (2004), este tipo de ligante permanece estável em água, óleos e ácidos e pode ser aplicado velocidade de corte de até 60 m/s.

Ligantes Resinóides: sua identificação é feita pela letra B. São compostas de ligantes orgânicos, prensadas a quente e possuem elevada resiliência e resistência. Este tipo de ligante pode perder a capacidade de fixação dos grãos caso seja aplicada em temperaturas acima de 250°C. Segundo Diniz *et al.* (2008), este é o segundo tipo de ligante mais aplicado, podendo ser empregada para retificação com velocidade de até 100 m/s.

Ligantes Metálicos: este tipo de ligante pode ser de níquel, cobalto, tungstênio, bronze e também de outros metais, podendo ser introduzido nos rebolos pelo processo de sinterização de pó de bronze e outros metais nobres ou eletrodeposição, como o níquel. Este é o tipo de ligante de maior resistência a altas velocidades de corte, acima de 100 m/s. No processo de eletrodeposição, a temperatura é relativamente baixa, situando-se abaixo de 100°C.

Segundo Marinescu *et al.* (2006), os rebolos revestidos por este processo usam corpo de aço revestido com uma camada simples de ligante e grãos de CBN ou diamante. Estes corpos de aço podem ser reutilizados de cinco a seis vezes, se não forem danificados. A espessura da camada de ligante que fixa os grãos precisa ter, no mínimo, 50% da altura do grão, para que seja fixado adequadamente. No processo de fixação dos grãos por sinterização, a temperatura é acima de 1.000°C, podendo reduzir a resistência dos grãos e deformar o corpo de aço.

2.2.6 Descrição dos Rebolos

Cada rebolo deve ter sua descrição gravada pelo fabricante em uma das suas faces para que o usuário possa reconhecer o mesmo e aplicá-lo adequadamente. Normalmente, os rebolos possuem a gravação de suas dimensões e características, como tipo de grão, granulometria, estrutura, dureza e tipo de ligante, conforme exemplificado na Figura 2.12.

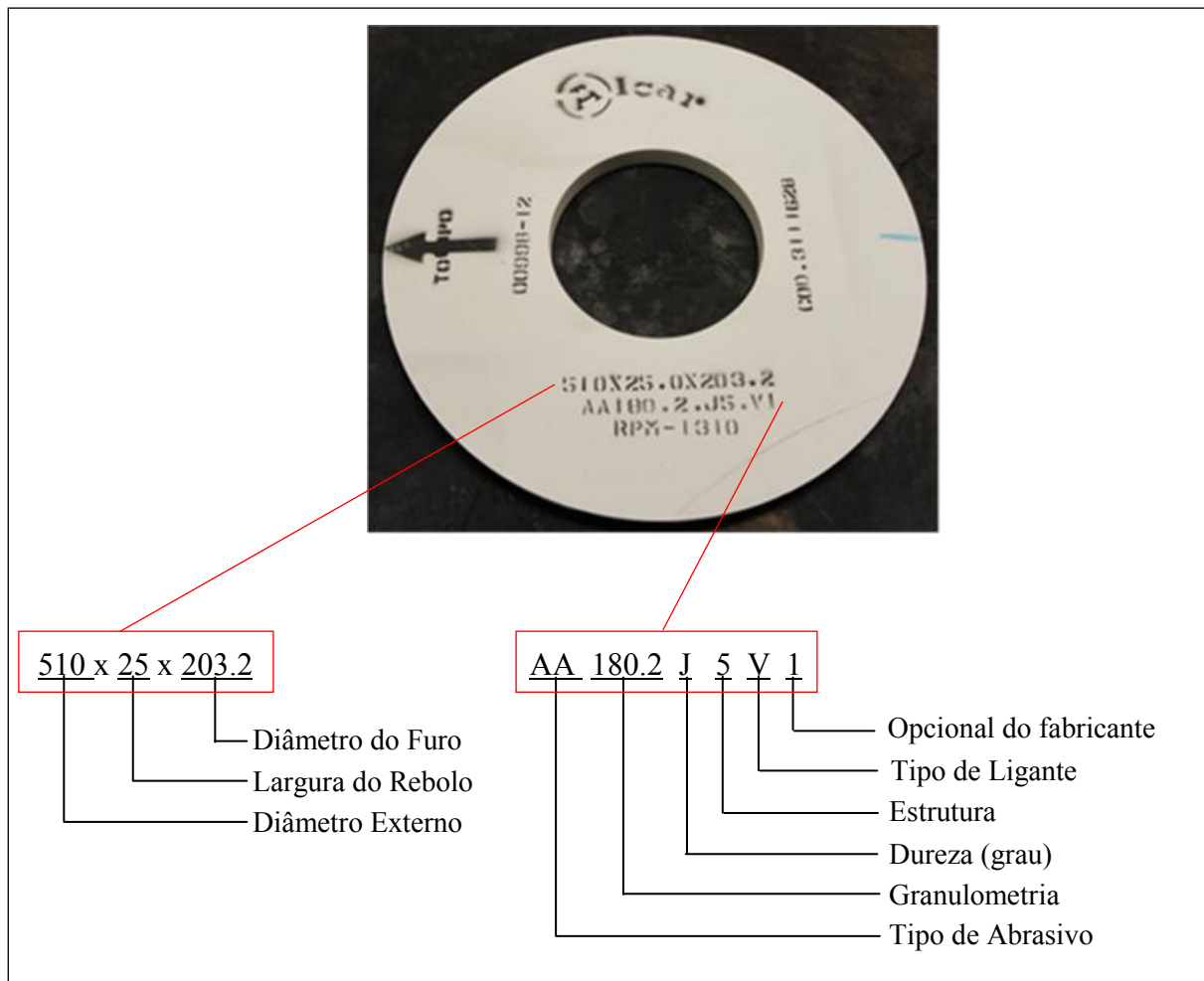


Figura 2.12 - Descrição do rebolo

2.3 Mecanismo de Formação do Cavaco

De acordo com Malkin (1989), o processo de remoção de material se dá pela interação do rebolo com a superfície da peça, de acordo com as condições físicas impostas, formando o cavaco por cisalhamento. Neste processo, há a distinção de diferentes mecanismos, separados em três regiões. A Figura 2.13 exemplifica o mecanismo de formação do cavaco (KÖNIG e KLOCKE, 1996).

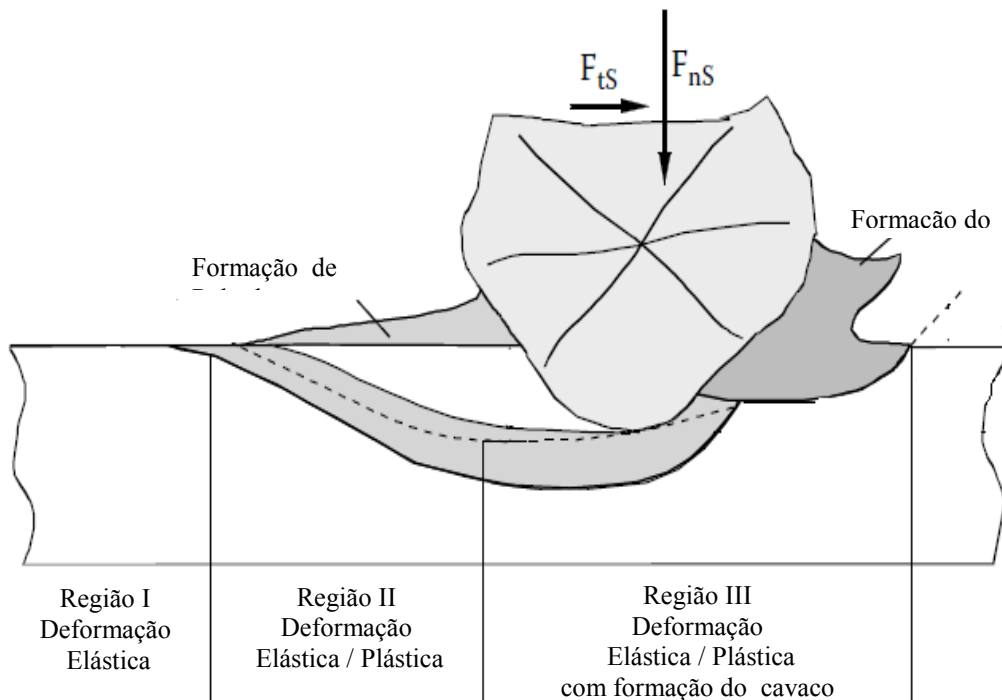


Figura 2.13 - Mecanismo de Formação do Cavaco
 Fonte: adaptado de König e Klocke (1996)

Segundo Malkin (1989), o detalhamento de cada região se dá da seguinte maneira:

Região I: nesta fase ocorre a deformação elástica do material da peça. O atrito, calor e deformações consomem a energia fornecida.

Região II: nesta etapa, além da deformação elástica do material, ocorre também a deformação plástica, com escoamento lateral de material, em forma de rebarba. O grão abrasivo continua a penetrar no material da peça, continuando o processo de deformação elástica.

Região III: etapa na qual há a formação do cavaco, com deformação plástica e cisalhamento do material, que consomem a energia fornecida, após o grão abrasivo ter atingido a máxima penetração (valor de penetração crítica) e pressão crítica.

Segundo Alves (2005), o material removido, que sai em forma de cavaco se aloja nos poros do rebolo até ser expulso pela força centrífuga devido à rotação do rebolo e pelo fluido refrigerante. Caso esta expulsão não aconteça, há o empastamento do rebolo.

De acordo com Vieira (1992) a extensão de cada região varia em função dos parâmetros de processo, como velocidade de corte e velocidade de avanço, além da agressividade do grão.

2.4 Mecanismos de Desgaste do Rebolo

Segundo Kane (2002), o desempenho da operação de retificação é altamente influenciado pela topografia do rebolo. Devido ao desgaste sofrido pelos grãos, o rebolo perde suas características, o que exige ciclos de dressagem para corrigir sua topografia.

De acordo com Malkin (1989), há três tipos principais de causas de desgaste dos rebolos: desgaste por atrito e/ou adesão, desgaste por fratura do grão e desgaste por fratura do ligante, que são exemplificados na Figura 2.14. O desgaste por fratura do grão é subdividido em macrofratura, que ocorre nos grãos convencionais, como o óxido de alumínio convencional, e a microfratura, que ocorre nos grãos cerâmicos, como o Seeded Gel[®] e o Cubitron[®], por exemplo.

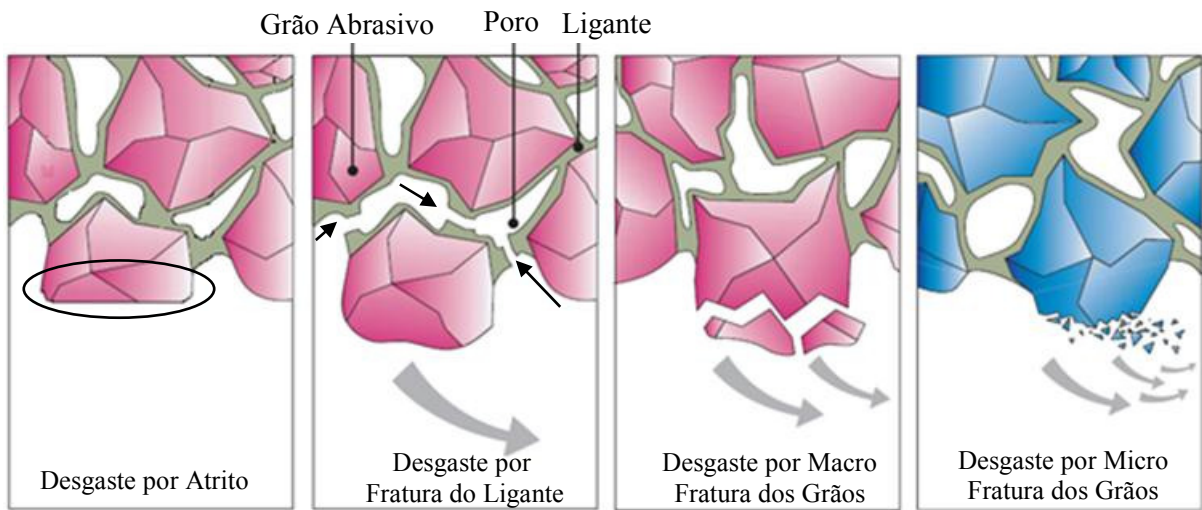


Figura 2.14 - Tipos de Desgaste do Rebolo
Fonte: adaptado do Manual Rappold-Winterthur (2010)

O desgaste por atrito, causado por ações mecânicas e químicas, acarreta a perda do poder de corte do grão abrasivo, devido ao arredondamento de suas arestas e o aumento da área de contato do grão, aumentando o esforço de corte. Em termos dimensionais, este tipo de desgaste é insignificante, mas afeta, consideravelmente, o comportamento do rebolo durante o trabalho, principalmente aumentando a possibilidade de queima da superfície da peça. (MALKIN, 1989).

O desgaste por fratura dos grãos, como o nome diz, acontece devido às quebras dos grãos, que liberam micro partículas, renovando suas arestas e mantendo o poder de corte do rebolo. Estas fraturas acontecem quando o esforço de corte é suficientemente alto sobre os grãos e depende da friabilidade do grão e da dureza do rebolo.

Segundo Diniz *et al.* (2008), neste tipo de desgaste, há perda significativa de material do rebolo, podendo comprometer a geometria da peça.

O desgaste por fratura do ligante acontece quando o grão abrasivo se desprende do rebolo, dado um determinado esforço de corte, sendo mais intenso em rebolo classificados como moles, que não suportam este esforço. Os grãos desgastados ao se desprenderem liberam a superfície do rebolo para que novos grãos passem a executar a remoção de material da peça. Segundo Kane (2002), a autoafiação gera aumento da rugosidade, devido à agressividade dos novos grãos.

Segundo Bianchi (2011), o ligante se desgasta e rompe devido ao atrito com a peça e com os cavacos, a fatores térmicos e também por agentes químicos do fluido de corte, além de combinação entre estes fatores.

2.5 Dressagem

A dressagem é uma etapa fundamental no processo de retificação, visto que é responsável pela definição da topografia do rebolo, que influencia diretamente o acabamento final da peça, o tempo de ciclo, a formação do cavaco durante a retificação e também a vida útil do rebolo, dado que quanto maior a frequência e a profundidade de dressagem menor é o aproveitamento desta ferramenta abrasiva. Logo, para se obter um bom desempenho na retificação, é necessário entender os mecanismos envolvidos neste processo.

Segundo Malkin (1989), a topografia do rebolo afeta diretamente os esforços de corte, o consumo de potência da máquina e a temperatura de corte da operação.

Após um ou mais ciclos de retificação, o rebolo pode estar impregnado de material da peça, os grãos podem ter perdido seu poder de corte, por estarem arredondados e isto faz com que o rebolo perca ou reduza sua capacidade de remover material, necessitando de dressagem.

De acordo com Marinescu *et al.* (2006), com exceção de rebolos com camada abrasiva eletrodepositada, os demais tipos necessitam de dressagem, apesar de que mesmo os rebolos eletrodepositados podem necessitar de uma dressagem inicial, com pedra abrasiva, para remoção do excesso do ligante metálico. Ainda segundo o autor, há vários métodos de dressagem, o que causa confusão e divergência entre autores, pois a dressagem exerce diferentes papéis como o perfilamento e a dressagem propriamente dita.

Perfilamento é a dressagem realizada para se corrigir o batimento do rebolo, principalmente após a sua montagem na máquina, fazendo com que gire centrado, radialmente e/ou axialmente, além de definir o perfil do rebolo, seja ele plano ou com um formato

específico. A eliminação de erros da topografia do rebolo é realizada para evitar vibrações e erros geométricos na peça.

Segundo Malkin (1989) a dressagem é realizada para reafiar o rebolo e obter diferentes comportamentos durante a retificação, sendo que, para rebolos convencionais, é realizada ao mesmo tempo em que o perfilamento. Entretanto, para rebolo com materiais superabrasivos, a dressagem e perfilamento são realizadas em momentos distintos.

Para execução da dressagem podem ser aplicados diferentes tipos de dressadores que são diferenciados pelo princípio cinemático de ação, divididos em dressadores estáticos e dressadores rotativos (PAULA, 2007). A dressagem convencional é realizada com dressadores ponta única, fliesen, perfil lapidado, multipontas, rolos dressadores e discos rotativos. Alguns destes dressadores são mostrados na Figura 2.15.



Figura 2.15 - Diferentes tipos de Dressadores
Fonte: Stroh do Brasil (2012)

No caso de dressadores estáticos, como os dressadores ponta única, conglomerados e bastões abrasivos, a ferramenta é fixada em algum tipo de suporte, e para a execução da dressagem, o rebolo, mesa ou cabeçote se desloca numa determinada profundidade e velocidade de avanço, que, combinada com o movimento de rotação do rebolo, remove material da superfície deste último. Para os dressadores rotativos há os mesmos mecanismos presentes na utilização dos dressadores estáticos, mas com a inclusão do movimento de

rotação do dressador, podendo avançar longitudinalmente no caso de discos dressadores, ou radialmente, no caso de rolos dressadores.

2.5.1 Dressagem com Diamantes Naturais

Na dressagem convencional, obviamente, para que o dressador remova material do rebolo é necessário que seja de material mais duro que o empregado no rebolo, fazendo com que o diamante seja o material mais utilizado.

O diamante é criado pela aplicação de temperaturas e pressões extremamente altas ao carbono, que naturalmente ocorre a profundidades de cerca de 200 km da crosta da Terra.

Os principais planos cristalinos do diamante são o cúbico, octaedro e dodecaedro. A taxa de crescimento dos planos depende da temperatura e pressão, aliado ao ambiente químico durante este crescimento, que também governam a forma e a morfologia. A Figura 2.16 mostra exemplos de pedras de diamantes com os planos cristalinos citados.



Figura 2.16 - Pedras de diamante - cúbico, octaedro e dodecaedro, respectivamente.
Fonte: Procedimentos internos da MAHLE Metal Leve S.A

Apesar do crescimento da demanda por diamantes sintéticos, a demanda por diamantes naturais não reduziu, sendo que o custo tem crescido, principalmente para pedras de alta qualidade. Devido ao custo elevado do diamante, logicamente as pedras usados na indústria são aquelas rejeitadas para a fabricação de joias, devido à coloração, forma, tamanho, defeitos no cristal e níveis de incrustações.

De acordo com Marinescu *et al.* (2006), a rede cristalina do diamante é surpreendentemente pura e os únicos elementos químicos conhecidos que se incorporam são o nitrogênio e o boro. No vácuo ou na presença de gás inerte, o diamante permanece estável até a temperatura de 1500°C e apenas se converte em grafite com um catalizador e energia suficiente, porém, com a presença de oxigênio, começa a se degradar a cerca de 650°C e este fator tem papel importante em como os rebolos e ferramentas são fabricados. Os diamantes são excelentes condutores térmicos e, para que os mesmos não sejam danificados pelo superaquecimento, fazendo com que se transformem em grafite, é necessário que sejam

aplicados com a sua massa em quilates, adequados ao tamanho do rebolo, para que tenham o tamanho suficiente para dissipar o calor gerado na dressagem. A Tabela 2.7 determina o tamanho mínimo da pedra de diamante em função do diâmetro do rebolo.

Tabela 2.7 - Massa do diamante em função do diâmetro do rebolo

Diâmetro do Rebolo [polegadas]	Diâmetro do Rebolo [mm]	Peso do Diamante [quilates]
$\leq 7''$	$\leq 177,80$	0,25
$8'' \sim 10''$	$203,2 \sim 254$	0,33
$11'' \sim 14''$	$279,40 \sim 355,60$	0,50
$15'' \sim 20''$	$381 \sim 508$	0,75
$\geq 21''$	$\geq 533,40$	1,00

2.5.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação

Segundo Oliveira e Bianchi (1992), na operação de dressagem com dressadores estáticos há dois efeitos resultantes: o macroefeito e o microefeito.

O macroefeito está relacionado com o formato da ponta do dressador, com a profundidade e com o passo de dressagem, que determinam a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estarão localizadas na superfície do rebolo (ALVES, 2005). O macroefeito forma uma ondulação parecendo com o perfil de uma rosca, ilustrado na Figura 2.17.

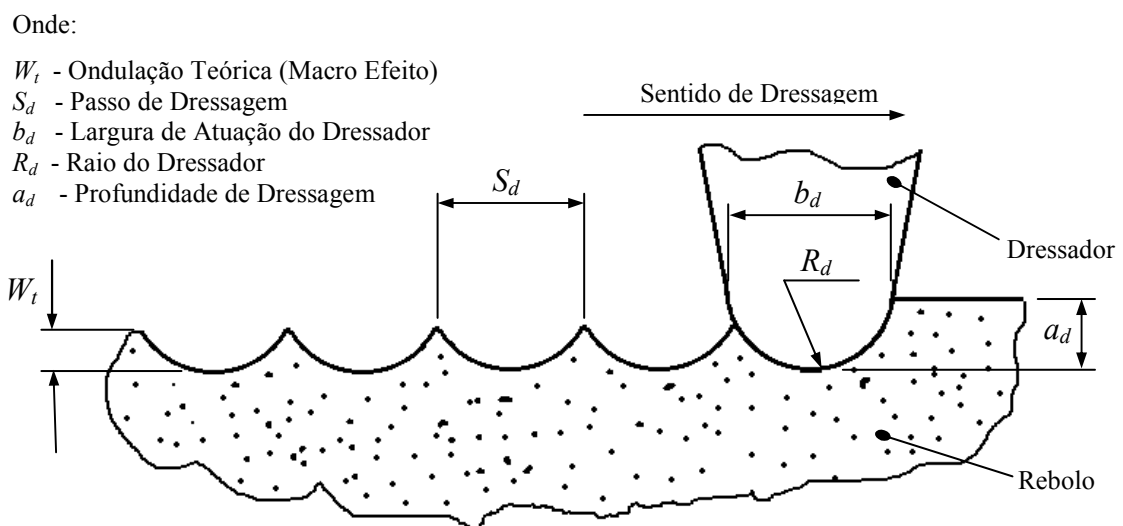


Figura 2.17 - Macro Efeito da Dressagem
Fonte: adaptado de Oliveira & Bianchi (1992)

De acordo com Bianchi *et al.* (2011), o microefeito está relacionado à remoção dos grãos desgastados, com baixa ancoragem pelo ligante e, também, pela fratura dos grãos que não se desgastaram completamente, gerando novas arestas de corte, que dependem da

friabilidade do grão e dos parâmetros de dressagem aplicados, ou seja, o microefeito está ligado ao tipo de aresta que é formada nos grãos, deixando o rebolo mais ou menos agressivo.

Quando a dressagem é realizada com baixa velocidade de avanço do dressador, ou seja, uma dressagem fina, as dimensões S_d e W_t , representados na Figura 2.17, também são pequenas. Esta baixa velocidade de avanço deixando o rebolo menos agressivo, devido à superfície mais plana do rebolo e dos grãos, praticamente sem o macroefeito e com predominância do microefeito. Há também a fratura dos grãos em partículas menores, promovendo desta forma uma menor rugosidade na peça. Do mesmo modo, quando a dressagem é realizada com maiores velocidades de avanço, as dimensões S_d e W_t resultam em uma superfície mais rugosa, devido a maiores fraturas dos grãos e maiores microefeito e macroefeito, justificando o maior poder de remoção do rebolo com o aumento do passo S_d e da profundidade W_t (BIANCHI *et al.*, 2011).

Na dressagem com dressadores rotativos, a velocidade entre rebolo e dressador possui uma relação, definida como q_d , conforme descrita na equação (1), sendo o quociente entre as velocidades periféricas do rebolo e do dressador. Esta relação será positiva quando o sentido de giro entre ambas as ferramentas, no ponto de tangencia, for concordante, ou seja, quando o rebolo e dressador tiverem sentido contrário de giro. Analogamente a relação será negativa quando o sentido de giro, no ponto de tangencia, for discordante, ou seja, com o mesmo sentido de giro.

$$q_d = \frac{V_r}{V_s} \quad (1)$$

Onde:

V_r – Velocidade Periférica do Dressador

V_s – Velocidade Periférica do Rebolo

Quando o sentido de giro é entre rebolo e rolo é concordante, há uma alta carga compressiva sobre os grãos do rebolo, levando à fratura dos mesmos, gerando gumes mais vivos nestes grãos, acarretando numa superfície bastante rugosa do rebolo, com maior agressividade. Ao contrário, quando o sentido é discordante, o número de grãos cisalhados é muito maior que a quantidade de grãos fraturados, deixando a superfície do rebolo menos agressiva, ou seja, com menor rugosidade.

Observando a Figura 2.18, nota-se que os picos de rugosidade (rebolo mais agressivo) foram obtidos com relação de velocidades (q_d) igual à +1,0 (sentido concordante das rotações) e a zero (rolo sem movimento). Ambas as condições de pico não são recomendadas, visto que

a condição +1,0 leva ao arranchamento de diamantes do rolo, devido à alta carga sobre eles, e porque a condição zero poderia desgastar o rolo, deixando a uma parte plana no mesmo, visto que estaria parado. Porém, a maioria das condições positivas gera um rebolo mais agressivo do que as condições negativas, pois nestas condições a curva decresce continuamente (o rebolo tende a se tornar sem corte). Adicionalmente, a velocidade radial do rolo por rotação do rebolo pode aumentar ou reduzir a rugosidade do rebolo, como mostrado pelas quatro linhas da Figura 2.18. Portanto, melhores acabamentos podem ser obtidos pela aplicação de uma baixa velocidade de penetração por rotação e relação de velocidades (q_d) negativas (DAVIS e ASM, 1995).

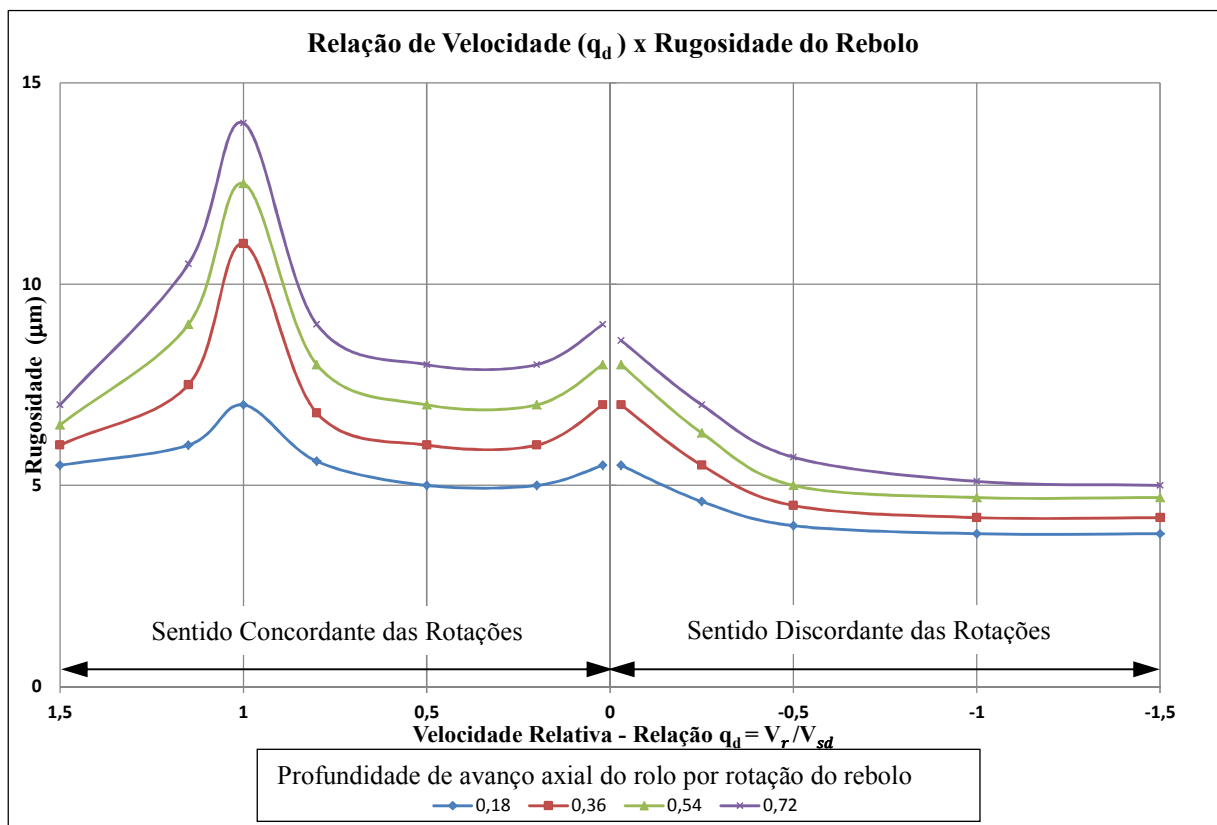


Figura 2.18 - Relação de Velocidade (q_r) x Rugosidade do Rebolo
 Fonte: adaptado de Davis e ASM (1995) - ASM Metals Handbook - Vol. 16

2.5.3 Grau de recobrimento da dressagem

Segundo Aguiar *et al.* (2007), o grau de recobrimento da dressagem no rebolo influencia diretamente a afiação do rebolo, que interfere na taxa de remoção do material, que por sua vez afeta a rugosidade da peça produzida.

De acordo com Hassui e Diniz (2003), o grau de recobrimento (U_d) é definido como sendo a relação entre a largura de atuação da ponta do dressador (b_d) e o avanço do mesmo em cada revolução do rebolo e utilizam para cálculo do grau de recobrimento a equação (2).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} = \frac{b_d \cdot n_s}{V_{fd}} \quad (2)$$

Onde:

U_d - Grau de Recobrimento da Dressagem

b_d - Largura de Atuação do Dressador - mm

S_d - Passo de Dressagem - mm

n_s - Rotação do Rebolo - rpm

V_{fd} - Velocidade de Dressagem - mm/min

Em termos práticos, deseja-se calcular a velocidade de avanço do dressador (V_{fd}) em função de um determinado grau de recobrimento (U_d), para se obter o acabamento desejado, tendo a largura efetiva do dressador (b_d) e rotação do rebolo (n_s), logo, obtém-se:

$$V_{fd} = \frac{b_d \cdot n_s}{U_d} \quad (3)$$

Segundo Marinescu *et al.* (2006), de acordo com o grau de acabamento desejado deve-se aplicar valores de grau de recobrimento diferentes, de acordo com a Tabela 2.8 para qualquer dressagem transversal. O autor cita uma forma alternativa para determinar o contato efetivo do macro efeito (S_d), baseado na severidade da retificação, utilizando a metade do tamanho do grão do rebolo como referência. Ainda segundo o autor, muitos problemas são causados devido a uma velocidade de dressagem muito baixa, gerando um grau de recobrimento muito elevado, resultando num rápido desgaste do diamante e danos aos grãos abrasivos do rebolo.

Tabela 2.8 - Grau do Recobrimento em função do acabamento

Acabamento	Grau de Recobrimento
Grosseiro	$2 \leq U_d \leq 3$
Médio	$3 < U_d \leq 4$
Fino	$4 < U_d \leq 6$
Extra Fino	$6 < U_d \leq 8$

Segundo Oliveira (1989), a ondulação teórica (macroefeito) pode ser obtida pela equação (4).

$$W_t = \frac{a_d}{U_d^2} \quad \text{somente para } U_d > 1 \quad (4)$$

Onde:

W_t - Ondulação Teórica (Macroefeito)

a_d - Profundidade de Dressagem

U_d - Grau de Recobrimento da Dressagem

Segundo Marinescu *et al.* (2006) a profundidade de dressagem deve ser mantida abaixo de 30 μm , para rebolos de óxido de alumínio convencional, pois acima destes valores a única alteração é aumentar o desgaste do dressador.

2.5.4 Desgaste do Dressador

De acordo com Marinescu *et al.* (2006) o desgaste dos dressadores de ponta única é rápido, se comparado com os dressadores multipontas. Os dressadores de ponta única são considerados desgastados quando o comprimento da área plana atinge 0,60 mm. O autor comenta que uma vantagem em fixar o dressador inclinado em relação ao eixo do rebolo é permitir que o dressador possa ser girado para manter a ponta afiada. Com o desgaste do dressadores, esforços durante a retificação podem ser afetados, causando severas fraturas dos grãos, por exemplo, com conseqüente aumento da rugosidade e aumentando a variabilidade do processo, o que é exatamente oposto aos requerimentos de tolerâncias apertadas. Ainda podem ocorrer vibrações do dressador, afetando a topografia do rebolo. A Figura 2.19 mostra um dressador ponta única perfilado sem desgaste e outro desgastado.

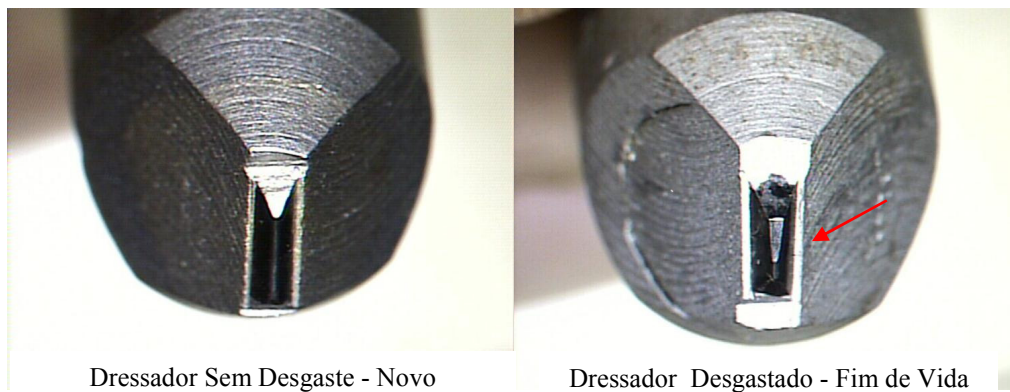


Figura 2.19 - Dressador novo x dressador desgastado (ampliação 6x)

De acordo com Linke e Klocke (2010), com o aumento do grau de recobrimento da dressagem há uma redução na temperatura no ponto de dressagem de forma que para $U_d = 6$ a

temperatura de dressagem foi de 650°C e para $U_d = 15$ a temperatura foi de 520°C. A redução de temperatura foi atribuída à redução da frequência do atrito dos grãos do rebolo com o dressador por unidade de tempo.

Segundo Zhang e Shin (2003), o desgaste do diamante se dá por dois diferentes mecanismos, sendo o desgaste progressivo devido ao atrito e ação química (grafitização) e o desgaste por micro fraturas atribuído à fadiga térmica e micro fragmentação. Os autores mostram que com o aumento da velocidade de dressagem o desgaste do dressador é maior.

2.6 Principais Parâmetros do Processo de Retificação

Às vezes, basta que um único parâmetro apresente um desvio para que um processo seja inteiramente comprometido. As diferenças de qualidade de fabricação de um mesmo tipo de rebolo, a dependência da habilidade e sensibilidade do operador e o desconhecimento das condições ideais de utilização do rebolo agravam este problema (KANE, 2002).

Segundo King e Hahn (1986), durante o planejamento da operação de retificação é necessário definir as entradas e saídas do processo e entender as relações entre elas. Logo, é importante definir as variáveis de entrada da máquina retificadora que irão definir a interação entre rebolo e peça.

Segundo Catai *et al.* (2006), na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho os principais parâmetros são basicamente:

- Profundidade total de mergulho (a);
- Velocidade da ferramenta (V_s);
- Rotação da peça (V_w);
- Velocidade de avanço mergulho (V_a);
- Velocidade de saída do fluido (V_j).

Para Shaji e Radhakrishna (2003), o processo de retificação é complexo e com um amplo número de interações, sendo que a geometria da peça é influenciada por vários fatores:

- Características do rebolo: diâmetro, tipo e tamanho de grão, dureza, estrutura, tipo de ligante, método de dressagem e nível de balanceamento do rebolo;
- Características de trabalho: dureza da peça, microestrutura e composição química;
- Características da máquina: rigidez da mesa e cabeçote, capacidade de absorver vibrações e outras características dinâmicas;
- Condições operacionais: velocidade do rebolo, velocidade de avanço, profundidade de corte, fluido refrigerante, etc.

De acordo com Severiano (2002), o resultado esperado para uma determinada peça retificada não pode ser atingida com a especificação de um único parâmetro, mas pela combinação de vários parâmetros que atuam ao mesmo tempo. O processo deve ser avaliado de acordo com a qualidade da peça e os aspectos econômicos, como o custo de fabricação, que é diretamente influenciado pela velocidade de remoção de material.

Os componentes de entrada do processo de retificação incluem o tipo de rebolo, o tipo de dressador, a cinemática de dressagem, a cinemática de retificação e a peça. Este conjunto de dados irá impactar na topografia do rebolo, que, junto com a cinemática de retificação, determinam a geometria do cavaco, que, por sua vez, aliada à peça, impactam na carga aplicada sobre o grão abrasivo (DEDINE, 2000).

Estas entradas irão gerar as saídas deste processo, como as forças e temperaturas atuantes na retificação, vibração, desgaste do rebolo, potência utilizada, integridade do material da peça, como as características da microestrutura, além da rugosidade da superfície da peça e o erro dimensional da mesma.

Tanto o conjunto de entrada que geram os mecanismos de retificação, quanto o conjunto de saídas, estão ilustrados na Figura 2.20.

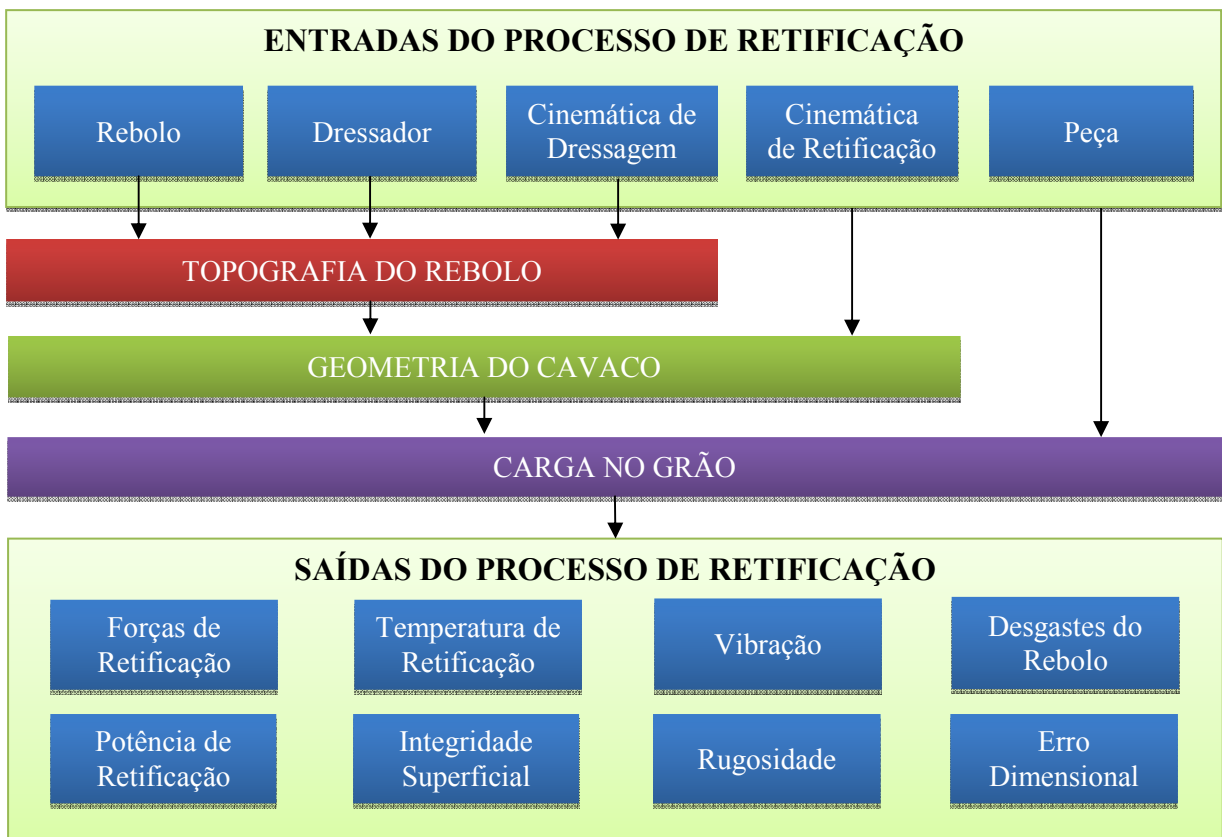


Figura 2.20 - Entradas e Saídas do Processo de Retificação
Fonte: adaptado de Chen e Rowe (1996)

2.6.1 Velocidade de Corte (V_c)

Na retificação cilíndrica, como o sentido de rotação da peça e do rebolo são os mesmos, no ponto de tangência entre ambos, a direção dos movimentos da peça e rebolo são opostos, logo, a velocidade de corte (V_c), conforme equação (7), é composta pela soma da velocidade periférica do rebolo (V_s), conforme equação (5), e da velocidade periférica da peça (V_w), conforme equação (6), que está exemplificada na Figura 2.21. A velocidade de corte normalmente é representada no sistema métrico em metros por segundo [m/s].

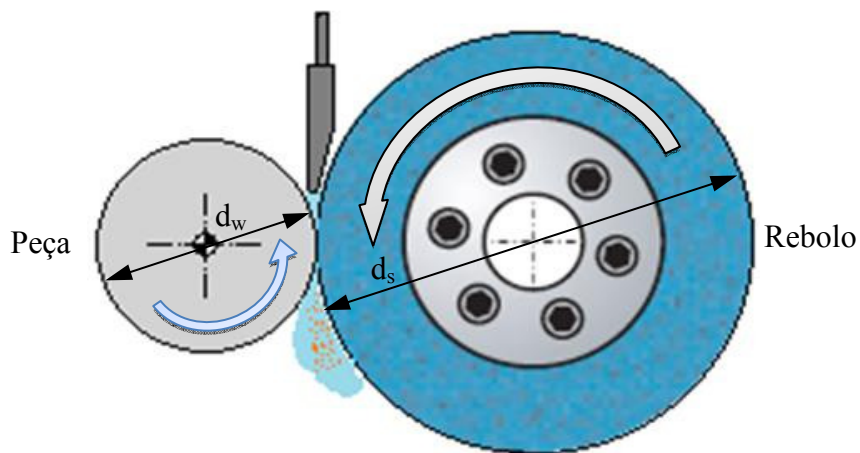


Figura 2.21 - Sentido de giro da peça e rebolo compondo a velocidade de corte
Fonte: o autor

$$\vec{V}_w [m/s] = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

$$\vec{V}_s [m/s] = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

$$\vec{V}_c [m/s] = \vec{V}_w + \vec{V}_s \quad (7)$$

A velocidade de corte (V_c) influencia o comportamento do rebolo, visto que com o seu aumento, os grãos passam mais vezes no ponto de corte, para uma mesma velocidade de avanço, diminuindo a carga sobre cada grão e reduzindo sua friabilidade. Com este comportamento o rebolo reage de forma mais duro, além de produzir cavacos menores. O contrário acontece com a redução da velocidade de corte, pois se têm menos arestas de corte ativas numa mesma unidade de tempo, aumentando-se a carga sobre os grãos, que conseqüentemente se fraturam, além da geração de cavacos maiores, que desgastam mais rapidamente o ligante. Com este comportamento o rebolo reage de forma mais mole.

2.6.2 Velocidade de Avanço Axial (V_a)

De acordo com Marinescu *et al.* (2006) a profundidade de corte é dada pela penetração do rebolo na peça em uma revolução. Assim como a velocidade de corte do rebolo, a velocidade de avanço axial (V_a) tem impacto sobre o comportamento do rebolo, mas, adicionalmente, tem impacto na produtividade, pois maiores V_a implicam em menores tempos de ciclo e vice versa, que culminam em maior ou menor custo do processo de fabricação.

A velocidade de avanço define a profundidade de penetração do grão abrasivo para uma dada velocidade de corte, sendo que quanto maior a velocidade, maior a taxa de remoção de material, com maiores cavacos e maiores cargas sobre os grãos, aumentando sua friabilidade. Menores velocidades reduzem a taxa de remoção, diminuindo o tamanho dos cavacos, bem como a carga sobre cada grão, diminuindo sua friabilidade.

2.6.3 Espessura de Corte Equivalente (h_{eq})

A espessura de corte equivalente (h_{eq}) é um parâmetro amplamente utilizado e refere-se à relação entre a taxa de remoção de material e a velocidade de corte, como uma medida de profundidade de penetração da ferramenta (MARINESCU *et al.*, 2006).

De acordo com Bianchi (1990), a h_{eq} representa a espessura física de material que é removida pelo rebolo numa volta completa, sendo um parâmetro teórico para quantificar a condição de trabalho por meio das variáveis V_s e V_w , sendo de grande valia no processo de retificação, que é representada pela equação (8).

$$h_{eq}[mm] = a \cdot \frac{V_w}{V_s} \quad (8)$$

Onde:

a - avanço por volta na retificação cilíndrica de mergulho – mm;

V_w - velocidade periférica da peça – m/s;

V_s - velocidade periférica do rebolo – m/s.

Segundo Malkin (1989), o comportamento do processo de retificação está diretamente relacionada à espessura de corte equivalente, em função das variáveis envolvidas, tais como força de corte da máquina, rugosidade da peça, topografia da ferramenta entre outras.

Com o aumento da velocidade de corte, há redução do h_{eq} , pois o ângulo de penetração diminui e o cavaco produzido tem uma espessura menor, reduzindo os esforços de corte propiciados nos grãos abrasivos, promovendo maior vida do rebolo. O aumento de h_{eq} , causa aumento do esforço de corte e da rugosidade da peça, além de reduzir a vida do rebolo.

3. PROJETO DE EXPERIMENTOS

Em muitas unidades de fabricação em massa, projetos experimentais sistemáticos baseados em técnicas estatísticas, tais como fatoriais completos, fatoriais fracionados e metodologia da superfície de resposta para processos de multietapas, podem se tornar inviáveis, se não impossíveis. Por outro lado, experimentos laboratoriais podem ser economicamente inviáveis e conduzir à parada de uma linha completa de manufatura. Além disso, a seleção de fatores e seus níveis, para o projeto de experimentos são geralmente baseados em conhecimento especializado ou percepção, e podem ser enviesados para determinados processos, ou não incluir o efeito real ambiente de fabricação (MUKHERJEE e RAY, 2008).

Segundo Montgomery (2001), pesquisadores executam experimentos em várias áreas de atuação procurando descobrir particularidades de um processo ou sistema. Estes experimentos são compostos por uma série de testes onde as variáveis são alteradas propositalmente no processo ou sistema, para observar o efeito na saída deste processo. Ainda segundo o autor, a experimentação tem papel importante nas áreas de engenharia, seja no projeto de um produto, desenvolvimento ou melhoria de processos de manufatura, porém em muitos casos o objetivo pode ser desenvolver um processo robusto, sendo afetados minimamente por agentes externos de variação, chamados de ruídos.

O pioneiro na aplicação de projeto de experimentos, aliado a métodos estatísticos, foi Ronald A. Fisher, cientista britânico, que em 1926 publicou uma pesquisa realizada na *Rothamsted Experimental Station*, instituto de pesquisas em agricultura, situada em Hertfordshire, Inglaterra (FISHER, 1926).

Segundo Severino (2011), atualmente, são vários os segmentos industriais onde o Delineamento de Experimentos (DOE) é aplicado para investigação sistemática das variáveis de um processo, havendo diversas estratégias de experimentação desenvolvidas ao longo do tempo, dos quais podemos citar o arranjo fatorial, arranjos ortogonais de Taguchi, metodologia da superfície de resposta e arranjo de misturas.

As técnicas aplicadas no DOE visam planejar experimentos por meio de dados apropriados para uma análise estatística que permita extrair conclusões válidas e objetivas. Nota-se então a diversidade do potencial de utilização desta ferramenta na otimização de processos produtivos em todas as áreas industriais (SEVERINO, 2011).

O DOE permite detectar interação das variáveis de entrada para analisar os efeitos sobre as variáveis de saída, indicando o rendimento e a significância dos testes do nível de

fator, além de fornecer um modelo matemático para a resposta. Paiva (2006), afirma que para garantir o sucesso do experimento é necessário realiza-los de acordo com o planejamento, detectando, documentando e analisando as anormalidades que ocorrerem na condução experimental. Após a realização dos experimentos, o passo seguinte é avaliar os efeitos dos fatores do modelo, utilizando métodos estatísticos adequados para que, ao final, os dados sejam interpretados e discutidos, definindo-se as ações de melhorias.

3.1 Aplicação de Projetos de Experimentos nos Processos de Retificação

Diversas técnicas de modelagem e otimização aplicadas em retificação, para problemas de otimização de parâmetros, têm sido relatadas na literatura, como nas pesquisas de Pei e Strasbaugh (2002), com aplicação de um modelo fatorial completo, na retificação plana tangencial, em pastilhas de silício para semicondutores eletrônicos. Nesta pesquisa os parâmetros de processo analisados foram a rotação do rebolo (rpm), rotação do mandril (rpm) e velocidade de avanço axial ($\mu\text{m}/\text{min}$), aplicados na otimização da força de retificação (N), corrente do motor (A), tempo de ciclo (s), rugosidade da superfície (R_a) e as marcas da retificação. Os resultados mostram que os principais efeitos que influenciaram a força de retificação foram a velocidade do rebolo e a velocidade de avanço axial, sendo que com o aumento os valores destes parâmetros, houve aumento na força de retificação. Outra resposta estudada, a corrente do motor, aumentou com a redução da velocidade do rebolo. Apesar da velocidade do rebolo influenciar a força de retificação e a corrente do motor, a influência deste parâmetro foi maior na força de retificação, com aumento na proporção de 50% entre a primeira e a última pastilha de silício retificada, enquanto que a influência na amperagem foi de apenas 5%, também entre a primeira e a última pastilha. Quanto ao tempo de ciclo, este teve seu resultado influenciado pela velocidade de avanço, obviamente, quanto maior foi a velocidade de avanço, menor foi o tempo de ciclo. Já a rugosidade da superfície se mostrou maior com o aumento da rotação do mandril. Finalmente, para as marcas da retificação não foi identificado nenhum parâmetro significativo. Os estudos também mostraram que a interação entre a velocidade do rebolo, rotação do mandril e velocidade de avanço são significantes para as respostas estudadas.

Pei *et al.* (2003) aplicaram um modelo fatorial completo, também na retificação plana tangencial em pastilhas de silício de semicondutores eletrônicos, para analisar o deslocamento dos picos da ondulação até a zona ativa de retificação (mm), experimentando os fatores de

espessura da pastilha (μm), comprimento da ondulação (mm), altura da ondulação (μm) e força da retificação (N). Todos os fatores estudados se mostraram relevantes, quando observados individualmente. Além da influencia individual a interação entre a espessura da pastilha, comprimento da ondulação e força de retificação se mostrou significativa. O estudo mostrou que é mais difícil remover os deslocamentos dos picos da ondulação com a menor espessura da pastilha. O melhor cenário para eliminação dos deslocamentos dos picos da ondulação foi obtido com a combinação do menor comprimento da ondulação e menor força de retificação e o pior resultado foi obtido com o maior comprimento da ondulação, maior força de retificação e pastilha de menor espessura.

Choi *et al.* (2008), por meio do arranjo ortogonal de Taguchi, pesquisaram a retificação cilíndrica de mergulho, em aço 4140, com dureza 40 HRC, alterando os parâmetros do processo, como profundidade de dressagem (mm), passo de dressagem (mm/rev), diâmetro equivalente (mm), velocidade periférica da peça (mm/s), velocidade periférica do rebolo (m/s), profundidade de corte (mm/rev) e tempo de faiscamento (s), analisando a energia de retificação (W), rugosidade da superfície (Ra), desgaste radial do rebolo (μm) e taxa de remoção de material (mm^3/min). Neste trabalho foi apresentada a vantagem da aplicação do método, que com 21 experimentos, que foi suficiente para otimizar os parâmetros do processo de retificação, sem extenso esforço experimental.

Shaji e Radhakrishnan (2003) aplicaram o arranjo ortogonal de Taguchi e a função sinal/ruído, na retificação de superfície plana do aço AISI 52100, com dureza 60 HRC, alternando as variáveis velocidade periférica (m/s), velocidade de avanço da mesa (m/min), profundidade de corte (μm), modo de dressagem ($\mu\text{m} \times \text{mm}/\text{min}$), observando as saídas rugosidade (Ra), força normal (N) e força tangencial (N), para otimizar a geração de calor nas zonas de retificação, com o uso de grafite no processo. A conclusão mostrou que o uso de grafite reduziu a força tangencial e a rugosidade, enquanto que a força normal foi maior, quando comparado com o processo convencional com fluido refrigerante. Os experimentos mostraram que com o aumento da velocidade periférica e da velocidade de avanço a componente das forças reduziu. A rugosidade das peças aumentou, com o aumento da velocidade de avanço, aumento da profundidade de corte e uma dressagem mais grosseira, e reduziu com o aumento da velocidade periférica. O estudo apresenta o entendimento da limitação do método, que otimiza apenas uma única resposta por vez, sendo que vários problemas práticos envolvem múltiplas características, sendo necessário a escolha de qual característica deve ser preterida na definição dos parâmetros.

Kwak (2005) aperfeiçoou a retificação de superfície plana, em aço rápido SKH51, aplicando o Arranjo Ortogonal de Taguchi e a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), investigando a influência da rotação do rebolo (rpm), velocidade da mesa (mm/min), profundidade de corte (μm) e tamanho do grão (mesh) no erro geométrico da peça (μm). Os resultados mostraram que a profundidade de corte foi o parâmetro dominante, seguido pelo tamanho do grão do rebolo, na definição do erro geométrico da peça. A pesquisa evidenciou a aplicação da Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) para selecionar as condições apropriadas para a retificação. Também foram realizados experimentos de confirmação na condição ótima, confirmando que o modelo proposto pela MSR foi adequado para prever a resposta em questão.

Dhavlikar *et al.* (2003) aplicaram o Arranjo Combinado de Taguchi na retificação cilíndrica sem centros (*Centerless*) em pino mola, utilizando a metodologia da Superfície de Resposta Dual (SRD) e Simulação de Monte Carlo (SMC) para otimização dos parâmetros do processo, sendo eles: ângulo de regulação do rebolo (graus), altura de trabalho acima da linha de centro (mm), velocidade de passagem (peças/min) e profundidade de corte (mm), com o objetivo de reduzir o erro de circularidade das peças. A pesquisa concluiu que o Arranjo Combinado de Taguchi e a metodologia da Superfície de Resposta Dual propiciaram uma solução que levou a uma condição de quase zero defeito neste processo de retificação cilíndrica *centerless*. O conceito do sinal ruído (S/N) de Taguchi foi aplicado na medição da variância do erro de circularidade, enquanto que a metodologia da Superfície de Resposta foi utilizada na formulação da função objetivo para obter a condição ótima dos parâmetros. A simulação de Monte Carlo (SMC) determinou a condição ótima por meio de um sequenciamento de reduções da faixa de tolerância das variáveis, ao redor da solução ótima, obtida a cada rodada. A solução final levou à taxa de S/N de -7,2 e ao erro de circularidade de 2,1 μm , quando o objetivo era uma solução abaixo de 5 μm .

Krajnik e Kopac (2004) aplicaram o Arranjo Ortogonal de Taguchi na retificação de superfície plana em lâmina industrial de aço X50CrVMo5-1, tendo como variável de saída a taxa de remoção de material (cm^3/min), variando os parâmetros volume do segmento do rebolo (cm^3), velocidade de avanço longitudinal (mm/min.), avanço por passe (mm/passe) e distância entre os segmentos (cm). Neste trabalho concluiu-se que a aplicação do Arranjo Ortogonal de Taguchi foi uma abordagem adequada e trouxe informações adequadas sobre os efeitos da retificação, mostrando não ser necessária a aplicação de uma matriz de experimentos fatorial completo. Porém, a pesquisa deixa clara a não aplicação do Arranjo

Ortogonal de Taguchi na determinação dos níveis ótimos dos fatores, além da inclusão da análise de variância ser necessária para auxiliar na análise dos dados. Os autores indicam estender as análises preliminares para um projeto de parâmetros de processo mais formal.

Krajnik *et al.* (2005) aplicaram a Metodologia da Superfície de Resposta, na retificação sem centros (*Centerless*) por mergulho em aço 9SMn28, para reduzir a rugosidade da superfície retificada, variando os fatores altura do centro da peça (mm), velocidade de dressagem (mm/min), rotação do rebolo (rpm) e velocidade de avanço ($\mu\text{m/s}$), otimizando o processo com a aplicação de Programação Não Linear (NLP) e Algoritmo Genético (AG). Neste trabalho concluiu-se que as condições de dressagem do rebolo influenciam a rugosidade da superfície, que também foi afetada pela velocidade do rebolo. A metodologia da Superfície de Resposta conduziu a região de ótimo, indicando onde procurar as condições ótimas dos parâmetros numa próxima matriz de experimentos. A NLP foi aplicada na função “*desirability*” com três diferentes pesos para os parâmetros, enquanto que o algoritmo genético foi aplicado na definição do ponto ótimo na minimização da equação da superfície de resposta para o problema.

Kwak *et al.* (2006) aplicaram a Metodologia da Superfície de Resposta na retificação cilíndrica de passagem, em elemento de motor elétrico, de aço endurecido SCM440, tendo como respostas a energia de retificação (W), rugosidade da superfície (Ra) e taxa de remoção de material (mm^3/min), experimentando os parâmetros rotação da peça (rpm), velocidade de avanço transversal (m/min) e profundidade de corte (μm). O modelo da superfície de resposta foi desenvolvido para a energia de retificação, para a rugosidade da superfície e para a taxa de remoção de material, que podem prever estas respostas antes da retificação das peças, dentro das restrições estabelecidas. Baseado nos resultados experimentais, aumentar a profundidade de corte afetou mais a energia de retificação do que o aumento na velocidade de avanço transversal. Conclui-se também que a velocidade transversal e a rotação da peça alteraram a rugosidade da superfície, sendo que quanto maior o valor destes dois parâmetros, maior a rugosidade da superfície.

Conforme descrito anteriormente, várias publicações mostram a aplicação de experimentos no processo de retificação. Conforme mostrado na Tabela 3.1, o método mais aplicado é o arranjo ortogonal de Taguchi, entre outros métodos, como Fatorial Completo e Metodologia da Superfície de Resposta. A pesquisa de Dhavlikar *et al.* (2003) mostra a aplicação do Projeto Robusto de Parâmetros, por meio do Arranjo Combinado e da Superfície de Resposta Dual. Apesar das várias publicações mostradas, não foi identificada a aplicação

do Projeto Robusto de Parâmetros, por meio do Arranjo Cruzado, que é o método aplicado neste trabalho.

Tabela 3.1 – Publicações Envolvendo Retificação e Métodos Experimentais

Referência	Tipo de Arranjo	Método de Otimização
Pei e Strasbaugh (2002)	Fatorial Completo 2 ³	-----
Pei <i>et al.</i> (2003)	Fatorial Completo 2 ⁴	-----
-----	Fatorial Fracionado	-----
Choi <i>et al.</i> (2008)	Taguchi - Arranjo Ortogonal L18	-----
Shaji e Radhakrishnan (2003)	Taguchi - Arranjo Ortogonal L9	-----
Kwak (2005)	Taguchi - Arranjo Ortogonal L27	MSR - CCD
Krajnik e Kopac (2004)	Taguchi - Arranjo Ortogonal L8	-----
Dhavlikar <i>et al.</i> (2003)	Arranjo Combinado de Taguchi L8	SRD e SMC
-----	Arranjo Cruzado de Taguchi	-----
Krajnik <i>et al.</i> (2005)	MSR - CCD	-----
Kwak <i>et al.</i> (2006)	MSR - CCD	NLP e AG
-----	Arranjo de Misturas	-----
-----	Plackett - Burman	-----

Nas pesquisas apresentadas na Tabela 3.1 foram investigados vários fatores controláveis, atuantes nos diferentes processos de retificação, que são apresentados na Tabela 3.2, bem como as respostas de interesse. Dentre as publicações analisadas são identificados os processos de retificação cilíndrica, de passagem, de mergulho e sem centros, bem como a retificação de superfície plana de passagem e tangencial. Na Tabela 3.3 são apresentados os níveis aplicados nestes fatores controláveis, mostrando que Pei e Strasbaugh (2002), Pei *et al.* (2003), Dhavlikar *et al.* (2003), Krajnik e Kopac (2004) aplicaram apenas dois níveis, +1 e - 1, enquanto Choi *et al.* (2008), Shaji e Radhakrishnan (2003), Kwak (2005) e Kwak *et al.* (2006), aplicaram três níveis, com pontos centrais, além dos níveis +1 e - 1. A pesquisa de Krajnik *et al.* (2005) mostra a aplicação de pontos axiais em sua matriz de experimentos. A Tabela 3.4 mostra a frequência de aplicação dos parâmetros aplicados como fatores controláveis, sendo a profundidade de corte e as diferentes velocidades de avanço, os fatores de maior frequência, seguidos pela velocidade do rebolo, velocidade de rotação das peças e a profundidade de dressagem, como os fatores mais aplicados.

A rugosidade da superfície das peças foi a resposta que apareceu com maior frequência, o que também pode ser verificado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros Aplicados nos Processos de Retificação das Publicações Estudadas

Referência	Processo de Retificação	Fatores Controláveis	Respostas de Interesse
Pei e Strasbaugh (2002)	Retificação Plana Tangencial em pastilhas de silício para semicondutores eletrônicos	Rotação do Rebolo (rpm) Rotação do Mandril (rpm) Velocidade de Avanço Axial ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Força de Retificação (N) Corrente do Motor (A) Tempo de Ciclo (s) Rugosidade da Peça - Ra (μm) Marcas da Retificação (visual)
Pei <i>et al.</i> (2003)	Retificação Plana Tangencial em pastilhas de silício para semicondutores eletrônicos	Espessura da Pastilha (μm) Comprimento da Ondulação (mm) Altura da Ondulação (μm) Força da Retificação (N)	Deslocamento dos Picos da Ondulação até a Zona Ativa de Retificação (mm)
Choi <i>et al.</i> (2008)	Retificação Cilíndrica de Mergulho em Aço 4140 com dureza 40 HRC	Velocidade Periférica da Peça (mm/s) Velocidade Periférica do Rebolo (m/s) Profundidade de Corte (mm/rev) Diâmetro Equivalente (mm) Profundidade de Dressagem (mm) Passo de Dressagem (mm/Rev) Tempo de Faiscamento (s)	Energia de Retificação (W) Rugosidade da Superfície - Ra (μm) Desgaste Radial do Rebolo (μm) Taxa de Remoção de Material (mm^3/min)
Shaji e Radhakrishnan (2003)	Retificação de Superfície Plana de AISI 52100 com dureza 60 HRC	Velocidade Periférica (m/s) Velocidade de Avanço da Mesa (m/min) Profundidade de Corte (μm) Modo de Dressagem ($\mu\text{m} \times \text{mm}/\text{min}$)	Rugosidade - Ra (μm) Força Normal (N) Força Tangencial (N)
Kwak (2005)	Retificação de Superfície Plana em aço rápido SKH51	Rotação do Rebolo (rpm) Velocidade da Mesa (mm/min) Profundidade de Corte (μm) Tamanho do Grão (mesh)	Erro Geométrico (μm) Sinal/Ruído
Dhavlikar <i>et al.</i> (2003)	Retificação Cilíndrica Sem Centros (Centerless) em pino mola	Ângulo de Regulagem do Rebolo (graus) Altura de Acima da Linha de Centro (mm) Velocidade de Passagem (peças/min) Profundidade de Corte (mm)	Erro de Circularidade (μm) Sinal Ruído
Krajnik e Kopac (2004)	Retificação de Superfície Plana em lâmina industrial de aço X50CrVMo5-1	Volume Segmento do Rebolo (cm^3) Velocidade de Avanço Longitudinal (mm/min.) Avanço por Passe (mm/passe) Distância entre os Segmentos (cm)	Taxa de Remoção de Material (cm^3/min)
Krajnik <i>et al.</i> (2005)	Retificação Sem Centros (Centerless) por mergulho em aço 9SMn28	Altura do Centro da Peça (mm) Velocidade de Dressagem (mm/min) Rotação do Rebolo (rpm) Velocidade de Avanço ($\mu\text{m}/\text{s}$)	Rugosidade - Ra (μm)
Kwak <i>et al.</i> (2006)	Retificação Cilíndrica de Passagem em elemento de motor elétrico de aço endurecido SCM440	Rotação da Peça (rpm) Velocidade de Avanço Transversal (m/min) Profundidade de Corte (μm)	Energia de Retificação (W) Rugosidade da Superfície - Ra (μm) Taxa de Remoção de Material (mm^3/min)

Tabela 3.3 - Níveis dos Fatores dos Processos de Retificação das Publicações Estudadas

Referência	Fatores Estudados	Axial (-2)	Nível Baixo (-1)	Ponto Central (0)	Nível Alto (+1)	Axial (+2)
Pei e Strasbaugh (2002)	Rotação do Rebolo (rpm)		2175		4350	
	Rotação do Mandril (rpm)	-----	40	-----	590	-----
	Velocidade de Avanço Axial ($\mu\text{m}/\text{min}$)		0,10		0,30	
Pei <i>et al.</i> (2003)	Espessura da Pastilha (μm)		700		1000	
	Comprimento da Ondulação (mm)	-----	5	-----	15	-----
	Altura da Ondulação (μm)		10		30	
	Força da Retificação (N)		80		200	
Choi <i>et al.</i> (2008)	Velocidade Periférica da Peça (mm/s)		20	25	30	
	Velocidade Periférica do Rebolo (m/s)		28	30,50	33	
	Profundidade de Corte (mm/rev)		0,013	0,0038	0,0064	
	Diâmetro Equivalente (mm)	-----	34,42	49,24	62,75	-----
	Profundidade de Dressagem (mm)		0,015	0,023	0,030	
	Passo de Dressagem (mm/Rev)		0,04	0,10	0,16	
Shaji e Radhakrishnan (2003)	Tempo de Faiscamento (s)		1	3	5	
	Velocidade Periférica (m/s)		22	27	32	
	Velocidade de Avanço da Mesa (m/min)		5	10	15	
	Profundidade de Corte (μm)	-----	10	20	30	-----
Kwak (2005)	Modo de Dressagem (μm X mm/min)		Fino	Médio	Grosso	
	Rotação do Rebolo (rpm)		1500	1800	2100	
	Velocidade da Mesa (mm/min)	-----	7,50	10	12,5	-----
	Profundidade de Corte (μm)		10	15	20	
Dhavlkar <i>et al.</i> (2003)	Tamanho do Grão (mesh)		46	120	200	
	Ângulo de Regulagem do Rebolo (graus)		3,5		5	
	Altura de Acima da Linha de Centro (mm)	-----	16	-----	19	-----
	Velocidade de Passagem (peças/min)		10		16	
Krajnik e Kopac (2004)	Profundidade de Corte (mm)		0,05		0,10	
	Volume Segmento do Rebolo (cm^3)		30		170	
	Velocidade de Avanço Longitudinal (mm/min.)	-----	35	-----	40	-----
	Avanço por Passe (mm/Passe)		0,05		0,06	
Krajnik <i>et al.</i> (2005)	Distância entre os Segmentos (cm)		1		1,5	
	Altura do Centro da Peça (mm)	10	11,50	13	14,50	16,00
	Velocidade de Dressagem (mm/min)	100	200	300	400	500
	Rotação do Rebolo (rpm)	46	51	56	61	66
Kwak <i>et al.</i> (2006)	Velocidade de Avanço ($\mu\text{m}/\text{s}$)	10	20	30	40	50
	Rotação da Peça (rpm)		52	64	76	
	Velocidade de Avanço Transversal (m/min)	-----	1,19	1,46	2,14	-----
	Profundidade de Corte (μm)		20	25	30	

Tabela 3.4 - Frequência dos Parâmetros dos Processos de Retificação das Publicações

Parâmetros dos Processos	Referências								
	Pei e Strasbaugh (2002)	Pei <i>et al.</i> (2003)	Choi <i>et al.</i> (2008)	Shaji e Radhakrishnan (2003)	Kwak (2005)	Dhavlkar <i>et al.</i> (2003)	Krajnik e Kopac (2004)	Krajnik <i>et al.</i> (2005)	Kwak <i>et al.</i> (2006)
Altura da Ondulação		X							
Altura do Centro da Peça						X		X	
Ângulo de Regulagem do Rebolo						X			
Comprimento da Ondulação		X							
Diâmetro Equivalente			X						
Distância entre os Segmentos							X		
Espessura da Pastilha		X							
Força da Retificação		X							
Parâmetros de Dressagem			X	X					
Profundidade de Corte			X	X	X	X	X		X
Profundidade de Dressagem		X	X						X
Tamanho do Grão					X				
Tempo de Faiscamento			X						
Velocidade de Avanço	X			X	X	X	X	X	X
Velocidade de Dressagem								X	
Velocidade da Peça	X		X	X					
Velocidade do Rebolo	X		X		X			X	

Parâmetros em negrito representam os de maior frequência

Como pode ser verificado na Tabela 3.4, apesar dos diferentes tipos de retificação, os parâmetros profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade do rebolo são frequentemente pesquisados, visto que são os parâmetros sempre presentes neste processo.

3.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Segundo Montgomery (2001), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é composta por técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas na análise e modelagem de respostas influenciadas por algumas variáveis. Este método funciona muito bem quando se assume a homogeneidade da variância dos dados. Entretanto, tal consideração pode não ser válida para todos os casos de aplicações reais (DING *et al.*, 2004).

A MSR é empregada na otimização de processos, sendo composta por duas etapas: a modelagem e a busca por uma região de curvatura. Nestas etapas o objetivo é atingir a região ótima, podendo ser um ponto de máximo ou de mínimo, na superfície analisada. A modelagem consiste em ajustar os modelos matemáticos, que podem ser lineares ou quadráticos aos resultados apurados nos experimentos. Já a busca por uma região de curvatura é realizado na direção da máxima inclinação de um determinado modelo.

O método avalia as relações existentes entre os fatores de um determinado processo por meio das respostas observadas, determinando quais condições de parametrização do processo levarão a atingir o ponto de ótimo de uma resposta ou conjunto delas (FERNADES JÚNIOR, 2002).

Segundo Montgomery (2001), o primeiro passo da metodologia é encontrar uma aproximação para o verdadeiro relacionamento entre a resposta (Y) e o conjunto de parâmetros, que são as variáveis (X). Esta metodologia passa a ser uma estratégia adequada quando se tem conhecimento do processo que se pretende otimizar. Segundo Montgomery (2001), a análise da superfície é feita a partir de uma superfície ajustada, que, se for adequada, será equivalente a análise da superfície real, que pode apresentar forma semelhante à da Figura 3.1.

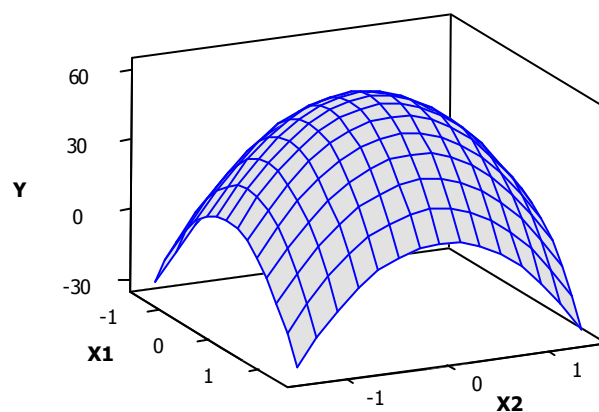


Figura 3.1 - Superfície de Resposta
Fonte: o autor

De acordo com Montgomery (2001), o relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes normalmente é desconhecido e, usualmente, é aplicado um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse. Se a resposta for modelada por uma função linear, então a função de aproximação será de primeira ordem, descrita pelo modelo a seguir, na equação (9):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (9)$$

Onde:

β = coeficiente polinomial

Y = variável dependente

X_1 = variável independente 1

X_2 = variável independente 2

ε = erro experimental

Para testar as dependências cumulativas de uma única variável dependente em relação às diversas variáveis independentes é aplicada a regressão múltipla, por meio do isolamento de cada variável, que é mantida constante, enquanto outras variáveis variam sistematicamente, permitindo a verificação dos seus efeitos sobre a variável dependente. A variável a ser inicialmente mantida constante é aquela que ocasiona maior influência na variabilidade da variável dependente (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Esse é um modelo de regressão linear múltipla com k regressores. O termo “linear” é usado porque a equação é uma função linear dos parâmetros desconhecidos, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_k \dots$

Os coeficientes $\beta_1, \beta_2, \beta_k$ são chamados de coeficientes parciais de regressão, visto que β_1 mede a variação esperada em Y por unidade de variação em X_1 , quando X_2 for constante, e β_2 mede a variação esperada em Y por unidade de variação em X_2 , quando X_1 for constante e assim por diante.

Conforme Montgomery e Runger (2003), modelos que incluem efeitos de interação podem ser analisados pelos métodos de regressão linear múltipla. Uma interação entre duas variáveis pode ser representada por um termo cruzado no modelo, mostrado na equação (10).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_i x_i + \beta_{12} x_1 x_2 \dots + \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (10)$$

Caso a superfície apresente curvatura a função de aproximação será um polinômio de ordem superior, como o modelo de segunda ordem. Os termos quadráticos e de interação nos

modelos podem produzir uma função formando uma curvatura, chamado modelo de 2ª ordem. Dependendo dos valores dos coeficientes de regressão, o modelo de segunda ordem com interação é capaz de considerar uma ampla variedade de formas; assim, ele é um modelo flexível de regressão (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

O modelo de segunda ordem pode ser aplicado em situações onde a função não seja originalmente quadrática e é descrita pela função da equação (11):

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (i, j = 1, 2, \dots, k) \quad (11)$$

De acordo com Box e Draper (1987) tanto o modelo de primeira ordem, para sistemas sem curvatura, quanto o modelo de segunda ordem, para sistemas com curvatura, são capazes de representar quase todos os problemas referentes à superfície de respostas. Segundo Montgomery (2001), é pouco provável que um modelo polinomial seja uma boa aproximação de um modelo real para todo o espaço experimental coberto para as variáveis independentes, porém esta aproximação pode ser considerada adequada para uma região específica.

Segundo Paiva (2006), para se estimar os coeficientes β de um modelo de regressão, seja ele de regressão linear múltipla, fatorial completo, fatorial fracionado ou superfície de resposta, pode ser aplicado o método dos mínimos quadrados ordinários (*OLS*), que visa encontrar o melhor ajuste do modelo aos dados observados, por meio da minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados e os valores observados para um conjunto de dados, que são chamados de resíduos, representado pela equação (12).

$$e = y_i - \hat{y}_i \quad (12)$$

Onde:

- e = Resíduo
- y_i = Valores observados de y
- \hat{y}_i = Valores calculados de y

Considerando a soma dos quadrados dos resíduos tem se a equação (13):

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (13)$$

Onde:

- S = Soma dos Quadrados dos Resíduos
- n = número de diferenças entre os valores estimados e os valores observados

Segundo Myers e Montgomery (2002), a última etapa, após a validação do modelo matemático, é determinar os níveis ótimos do sistema. No processo de otimização do modelo de segunda ordem, deve-se determinar qual é a forma da superfície, que pode levar a um ponto de mínimo, um ponto de máximo ou um ponto de sela. Um dos processos utilizados para se determinar o tipo de superfície e o ponto de ótimo é a análise canônica, que tem como ponto de partida a determinação do ponto estacionário, por meio da derivação da equação do modelo ajustado em relação a cada uma das variáveis X_1, X_2, \dots, X_k , igualando a zero e resolvendo o sistema, conforme a equação (14) ou (17).

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_k} = 0 \quad (14)$$

Ou na forma matricial do modelo de segunda ordem:

$$y = \beta_0 + x'b + x'Bx \quad (15)$$

onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12}/2 & \dots & \beta_{1k}/2 \\ & \beta_{22} & \dots & \beta_{2k}/2 \\ & & \vdots & \\ & & & \dots & \beta_{kk} \end{bmatrix}$$

Segundo Box e Draper (1987), na equação (17), b representa o vetor dos coeficientes de regressão de primeira ordem e B é uma matriz simétrica, com a diagonal principal formada pelos coeficientes dos termos quadráticos puros.

A derivada da equação (15) com relação aos elementos do vetor x é dada pela equação (16).

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x} = b + 2Bx = 0 \quad (16)$$

O ponto estacionário é obtido pela solução da equação (16), que na forma matricial é obtido por meio da equação (17).

$$x_s = -\frac{1}{2}B^{-1}.b \quad (17)$$

O resultado do cálculo do ponto estacionário pode representar:

- Um ponto de máximo;
- Um ponto de mínimo;
- Um ponto de sela.

Para se caracterizar a natureza da superfície de resposta deve-se levar em consideração o resultado dos autovalores da matriz [B]:

- Se os autovalores são todos positivos, então o ponto estacionário é um ponto de mínimo e a superfície será côncava;
- Se os autovalores são todos negativos, então o ponto estacionário é um ponto de máximo e a superfície será convexa;
- Se os autovalores têm sinais opostos, então o ponto estacionário é um ponto de inflexão e a superfície terá a forma de sela.

3.2.1 Arranjo Composto Central

Um dos arranjos amplamente aplicados na Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) é o Arranjo Composto Central (*Central Composite Design - CCD*), representado na Figura 3.2, que tem o objetivo de ajustar um modelo de segunda ordem, apresentando relativa eficiência com a quantidade de experimentos requeridas, formado por três conjunto de elementos experimentais, sendo:

- Um arranjo fatorial completo ou fracionado;
- Um conjunto de pontos centrais;
- Um conjunto de pontos axiais.

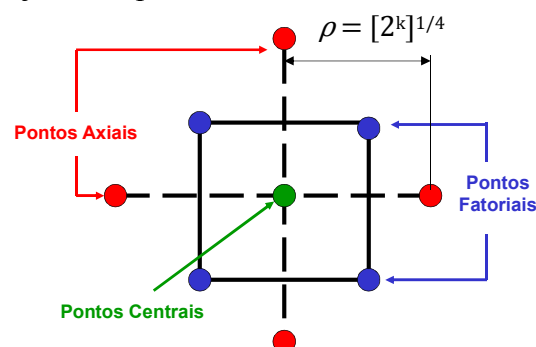


Figura 3.2 - Arranjo Composto Central para dois fatores

A quantidade de pontos axiais é igual ao dobro da quantidade de fatores. Entre os valores dos pontos centrais e os pontos axiais há uma distância, representada por ρ , que é determinado em função do número de fatores envolvidos (MONTGOMERY, 2001). De

acordo com a localização dos pontos axiais o CCD pode ser circunscrito (CCC), inscrito (CCI) ou de face centrada (CCF), representado na Figura 3.3.

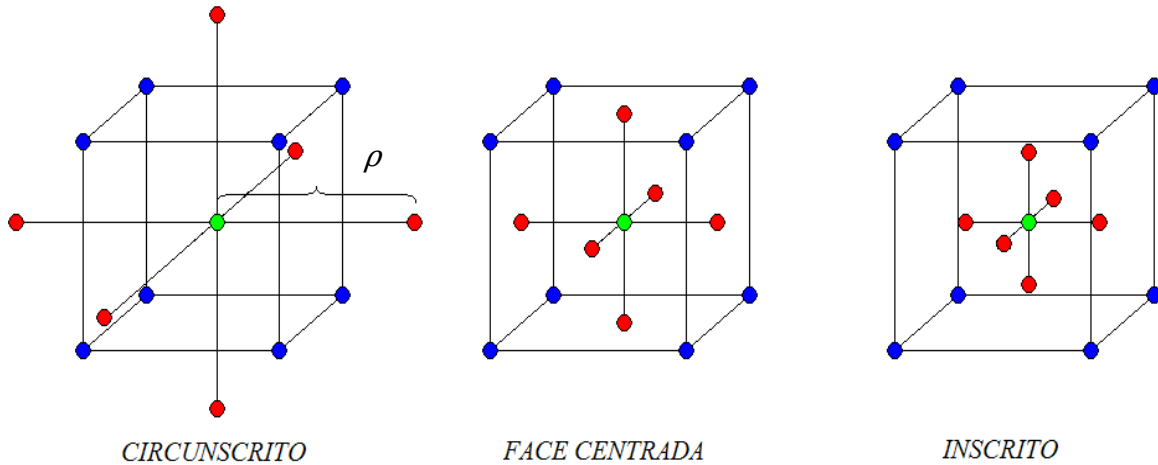


Figura 3.3 - Tipos de CCD
Fonte: Montgomery (2001)

Segundo Montgomery (2001), um CCD clássico com k fatores requer 2^k corridas fatoriais, $2 \times k$ corridas axiais e ao menos um ponto central, possuindo preferencialmente de três a cinco pontos centrais. A rotacionalidade de um CCD, para modelos de segunda ordem, significa que a variância da resposta é a mesma em todos os pontos experimentais da esfera de raio ρ , pois estão à mesma distância do ponto central. Para manter a rotacionalidade de um arranjo, o valor de ρ , dependendo do número de experimentos (k) da porção fatorial do CCD é regido pela equação 18, conforme (BOX e DRAPPER, 1987).

$$\rho = (2^k)^{1/4} \quad (18)$$

O arranjo circunscrito (CCC) é aquele onde os pontos axiais estão a uma distância ρ do centro e requer cinco níveis para cada fator. O arranjo de face centrada (CCF) é aquele onde os pontos axiais estão sobre o centro de cada face do espaço fatorial, sendo $\rho = +1$ ou -1 , requerendo três níveis para cada fator. Já o arranjo inscrito (CCI) utiliza os pontos axiais com valores de ρ menores que $+1$ ou -1 , em casos onde os limites especificados não possam ser extrapolados por limitações físicas de equipamentos ou do produto, ou ainda por questão de segurança. Este tipo de CCD também necessita de cinco níveis.

Segundo Fernandes Júnior (2002), a repetição do ponto central tem a função de fornecer uma medida de erro puro e estabilizar a variância da resposta prevista. Para

estabilizar a variância o adequado é realizar de três a cinco repetições do ponto central se ρ estiver próximo de \sqrt{k} e apenas 1 ou 2 se ρ estiver próximo de 1.

3.2.2 Método do Valor P

De acordo Montgomery (2001), a investigação de um determinado fenômeno por meio de dados estatísticos considera a hipótese de que o modelo sugerido é adequado, quando se deseja saber se o fenômeno pode ser descrito por meio de algum modelo teórico envolvendo probabilidades. Para o teste, denomina-se a hipótese nula (H_0) como sendo a hipótese a ser avaliada pelo teste. A hipótese contrária é denominada como alternativa e é representada como H_1 .

Montgomery e Runger (2003), afirmam que um dos métodos de teste de hipóteses de uma afirmação sobre uma média é o método do valor P (valor da probabilidade), que quando dada uma hipótese nula e um conjunto de dados amostrais, reflete a plausibilidade de se obter tais resultados no caso de a hipótese nula ser verdadeira.

O pesquisador geralmente determina o nível de significância a ser adotado, que tradicionalmente, nas vastas aplicações estatísticas é fixado em 0,05 (5%). Um valor de P menor que 0,05 sugere que os valores amostrais são muito improváveis sob a hipótese nula.

O valor de P é a probabilidade de se obter um valor da estatística amostral de teste no mínimo tão extremo como o que resulta dos dados amostrais, na suposição de a hipótese nula ser verdadeira. Enquanto a abordagem tradicional do teste de hipótese resulta em uma conclusão do tipo “rejeitar / não rejeitar”, os valores P dão o grau de confiança ao se rejeitar a hipótese nula.

Devido à tomada de decisão partir de uma amostra e não da população inteira há a possibilidade de que seja cometido um erro, que será do tipo I quando rejeitarmos H_0 e este for verdadeiro, e será do tipo II quando aceitarmos H_0 e este for falso.

Tabela 1. Erro tipo I e erro tipo II

		Realidade	
		A hipótese H_0 é verdadeira	A hipótese H_0 é falsa
Decisão	Aceitar H_0	Decisão correta	Erro de tipo II
	Rejeitar H_0	Erro de tipo I	Decisão correta

Fonte: Adaptado de Montgomery – 2001.

Assume-se o erro tipo I e rejeita-se a hipótese nula se o valor P for menor que o nível de significância estipulado. Ao contrário, se o valor P for maior, não é assumido o erro tipo I e se aceita a hipótese nula.

Os valores P são interpretados da seguinte forma:

- a) $P < 0,01$ – Elevada significância estatística (evidência muito forte contra a hipótese nula)
- b) $0,01 \leq P \leq 0,05$ – Estatisticamente significativa (evidência forte contra a hipótese nula)
- c) $P > 0,05$ – Evidência insuficiente contra a hipótese nula.

3.2.3 Teste para a Significância do Modelo

O teste de significância é realizado como um procedimento de análise de variância (ANOVA), onde se calcula a razão entre a média quadrática dos termos de regressão e a média quadrática do erro, encontra-se o parâmetro F, que comparada com o valor crítico de F, para um dado nível de significância, permite avaliar a significância do modelo. Se F for maior que $F_{\text{crítico}}$, então o modelo é adequado (Montgomery, 2001).

Testando-se individualmente a significância de cada coeficiente pode-se levar à otimização do modelo por meio da exclusão ou da inclusão de termos. Quando o valor P do teste individual para os termos for inferior ao nível de significância, então, o termo é adequado ao modelo, logo, deve ser mantido. Ao contrário, o termo deve ser eliminado se tal procedimento conduzir ao aumento do coeficiente de determinação R^2 , conjuntamente com a diminuição do erro residual S e o valor P referente à falta de ajuste do modelo for superior ao nível de significância. Adicionalmente, a retirada de qualquer termo deve obedecer ao princípio da hierarquia (Montgomery, 2001). Este princípio indica que se o modelo contém um termo de alta ordem, o termo de baixa ordem deve ser mantido. Isto promove um tipo de consistência interna do modelo.

3.2.4 Coeficiente de determinação múltipla (R^2)

O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson (r) resulta no coeficiente de determinação (R^2), que indica o poder de explicação do modelo, em função das variáveis independentes consideradas. Na regressão múltipla, a medida relativa de adequação do ajuste é chamada de coeficiente de determinação múltipla e é designada pelo símbolo R^2 , que é a relação entre a variação explicada pela equação de regressão múltipla e a variação total da

variável dependente. Assim, $R^2 = 0,70$ significa que 70% de variância de y é explicada pela variação de x . O coeficiente de determinação é um número no intervalo $[0;1]$ e é obtido através da equação (19).

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \therefore 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (19)$$

onde:

$SQ_{exp} = \sum_i^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ é uma medida da variabilidade dos dados ajustados pelo modelo

$SQ_{tot} = \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2$ é uma medida da variabilidade das observações da variável resposta

$SQ_{res} = \sum_i^n (\hat{y}_i - y_i)^2$ é uma medida de variabilidade não controlada

Entretanto, um valor maior que 0,70 de R^2 não implica necessariamente que o modelo de regressão seja bom. A adição de uma variável ao modelo sempre aumentará o R^2 , independentemente da variável adicional ser ou não ser estatisticamente significativa. Assim, modelos que tenham valores grandes de R^2 podem resultar em previsões pobres de novas observações ou estimativas da resposta média (PIMENTA, 2008).

A raiz quadrada de R^2 é chamada de coeficiente de correlação múltipla entre Y e o conjunto de regressores X_1, X_2, \dots, X_k . Ou seja, R é uma medida da associação linear entre Y e X_1 e X_2, \dots, X_k . Quando $k = 1$, ele se torna a correlação simples entre Y e X .

R^2 ajustado (R^2_{adj}) é uma medida semelhante ao R^2 , mas que, ao contrário deste, não aumenta com a inclusão de variáveis independentes não significativas. Dessa forma, evita-se o problema característico do R^2 , que tende a aumentar sempre que são adicionadas novas variáveis independentes, mesmo que contribuam pouco para o poder explicativo da regressão (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

O valor de R^2_{adj} pode ser obtido através da equação (20).

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(k+1)} \right) \cdot (1 - R^2) \quad (20)$$

onde:

n = número de interações das variáveis independente (X_1, X_2, \dots, X_k)

k = número de coeficientes das variáveis independentes na equação de regressão ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$)

3.2.5 Análise residual

Conclusões não devem ser tomadas a partir apenas da análise de variância, pois a adequação do modelo também deve ser verificada para detectar se há distorções no modelo. Segundo Montgomery *et al.* (2001), a primeira técnica a ser utilizada é a análise residual. Um resíduo é a diferença entre o valor observado e o valor ajustado correspondente, conforme equação (21), que depende de suposições básicas. A estimação dos parâmetros do modelo requer a suposição de que os erros sejam variáveis aleatórias, não correlacionadas, com média zero e variância constante. Testes de hipóteses e estimação do intervalo requerem que os erros sejam normalmente distribuídos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (21)$$

Para que o modelo seja válido, é preciso verificar se estas suposições acerca dos erros são atendidas. Montgomery (2001) sugere técnicas de análise de resíduos que incluem as seguintes verificações:

Gráfico de probabilidade normal dos resíduos: o histograma de resíduos deve representar uma distribuição normal, apesar de pequenas distorções na normalidade serem esperadas quando o tamanho da amostra é pequeno. A plotagem dos resíduos lembrará uma linha reta e se algum ponto mostrar um afastamento anormal em relação aos demais será chamado de *outlier*.

Gráficos de resíduos em uma sequência temporal: a traçagem dos resíduos na ordem de coleta dos dados serve para detectar se há correlação entre os resíduos. Se houver alguma tendência, haverá violação da suposição de independência. Segundo Breyfogle (1999), é importante conduzir os experimentos de forma aleatória para que um passo importante seja dado para a independência dos dados.

Gráficos dos resíduos contra os valores ajustados: a traçagem dos valores ajustados não deve apresentar nenhum padrão e deve ser distribuída aleatoriamente. Segundo Breyfogle (1999), as discrepâncias comuns podem incluir:

- Pontos fora do comum (*outliers*): estes pontos aparecem muito acima ou muito abaixo dos valores residuais normais. Estes pontos devem ser investigados, pois podem ser oriundos de alguma coleta incorreta, ou, por outro lado, algum conhecimento adicional pode ser obtido levando a melhorias do processo.

- Variância não constante: onde a diferença entre os valores ou aumenta ou decresce para um aumento nos valores ajustados, que pode ser causado pelo instrumento de medição, por exemplo, onde o erro é proporcional ao valor medido.
- Ajuste pobre do modelo, onde, por exemplo, valores residuais aumentam e em seguida diminuem com um aumento no valor ajustado. Neste caso, talvez um modelo quadrático seja melhor que um modelo linear.

As premissas de normalidade e linearidade dos resíduos devem ser verificadas, o que pode ser feito por meio do gráfico de resíduos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

3.3 Projeto Robusto de Parâmetros

Segundo Montgomery (2001), na década de 80 o engenheiro japonês Genichi Taguchi desenvolveu uma nova abordagem para a redução da variação em produtos e processos, se referindo ao método como Projeto Robusto de Parâmetros (PRP), classificando variáveis significativas que influenciam o sistema como “variável de controle” e “variável de ruído”. Taguchi assumiu que a maior parte da variabilidade da resposta em relação ao alvo era causada pela presença de variáveis de ruído e sua abordagem se baseou em encontrar valores para os parâmetros controláveis de modo a reduzir a variação do processo causada pelos ruídos.

Segundo Ardakani e Noorossana (2008), Projeto Robusto de Parâmetros (PRP) é um conjunto de técnicas para determinar o nível de um conjunto de fatores controláveis que visa reduzir a sensibilidade do processo a outro conjunto de fatores incontroláveis, denominado como ruídos, de modo a aumentar a robustez do processo. Desta forma, o PRP procura uma combinação de fatores controláveis tais que dois objetivos principais sejam alcançados: a localização da média da resposta esteja no nível desejado e a variação ou dispersão da resposta seja a menor possível, tornando assim o sistema insensível à ação das variações incontroláveis (ruídos).

As variáveis de controle influenciam fortemente o processo e são facilmente controladas em um processo normal. Os ruídos também influenciam o processo, porém, são incontroláveis. Entretanto, uma vez identificados, alguns ruídos podem ser controláveis no ambiente experimental ou em laboratório. Os ruídos podem ser gerados por condições ambientais, devido às condições de utilização do produto, ou alterações de características físicas de partes integrantes do processo, durante sua realização.

De acordo com Li (2006), nas últimas décadas o método PRP tem se desenvolvido por

meio de pesquisas e publicações, além de ser amplamente aplicado na indústria. Porém, tanto na indústria, quanto no desenvolvimento metodológico, têm ocorrido consideráveis controvérsias, não havendo um consenso claro de qual entre os métodos disponíveis é o mais eficaz.

As ideias gerais de Taguchi são amplamente difundidas em todo o mundo. Um aspecto importante no método desenvolvido foi o uso do arranjo ortogonal, que fornece vantagens no balanceamento dos experimentos e eficiência na presença de erros experimentais. No entanto, sua filosofia e metodologia para lidar com problemas PRP tem sido alvo de análises minuciosas entre pesquisadores, como pode ser verificado nos trabalhos de KACKER, 1985; HUNTER, 1985; BOX, 1985; BOX, 1988; HAMADA e WU, 1990; NAIR, 1992. O consenso geral é de que os trabalhos de Taguchi trouxeram grandes benefícios, mas os métodos podem ser melhorados com a aplicação de ferramentas estatísticas. Box (1985) comenta que as boas ideias devem ser absorvidas, enquanto as ideias não tão boas devem ser corrigidas, modificadas e melhoradas, sendo que uma das críticas do método é que as interações entre os fatores controláveis e os ruídos são deixadas de lado, além da relação sinal/ruído (S/N) não ser convincente (KIM e RHEE, 2003).

Segundo Li (2006), uma das principais discussões tem sido o uso do arranjo cruzado ou o arranjo combinado, sendo que, uma das vantagens do arranjo combinado, é quanto à flexibilidade para que alguns efeitos possam ser retirados e, deste modo reduzir, a quantidade de experimentos.

De acordo com Ardakani e Noorossana (2009), a abordagem da MSR, aliada ao PRP foi desenvolvida por Myers e Carter (1973), para resolver problemas onde o experimentador pode identificar uma resposta primária a ser otimizada, restrita a um valor específico de média ou variância, como resposta secundária.

De acordo com Quesada e Del Castillo (2004), a formulação envolvendo a aplicação da MSR com PRP são observadas desde o início dos anos 90, com as pesquisas de BOX e JONES (1990) e VINING e MYERS (1990).

O planejamento geral da PRP-MSR consiste em gerar uma matriz experimental com os fatores de ruído considerados com variáveis controláveis, eliminando os pontos axiais relacionados com os ruídos da matriz, logo, por meio do algoritmo OLS a superfície para $f(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ se ajusta e as derivadas parciais podem ser calculadas, levando a equação da média e variância para uma única resposta, considerando a interação dos fatores de ruído. Porém, como mencionado anteriormente, na maioria das aplicações industriais, mais de uma resposta necessita ser otimizada simultaneamente para obtenção da qualidade do produto

(KAZEMZADEH *et al.*, 2008). Segundo Quesada e Del Castillo (2004) e Paiva *et al.*, (2012), apesar da ampla aplicação do PRP, poucos trabalhos têm sido realizados com múltiplas respostas, principalmente quando as respostas são correlacionadas (PAIVA *et al.*, 2009).

Mesmo em trabalhos que envolvem abordagens para múltiplas respostas, as interações entre ruídos e fatores controláveis são geralmente negligenciadas e as equações da média e variância provêm do arranjo cruzado ou replicação (TANG E XU, 2002; JEONG *et al.*, 2005; KOVACH e CHO, 2005; LEE e PARK, 2006; SHAIBU e CHO, 2009; SHIN *et al.*, 2011; PAIVA *et al.*, 2012).

3.3.1 Arranjo Cruzado

Segundo Montgomery (2001), a metodologia de Taguchi gira em torno da aplicação do arranjo ortogonal para as variáveis de controle, chamada de arranjo interno, e outro arranjo ortogonal para as variáveis de ruído, denominado arranjo externo, formando o arranjo cruzado, onde cada combinação de fatores é realizada sob um cenário de condições de ruído. A Figura 3.4 mostra o formato de um arranjo cruzado composto de um arranjo interno 2^{4-1} e de um arranjo externo 2^2 .

					ARRANJO EXTERNO											
					j				j_1				j_2			
Z_1					-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
Z_2					-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
ARRANJO INTERNO					Y_{ij1}				Y_{ij2}				Y_{ij3}			
i	X_1	X_2	X_3	X_4												
1	-1	-1	-1	-1	Y_{1j1}				Y_{1j2}				Y_{1j3}			
2	-1	-1	+1	+1	Y_{2j1}				Y_{2j2}				Y_{2j3}			
3	-1	+1	-1	+1	Y_{3j1}				Y_{3j2}				Y_{3j3}			
4	-1	+1	+1	-1	Y_{4j1}				Y_{4j2}				Y_{4j3}			
5	+1	-1	-1	+1	Y_{5j1}				Y_{5j2}				Y_{5j3}			
6	+1	-1	+1	-1	Y_{6j1}				Y_{6j2}				Y_{6j3}			
7	+1	+1	-1	-1	Y_{7j1}				Y_{7j2}				Y_{7j3}			
8	+1	+1	+1	+1	Y_{8j1}				Y_{8j2}				Y_{8j3}			

Figura 3.4 - PRP com Arranjo Cruzado

Como pode ser visto na Figura 3.4, a matriz do arranjo cruzado pode resultar em um grande número de experimentos, mesmo para um número relativamente pequeno de fatores controláveis e de ruídos, pois neste tipo de arranjo, cada condição experimental é repetida nas diversas condições de ruído, numa tentativa de se combinar informações sobre a média e a

variância, conhecida como a razão Sinal-Ruído (S/N), que define que o maior valor da taxa minimiza a variabilidade transmitida pelo ruído. Nesta abordagem, o objetivo é determinar quais são os valores dos fatores controláveis que resultam numa média o mais próximo possível do alvo. Os efeitos dos fatores controláveis no sinal/ruído são analisados para robustecer ao máximo o sistema.

Segundo Singh *et al.* (2007), para reduzir o esforço com o número de experimentos, Taguchi propôs o ruído composto, que consiste numa técnica no qual os múltiplos fatores de ruídos são tratados como um único fator, normalmente em apenas dois níveis, no qual todos os fatores de ruído são alterados simultaneamente. Taguchi (1987) e Phadke (1995) sugeriram a formação do ruído composto baseado no direcionamento do efeito destes fatores, deste modo, criando duas condições que representam os extremos opostos destes fatores de ruído.

De acordo com Montgomery (2001), um ponto importante sobre o arranjo cruzado é que ele fornece sim informações sobre as interações entre os fatores controláveis e os ruídos, que são cruciais para a solução dos problemas envolvendo PRP, como na interação entre dois fatores, mostrada na Figura 3.5, sendo “x” o fator controlável, “z” o ruído e “y” a resposta. Na Figura 3.5 (a), não há interação entre x e z, e desta forma não há valor para o fator controlável x que afete a variabilidade da resposta transmitida por z. Porém na Figura 3.5 (b), há uma forte interação entre x e z, e quando x está no seu nível baixo (–), a variação é muito menor do que quando está no seu nível alto (+). Desta forma, se não houver, ao menos uma interação entre os fatores controláveis e os ruídos, não há Projeto Robusto de Parâmetros.

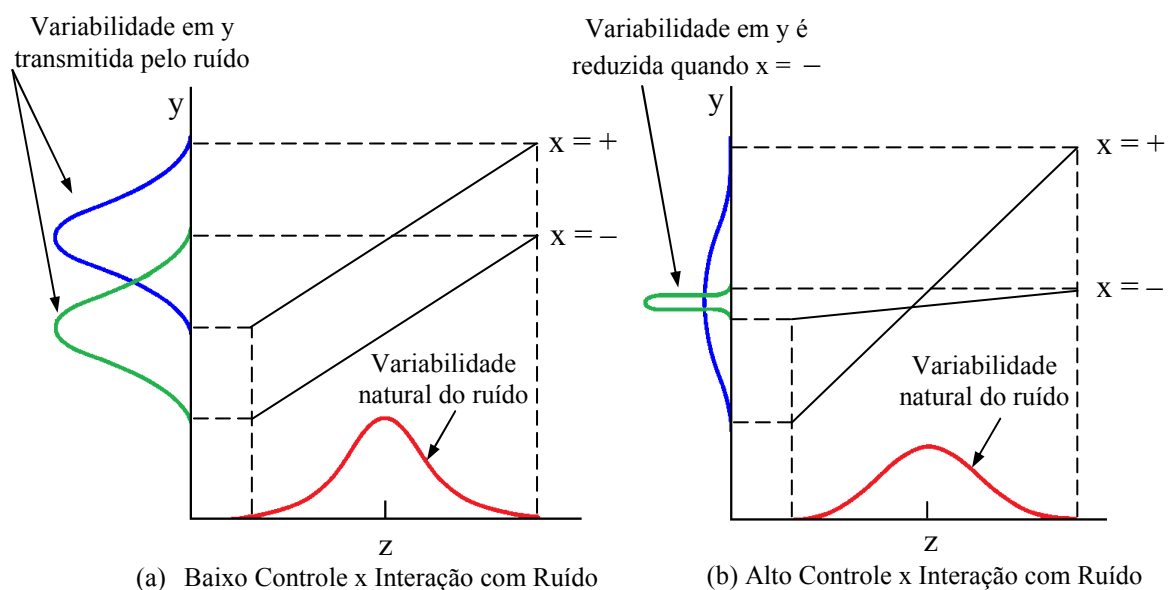


Figura 3.5 - Controle do Processo x Interação com Ruído no PRP – Montgomery (2001)

3.3.2 Arranjo Combinado

Welch *et al.* (1990) propuseram a substituição do arranjo cruzado pelo arranjo combinado, tanto com os fatores controláveis quanto com os fatores de ruído, aplicando esta abordagem a experimentos computacionais, por meio de simulação. Esta mesma abordagem foi aplicada por Shoemaker *at al.* (1991) em experimentos na física.

Wu e Zhu (2003) propuseram o critério *minimum J-aberration*, para a seleção do arranjo combinado baseado nos princípios da ordenação dos efeitos, nos quais as diferentes categorias dos efeitos são ordenadas de acordo com sua provável importância para o Projeto Robusto de Parâmetros (PRP).

A abordagem PRP com arranjo combinado trata todas as variáveis da mesma forma, sendo elas variáveis controláveis ou de ruído, usando um modelo que inclui as interações entre eles. Esses modelos são capazes de modelar os efeitos principais de fatores controláveis e ruído e também as suas interações.

Segundo Montgomery (2001), o modelo que descreve o método é mostrado na equação (22).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \gamma_i z_i + \sum_{i=1}^k \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (22)$$

onde:

x_i – são os fatores controláveis;

z_j – são os fatores de ruído;

β_i – são os coeficientes de fatores controláveis;

β_{ii} e β_{ij} – são os coeficientes de interação de fatores controláveis;

γ_i – são os coeficientes dos fatores de ruídos;

δ_{ij} – são os coeficientes de interação entre fatores controláveis e ruído.

ε – erro experimental

Como pode ser visto, o modelo inclui todas as variáveis em um único modelo experimental, não importando se elas são controláveis ou ruídos. Assumindo que ε é uma variável com média zero e variância σ^2 , que os ruídos são variáveis aleatórias com média zero e variância σ_z^2 , que se houverem vários fatores de ruído suas covariâncias serão zero e que as

variáveis de ruído e variáveis controláveis não são correlacionadas. O modelo pode ser descrito pelas equações (23) e (24).

$$E_z[y(\mathbf{x}, \mathbf{z})] = f(\mathbf{x}) \quad (23)$$

$$V_z[y(\mathbf{x}, \mathbf{z})] = \sigma_z^2 \left\{ \sum_{i=1}^r \left[\frac{\partial y(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial z_i} \right]^2 \right\} + \sigma^2 \quad (24)$$

Alguns pesquisadores argumentam que o arranjo combinado geralmente é superior ao arranjo cruzado. Wu e Hamada (2000) afirmam que alguns arranjos combinados são uniformemente melhores que os arranjos cruzados, com a mesma quantidade de experimentos em termos de efeitos principais e interações de segunda ordem. Os autores explicam que se os custos de experimentos com fatores de ruídos forem muito menores que os custos dos fatores controláveis, o arranjo cruzado é mais econômico.

Segundo Kacker (1985), os arranjos combinados são excessivamente sensíveis à falta de dados e também levam a algumas dificuldades quando as fontes de variação não estão incluídas nas variáveis exploratórias.

Baseados nestas evidências, alguns pesquisadores propuseram a alternativa de abordagem por meio da superfície de resposta e da superfície de resposta dual (WELCH *et al.*, 1990; VINING e MEYERS, 1990).

Kunert *et al.* (2007), compararam a eficácia da abordagem do arranjo cruzado e do arranjo combinado num processo de conformação de folhas de metal, mostrando que o arranjo cruzado encontrou um efeito na variância que não pode ser visto no arranjo combinado, se mostrando mais eficiente em promover a redução da variância nas folhas de metal. Kunert *et al.* (2007), também comentam que a abordagem do arranjo combinado falhou devido ao fato de se basear excessivamente na dispersão dos efeitos.

Com as evidências apontadas na literatura, não há uma definição relativa entre qual método deva ser escolhido: o arranjo cruzado ou o arranjo combinado.

3.4 Superfície de Resposta Dual

De acordo com Salgado Júnior (2010), nos processos de manufatura, dois objetivos devem ser avaliados quando se busca sua melhoria, sendo um deles a distância entre o valor

real e o valor desejado para uma dada característica de qualidade, denominado como alvo (μ) e a outra, a redução de sua variância (σ^2).

A superfície de resposta dual (SRD) é um modelo clássico da MSR no qual a equação da média e da variância são obtidas por meio da equação da superfície de resposta para a média (μ) e da equação da superfície de resposta para a variância (σ^2), aplicando replicações, arranjo cruzado ou arranjo combinado. Estas funções, que são usualmente escritas como modelos de segunda ordem, podem ser otimizadas simultaneamente (KAZEMZADEH *et al.*, 2008).

Vining e Myers (1990) desenvolveram a abordagem da Superfície de Resposta Dual (SRD), propondo um método de otimização para a superfície de resposta para a média da resposta envolvida ($\hat{\mu}$), conforme equação (25), e outra superfície de resposta para o desvio padrão ($\hat{\sigma}^2$), conforme equação (26).

$$\hat{\mu} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\mu} \quad (25)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{i < j}^k \gamma_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\sigma} \quad (26)$$

Os autores utilizaram a técnica de Myers e Carter (1973) para otimizar a Superfície de Resposta Dual sem a necessidade da função sinal/ruído de Taguchi, expressando o problema como minimização ou maximização da função objetivo, conforme equações (27), (28) e (29), com uma simples restrição de igualdade, aplicando os multiplicadores de Lagrange, assumindo que tanto a função objetivo quanto a restrição como modelos de superfície de resposta de segunda ordem. Esta técnica busca um ponto de máximo ou de mínimo numa função quadrática.

Sendo ($\hat{\mu}$), a superfície de resposta ajustada para a média e σ^2 a superfície de resposta ajustada para o desvio padrão, três diferentes tipos de soluções foram propostas:

Caso 1: Normalização (*Target value is best*), com o objetivo de manter a média (μ) no valor alvo T, minimizando a variância (σ^2).

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \hat{\sigma}^2 \\ & \text{Sujeito à: } \hat{\mu} = T \end{aligned} \quad (27)$$

Caso 2: Maximização (*The larger, the better*), com o objetivo de maximizar a média ($\hat{\mu}$), controlando a variância ($\hat{\sigma}^2$) em um valor desejado.

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \hat{\mu} \\ \text{Sujeito à: } & \hat{\sigma}^2 = T \end{aligned} \quad (28)$$

Caso 3: Minimização (*The smaler, the better*), com o objetivo de minimizar a média ($\hat{\mu}$), controlando a variância ($\hat{\sigma}^2$) em um valor desejado.

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \hat{\mu} \\ \text{Sujeito à: } & \hat{\sigma}^2 = T \end{aligned} \quad (29)$$

De acordo com Vining e Myers (1990), a determinação da resposta primária e secundária depende do objetivo do experimento, sendo a maior preocupação quanto à falta de realismo na igualdade das restrições, pois tanto a superfície de resposta para $\hat{\mu}$, quanto para ω_σ são aproximações das respostas reais e que estão submetidas a alguns erros. Restringir a otimização à igualdade das restrições irá excluir o valor global preferido, principalmente nos casos 2 e 3 onde o alvo do desvio padrão normalmente é desconhecido.

Lin e Tu (1995), Kim e Rhee (2003), Cho e Park (2009), Lee e Park (2006), K oksoy e Yalcinoz (2006), Kazemzadeh *et al.* (2008), Steenackers e Guillaume (2008); Kovack e Cho (2005); Shin *et al.* (2011); Paiva *et al.* (2012), aplicaram uma diferente abordagem para o método, aplicando o Erro Quadrático Médio (EQM) ao invés dos multiplicadores de Lagrange como uma estratégia eficiente para o PRP, sendo tal método expresso pela equa o (30):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar EQM} &= (\hat{\mu} - T)^2 + \hat{\sigma}^2 \\ \text{Sujeito  : } & X^T X \leq \rho^2 \end{aligned} \quad (30)$$

Onde:

- $\hat{\mu}$ – Superfície de Resposta Ajustada para a Média
- T – Valor alvo da dimensão
- $\hat{\sigma}^2$ – Superfície de Resposta Ajustada para o Desvio Padrão
- ρ – Distância dos Pontos Axiais em Relaq o aos Pontos Centrais da MSR

Supondo que a m dia e a variância podem ter diferentes importâncias, a funq o objetivo para o EQM pode ser ponderada por meio de pesos, conforme expresso na

equação (31), (BOX e JONES, 1990; LIN e TU, 1995; TANG e XU, 2002; KAZEMZADEH *et al.*, 2008).

$$EQM_w = w_1(\hat{\mu} - T)^2 + w_2 \hat{\sigma}^2 \quad (31)$$

Onde:

w_1 e w_2 – Constantes pré-definidas

$\hat{\mu}$ – Média da especificação da característica

T – Valor alvo da dimensão

$\hat{\sigma}^2$ – Variância da dimensão

De acordo com Tang e Xu (2002) os pesos podem apresentar diferentes combinações, como $w_1+w_2=1$, $w_1>0$, $w_2>0$ gerando um conjunto de soluções para otimizações multiobjetivo.

Analogamente, o EQM pode ser estendido para problemas multiobjetivo, quando há varias características, por meio de algum tipo de operador de aglutinação, como a soma ponderada (YANG e SEN, 1996; BUSACCA *et al.*, 2001). Neste caso, a EQM é expresso conforme a equação (32).

$$EQM_T = \sum_{i=1}^p [(\hat{\mu}_i - T_i)^2 + \hat{\sigma}_i^2] \quad (32)$$

De acordo com K oksoy (2006), se diferentes import ancias foram necessárias para cada EQM, a equa o (32) pode ser modificada, com o acréscimo de pesos, ficando conforme equa o (33).

$$EQM_T = \sum_{i=1}^p w_i EQM_i = \sum_{i=1}^p w_i [(\hat{\mu}_i - T_i)^2 + \hat{\sigma}_i^2] \quad (33)$$

Por meio da combina o das equa es (32) e (33) a abordagem ao Erro Quadrático Médio para um problema multiobjetivo envolvendo SRD pode ser escrito pela equa o (34).

$$EQM_T = \sum_{i=1}^p [w_i [(\hat{\mu}_i - T_i)^2 + (1 - w_i) \hat{\sigma}_i^2] \quad (34)$$

3.5 Método do Critério Global

Grande parte dos problemas de otimização envolve objetivos múltiplos e, desta forma, não se pode aplicar a otimização isolada de cada objetivo. Adicionalmente, muitas vezes os objetivos são conflitantes, ou seja, melhorar algum destes objetivos consiste em piorar algum outro (OLIVEIRA, 2005).

Geralmente, as otimizações multi-objetivo consistem em minimizar uma ou mais funções objetivo, sujeitas ou não a restrições que devem ser satisfeitas pela solução encontrada, que podem ser de igualdade, desigualdade e restrições laterais.

Segundo Rao (1996) o Método do Critério Global (MCG) é um método utilizado na otimização multivariada. Neste método, a solução ótima é um vetor de variáveis de decisão que minimiza algum critério global, que tem por objetivo uma solução ótima, por meio da minimização da soma dos quadrados dos desvios das funções objetivos individuais em relação à solução ideal para cada resposta dentro da região praticável.

De acordo com Osyczaka (1984), existem diferentes equações aplicadas ao critério global, mas cabe ao pesquisador definir a função que melhor o descreve, de forma que se possa obter a solução mais próxima possível da solução ideal. A equação (35) representa o método em questão:

$$\text{Minimizar } F(X) = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{f_i(X^*) - f_i(X)}{f_i(X^*)} \right\}^s \quad (35)$$

$$\text{Sujeito a: } g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$$

Onde:

$F(X)$ – Função do Critério Global

$f_i(X^*)$ – Alvo de cada função objetivo

$f_i(X)$ – Função Objetivo

k – Número de objetivos

s – Constante

$g_j(X)$ – Restrições

Para a equação (35) Boychuk e Ovchinnikov (1973) propuseram $s = 1$ e Salukvadze (1974) propôs $s = 2$, que é o valor comumente utilizado, mas outros valores também podem ser assumidos.

Segundo Gomes *et al.* (2011), por meio da equação (35), com alvos definidos para cada resposta de interesse, os múltiplos objetivos são combinados em uma única função, que

se torna a função de otimização global para o processo, que pode ser solucionado por diferentes algoritmos, como o Algoritmo Genético (AG) e Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), por exemplo, sendo este segundo o aplicado neste trabalho.

3.6 Gradiente Reduzido Generalizado

Problemas de Otimização Não-Linear (*Nonlinear Problem* – NLP) podem ser resolvidos por diferentes métodos conhecidos, sendo o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (*Generalized Reduced Gradient* – GRG) o de maior aplicação, pois apresenta grande robustez e eficiência dentre os métodos de otimização de restrições não lineares disponíveis (KÖSKOY e DOGANAKSOY, 2003).

Segundo Carlyle *et al.* (2000), além de sua eficiência, outro fator que contribui para a ampla aplicação do algoritmo (GRG) a muitos tipos de problemas de otimização Não-Lineares é a disponibilidade no programa Excel[®] da *Microsoft Office*.

Este método de resolução de problemas de programação não linear é aplicado a problemas com restrições. O método prevê apenas a utilização de restrições lineares ou não lineares de igualdade. No entanto, para resolver casos onde a restrição não for de igualdade, acrescentam-se variáveis de folga, caso a restrição seja do tipo menor ou igual, ou variáveis de excesso, caso a restrições seja do tipo maior ou igual.

De acordo com Kōksoy (2007), o método GRG é conhecido como um método primal, que, apresenta três significantes vantagens:

- a. Se o processo termina antes da confirmação do ótimo, o último ponto encontrado é viável devido ao fato de que cada ponto gerado no processo de pesquisa é viável e provavelmente próximo do ótimo;
- b. Se o método gera uma sequência convergente, o ponto limite garante, pelo menos, um mínimo local;
- c. A maioria dos métodos primais são geralmente absolutos, não dependendo de uma estrutura especial, tais como a convexidade.

Para Lasdon *et al.* (1978), Nash e Sofer (1996), Koksoy e Doganaksoy (2003) uma forma geral para a programação não-linear é a descrita na equação (36).

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } F(x) \\
 & \text{Sujeito a: } g_j(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \\
 & l_j \leq x_j \leq u_j, j = 1, \dots, 1, n
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Onde:

$F(\mathbf{x})$ – Função objetivo do GRG

x – Vetor de n variáveis de processo (x_1, \dots, x_n)

$g_j(\mathbf{x})$ – Restrições

l_j e u_j – Limites inferior e superior do processo

Segundo Lasdon *et al.* (1978), o modelo geral do método GRG é baseado na conversão das restrições do problema para uma irrestrrição, usando substituição direta. O vetor da variável de processo \vec{x} pode ser particionado em dois subvetores $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^B, \mathbf{x}^N)^T$, onde \mathbf{x}^B é o vetor das variáveis básicas, dependentes, e \mathbf{x}^N é o $n-m$ vetor das variáveis não básicas, independentes. Reescrevendo o problema de programação não linear, a maneira reduzida poderia ser descrita conforme a equação (37), (LASDON *et al.* 1978; CHEN e FAN, 2002).

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(x) &= f(x^B, x^N), x^N \\ \text{Sujeito a: } &l_N \leq x^N \leq u_N \end{aligned} \quad (37)$$

Onde:

l_N e u_N são vetores dos limites para x^N .

Iniciando-se com um ponto viável x^k , o algoritmo GRG tenta encontrar uma direção de movimento para otimizar a função objetivo. A direção do movimento pode ser obtida pelo gradiente reduzido através da Equação (38).

$$r^k(x_N) = \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_N^k} \right]^T - \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_B^k} \right]^T \left[\frac{\partial g^k}{\partial x_B^k} \right]^{-1} \left[\frac{\partial g^k}{\partial x_N^k} \right] \quad (38)$$

Segundo Lasdon *et al.* (1978), o algoritmo pára quando a magnitude do gradiente reduzido no ponto corrente é tão pequeno quanto o desejado. De outro modo, um procedimento de pesquisa é executado para localizar um novo ponto na direção do gradiente reduzido. Este procedimento é executado repetidamente.

4. CAPACIDADE DE PROCESSOS

Segundo Montgomery (2009), a distribuição normal é provavelmente a mais importante das distribuições, tanto na teoria quanto na aplicação da estatística. Este tipo de distribuição é simétrica, com uma curva em forma de sino, uma média (μ) e uma variância (σ^2), conforme ilustrado na Figura 4.1.

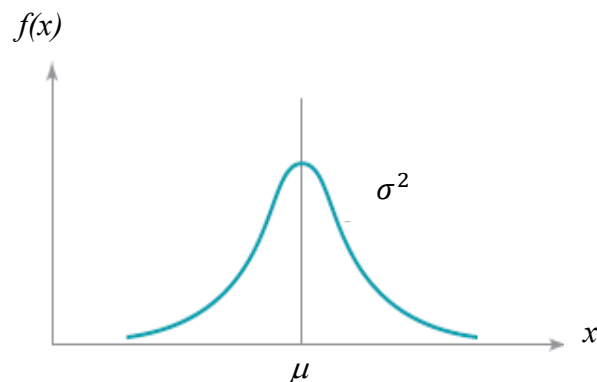


Figura 4.1 - Histograma de uma distribuição normal
(Fonte: Montgomery 2009)

O histograma é útil na análise de capacidade, visto que apresenta uma impressão visual e imediata do desempenho do processo. A Figura 4.2 (a) mostra um processo com uma capacidade potencial adequada, porém com a média fora de centro. A Figura 4.2 (b) mostra um processo com baixa capacidade, resultado de variabilidade excessiva (MONTGOMERY, 2009).

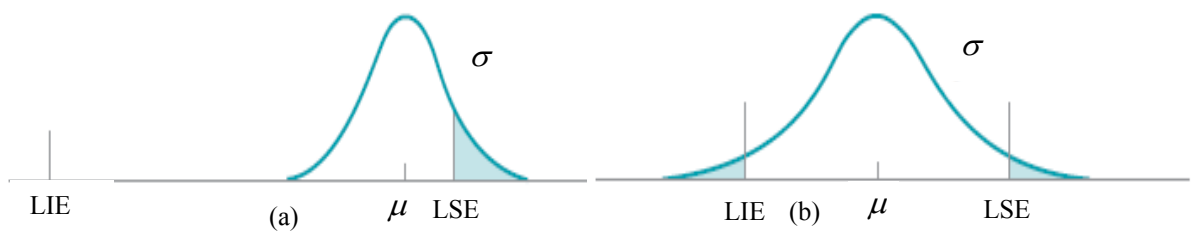


Figura 4.2 - Histograma – (a) processo com média fora de centro. (b) processo com variabilidade excessiva.
(Fonte: Montgomery 2009)

Numa distribuição normal 68,26% dos valores da população estão contidos entre os limites definidos entre a média, mais ou menos um desvio padrão ($\mu \pm 1\sigma$); 95,46% estão entre os limites entre a média, mais ou menos dois desvios padrão ($\mu \pm 2\sigma$) e 99,73% dos

valores estão contidos entre os limites definidos entre a média, mais ou menos três desvios padrão ($\mu \pm 3\sigma$). Estes percentuais são calculados por meio da área entre cada faixa de desvio padrão. A Figura 4.3 mostra a distribuição destas áreas no histograma de uma distribuição normal.

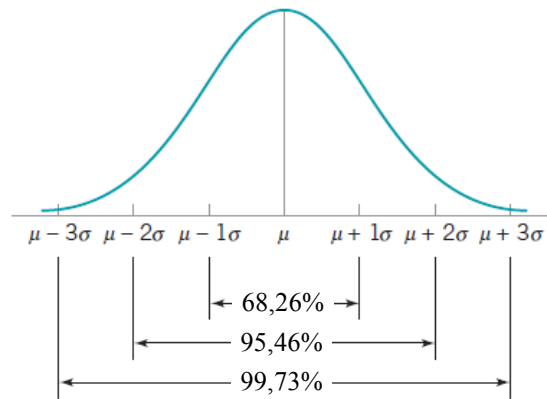


Figura 4.3 - Distribuição das áreas de uma distribuição normal
(Fonte: Montgomery 2009)

Segundo Torminato (2004), analisar a capacidade de um processo permite ao especialista diagnosticar o estado de controle dos processos de produção, verificando se estes são capazes, ou não, de satisfazer as solicitações dos clientes, ou seja, a capacidade de um processo é a variabilidade mínima que pode ser alcançada depois que todas as causas especiais forem eliminadas. Assim, a capacidade representa o melhor desempenho de um processo quando ele está operando sob controle estatístico.

Pode-se definir capacidade do processo como um estudo formal para avaliar a capacidade do processo, na forma de uma distribuição de probabilidades que tem uma média e um desvio padrão. É um índice numérico que compara um comportamento de um produto ou processo com as especificações de engenharia.

Segundo Montgomery (2009), capacidade de processo se refere à uniformidade do processo em questão, por meio da medição de suas características chaves. Há duas formas de pensar nesta variabilidade:

- Variabilidade natural ou inerente de uma característica crítica para a qualidade num determinado momento, que se refere à variabilidade instantânea.
- Variabilidade natural de uma característica crítica para a qualidade ao longo do tempo.

Para aplicação de estudos de capacidade é necessário que o processo esteja sob controle estatístico, ou seja, deve haver apenas causas comuns atuando no processo, sem existir causas especiais.

4.1 Índices de Capacidade Potencial do Processo (C_p e C_{pk})

Uma das formas de se expressar a capacidade do processo é através do cálculo do índice de capacidade do processo (C_p), que define a capacidade potencial do processo, relacionando a variabilidade inerente deste processo com suas especificações, calculado conforme equação (39). Segundo González e Werner (2009), este índice relaciona a variabilidade permitida ao processo com a variabilidade natural do processo, e com isso tem-se que quanto maior for o valor do C_p , maior será a capacidade do processo em satisfazer às especificações. Porém, o índice C_p , não considera a localização do processo para o seu cálculo, e como consequência disto, para um determinado valor de C_p , pode-se ter qualquer percentual de itens fora das especificações. Este percentual vai depender apenas de onde está localizada a média do processo e por esta razão, o índice C_p mostra apenas o quanto o processo é potencialmente capaz de produzir dentro da dispersão permitida no projeto.

Segundo González e Werner (2009), na prática, muitas vezes, o processo não está centrado no valor nominal da especificação, então o uso do índice C_p é insuficiente para uma análise correta do processo. Para processos não centrados o índice de capacidade (C_{pk}) deve ser aplicado, pois é calculado considerando a distância da média do processo em relação aos limites de especificação, que é calculado pela equação (40).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (39)$$

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3\sigma}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\sigma} \right) \quad (40)$$

Onde:

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSE – Limite Superior de Especificação

σ – Desvio Padrão Estimado

$\bar{\bar{X}}$ – Média das médias dos subgrupos da amostra

Quando o processo está centrado no valor nominal da especificação, o C_p é igual ao C_{pk} . Caso o C_p seja diferente do C_{pk} , o processo está descentrado, ou seja, a média não coincide com o valor nominal da especificação (GONÇALEZ E WERNER, 2009).

O índice C_{pk} mede quantos desvios padrão estão situados no intervalo entre a média do processo e o limite especificado mais próximo. Quanto maior o C_{pk} , menor a dispersão do processo ou menor o afastamento da média do processo em relação ao alvo.

Na equação (39) e (40), o desvio padrão é calculado com a equação (41).

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (41)$$

Onde:

\bar{R} – Média das amplitudes de uma série de subgrupos de tamanho constante.

d_2 – Constante que varia de acordo com o tamanho da amostra n .

Na equação (45) o desvio padrão estimado é calculado com base nos subgrupos oriundo das amplitudes (R) de cada subgrupo. O desvio padrão dos valores individuais é maior que o desvio padrão baseado nos subgrupos, não incluindo o efeito da variabilidade do processo entre os subgrupos.

Segundo Montgomery (2009), o valor de C_p tem uma usual interpretação prática para determinar o percentual da especificação que está sendo usada pelo processo (P), definido pela equação (42).

$$P = \left(\frac{1}{C_p} \right) \cdot 100 \quad (42)$$

A *Automotive Industry Action Group* (AIAG), que consiste de três grandes montadoras de automóveis, Ford, General Motors e Chrysler orienta que os índices C_p e C_{pk} sempre devem ser avaliados em conjunto, visto que um valor de C_p maior que o valor do C_{pk} indica uma oportunidade de melhoria no processo, por meio da centralização do processo e que não pode ser detectado apenas com a análise do C_{pk} .

Segundo Montgomery (2009), em função do valor calculado do índice de capacidade do processo, pode se determinar a quantidade de peças fora da especificação em partes por milhão (ppm), mostrado na Tabela 4.1, válido para dados com distribuição normal, com processo sobre controle estatístico e média centrada entre o limite superior e inferior da especificação.

Tabela 4.1 – Peças fora da especificação em função da capacidade do processo

Índice de Capacidade	Peças fora da especificação em ppm	
	Especificação Unilateral	Especificação Bilateral
0.25	226,628	453,255
0.50	66,807	133,614
0.60	35,931	71,861
0.70	17,865	35,729
0.80	8,198	16,395
0.90	3,467	6,934
1.00	1,35	2,7
1.10	484	967
1.20	159	318
1.30	48	96
1.40	14	27
1.50	4	7
1.60	1	2
1.70	0.17	0.34
1.80	0.03	0.06
2.00	0.0009	0.0018

(Fonte: Montgomery 2009)

4.2 Índices de Desempenho Potencial do Processo (P_p e P_{pk})

Segundo Montgomery (2009), a AIAG estabelece o uso do C_p e C_{pk} , quando o processo está sob controle. Quando o processo não está sob controle a AIAG recomenda usar os índice de desempenho do processo P_p e P_{pk} . Esses índices analisam se a amostra gerada do processo tem condição de atender as especificações estabelecidas, não sendo adequados para inferências sobre a condição geral do processo. Esses índices são calculados pelas equações (43) e (44):

$$P_p = \frac{LSE - LIE}{6S} \quad (43)$$

$$P_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3S}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3S} \right) \quad (44)$$

Onde:

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSE – Limite Superior de Especificação

S – Desvio Padrão Amostral

$\bar{\bar{X}}$ – Média das médias dos subgrupos da amostra

O P_{pk} é um indicador do desempenho baseado na variação do processo através do conjunto completo de dados, ou seja, considera a variação entre os subgrupos do estudo. O cálculo do desvio-padrão amostral é determinado pela equação (45).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (45)$$

Onde:

X_i – leitura individual de uma amostra

\bar{X} – média das médias dos subgrupos leituras individuais da amostra

n – tamanho da amostra

Segundo o manual do Processo de Aprovação de Peças de Produção (PAPP) 4ª Edição, 2006, os requerimentos de capacidade do processo são definidos como:

Para processos existentes o índice de desempenho do processo deve ser definido pelos clientes. Se este requisito não for estabelecido os seguintes valores devem ser aplicados:

- Para processos estáveis e com distribuição normal, o $C_{pk} \geq 1,33$ deve ser alcançado.
- Para processos cronicamente instáveis com a saída atendendo a especificação e com comportamento previsível, o $P_{pk} \geq 1,67$ deve ser atingido.

Ainda de acordo com o manual do PAPP, os requerimentos relacionados ao desempenho do processo devem ser interpretados conforme Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Desempenho do Processo x Interpretação dos Valores

Desempenho do Processo	Interpretação
P_p e $P_{pk} > 1,67$	O processo atende aos requisitos do cliente.
$1,33 \leq P_{pk} \leq 1,67$	O processo pode ser aceito. Contatar o representante autorizado do cliente para revisão dos resultados do estudo.
$P_{pk} < 1,33$	O processo não atende aos requisitos do cliente. Contatar o representante autorizado do cliente para revisão dos resultados do estudo.

(Fonte: Manual do Processo de Aprovação de Peças de Produção (PAPP) 4ª Edição, 2006)

Segundo o manual de referência do Controle Estatístico do Processo (CEP) não existe um único índice que possa descrever um processo, e recomenda que todos os quatro índices (C_p , C_{pk} , P_p e P_{pk}) sejam calculados no mesmo conjunto de dados e sua comparação pode indicar os potenciais problemas do processo e auxiliar na medição e priorização da melhoria de longo prazo.

5. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo mostra a aplicação do método experimental na manufatura de uma indústria de autopeças, multinacional de grande porte do sul de Minas Gerais, especificamente no processo de retificação cilíndrica de anéis de ferro fundido nodular martensítico recoberto com cromo duro no seu diâmetro externo. Desta forma, serão detalhadas as etapas realizadas nos experimentos, como o planejamento, a máquina retificadora utilizada, insumos e parâmetros de usinagem, bem como os resultados práticos e estatísticos obtidos ao longo do estudo.

5.1 Material e Recobrimento dos Anéis de Pistão

Os anéis de pistão são peças circulares auto expansivas com uma abertura. Este produto exerce pressão contra a parede do cilindro do motor de combustão interna. No caso em questão, o produto se trata de um anel de compressão, conforme mostrado na Figura 5.1, assim denominado por ser o primeiro anel da parte superior do cilindro e que tem a principal função de vedar a câmara de combustão, além de ser responsável por transmitir calor do pistão para a parede do cilindro e controlar o filme de óleo para evitar o atrito seco.

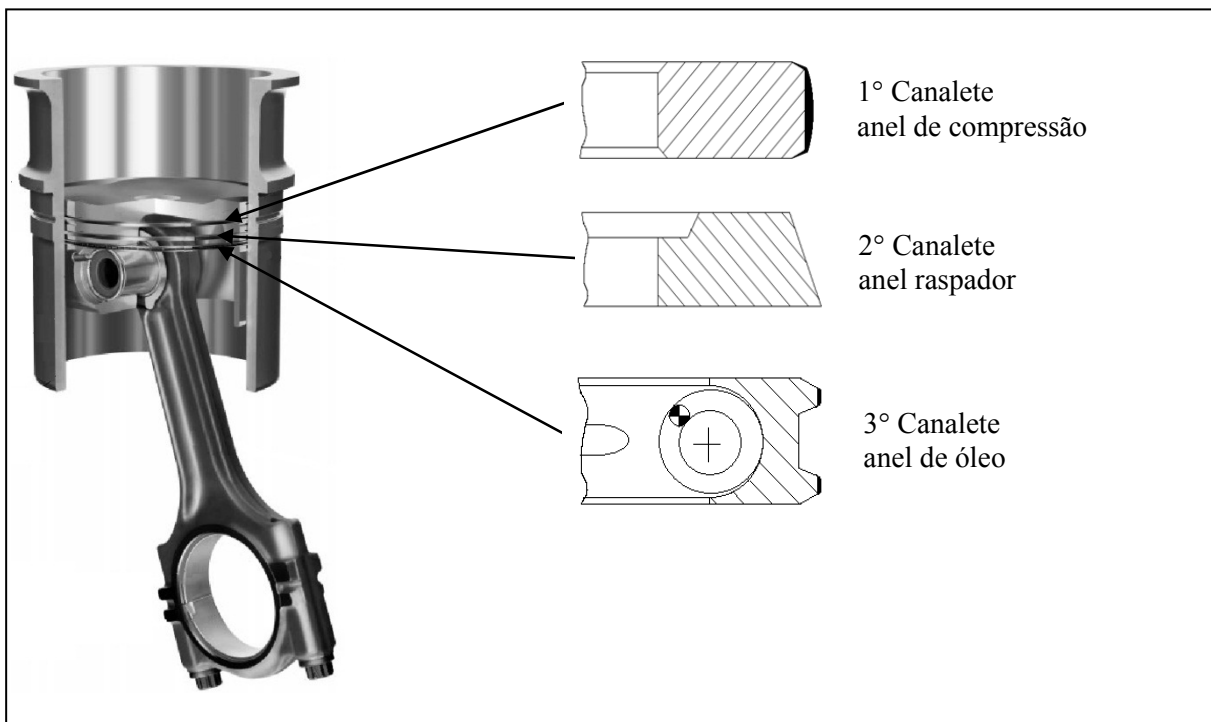


Figura 5.1 – Ilustração da célula de potência de um motor de ciclo Otto

Fonte: MAHLE Metal Leve S.A.

O produto a ser usinado nos diversos experimentos, é recoberto em seu diâmetro externo por uma fina camada de cromo duro, com dureza de 800 HV min e espessura de 0,10 mm, sobre o metal base de ferro fundido nodular martensítico. Este produto possui as principais dimensões, diâmetro externo, altura paralela, espessura radial, folga entre pontas e espessura da camada de cromo, representadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Principais dimensões do anel de pistão aplicado nos experimentos

Diâmetro Externo	Altura Paralela	Espessura Radial	Folga entre Pontas	Espessura da Camada de Cromo Duro
82,00	2,00 $\pm 0,010$	3,00 $\pm 0,15$	0,20 $\pm 0,10$	0,10 mínimo

A Figura 5.2 ilustra as principais dimensões do anel em questão, além da secção transversal, evidenciando a camada de cromo duro depositada no diâmetro externo.

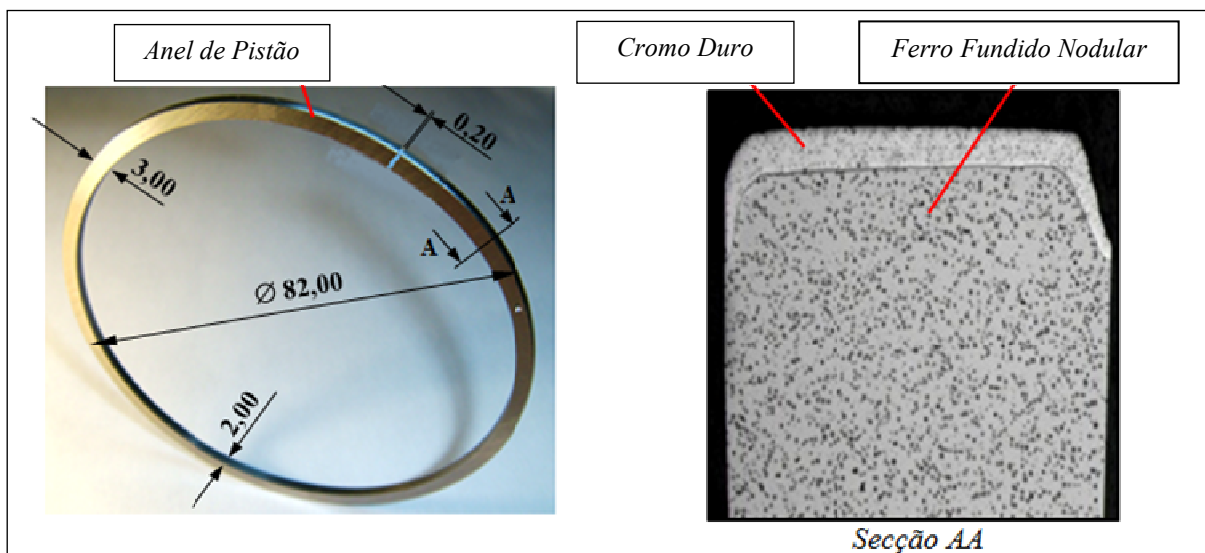


Figura 5.2 - Anel de Pistão

A Tabela 5.2 mostra as principais características do material, ferro fundido nodular martensítico, do produto anel a ser retificado nos experimentos.

Tabela 5.2- Características do Ferro Fundido Nodular

Ferro Fundido Nodular Martensítico - ISO 6621-3 Subclasse MC 53	
Microestrutura	Martensita temperada com grafita nodular e distribuição fina de carbetos
Dureza	290 – 420 HV 28 – 43 HRC
Módulo de Elasticidade	145.000 – 193.000 MPa
Módulo de Ruptura	1.300 MPa (mínimo)

Na Figura 5.3, é mostrada a estrutura metalográfica do ferro fundido atacado com solução de nital a 3% evidenciando os nódulos de grafita e carbetos.

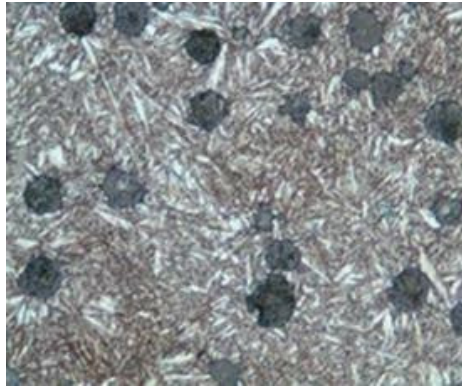


Figura 5.3 - Ampliação: 500x – Ataque: Nital 3%

Na Tabela 5.3, está descrita a composição química do material base que possibilita o melhor entendimento do tipo de material.

Tabela 5.3 - Composição Química do Material Base

Composição Química (%)							
C (carbono)	Si (silício)	Mn (manganês)	P (fósforo)	S (enxofre)	Ni (níquel)	Cr (Cromo)	Mo (molibdênio)
3.30 – 4.10	1.70 – 3.00	0.15 – 0.80	0.15 max	0.03 max	0.70 max	0.12 max	0.30 max

Tratando especificamente do recobrimento de cromo duro, que é o material a ser efetivamente retificado nos ensaios, é mostrado nas Figura 5.4 e Figura 5.5 como o mesmo está depositado no metal base de ferro fundido.

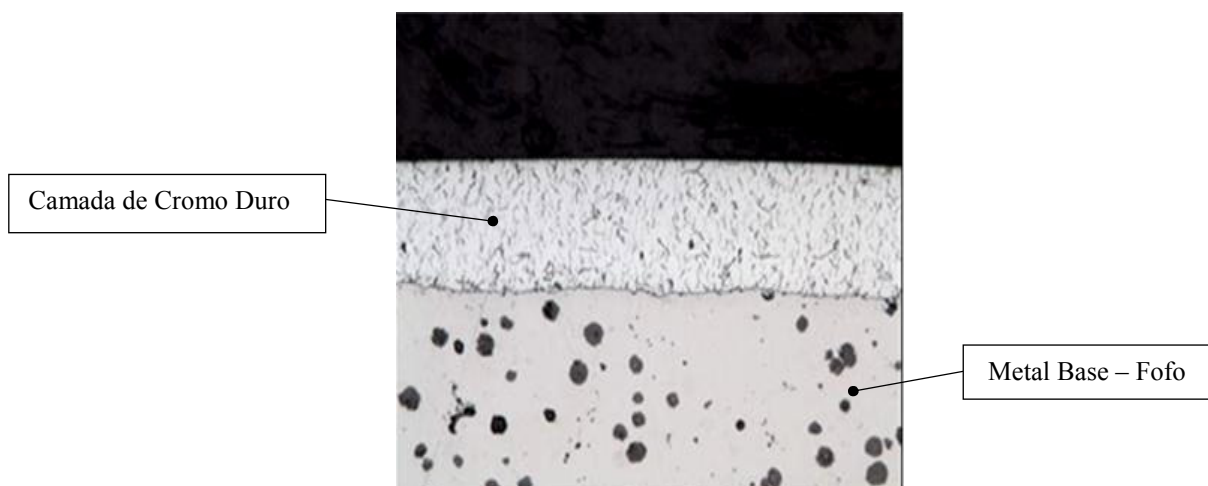


Figura 5.4 - Cromo Duro sobre Fofu Nodular – ampliação 200x – ataque NaOH 1%

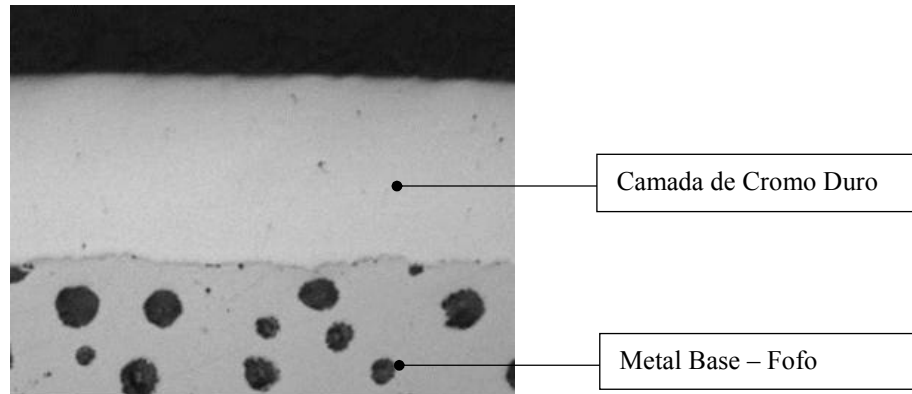


Figura 5.5 - Cromo Duro – ampliação 500x – Sem Ataque

O cromo é um material com tensões internas em sua estrutura, sendo importante o controle das microfissuras, de modo a minimizar o aparecimento de macro trincas o que é prejudicial ao produto. O cromo duro aplicado nos ensaios tem as características mostradas na tabela a seguir:

Tabela 5.4 - Características Cromo Duro

Cromo Duro	
Microestrutura	Monofásica
Densidade de Fissuras	40 – 120 fissuras por mm/linear
Dureza	800 HV min

5.2 Máquina e Ferramental

A máquina utilizada na experimentação é uma retificadora cilíndrica específica para fabricação de anéis de pistão, conforme Figura 5.6. O equipamento possui comando numérico computadorizado (CNC), no qual são inseridos os parâmetros de retificação e dressagem.



Figura 5.6 - Retificadora Cilíndrica

A fixação dos anéis é realizada por meio de mandril e espaçadores, formando dois pacotes de peças, que são retificadas em duas etapas, através de dois movimentos de mergulho do rebolo, executando o 1º pacote à esquerda, próximo da placa de arraste e o segundo pacote à direita, próximo ao contraponto, estando em condições diferentes de rigidez. Próximo a região de fixação do mandril montado com os anéis fica localizado o dressador com ponta única de diamante, responsável por reafiar e perfilar o rebolo utilizado na retificação. A Figura 5.7 mostra o conjunto de ferramental e anéis montados na retificadora.

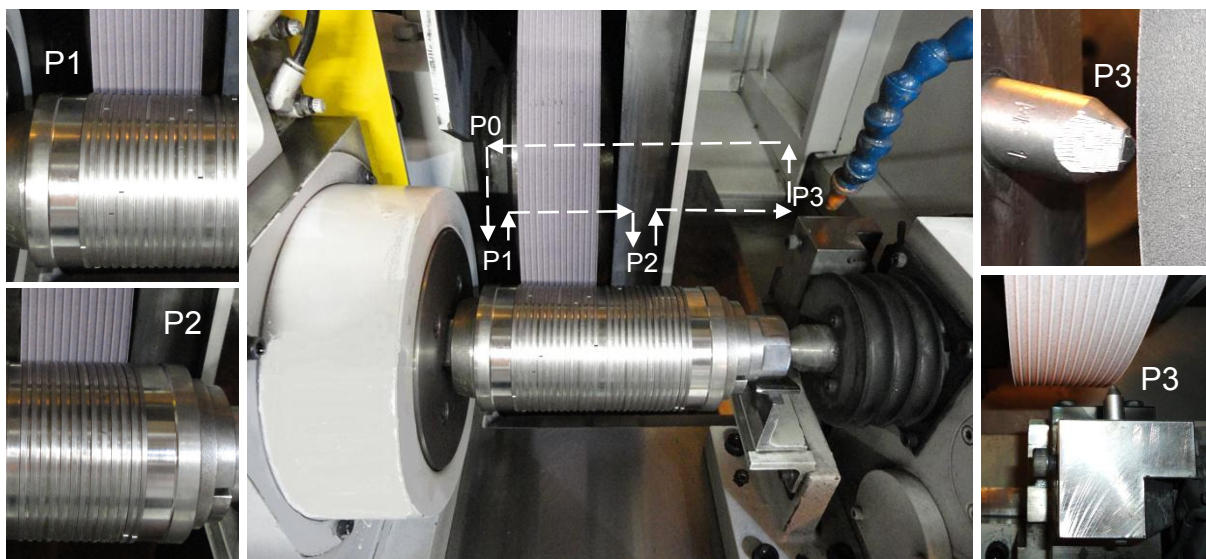


Figura 5.7 - Fixação das Peças e Posição de Dressagem

A ferramenta de corte aplicada é um rebolo reto de óxido de alumínio rosa de ligante vitrificado, RT 510 x 52 x 203,2 – DR 240 J6 V16, desenvolvido entre fabricante e usuário, especificamente para ser aplicado em produtos com recobrimento de cromo duro, com as características e dimensões mostradas nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

Tabela 5.5 - Forma e Dimensões do Rebolo

Forma	Diâmetro Externo [mm]	Largura [mm]	Diâmetro Interno [mm]
RT	510	52	203,2

Tabela 5.6 - Características do Rebolo

Abrasivo	Grão	Dureza	Estrutura	Ligante
DR	240	J	6	V16
Óxido de Alumínio Rosa	Muito Fino	Mole	Normal	Vitrificada

Para dressagem do rebolo, é aplicado um dressador com ponta única. A pedra de diamante natural é fixada em um corpo de aço para permitir a fixação na máquina. Como este dressador também tem a função de perfilar o rebolo, a ponta do diamante deve ser delgada, ou seja, com uma geometria específica, conforme mostrado na Figura 5.8. Logo, a pedra de diamante não possui mais a sua geometria natural, pois passa por um processo de lapidação até atingir as dimensões especificadas em desenho.



Figura 5.8 - Dressador Ponta Única

O dressador é montado na máquina com inclinação de 10° para que apenas o vértice da pedra trabalhe no rebolo, permitindo a utilização dos dois vértices e promovendo ao rebolo uma dressagem adequada. Depois de desgastados, os dressadores são enviados para relapidação, para retornar à geometria especificada e ser reutilizado.

5.3 Método Experimental

Para a otimização do processo de retificação, será aplicado um Arranjo Cruzado na identificação dos fatores que influenciam a resposta na presença de ruídos, concomitantemente com a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) usada na criação da matriz de experimentos com pontos centrais e axiais. Também é aplicada a equação do Erro Quadrático Médio (EQM) no cálculo das respostas dos experimentos, bem como o Método do Critério Global (MCG) na otimização de múltiplas respostas, além do auxílio do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) na solução das equações. A Figura 5.9 apresenta o fluxo das fases do processo experimental executadas durante o trabalho.

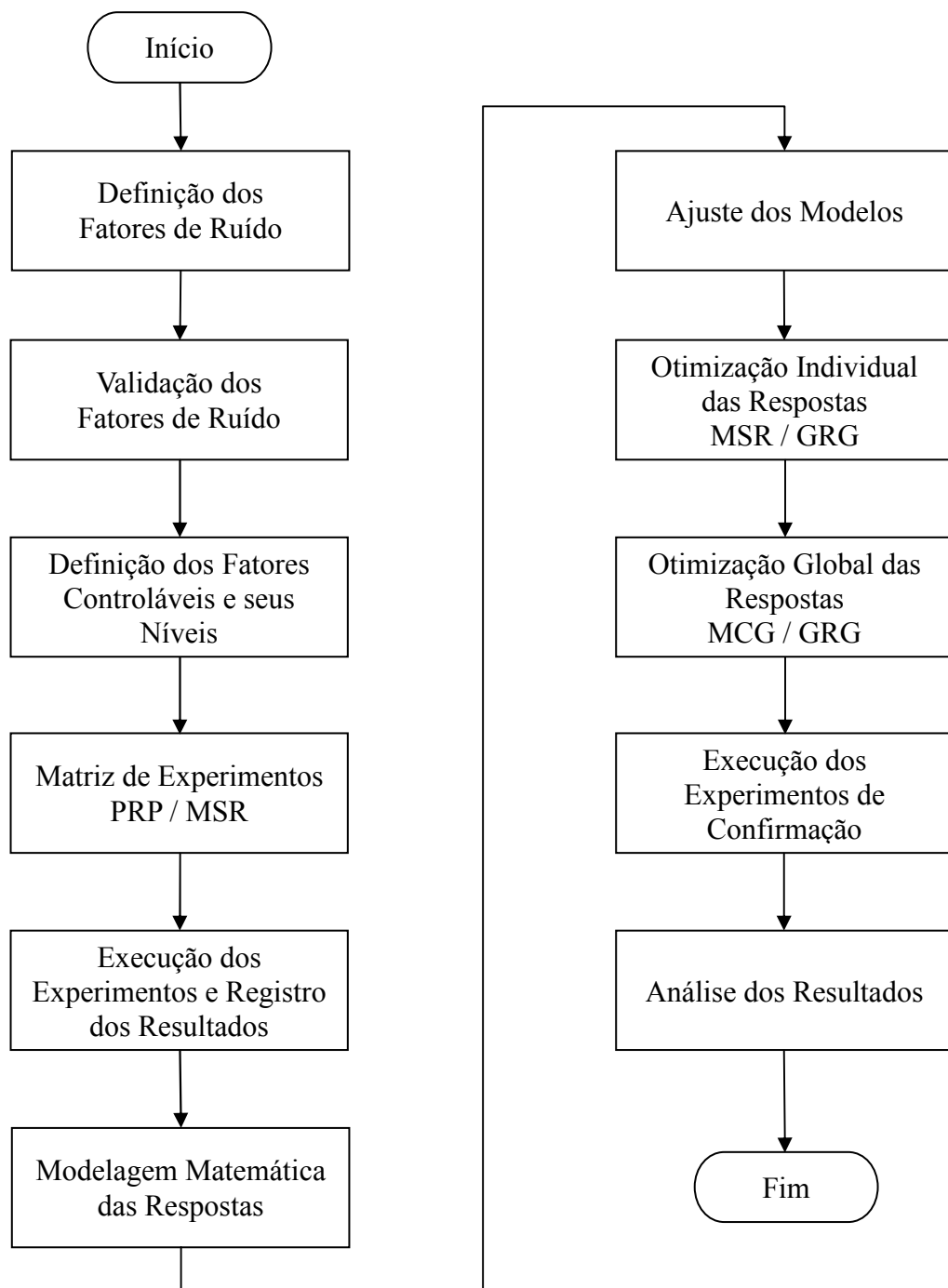


Figura 5.9 - Método Experimental

Os anéis de pistão utilizados nos experimentos possuem uma determinada singularidade no seu diâmetro externo, com um perfil formado por dois raios, com três dimensões que devem ser atendidas para que o produto esteja dentro da especificação de desenho. Este perfil é chamado de perfil abaulado e as dimensões foram nomeadas como T_1 , T_2 e T_3 , conforme mostrado na Figura 5.10, sendo estas dimensões alvos dos estudos dos experimentos e que foram usadas para cálculo das respostas dos experimentos.

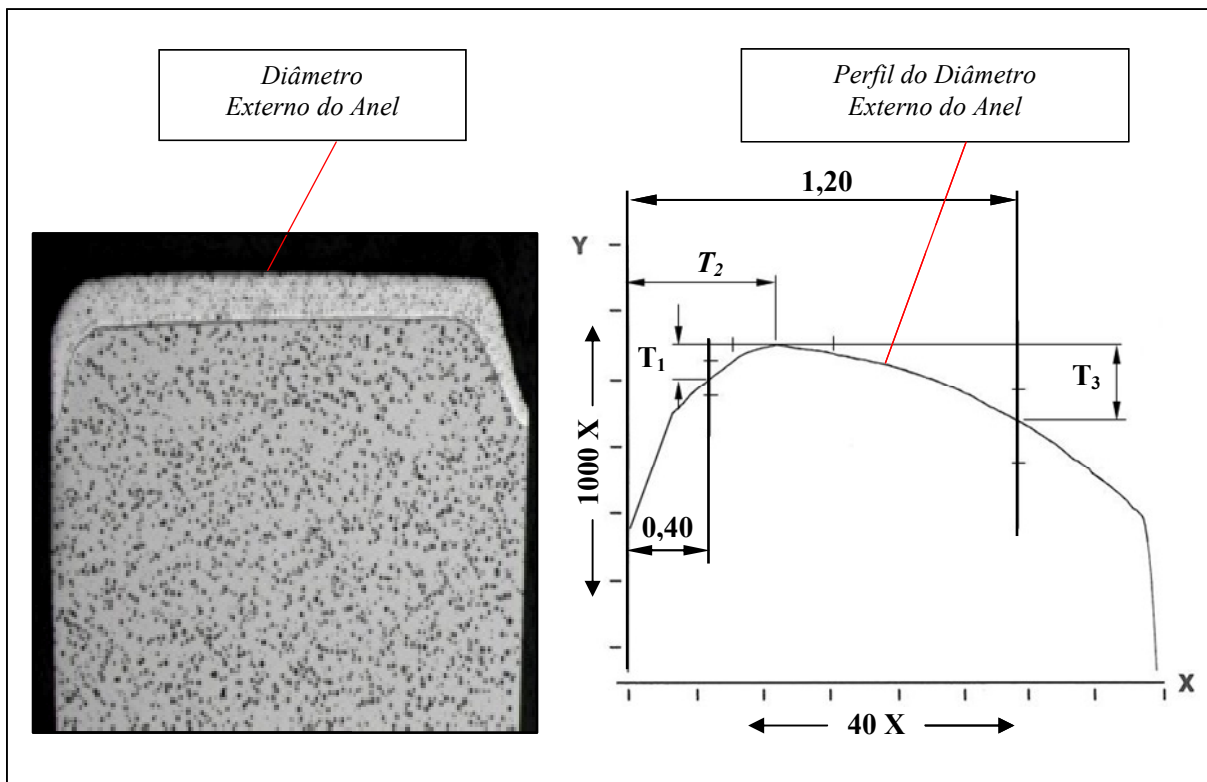


Figura 5.10 - Perfil do Diâmetro Externo dos Anéis de Pistão

A Tabela 5.7 mostra os valores mínimos e máximos para as dimensões T_1 , T_2 e T_3 , especificado no desenho do produto, para os anéis aplicados nos ensaios, para os quais o processo de retificação deve ser robusto e propiciar uma variância adequada para que apresente índice de capacidade $P_{pk} \geq 1,33$, que é o valor de capacidade mínimo exigido pelo mercado automobilístico.

Tabela 5.7 - Valores do Perfil do Diâmetro Externo dos Anéis

Especificações	Dimensões		
	T_1 [mm]	T_2 [mm]	T_3 [mm]
LIE	0,001	0,300	0,010
Alvo	0,004	0,400	0,016
LSE	0,007	0,600	0,022

As três dimensões são produzidas simultaneamente, visto que a geometria do produto é definida pelo rebolo que, conforme comentado anteriormente, é perfilado com os valores definidos no comando CNC da retificadora. A retificação é executada por mergulho, num total de 13 peças em cada pacote, totalizando 26 peças por ciclo, promovendo elevado esforço na máquina se comparado com uma retificação por passagem. Desta forma, a otimização dos parâmetros deve promover robustez ao processo para as três dimensões, que são importantes

para o desempenho do produto durante sua aplicação no motor. Para estas três dimensões serão utilizados os EQM's como respostas da matriz de experimentos.

Outro item do processo que foi considerado nos experimentos é o desgaste do dressador de ponta única de diamante, que deve ser o menor possível para que o custo do processo seja reduzido. Este desgaste se dá pelo atrito do rebolo na pedra de diamante e pelo aquecimento promovido por este atrito, que dependendo dos parâmetros utilizados pode ser maior ou menor. Este desgaste é medido indiretamente por meio da vida útil do dressador, que num determinado momento atinge seu desgaste máximo e deve ser substituído, pois interfere nas dimensões T_1 , T_2 e T_3 , reduzindo a capacidade do processo fazendo com que as três dimensões tendam a sair dos limites das especificações, sendo então a vida útil do dressador uma das respostas dos experimentos.

5.4 Ruídos

Inicialmente, foram discutidos os ruídos que influenciam as dimensões das peças e que interferem na robustez do processo, sendo a posição do pacote de anéis (Z_1) e os eixos utilizados como mandris para fixação das peças (Z_2), os dois ruídos considerados.

Como já mencionado anteriormente, cada ciclo do processo é composto pela retificação de dois pacotes de anéis que são fixados em um mandril e, posteriormente, montados entre pontas na retificadora, sendo que a condição de rigidez destes pacotes não é a mesma, pois o pacote à esquerda que está próximo ao cabeçote do eixo árvore apresenta menor balanço em relação ao segundo pacote que está próximo ao contraponto, onde há um maior balanço do sistema, conforme mostrado na Figura 5.11.

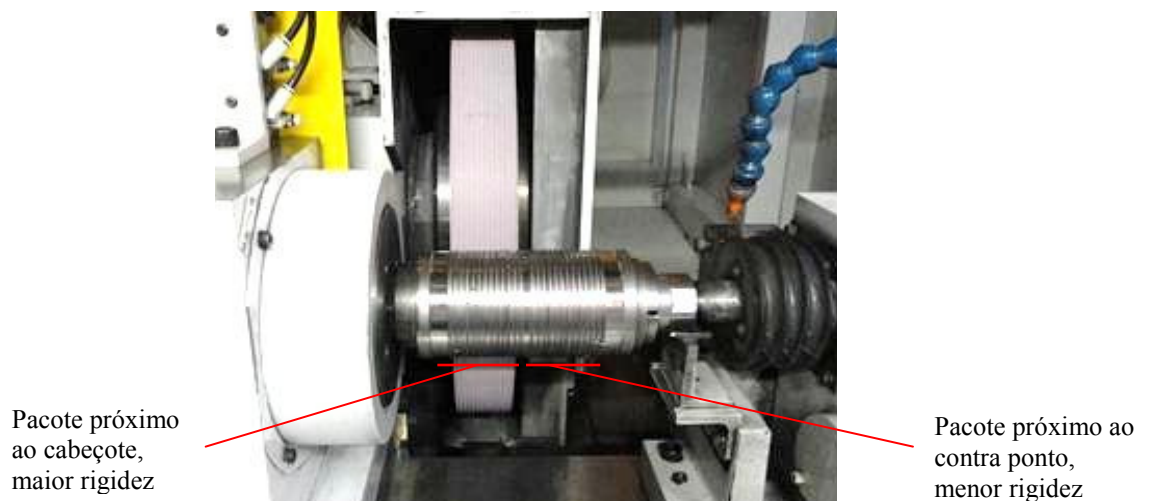


Figura 5.11 - Posição dos Pacotes de Anéis na Árvore

Para que após cada final de ciclo a máquina não fique parada aguardando a desmontagem e montagem dos próximos anéis no mandril, há dois conjuntos deste tipo de ferramental. Logo, enquanto um está na máquina, em processo, o outro está sendo preparado para o próximo ciclo. Os mandris diferentes também foram considerados como um ruído no sistema, pois cada conjunto deste mandril é composto por diferentes peças, as quais possuem diferenças construtivas e geram pequeno erro de posição dos anéis na retificadora, podendo influenciar as dimensões da peça. A Figura 5.12 demonstra ambos os mandris preparados com os anéis.



Figura 5.12 - Mandris de Fixação dos Anéis

Os primeiros ensaios realizados tiveram o objetivo de comprovar os fatores escolhidos como ruídos, que realmente interferiam na dimensão da peça. Para tanto, foram retificados pacotes de anéis na posição nomeada como Lado Placa e pacotes na posição nomeada como Lado Contraponto.

Após a confirmação do primeiro ruído, o mesmo procedimento foi realizado para o segundo, que se refere aos dois mandris de anéis e que estão demonstrados na Tabela 5.8, condições nas quais foram produzidas peças e, assim como na primeira investigação, foram medidas e comparadas pela ANOVA.

Tabela 5.8 - Ruído da Posição dos Pacotes

Ruído Fator	Níveis dos Ruídos	
	(-)	(+)
Z_1	Pacote Próximo a Placa	Pacote Próximo ao Contra Ponto
Z_2	Mandril 1	Mandril 2

Ambos os experimentos apresentaram o resultado esperado, que foram confirmados por meio da análise de variância entre as diferentes condições. Como mostrado na Tabela 5.9, que foi gerada com o programa Minitab[®], o valor P é menor que 0,05 ou 5%, confirmando que as médias das amostras são diferentes, e que a posição dos pacotes e os diferentes mandris realmente influenciavam a característica dimensional estudada.

Tabela 5.9 - Análise de Variância para Posição dos Pacotes – Ruído 1

One-way ANOVA – Posicionamento do Pacote de Anéis & Mandril 1 e Mandril 2							
Individual 95% CIs para a média baseado no Desvio Padrão.							
Dimensão	Nível (Z_i)	N	Média	Desvio Padrão	F	P	
Posicionamento do Pacote de Anéis	T_1	Lado Placa (-)	10	6,900	3,814	13,25	0,002
		Lado Contra Ponto (+)	10	1,900	2,079		
	T_2	Lado Placa (-)	10	50,700	7,212	14,71	0,001
		Lado Contra Ponto (+)	10	39,100	6,280		
	T_3	Lado Placa (-)	10	13,200	2,486	19,59	0,000
		Lado Contra Ponto (+)	10	18,600	2,951		
Mandril 1 / Mandril 2	T_1	Mandril 1 (-)	10	2,278	0,4609	40,60	0,000
		Mandril 2 (+)	10	3,222	0,4278		
	T_2	Mandril 1 (-)	10	45,722	2,396	105,86	0,000
		Mandril 2 (+)	10	53,611	2,200		
	T_3	Mandril 1 (-)	10	17,278	0,958	56,90	0,000
		Mandril 2 (+)	10	15,222	0,647		

A diferença entre as duas posições também pode ser observada pelos *boxplots* da Figura 5.13 e Figura 5.14.

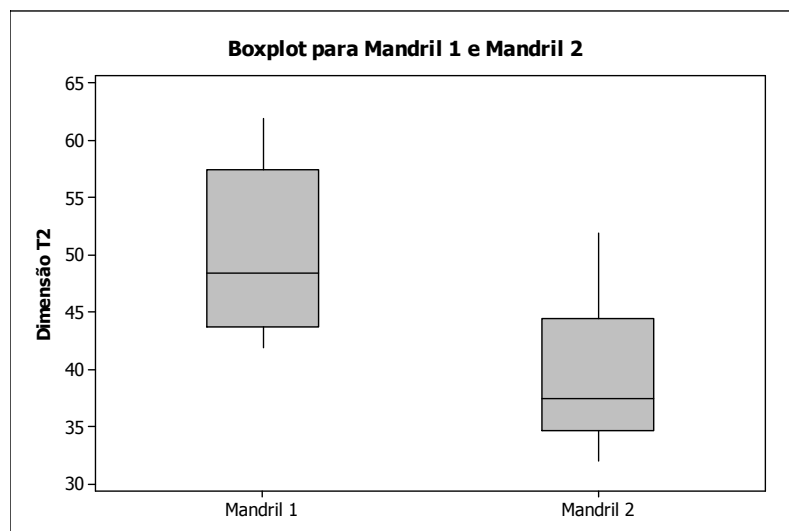


Figura 5.13 - Boxplot do Resultado das Posições dos Pacotes

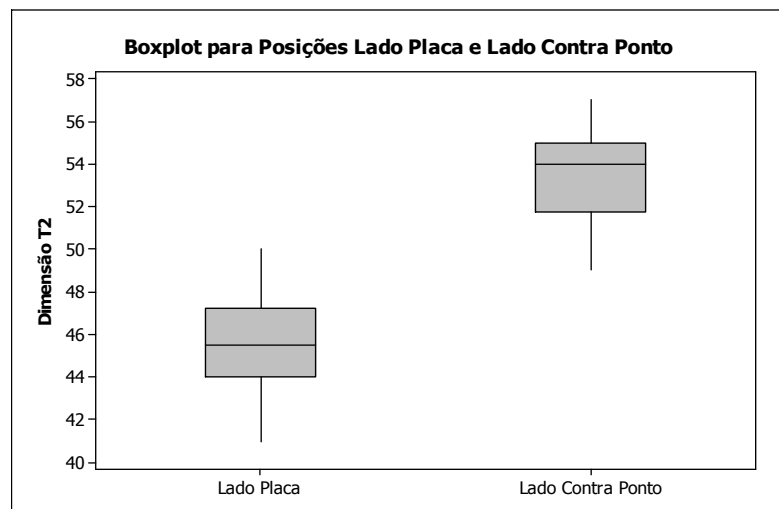


Figura 5.14 - Boxplot do Resultado dos Diferentes Mandris

5.5 Fatores Controláveis

Após a validação dos ruídos, o passo seguinte foi determinar os parâmetros de processo e seus níveis, baseado nos fatores indicados na literatura como significativos, conforme já apresentado no capítulo 3, e, também, na experiência dos engenheiros desta operação. Os parâmetros adotados foram velocidade de avanço do rebolo (V_a), velocidade de dressagem (V_{fd}), velocidade periférica do rebolo (V_s) e profundidade de dressagem (a_d). A velocidade do mandril (V_w) não foi considerada devido a ter pouca influência na velocidade de corte (V_c), visto que foi aplicada numa relação de 1/50 em relação à velocidade periférica do rebolo (V_s). Para os parâmetros considerados foram adotados os níveis apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Parâmetros de Processo e Níveis

Parâmetros de Processo	Unidade	Símbolo	Níveis (decodificados)				
			-1,5	-1	0	+1	+1,5
X_1 – Velocidade de Avanço do Rebolo	[mm/min]	V_a	0,1375	0,150	0,175	0,200	0,2125
X_2 – Velocidade de Dressagem	[mm/min]	V_{fd}	45,000	50,000	60,000	70,000	75,000
X_3 – Velocidade Periférica do Rebolo	[m/s]	V_s	39,000	33,000	39,000	45,000	48,000
X_4 – Profundidade de Dressagem	[mm]	a_d	0,015	0,020	0,030	0,040	0,045

Os demais parâmetros e condições de processo foram fixados, sendo o rebolo de óxido de alumínio rosa, rotação da árvore de anéis, sobremetal no diâmetro dos anéis e fluido refrigerante, conforme a Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Parâmetros Fixos de Processo

Parâmetros de Processo	Especificação
Sobremetal	0,12 [mm] no diâmetro
Rebolo	RT 510 x 52 x 203,2 – DR 240 J6 V16
Velocidade do Mandril (V_w)	0,64 [m/s]
Fluido Refrigerante	Tipo: Ecocool 1977 Fornecido pela Fuchs Vazão: 20 [l/min]

5.6 Respostas dos Experimentos

Como respostas dos experimentos, foram definidas a vida do dressador (V), como Y_1 , o EQM para a dimensão T_1 ($EQM T_1$), como Y_2 , o EQM para a dimensão T_2 ($EQM T_2$), como Y_3 e o EQM para a dimensão T_3 ($EQM T_3$), como Y_4 . Cada valor de EQM foi calculado com os dados obtidos em cada condição de ruído para cada combinação de parâmetros da matriz de experimentos, por meio da equação (30). Para melhor entendimento, a Tabela 5.12 mostra cada resposta (Y) dos experimentos.

Tabela 5.12 – Variáveis de Respostas para os Experimentos

Respostas (Y)	
Y_1	Vida do dressador, contadas em n° de dressagens (V)
Y_2	EQM da dimensão T_1 nas condições de ruídos ($EQM T_1$)
Y_3	EQM da dimensão T_2 nas condições de ruídos ($EQM T_2$)
Y_4	EQM da dimensão T_3 nas condições de ruídos ($EQM T_3$)

5.7 Matriz Experimental

A matriz experimental, do arranjo interno, utilizada para a Metodologia da Superfície de Resposta foi um CCD (Arranjo Composto Central) com quatro fatores, em dois níveis ($2^k = 2^4 = 16$), quatro pontos centrais ($1k = 1.4 = 4$) e oito pontos axiais ($2k = 2.4 = 8$), com uma replicação, valor de $\hat{\rho} = 1,50$ e dois blocos, totalizando 30 ensaios. Inicialmente, foi aplicado para $\hat{\rho}$ o valor de $(2^k)^{1/4} = 2$, mas os experimentos iniciais resultaram em valores de T_1 , T_2 e T_3 com variância elevada, com valores fora da especificação, pois os valores dos pontos axiais ficaram fora da região adequada dos parâmetros do processo, que por este motivo foi reduzido para 1,50.

Para o planejamento da matriz do arranjo externo, foi utilizado um fatorial completo, com dois fatores, em dois níveis ($2^k = 2^2 = 4$).

Após a definição dos fatores dos experimentos e dos parâmetros fixos, a matriz de experimentos foi gerada, as dimensões das peças em cada condição experimental foram coletadas e utilizadas para cálculo das respostas (EQM's). A Tabela 5.13 mostra a matriz completa de experimentos, com o arranjo interno de 30 ensaios e o arranjo externo com 4 ensaios, totalizando 120 experimentos, formando o método PRP e suas respectivas respostas.

Os valores de EQM's da Tabela 5.13 foram calculados a partir dos dados da tabela do apêndice A, obtidos pelas dimensões das peças, e do apêndice B.

Tabela 5.13 - Matriz de Experimentos PRP

ARRANJO INTERNO				Z_1 Setup Z_2 Árvore	ARRANJO EXTERNO					
					1 2 1 2		1 2 1 2		1 2 1 2	
X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2		Y_3		Y_4	
V_a [mm/min]	V_{fd} [mm/min]	V_s [m/s]	a_d [mm]	V	EQM T_1		EQM T_2		EQM T_3	
1	-1	-1	-1	-1	1207	1,46	37,81	2,10		
2	+1	-1	-1	-1	1105	0,98	24,22	1,36		
3	-1	+1	-1	-1	1090	1,66	37,79	1,64		
4	+1	+1	-1	-1	1072	1,26	17,70	1,33		
5	-1	-1	+1	-1	782	1,19	21,26	1,66		
6	+1	-1	+1	-1	703	0,74	27,14	1,36		
7	-1	+1	+1	-1	801	2,16	46,09	1,51		
8	+1	+1	+1	-1	779	1,47	24,28	1,81		
9	-1	-1	-1	+1	910	1,99	29,62	2,19		
10	+1	-1	-1	+1	890	3,12	27,89	2,30		
11	-1	+1	-1	+1	811	2,06	29,49	2,57		
12	+1	+1	-1	+1	870	2,19	33,18	2,75		
13	-1	-1	+1	+1	612	2,41	25,48	1,64		
14	+1	-1	+1	+1	656	2,67	30,56	2,51		
15	-1	+1	+1	+1	622	2,92	24,28	1,63		
16	+1	+1	+1	+1	690	1,99	30,18	2,39		
17	0	0	0	0	740	2,79	31,66	2,57		
18	0	0	0	0	699	3,28	31,79	2,42		
19	0	0	0	0	802	2,55	22,81	3,07		
20	0	0	0	0	704	2,91	28,41	2,97		
21	-1,5	0	0	0	613	2,64	23,78	1,92		
22	+1,5	0	0	0	717	2,03	26,89	1,66		
23	0	-1,5	0	0	695	2,38	41,80	1,54		
24	0	+1,5	0	0	730	3,51	39,37	1,35		
25	0	0	-1,5	0	990	5,70	94,86	1,85		
26	0	0	+1,5	0	420	4,44	64,75	1,61		
27	0	0	0	-1,5	950	1,50	12,21	1,00		
28	0	0	0	+1,5	520	2,57	26,72	2,64		
29	0	0	0	0	794	2,45	24,13	1,27		
30	0	0	0	0	765	3,05	21,34	1,95		

5.8 Modelagem das Respostas

A resposta Y_l , correspondente à vida útil do dressador (V), é representada pela quantidade de dressagens realizada por este dressador. Estas dressagens desgastam o diamante, alterando a geometria da ponta desta ferramenta, que, por sua vez, influencia o desvio padrão das características T_1 , T_2 e T_3 , ou seja, conforme a vida útil do dressador aumenta, o desvio padrão também aumenta, reduzindo a capacidade do processo, medida por meio do P_{pk} . Deste modo, a vida útil do dressador foi definida por meio da redução do P_{pk} , ou seja, quando este fator atinge valores entre 1,33 e 1,37 o diamante está no final de vida e, então, deve ser substituído.

Ao final da vida útil de cada dressador, foram coletadas 40 peças, o que equivale ao número de medições por experimento, que foram utilizadas para calcular as suas respectivas respostas. Estas 40 peças foram compostas por 10 peças em cada condição de ruído, para cada experimento, totalizando 1.200 dados para compor todas as respostas. A média de cada experimento foi calculada com os valores destas 40 peças, sendo esta média utilizada na equação (30).

A Tabela 5.14 mostra, como exemplo, os dados do experimento 1 para a dimensão T_1 , em μm , nas condições de ruído.

Tabela 5.14 - Valores da dimensão T_1 do experimento 1 nas condições de ruído

EXPERIMENTO 1 PARA DIMENSÃO T_1										
RUÍDOS	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
Posição 1 - Mandril 1	5	6	5	5	6	5	5	5	4	5
Posição 2 - Mandril 1	7	6	5	5	6	6	6	5	5	6
Posição 1 - Mandril 2	4	4	4	3	3	4	4	3	4	4
Posição 2 - Mandril 2	4	3	4	4	4	3	3	3	3	3

Os dados de cada experimento foram aplicados na equação (30), para cálculo do EQM, determinando a resposta de cada experimento para uma das três dimensões, T_1 , T_2 e T_3 .

A partir das respostas dos experimentos, conforme a Tabela 5.13, a relação entre as respostas foi estabelecida, por meio da modelagem matemática, do Método da Superfície de Resposta, determinando as relações entre os fatores controláveis do processo, utilizados como variáveis de entrada, e suas influências nas respostas de interesse. Em seguida, foi realizada a

Análise de Variância (ANOVA), calculadas pelo Minitab[®], utilizada para verificar o ajuste de cada modelo, o valor-P de todos os parâmetros e suas interações.

5.8.1 Ajustes e Significância dos Modelos

Partindo do modelo completo, alguns termos não significativos foram retirados, iniciando pelo de maior valor-P, sempre observando o princípio da hierarquia. Após a eliminação destes termos foram definidos os modelos reduzidos, com seus respectivos valores-P, conforme mostrado na Tabela 5.15. Como pode ser observado, houve aumento dos ajustes dos modelos e redução da variância, comprovando que os termos não significativos foram eliminados corretamente e nenhum modelo apresentou falta de ajuste (*Lack-of-Fit*) < 0,05, sendo que antes da remoção destes termos não significativos, o modelo completo para Y_3 (EQM_2), apresentava falta de ajuste de 0,029 (<0,05). O modelo para a resposta V apresentou bom ajuste, pois R^2 (Adj.) > 80%, enquanto os demais, EQM_1 , EQM_2 e EQM_3 apresentaram ajustes satisfatórios, pois se mantiveram entre 65% e 80%.

Tabela 5.15 – Análise de Significância Individual

Termos	Valor P - V		Valor P - EQM_1		Valor P - EQM_2		Valor P - EQM_3	
	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido
V_a	0,824	0,803	0,307	0,290	0,462	0,394	0,745	0,729
V_{fd}	0,841	0,822	0,217	0,202	0,722	----	0,872	0,864
V_s	0,000	0,000	0,632	0,620	0,227	0,160	0,180	0,152
a_d	0,000	0,000	0,000	0,000	0,709	0,665	0,000	0,000
V_a^2	0,681	----	0,003	0,002	0,057	0,028	0,200	0,171
V_{fd}^2	0,230	0,156	0,097	0,086	0,749	----	0,011	0,007
V_s^2	0,280	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,124	0,101
a_d^2	0,872	----	0,000	0,000	0,010	0,002	0,247	0,217
$V_a \cdot V_{fd}$	0,479	----	0,247	0,231	0,468	----	0,457	----
$V_a \cdot V_s$	0,788	----	0,274	0,257	0,486	----	0,090	0,070
$V_a \cdot a_d$	0,286	----	0,202	0,187	0,117	0,068	0,040	0,028
$V_{fd} \cdot V_s$	0,244	0,189	0,340	0,324	0,570	----	0,904	----
$V_{fd} \cdot a_d$	0,953	----	0,118	0,106	0,756	----	0,499	----
$V_s \cdot a_d$	0,152	0,106	0,829	----	0,775	----	0,258	0,228
R^2 (adj.)	80,28%	84,20%	77,38%	78,81%	62,78%	71,94%	65,07%	69,01%
Variância	83,7885	75,08	0,48540	0,46975	9,36032	8,12711	0,32657	0,30759
<i>Lack-of-fit</i>	0,066	0,108	0,199	0,226	0,029	0,162	0,674	0,751

Cada modelo apresentou fatores e interações significativas diferentes, aumentando a complexidade da otimização múltipla para as quatro respostas de interesse.

Tabela 5.16 - Coeficientes dos Modelos Quadráticos para V , EQM_1 , EQM_2 e EQM_3

Termos	Coeficientes - V		Coeficientes EQM_1		Coeficientes EQM_2		Coeficientes EQM_3	
	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido
Constante	718,100	725.584	3,040	3.041	30,235	30.662	2,320	2.320
V_a	4,195	4.179	-0,114	-0.114	-1,562	-1.562	0,024	0.024
V_{fd}	-3,780	-3.780	0,138	0.139	0,750	---	0,012	0.012
V_s	-154,390	-154.390	-0,052	-0.053	-2,615	-2.615	-0,102	-0.102
a_d	-115,927	-115.927	0,489	0.489	0,788	0.788	0,374	0.374
V_a^2	10,599	---	-0,532	-0.532	-5,855	-5.775	-0,133	-0.133
V_{fd}^2	31,710	33.100	-0,260	-0.260	0,922	---	-0,286	-0.286
V_s^2	28,377	29.766	0,685	0.685	18,353	18.432	-0,161	-0.161
a_d^2	4,154	---	-0,664	-0.664	-8,463	-8.384	-0,119	-0.119
$V_a \cdot V_{fd}$	15,250	---	-0,147	-0.147	-1,747	---	0,062	---
$V_a \cdot V_s$	5,750	---	-0,138	-0.138	1,674	---	0,149	0.148
$V_a \cdot a_d$	23,250	---	0,163	0.162	3,909	3.909	0,185	0.185
$V_{fd} \cdot V_s$	25,500	25.500	0,120	0.120	1,361	---	-0,010	---
$V_{fd} \cdot a_d$	-1,250	---	-0,202	-0.202	-0,741	---	0,057	---
$V_s \cdot a_d$	31,750	31.750	0,027	---	-0,683	---	-0,096	-0.096
R^2 (adj.)	80,28%	84.20%	77,38%	78.81%	62,78%	71.94%	65,07%	69.01%
Variância	83,788	75,080	0,485	0,470	9,360	8,127	0,327	0,308

Valores em negrito representam os termos significativos do modelo quadrático (Valor-P <5%)

5.8.2 Análise dos Resíduos

Para garantir que os modelos sejam realmente representativos das respostas estudadas é necessário realizar a análise dos resíduos, que são determinados pela diferença entre os valores experimentais e os valores teóricos previstos. Montgomery (2001) afirma que os resíduos devem ser normais, não correlacionados e aleatórios.

A Tabela 5.17 mostra os resultados das análises realizadas para os resíduos padronizados dos experimentos, para as respostas de interesse.

Tabela 5.17 - Análise dos Resíduos

Análise dos Resíduos	Respostas	Respostas			
		V	EQM_2	EQM_3	EQM_4
Teste de Normalidade	AD	0,224	0,203	0,290	0,191
	Valor-P	0,805	0,866	0,589	0,890

Como pode ser verificado, os resíduos são normalmente distribuídos, visto que os testes de normalidade de Anderson Darling (AD) apresentaram valores menores que um e valores-P maiores que 0,05. Da Figura 5.15 a Figura 5.18 estão mostradas as distribuições dos resíduos para as quatro respostas de interesse.

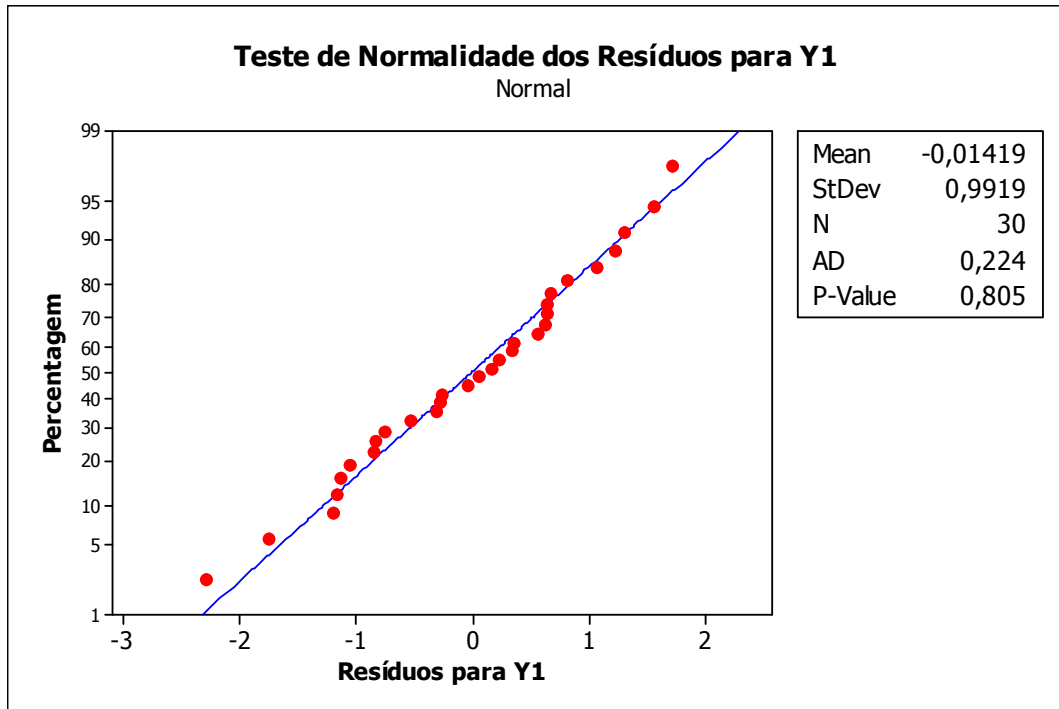


Figura 5.15- Testes de Normalidade para os Resíduos de V

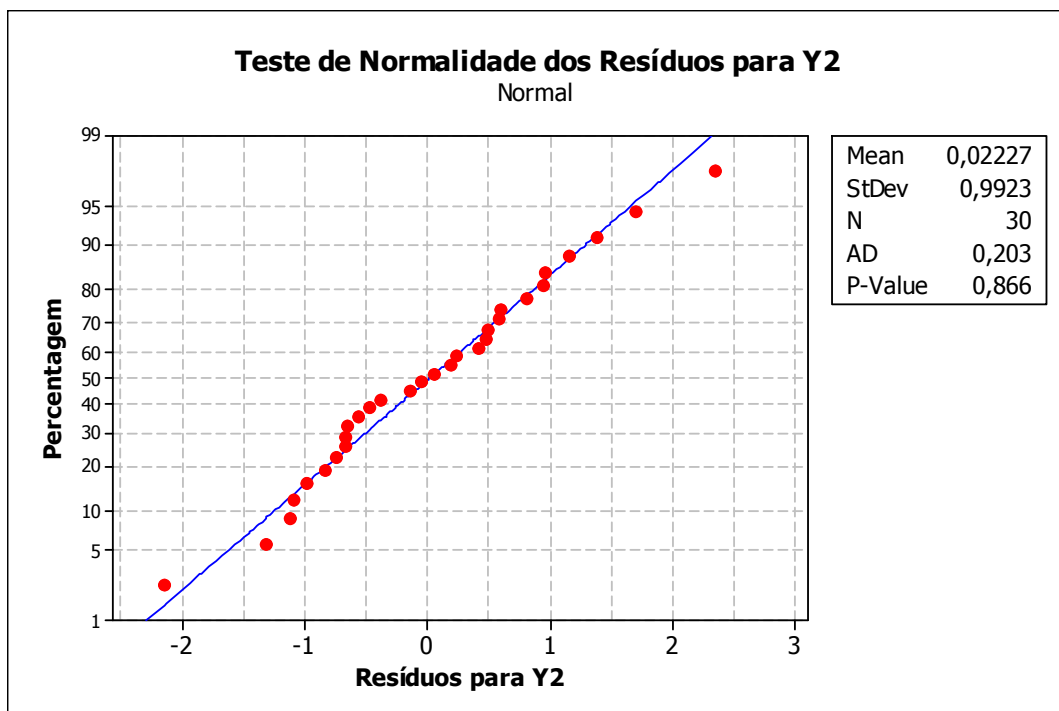


Figura 5.16- Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_1$

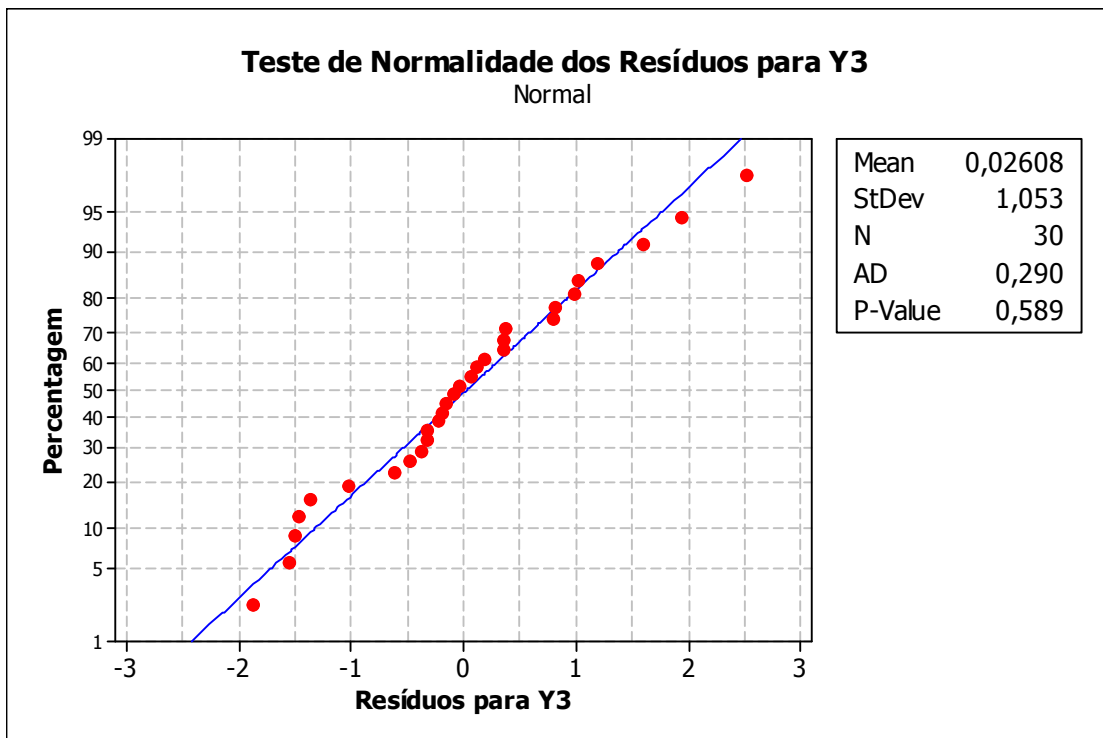


Figura 5.17- Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_2$

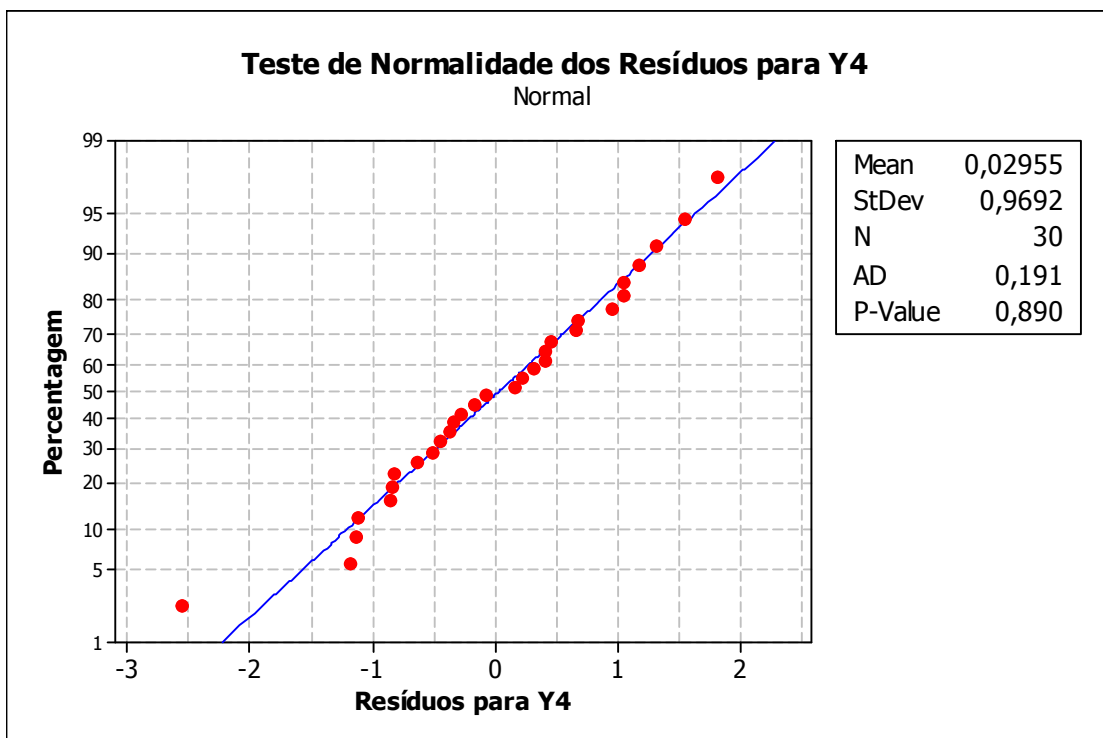


Figura 5.18- Testes de Normalidade para os Resíduos de $EQM T_3$

5.8.3 Superfície de Resposta

Por meio de cada modelo, foram construídas as superfícies de respostas. As Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 representam, como exemplo, as superfícies para velocidade de dressagem (V_{fd}) e a profundidade de dressagem (a_d) para mostrar a influencia dos parâmetros nas respostas estudadas, vida do dressador (V), $EQM T_1$, $EQM T_2$ e $EQM T_3$. As demais superfícies de respostas podem ser verificadas nos apêndices C, D, E e F.

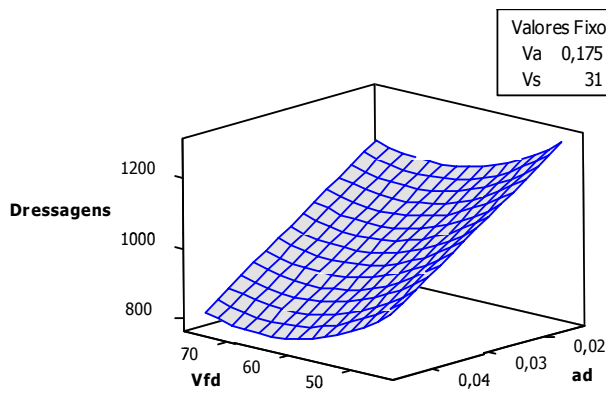


Figura 5.19 - Interação entre V_{fd} x a_d para Vida do Dressador

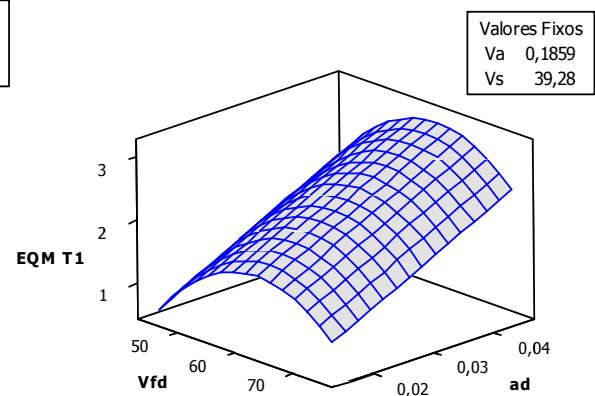


Figura 5.20 - Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_1$

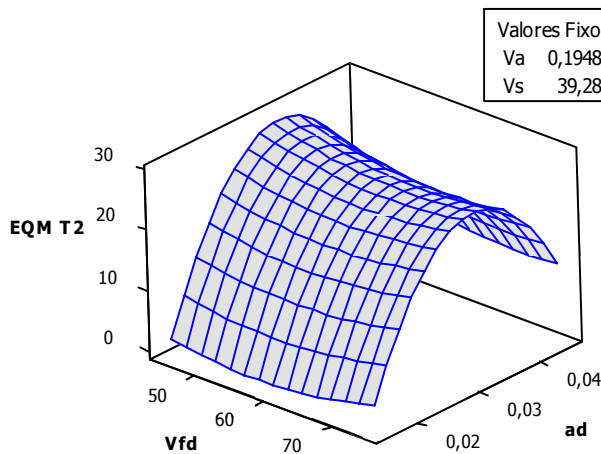


Figura 5.21- Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_2$

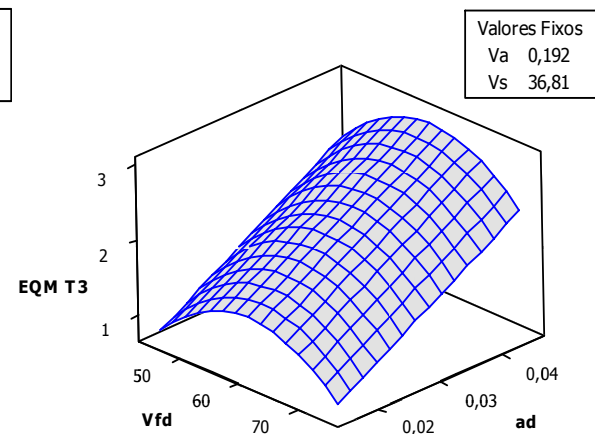


Figura 5.22 - Interação entre V_{fd} x a_d para $EQM T_3$

Observando a Figura 5.19, é possível notar, pela superfície, que há aumento da vida do dressador, conforme a profundidade de dressagem (a_d) e a velocidade de dressagem do rebolo (V_{fd}) são reduzidas.

Também as superfícies de respostas para $EQM T_1$, $EQM T_2$ e $EQM T_3$ mostram que os menores valores dos erros quadráticos médios (EQM) são obtidos com a redução da profundidade de dressagem e da velocidade de dressagem.

6. OTIMIZAÇÃO

6.1 Otimização Individual

Para a otimização dos modelos foi aplicada a equação do MSR, que ficou disposta conforme as equações de (46) a (49):

Por meio dos modelos reduzidos foram obtidas as suas respectivas equações, que foram utilizadas inicialmente para a otimização individual para cada resposta de interesse. Para a resposta V , a função objetivo é de maximização, visto que quanto maior a vida do dressador menor o custo da operação, enquanto para as demais respostas, $EQM T_1$, $EQM T_2$, e $EQM T_3$, a função objetivo é de minimização, pois quanto menor o valor destas respostas, mais robusto aos ruídos é o processo.

Considerando a equação (11) apresentada, foram estabelecidas as equações para as respostas de interesse V , $EQM T_1$, $EQM T_2$, e $EQM T_3$, respectivamente, que ficaram formatadas conforme equações (46), (47), (48) e (49):

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } f(V) = & 725,584 - 3,78.V_{fd} - 154,39.V_p - 115,927.ad + 33,1.V_{fd}^2 + \\ & + 29,766.V_p^2 + 25,5.V_{fd}.V_p + 31,75.V_p.ad \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f(EQM T_1) = & 3,04084 - 0,114.V_a + 0,138.V_{fd} - 0,052.V_p + 0,489.ad - \\ & - 0,532.V_a^2 - 0,261.V_{fd}^2 + 0,685.V_p^2 - 0,664.ad^2 - 0,147.V_a.V_{fd} - \\ & - 0,138.V_a.V_p + 0,163.V_a.ad + 0,120.V_{fd}.V_p - 0,202.V_{fd}.ad \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f(EQM T_2) = & 30,6621 - 1,562.V_a - 2,615.V_p - 5,775.V_a^2 + 18,432.V_p^2 - \\ & - 8,384.ad^2 + 3,909.V_a.V_{fd} \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f(EQM T_3) = & 2,3205 + 0,024V_a + 0,012V_{fd} - 0,102V_p + 0,374ad - 0,133V_a^2 - \\ & - 0,286V_{fd}^2 - 0,161V_p^2 - 0,119.ad^2 - 0,148V_a.V_p + 0,185V_a.ad - \\ & - 0,096V_p.ad \end{aligned} \quad (49)$$

Para evitar que a solução encontrada fique fora da região experimental foi acrescentada a seguinte restrição:

$$X^T X \leq (1,5)^2$$

Os respectivos dados foram lançados numa planilha do programa MS Excel[®], distribuídos conforme mostrado na Tabela 6.1. Para solucionar as equações, utilizou-se o aplicativo *Solver*[®], que conduziu a uma solução ótima individual para cada uma das equações, tendo o ponto de partida para cada variável de decisão o valor codificado zero (0).

Tabela 6.1 - Solução das Funções Objetivas

		V_a [mm/min]	V_{fd} [mm/min]	V_s [m/s]	a_d [mm]	Respostas Ótimas
V	Codificado	0,000	-0,259	-1,267	-0,760	1099
	Decodificado	0,1750	57	31	0,022	
$EQM T_1$	Codificado	0,435	-0,292	0,047	-1,405	0.663
	Decodificado	0,1859	57,08	39,28	0,016	
$EQM T_2$	Codificado	0,791	0,000	0,046	-1,273	7.189
	Decodificado	0,1948	60,00	39,28	0,017	
$EQM T_3$	Codificado	0,681	-0,140	-0,366	-1,278	1.369
	Decodificado	0,1920	58,60	36,81	0,017	

6.2 Otimização Global

Uma vez que a otimização individual conduziu aos parâmetros mais adequados para cada uma das respostas de interesse partiu-se, então, para a otimização global das múltiplas respostas. Como pode ser observado na Tabela 6.1, a solução de cada modelo obteve valores diferentes para o conjunto de parâmetros, gerando um conflito, pois este conjunto de parâmetros deve ser estabelecido de forma que um único valor para cada parâmetro atenda as quatro respostas analisadas.

Aplicando o Método do Critério Global foi estabelecida a equação (50), com os valores encontrados na otimização individual da Tabela 6.1, do modelo de cada resposta.

$$\text{Min. } F(X) = \left(\frac{1099 - V}{1099}\right)^2 + \left(\frac{0,663 - EQM T_1}{0,663}\right)^2 + \left(\frac{7,189 - EQM T_2}{7,189}\right)^2 + \left(\frac{1,369 - EQM T_3}{1,369}\right)^2 \quad (50)$$

Sujeito à:

$$X^T X \leq (1,5)^2$$

Para resolver as funções propostas, uma nova planilha do programa MS Excel[®] foi criada, na qual os dados foram lançados e a função *Solver*[®] foi novamente aplicada, também tendo como ponto inicial viável para a aplicação do GRG o vetor [0,0,0,0].

A Tabela 6.2 mostra a distribuição das funções e demais dados na planilha Excel[®], bem como a solução encontrada para os parâmetros de processo.

Tabela 6.2 - Aplicação do Método do Critério Global

	V	$EQM T_1$	$EQM T_2$	$EQM T_3$
<i>Solução</i>	889	0,696	7,582	1,393
Alvos	1099	0,663	7,189	1,369
	V_a [mm/min]	V_{fd} [mm/min]	V_s [m/s]	a_d [mm]
Codificado	0,615	-0,104	-0,008	-1,363
Decodificado	0,190	58,959	38,954	0,016

6.3 Experimentos de Confirmação

Em seguida, após a definição dos parâmetros ótimos para o processo, foi iniciada a fase de execução dos experimentos de confirmação, para validar os valores obtidos para os parâmetros do processo.

Antes do início dos testes, foi realizado o cálculo do intervalo de confiança para cada uma das respostas, para servirem de estimativas para validação dos experimentos de confirmação, conforme mostrado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Intervalo de Confiança para os Experimentos de Confirmação

Respostas	Intervalo de Confiança (95%)		
	Limite Inferior	Alvo	Limite Superior
V	821	889	966
$EQM T_1$	0	0,663	1,29149
$EQM T_2$	0	7,175	17,9140
$EQM T_3$	0,931	1,369	1,80503

Para a confirmação dos experimentos, foram utilizados cinco dressadores, e como critério de final de vida de cada um deles foi utilizado 889 dressagens, visto que é o valor obtido na fase de otimização.

Durante a utilização dos dressadores, foram coletadas 60 peças, em subgrupos de 10 peças, a partir de 700 dressagens até 889 dressagens, totalizando a medição de 900 peças. Esta forma de coleta foi utilizada para que fosse possível estudar o comportamento do EQM de cada dimensão ao longo da vida do dressador. A Tabela 6.4 demonstra as informações anteriores.

Tabela 6.4 - Quantidade de Peças Coletadas nos Experimentos de Confirmação

Experimentos de Confirmação		
	Quantidade por Experimento	Quantidade Total
Dressadores	1	5
Qtd. peças (anéis) com 700 dressagens	60	300
Qtd. peças (anéis) com 800 dressagens	60	300
Qtd. peças (anéis) com 889 dressagens	60	300
Total Peças (anéis)		900

Após cada experimento, os dressadores foram recolhidos para verificação microscópica do desgaste do diamante, para demonstrar o aspecto de cada dressador, mostrados nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

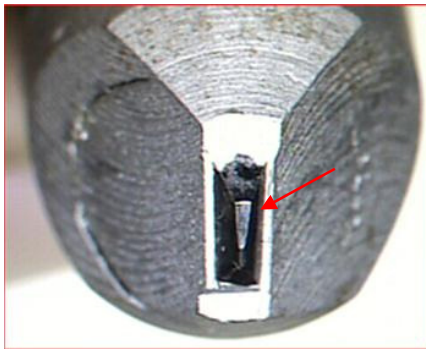


Figura 6.1 - Dressador Exp.1 – 6,3X

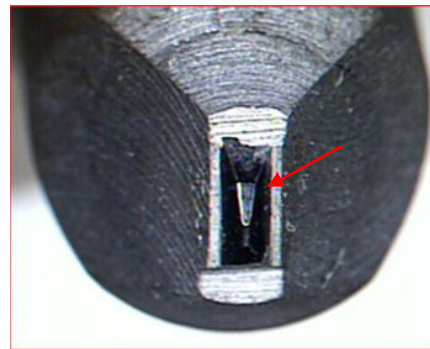


Figura 6.2 - Dressador Exp. 2 – 6,3X

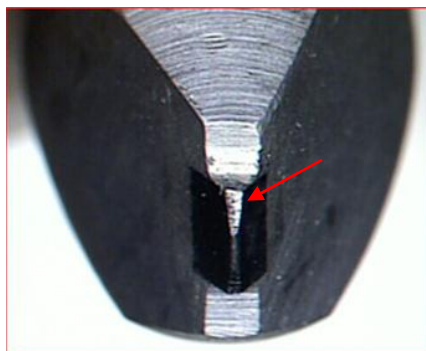


Figura 6.3 - Dressador Exp. 3 – 6,3X

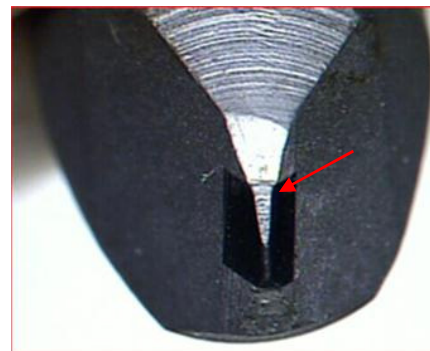


Figura 6.4 - Dressador Exp. 4 – 6,3X



Figura 6.5 - Dressador Exp. 5 – 6,3X

Após a medição das peças das amostras, os dados foram tabulados para o cálculo das respostas (*EQM's*) de cada subgrupo, conforme mostrado na Tabela 6.5, Tabela 6.6 e Tabela 6.7, com a distribuição dos dados para *EQM T₁*, *EQM T₂* e *EQM T₃* do experimento de confirmação 1.

Tabela 6.5 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para *EQM T₁*

EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO 1 – DIMENSÕES DE <i>T₁</i>												
Dressagens	Amostra	subgrupo										<i>EQM T₁</i>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
700	1	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	0,1100
	2	4	5	3	4	4	4	4	4	4	4	0,2222
	3	5	4	4	3	4	3	4	4	4	4	0,3322
	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	0,1100
	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0,0000
	6	3	3	4	4	3	4	4	4	4	4	0,3233
800	1	5	3	3	4	4	3	4	4	4	4	0,4400
	2	5	4	4	4	4	4	3	4	4	4	0,2222
	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0,0000
	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	5	0,2222
	5	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	0,1100
	6	3	4	4	4	4	4	5	3	3	4	0,4400
889	1	4	4	4	3	4	3	4	4	4	5	0,3322
	2	4	4	4	4	4	4	4	4	5	3	0,2222
	3	4	4	4	4	5	4	4	4	3	4	0,2222
	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	5	0,3322
	5	4	4	5	4	4	4	4	4	3	4	0,2222
	6	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	0,1100

Tabela 6.6 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para *EQM T₂*

EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO 1 – DIMENSÕES DE <i>T₂</i>												
Dressagens	Amostra	subgrupo										<i>EQM T₂</i>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
700	1	42	43	50	40	40	49	43	46	44	47	6,4966
	2	46	51	47	40	44	43	46	41	42	45	7,4383
	3	45	41	43	45	41	44	46	41	46	47	6,4211
	4	40	48	43	45	43	46	40	45	39	44	8,4383
	5	43	49	47	45	50	47	48	43	46	49	8,9011
	6	44	42	46	44	47	46	43	46	45	44	2,5456
800	1	40	41	43	47	39	50	50	42	46	39	11,1278
	2	41	43	42	45	40	44	43	44	40	42	9,6933
	3	41	43	42	45	40	44	43	44	40	42	9,6933
	4	45	43	43	45	43	40	48	44	44	43	5,6178
	5	47	48	47	45	46	45	47	44	48	44	3,5322
	6	41	42	47	49	45	51	46	39	43	46	7,2835
889	1	47	46	43	45	45	38	41	45	43	42	9,4167
	2	41	44	49	48	43	45	42	43	39	48	11,4844
	3	43	43	42	46	41	45	44	42	44	46	4,8933
	4	47	51	46	49	46	46	42	43	43	49	10,0622
	5	43	42	44	50	42	46	46	49	44	45	7,4433
	6	49	43	45	43	48	44	42	42	48	48	7,7733

Tabela 6.7 - Dados do Experimento de Confirmação 1 para $EQM T_3$

EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO 1 – DIMENSÕES DE T_3												
Dressagens	Amostra	subgrupo										$EQM T_3$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
700	1	16	16	16	16	17	16	17	17	14	17	0,8844
	2	17	17	17	16	17	17	16	16	15	16	0,6489
	3	17	18	17	17	16	17	16	17	17	16	1,0400
	4	17	15	20	17	18	16	16	17	17	17	2,7778
	5	16	18	16	17	17	17	17	17	16	16	0,9456
	6	16	16	17	17	16	16	17	15	17	14	0,9989
800	1	16	15	16	17	18	17	16	19	15	18	2,2789
	2	17	16	15	16	17	18	16	16	18	17	1,2933
	3	17	16	16	17	16	18	16	17	19	16	1,7067
	4	16	16	16	17	18	14	17	16	15	17	1,3289
	5	16	18	17	15	17	15	17	18	16	17	1,5156
	6	18	16	18	16	17	16	16	18	18	17	1,8889
889	1	16	15	16	17	18	16	16	18	15	18	1,6389
	2	16	15	15	16	16	18	16	16	18	17	1,2122
	3	17	16	16	17	16	18	16	17	18	16	1,1678
	4	16	16	16	17	18	14	17	16	15	17	1,3289
	5	16	17	17	15	17	15	17	18	15	17	1,3156
	6	18	16	17	16	17	16	16	18	18	17	1,5767

Com os dados coletados de todos os experimentos, foi verificado o comportamento de cada resposta no intervalo de vida do dressador, com 700, 800 e 889 dressagens. Como poderá ser verificada nos gráficos da Figura 6.6, Figura 6.7 e Figura 6.8, há uma tendência de aumento da média do EQM de cada dimensão, à medida que a vida do dressador aumenta. Este comportamento traduz o desgaste do dressador, gerando um deslocamento da média de cada dimensão e reduzindo a capacidade do processo.

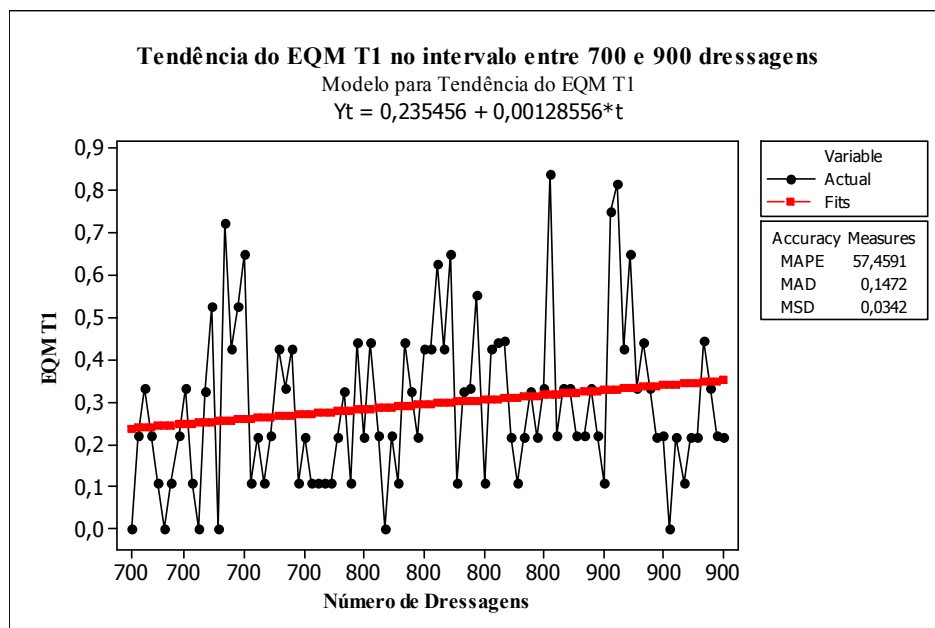


Figura 6.6 - Tendência de EQM T1 no intervalo entre 700 e 889 dressagens

A dimensão T_2 é a característica que apresenta maior influência do desgaste do dressador, também mostrando um aumento da média do $EQM T_2$ com o decorrer da vida do dressador, que pode ser observado pela Figura 6.7.

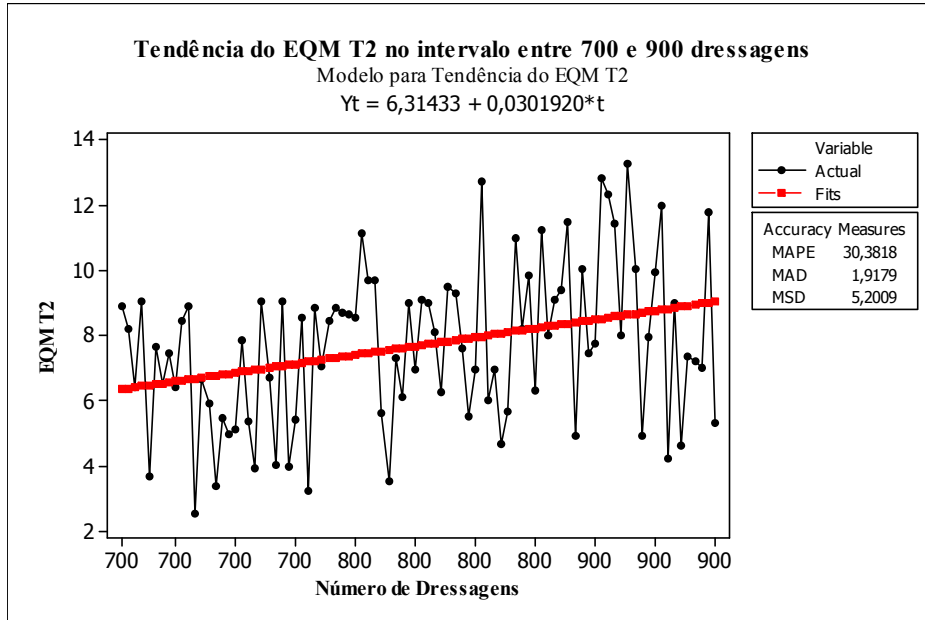


Figura 6.7 - Tendência do $EQM T_2$ no intervalo entre 700 e 889 dressagens

Assim como T_1 e T_2 , a dimensão T_3 também tem a média do $EQM T_3$ influenciada com o aumento do desgaste do dressador, porém, de forma menos acentuada, quando comparada com $EQM T_1$ e $EQM T_2$.

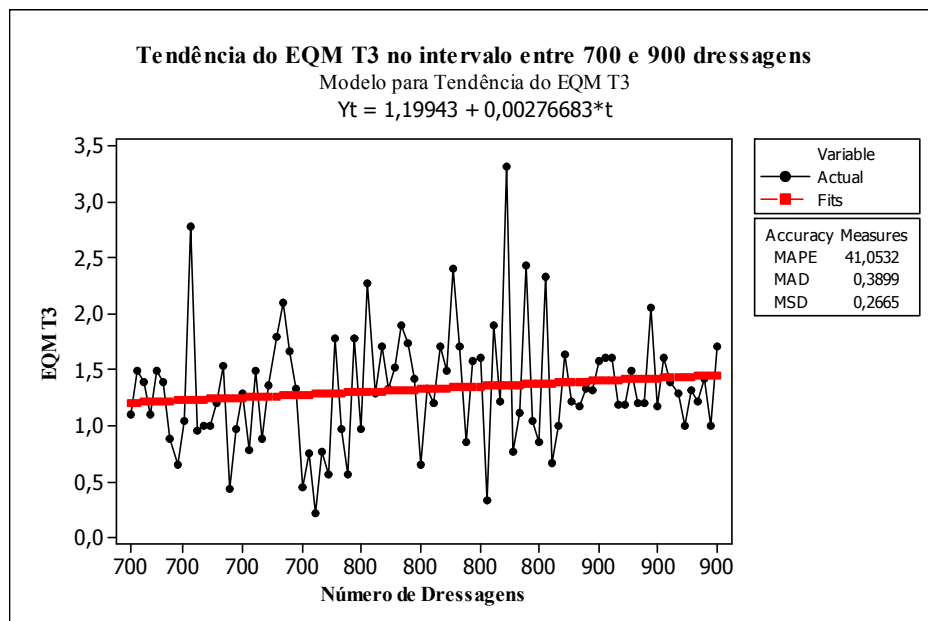


Figura 6.8 - Tendência de $EQM T_3$ no intervalo entre 700 e 889 dressagens

Para verificar se os valores de EQM para cada resposta corresponderam aos valores previstos pelos modelos teóricos, foram calculadas as médias dos EQM's para cada resposta, bem como o intervalo de confiança, todos considerados no final de vida do dressador, com 889 dressagens.

Tabela 6.8 - EQM's e Intervalos de Confiança - Valores Teóricos x Valores Experimentais

		Vida do Dressador	$EQM T_1$	$EQM T_2$	$EQM T_3$
Valores Teóricos	Valores Ótimos	889	0,693	7,548	1,393
	Intervalo de Confiança (95%)	LI 821 LS 966	LI 0 LS 1,291	LI 0 LS 17,914	LI 0,931 LS 1,805
Experimentos de Confirmação Valores práticos	Exp. Confirmação 1	889	0,378	10,307	1,373
	Exp. Confirmação 2	889	0,240	8,512	1,385
	Exp. Confirmação 3	889	0,569	11,322	1,376
	Exp. Confirmação 4	889	0,183	7,992	1,452
	Exp. Confirmação 5	889	0,275	7,206	1,275
	Resultado Global	889	0,329	9,068	1,372
	Intervalo de Confiança (95%)		LI 0,254 LS 0,333	LI 7,180 LS 9,196	LI 1,215 LS 1,435
Diferença percentual do valor experimental para o valor teórico			-52.53%	+20.14%	-1.51%

Como pode ser observado na Tabela 6.8, tanto os valores práticos obtidos nos experimentos de confirmação, quanto seus respectivos intervalos de confiança, estão contidos nos intervalos de confiança dos valores teóricos, confirmando que a estratégia de otimização foi adequada, aplicando o Projeto Robusto de Parâmetros (PRP) por meio do arranjo cruzado e à Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), aliado ao método do Erro Quadrático Médio (EQM), Método do Critério Global (MCG) e Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

Continuando a análise dos resultados dos experimentos de confirmação, foi então verificada a capacidade do processo de retificação com os parâmetros estabelecidos na otimização e com a vida do dressador em 889 dressagens. A Tabela 6.9 mostra a capacidade do processo para as três dimensões, T_1 , T_2 e T_3 , no momento do final de vida dos dressadores. Lembrando que para cada experimento foram coletadas 60 amostras, em subgrupos de 10 peças cada, totalizando a medição de 300 peças, que compõem o resultado global dos experimentos, com seus respectivos intervalos de confiança.

Tabela 6.9 - Capacidade do Processo de Retificação para as dimensões da peça

Capacidade do Processo no Final de Vida dos Dressadores					
		Vida do Dressador [Dressagens]	$C_{pk} T_1$	$C_{pk} T_2$	$C_{pk} T_3$
Experimentos de Confirmação Valores práticos	Exp. Confirmação 1	889	1,95	1,62	1,76
	Exp. Confirmação 2	889	1,52	1,67	1,75
	Exp. Confirmação 3	889	1,36	1,30	1,55
	Exp. Confirmação 4	889	2,44	1,57	1,75
	Exp. Confirmação 5	889	1,89	1,43	1,85
	Resultado Global	889	1,85	1,54	1,86
	Intervalo de Confiança (95%)			LI 1,69 LS 2,01	LI 1,40 LS 1,68

6.4 Comparativo do Processo Antes da Otimização e Após Otimização

6.4.1 Parâmetros de Processo Antes e Após Otimização

Para verificar a melhoria obtida no processo de retificação foi realizado um estudo comparativo com os parâmetros aplicados antes e após a otimização, que estão demonstrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Comparativo Processo Antes da Otimização x Após Otimização

Parâmetros do Processo Antes da Otimização x Após Otimização			
Parâmetros do Processo		Antes da Otimização	Após Otimização
V_a	[mm/min]	0,200	0,190
V_{fd}	[mm/min]	70,000	59,000
V_s	[m/s]	33,000	39,000
a_d	[mm]	0,040	0,016
U_d	-----	4,500	4,000
wt	-----	0,002	0,001
V	[dressagens]	562	889

Como pode ser observado na Tabela 6.10, o valor otimizado da velocidade periférica do rebolo (V_s) sofreu aumento em relação ao valor aplicado antes da otimização. Este aumento de velocidade faz com que os grãos abrasivos do rebolo sofram menos esforços durante a retificação, visto que passam mais vezes no ponto de corte, removendo uma menor

quantidade de material em cada revolução do rebolo, se comparado com uma velocidade periférica (V_s) menor e mantida uma mesma velocidade de avanço de mergulho (V_a). Este fenômeno gera menor desgaste do rebolo, o que faz com que a sua geometria permaneça por um maior tempo de retificação, contribuindo para a menor variância da geometria da peça.

Analisando a vida útil do dressador (V), medida em dressagens, pode se verificar que os fatores controláveis que mais afetam esta resposta são a Velocidade Periférica do Rebolo (V_s) e a Profundidade de Dressagem (a_d), sendo o valor ótimo para esta segunda variável de 0,016 mm, abaixo do valor praticado antes da otimização, de 0,040 mm. A redução no valor desta variável corrobora com Marinescu *et al.* (2006) que afirmaram que o diamante começa se desgastar em temperaturas acima de 650°C, na presença de oxigênio e que, a maior profundidade de dressagem apenas aumenta o desgaste do dressador. Com estas informações, aliada aos estudos de Zhang e Shin (2003), que mostram que uma das causas do desgaste do diamante se dá devido ao atrito, pode se inferir que a redução na profundidade de dressagem promove menor geração de atrito e calor, contribuindo para o aumento da vida do dressador, conforme observado nos resultados dos experimentos.

Observando a ondulação teórica (W_t), mostrada na Tabela 6.10, nota-se que houve redução neste parâmetro, que segundo Aguiar *et al.* (2007), leva à redução da rugosidade, e que, segundo Marinescu *et al.* (2006), leva ao aumento do desgaste do dressador. Baseado na redução do (W_t), pode-se deduzir que a redução neste parâmetro contribui para a menor variância da geometria analisada da peça, que possui dimensões milésimas e que são influenciadas pela rugosidade da superfície.

O grau de recobrimento da dressagem (U_d), mostrada na Tabela 6.10, também é outra condição de dressagem do rebolo que foi alterada, sofrendo ligeira redução após a otimização. A alteração deste parâmetro é um fator desfavorável ao menor desgaste do dressador, indo de encontro com as afirmações de Linke e Klocke (2010), que mostraram que o aumento do grau de recobrimento gera menos calor no momento da dressagem e conseqüentemente, menor desgaste do dressador.

6.4.2 Capacidade do Processo Antes e Após Otimização

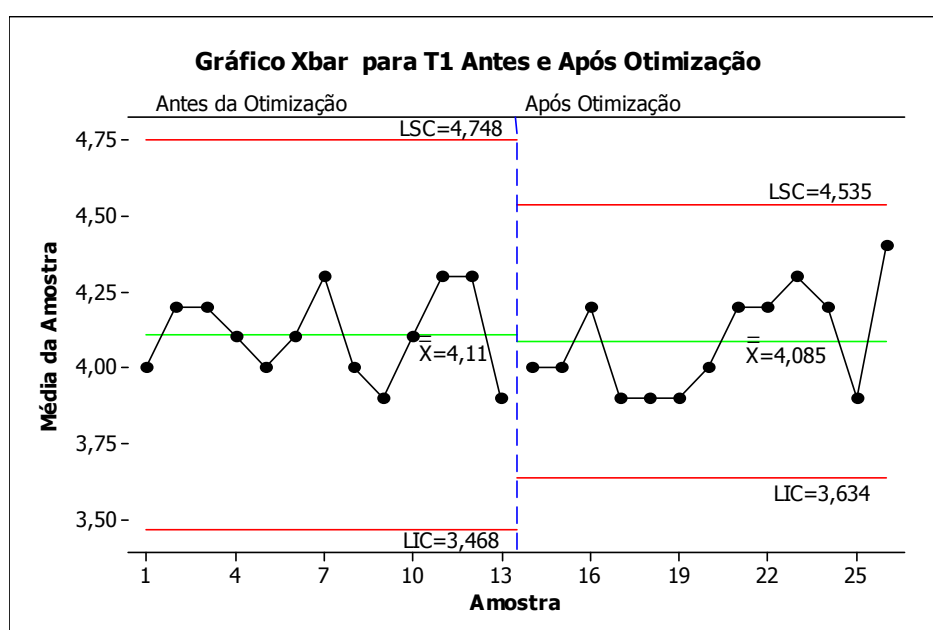
Além da análise dos parâmetros da retificação, foi realizado também um estudo estatístico da capacidade do processo, no qual foram analisados o EQM, a média (μ) das dimensões T_1 , T_2 e T_3 , e a variância do processo, bem como o C_{pk} e P_{pk} , tal como ilustra a Tabela 6.11, com os valores obtidos com o processo antes e após a otimização.

Tabela 6.11- Capacidade do Processo Antes e Após Otimização

Dimensão		EQM	μ	T	σ^2	C_{pk}	P_{pk}
T_1	Antes da Otimização	0,48	4,11	4,00	0,47	1,36	1,40
	Após Otimização	0,31	4,08		0,30	1,85	1,77
T_2	Antes da Otimização	14,21	43,46	45,00	11,83	1,36	1,30
	Após Otimização	9,40	44,32		8,94	1,54	1,49
T_3	Antes da Otimização	1,85	15,38	16,00	1,46	1,43	1,48
	Após Otimização	1,31	16,43		1,13	1,86	1,68

Nota-se que, após a otimização do processo, os valores médios obtidos para as dimensões T_1 , T_2 e T_3 estão mais próximos de seus alvos. A otimização também promoveu a redução da variância das três dimensões, que resultaram no aumento da capacidade do processo, avaliados pelo C_{pk} e P_{pk} , bem como na redução do Erro Quadrático Médio (EQM).

Como pode ser verificado na Figura 6.9, apesar do aumento da vida útil do dressador para 889 dressagens, não houve degradação da capacidade do processo para a dimensão T_1 , entretanto, houve a redução da variância e a média continuou praticamente no alvo.

Figura 6.9 - Gráfico Xbar para T_1 Antes e Após Otimização

Para a dimensão T_2 , o comportamento também foi de redução da variância e, do mesmo modo, a média ficou mais próxima do alvo da especificação, se comparado com o processo antes da otimização, que pode ser observado na Figura 6.10.

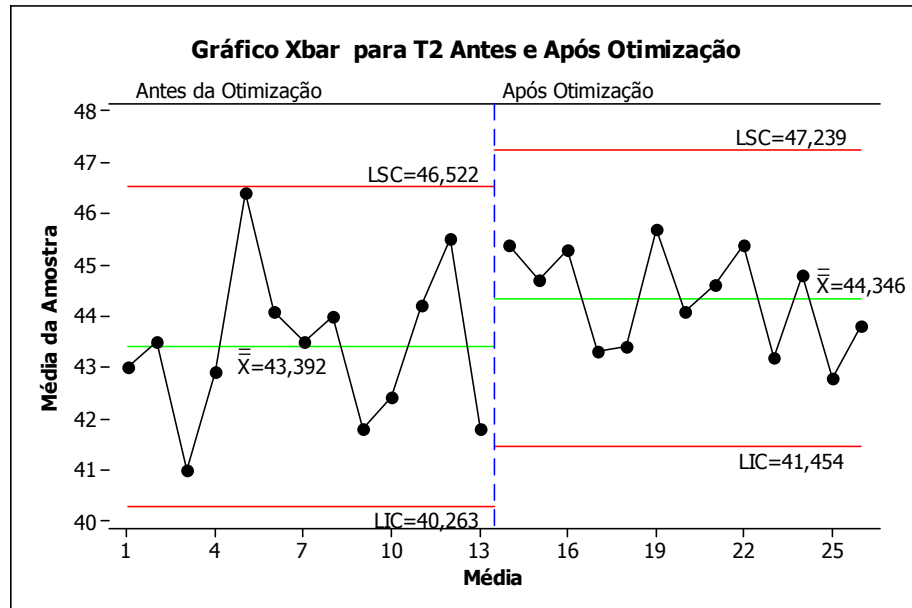


Figura 6.10 - Gráfico Xbar para T_2 Antes e Após Otimização

Para a dimensão T_3 , representada na Figura 6.11, a alteração foi mais representativa, visto que a alteração da média foi maior que para as dimensões T_1 e T_2 . Esta dimensão também ficou mais próxima do alvo e com menor variância após a otimização dos parâmetros do processo.

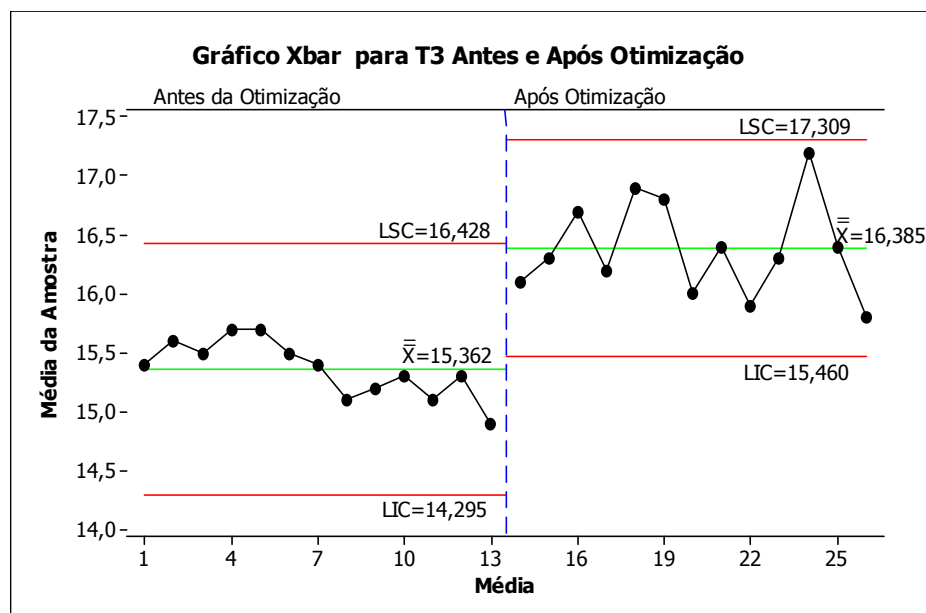


Figura 6.11 - Gráfico Xbar para T_3 Antes e Após Otimização

Da Figura 6.12 a Figura 6.17 são mostrados os relatórios da capacidade do processo antes e após otimização, para as três respostas de interesse, que são as dimensões do perfil da face de contato dos anéis, onde se verificam principalmente os índices C_p , C_{pk} , P_p e P_{pk} , e seus

respectivos intervalos de confiança, alguns já mostrados anteriormente na Tabela 6.9 e Tabela 6.11. Outras informações pertinentes aos estudos também podem ser extraídas destes relatórios.

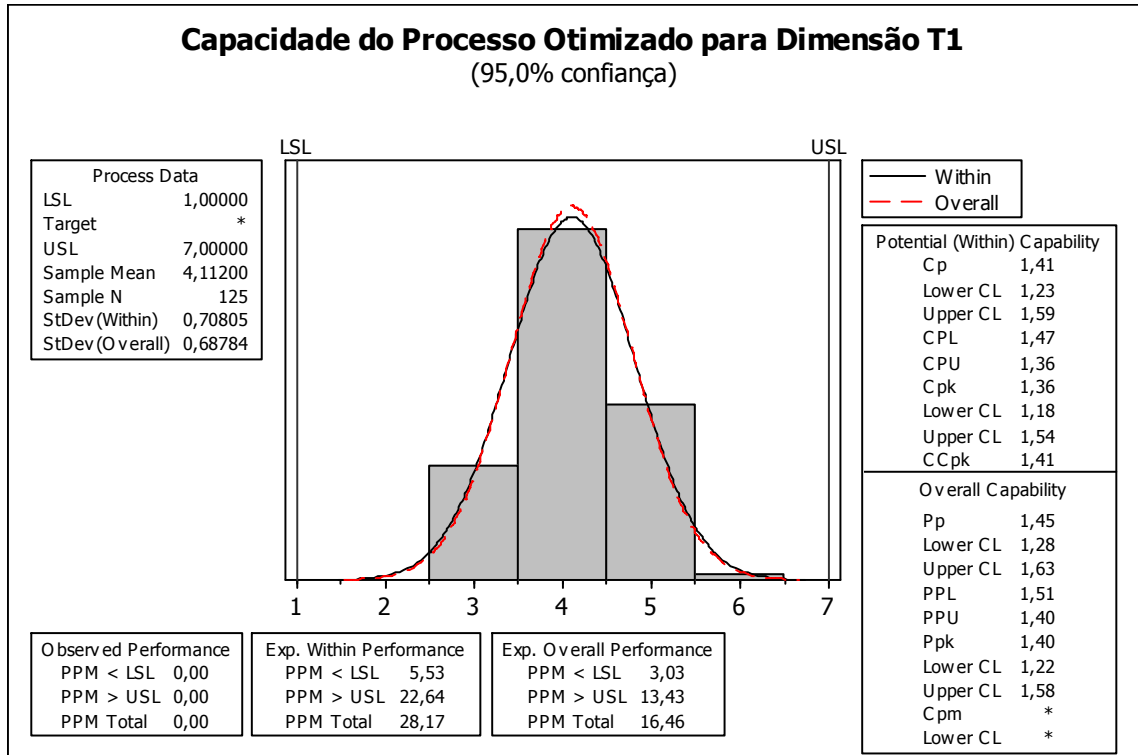


Figura 6.12 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T_1

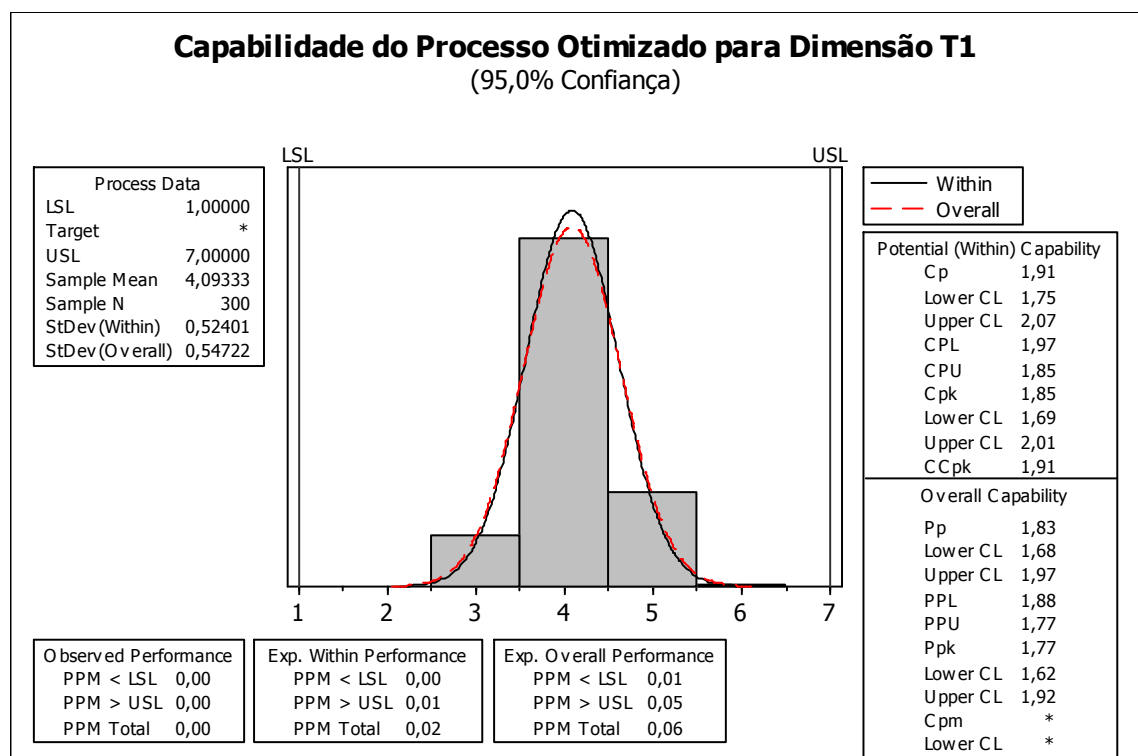


Figura 6.13 - Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T_1

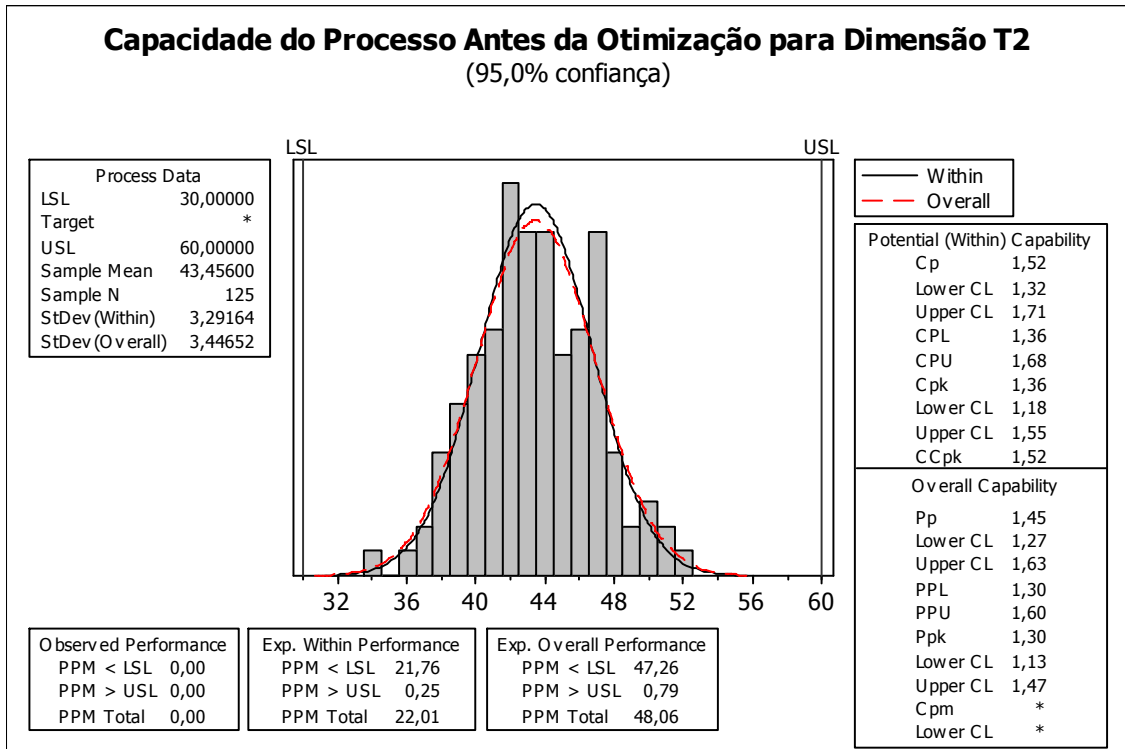


Figura 6.14 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T₂

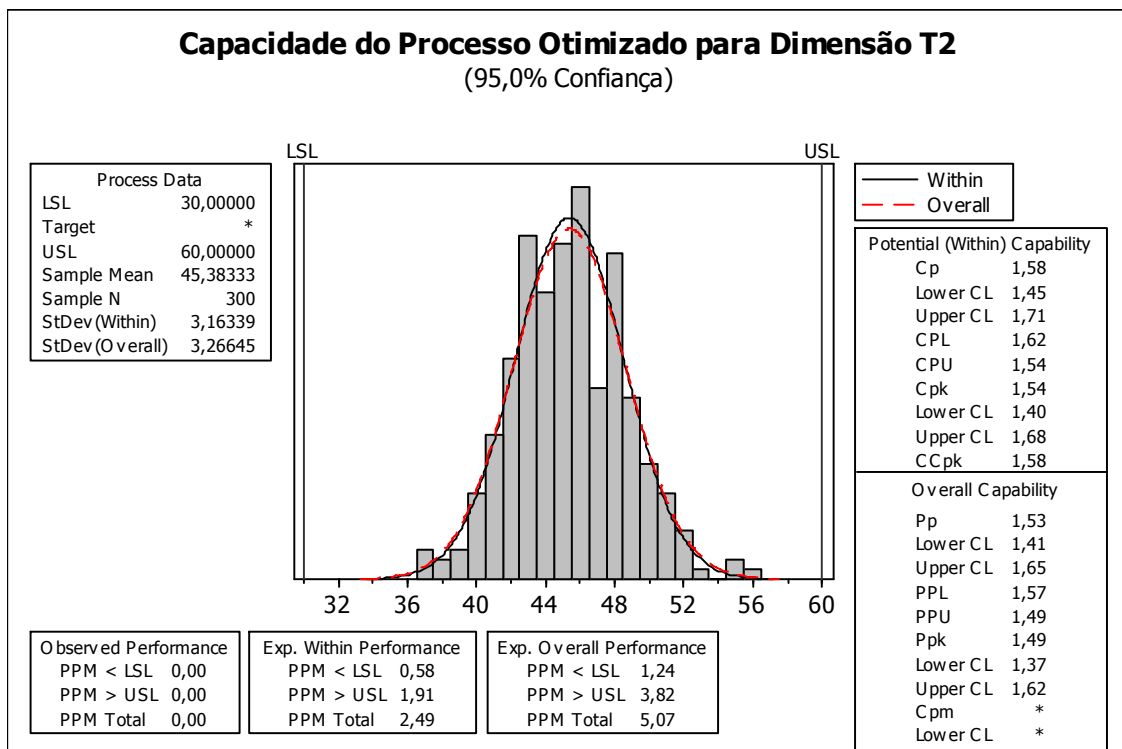


Figura 6.15- Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T₂

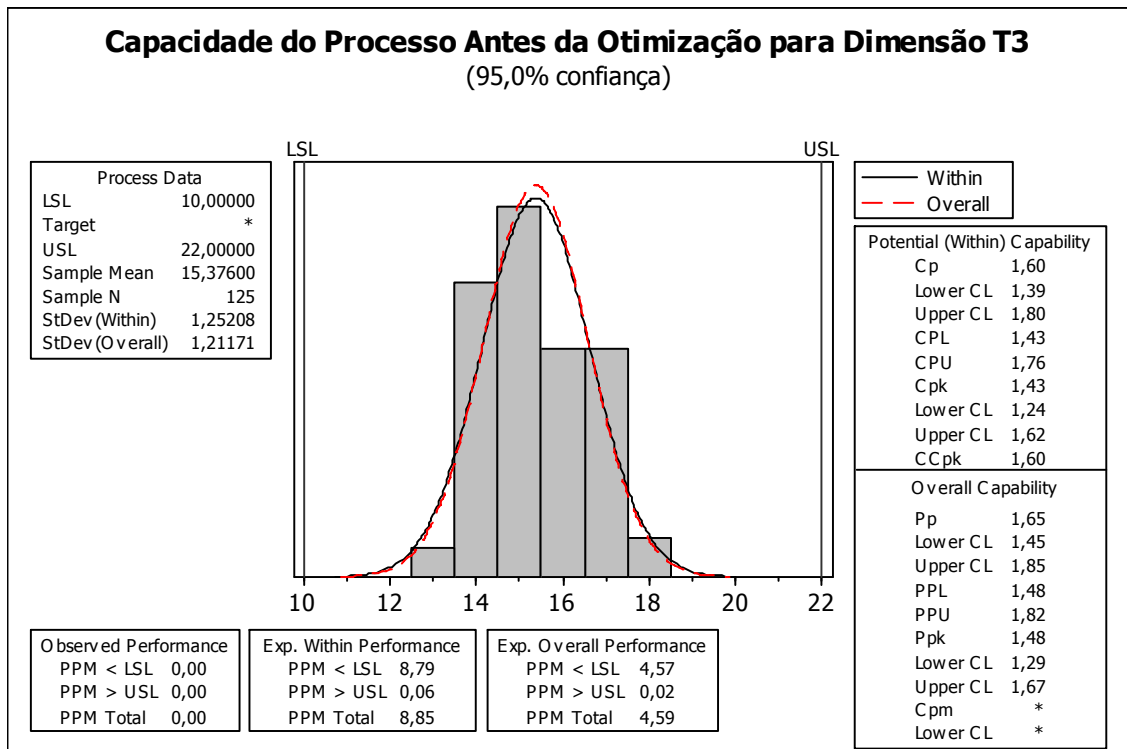


Figura 6.16 - Capacidade do Processo Antes da Otimização para Dimensão T₃

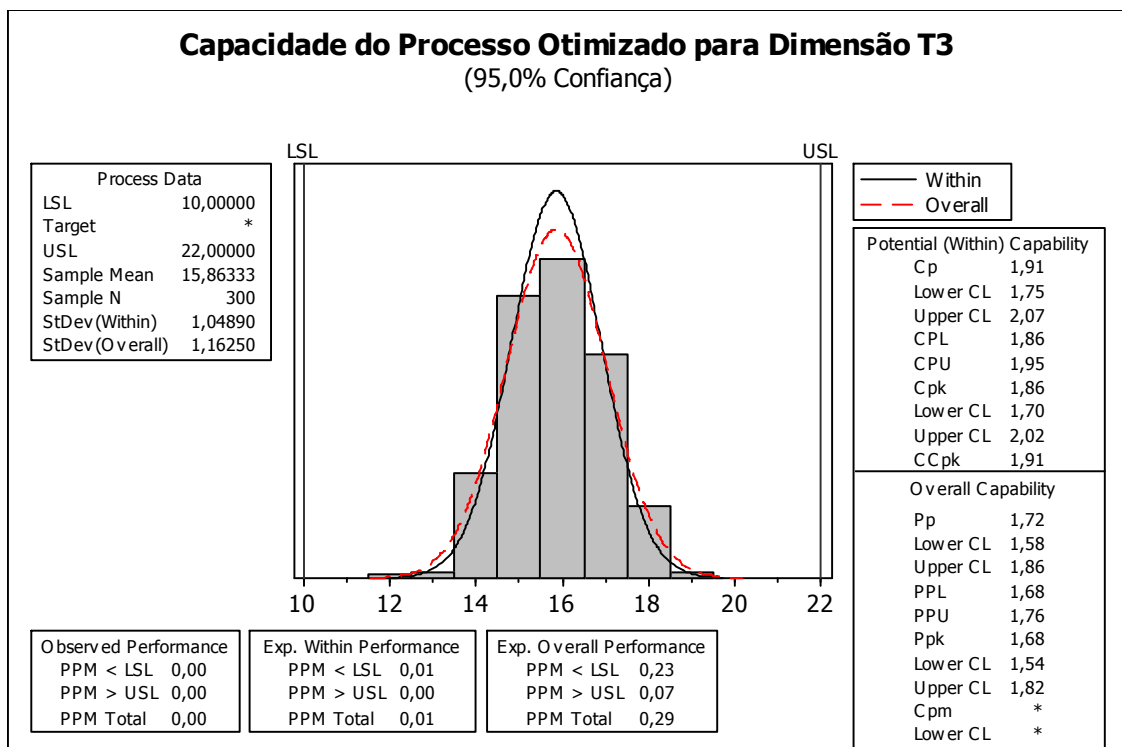


Figura 6.17 - Capacidade do Processo Após Otimização para Dimensão T₃

6.5 Custo do Processo

A otimização do processo teve como um dos objetivos aumentar a vida útil do dressador (V), para reduzir o custo com esta ferramenta, porém, culminou também na redução da profundidade de dressagem, conforme mostrado nos parâmetros do processo após a otimização. Adicionalmente, esta redução da profundidade de dressagem resulta no menor consumo de rebolos, visto que em cada dressagem menos material é removido desta ferramenta. Conseqüentemente, a redução potencial do custo de dressadores com os parâmetros otimizados é de 37,56%, que somada à redução de custo com menor consumo de rebolos, perfaz, 55,75%, conforme detalhado na Tabela 6.12 e Figura 6.18.

Tabela 6.12 – Potencial de redução de custos com dressadores e rebolos

	Custos 2011	Custos Estimados 2012	Potencial Redução de Custos	Redução %
Dressadores	R\$ 56.392,99	R\$ 35.214,29	R\$ 21.178,70	- 37,56%
Rebolos	R\$ 241.471,51	R\$ 96.588,61	R\$ 144.882,91	- 60,00%
Total	R\$ 297.864,50	R\$ 131.802,90	R\$ 166.061,61	- 55,75%

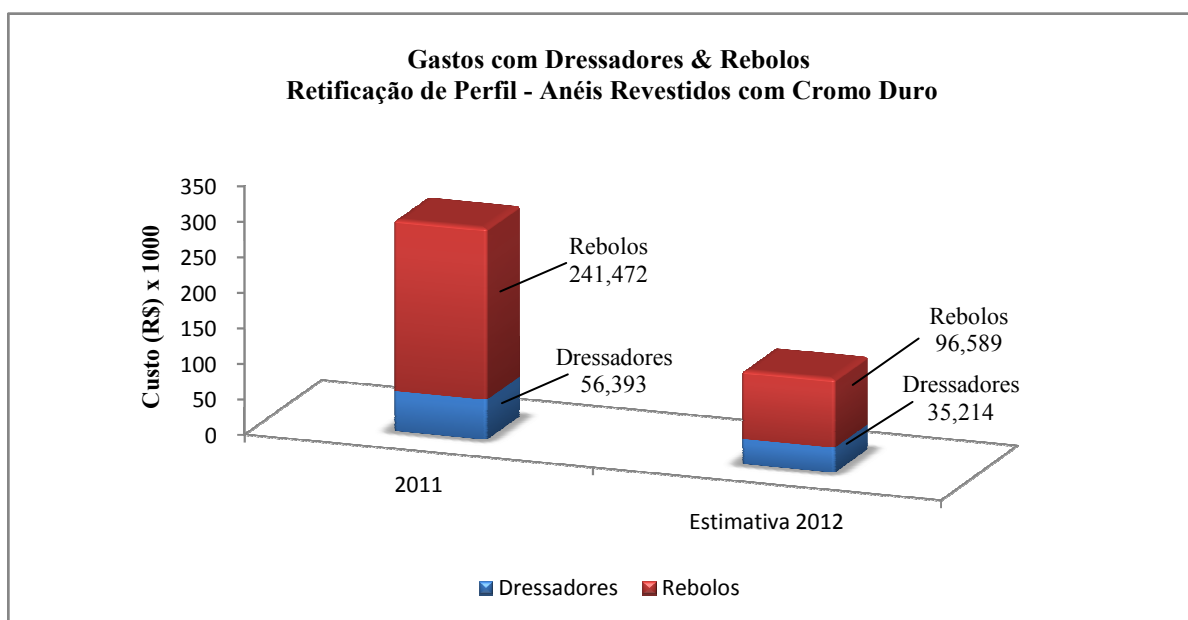


Figura 6.18 - Comparativo de custos com dressadores e rebolos antes e após otimização

Outros custos menos expressivos como redução do tempo com *setup* para troca de dressadores e rebolos, que contribuem para aumentar a produtividade não foram considerados, pois não foram alvos deste estudo.

7. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos experimentalmente, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

A abordagem do problema para otimização do processo de retificação cilíndrica de mergulho em anéis revestidos com cromo duro se mostrou adequada com a aplicação do Projeto Robusto de Parâmetros. Os resultados do Erro Médio Quadrático (EQM) dos experimentos de confirmação para as dimensões T_1 , T_2 e T_3 ficaram contidas nos intervalos de confiança calculados para os valores ótimos obtidos pela otimização.

Os experimentos de confirmação evidenciam que, mesmo com o aumento da vida útil do dressador, que antes da otimização era, em média, de 562 dressagens e após a otimização passou a ser de 889 dressagens, não houve redução da capacidade do processo, pelo contrário, apresentou ligeira melhoria, que pode ser observada pelo aumento do C_{pk} e P_{pk} para as três dimensões, T_1 , T_2 e T_3 , mostrando a robustez do processo com a minimização da variância.

O aumento da vida útil do dressador (V), medida em dressagens, se deu basicamente pela redução da profundidade de dressagem (a_d) de 0,040 [mm] para 0,016 [mm] e pela redução da velocidade de dressagem (V_{fd}) de 70 [mm/min] para 59 [mm/min]. Porém, com a redução destes parâmetros, houve redução no grau de recobrimento (U_d), indo de encontro às pesquisas de Linke e Klocke (2010), visto que a redução da velocidade de dressagem (V_{fd}) aumenta o grau de recobrimento do dressador, que na pesquisa destes autores, reduziu a temperatura na região de dressagem, reduzindo o desgaste do dressador. Entretanto, a atribuição da redução do desgaste à menor profundidade de dressagem vai ao encontro da afirmação de Marinescu *et al.* (2006), que dizem que o aumento da profundidade de dressagem leva ao maior desgaste do dressador.

A maior robustez do processo, com a redução da variância e alcance do alvo da especificação para dimensões T_1 , T_2 e T_3 , que foram medidos pelo erro quadrático médio (EQM), é explicada pelo aumento da velocidade periférica do rebolo (V_s) de 33 [m/s] para 39 [m/s], que gera menor desgaste do rebolo durante o ciclo de retificação, associada à redução da velocidade de dressagem (V_{fd}), que geram menor macro efeito da dressagem (W_t), deixando a superfície do rebolo menos agressiva, contribuindo para a menor variância das dimensões.

A otimização dos parâmetros, apesar do aumento da vida do dressador, reduziu os custos com dressadores na ordem de 37,56% e propiciou a redução da profundidade de dressagem (a_d), que também contribuiu para a redução de custo da operação com o consumo

de rebolos, que somada à redução do consumo do dressador podem auferir redução total de 55,75% com gastos destes dois itens.

Apesar dos resultados obtidos, não se pode concluir que os mesmos parâmetros sejam adequados para a retificação cilíndrica de mergulho de outros materiais, com diferentes tipos de rebolos, fluidos e máquinas, mesmo aplicados a anéis de pistão com outros recobrimentos. Porém a mesma abordagem pode ser aplicada a outras operações de usinagem.

7.1 Sugestões para Estudos Futuros

Este trabalho apresentou a aplicação do Projeto Robusto de Parâmetros e outros métodos de otimização num processo de retificação específico para a fabricação de anéis de pistão, voltado ao acabamento da face de contato, dentro de certos limites de trabalho e com particularidades, estudando as variáveis de entrada e as saídas do processo. No entanto, outros aspectos poderiam ser considerados em outras situações de usinagem na tentativa de aperfeiçoar o método ou verificar suas limitações, bem como:

- Adotar os métodos aplicados a outros processos de retificação, ou diferentes processos de usinagem, além de outros materiais, contribuindo para o aumento do conhecimento científico do método.
- Incluir ou adotar outras variáveis do processo como diferentes tipos de rebolos, fluidos de corte e formas de dressagem. Além da consideração de outros ruídos comuns ao processo de retificação, como: variações de dureza e porosidade nos rebolos e propriedades mecânicas da matéria prima das peças.
- Aplicar o método do Erro Quadrático Médio com o acréscimo de pesos para cada resposta de interesse ou entre a média e a variância.
- Aplicar diferentes rotinas de otimização, como Algoritmos Genéticos, que são métodos de otimização global.

8. APÊNDICE

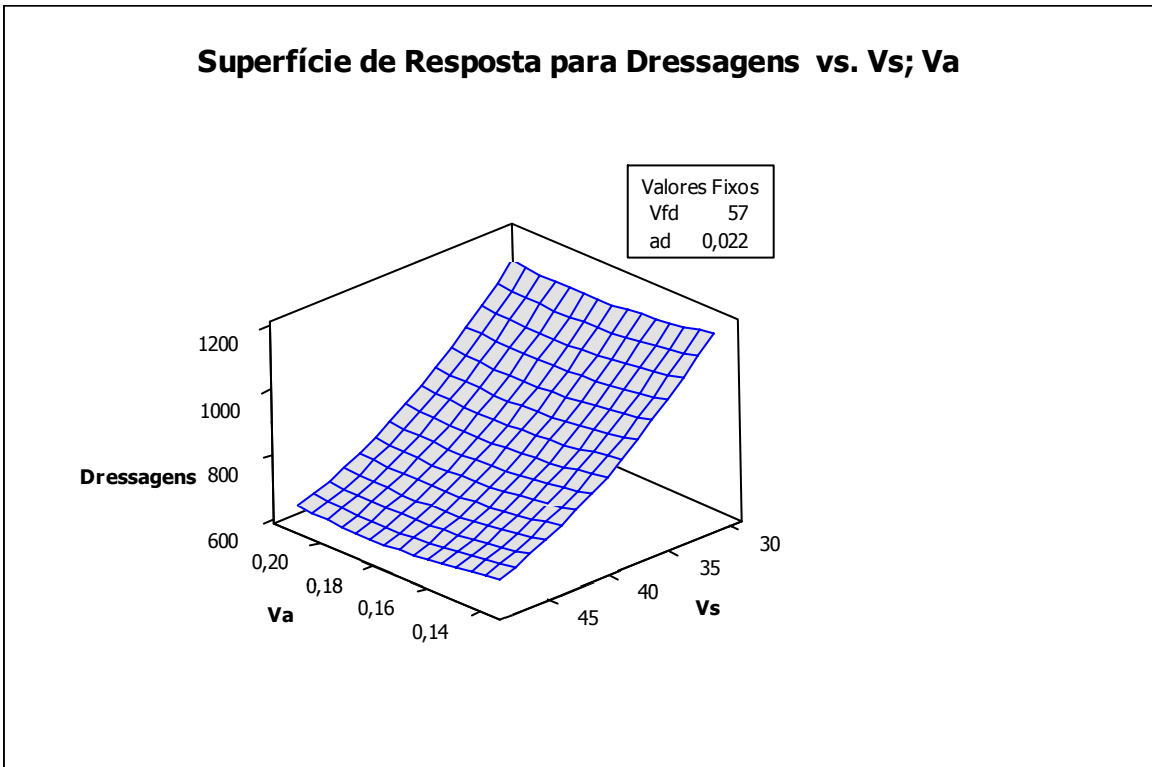
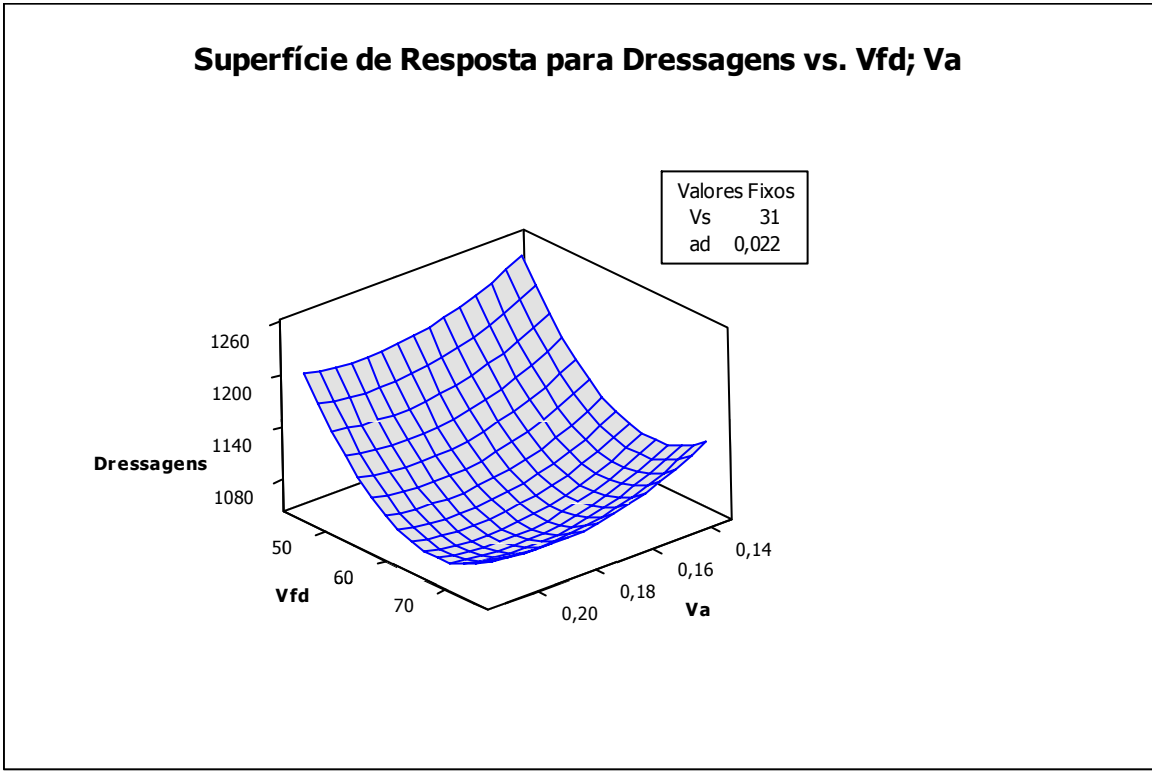
Apêndice A – Valores das dimensões T_1 , T_2 e T_3 obtidas nos experimentos

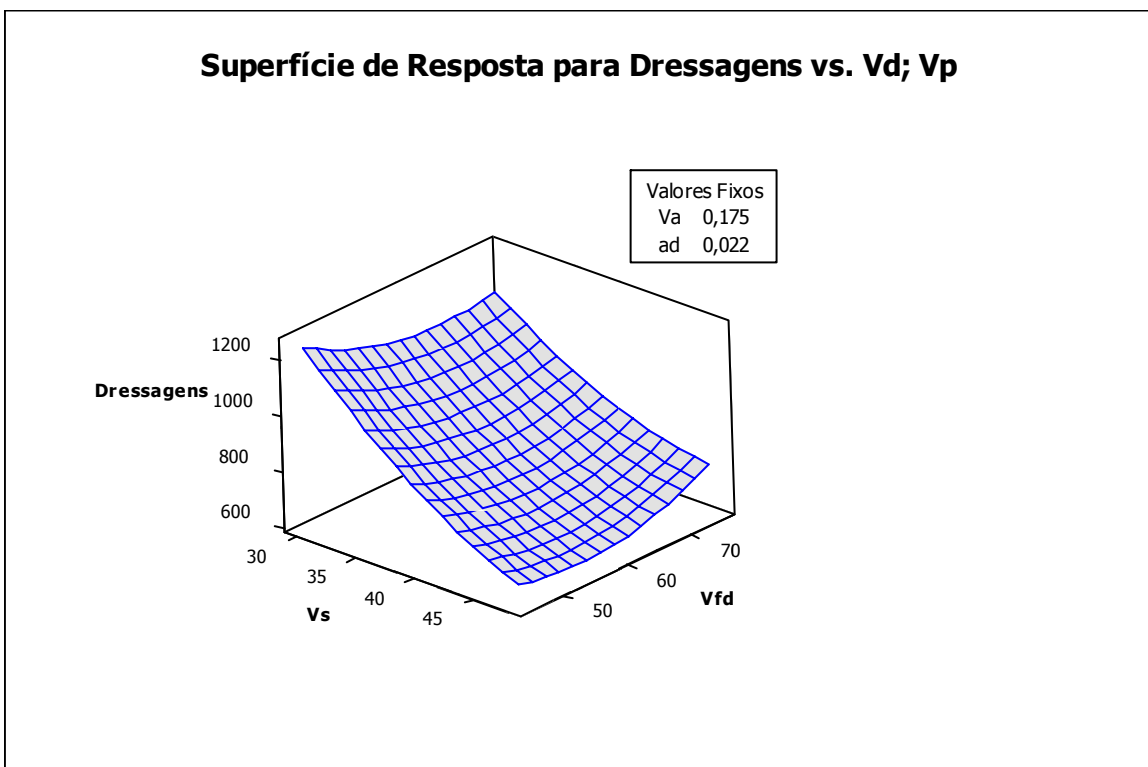
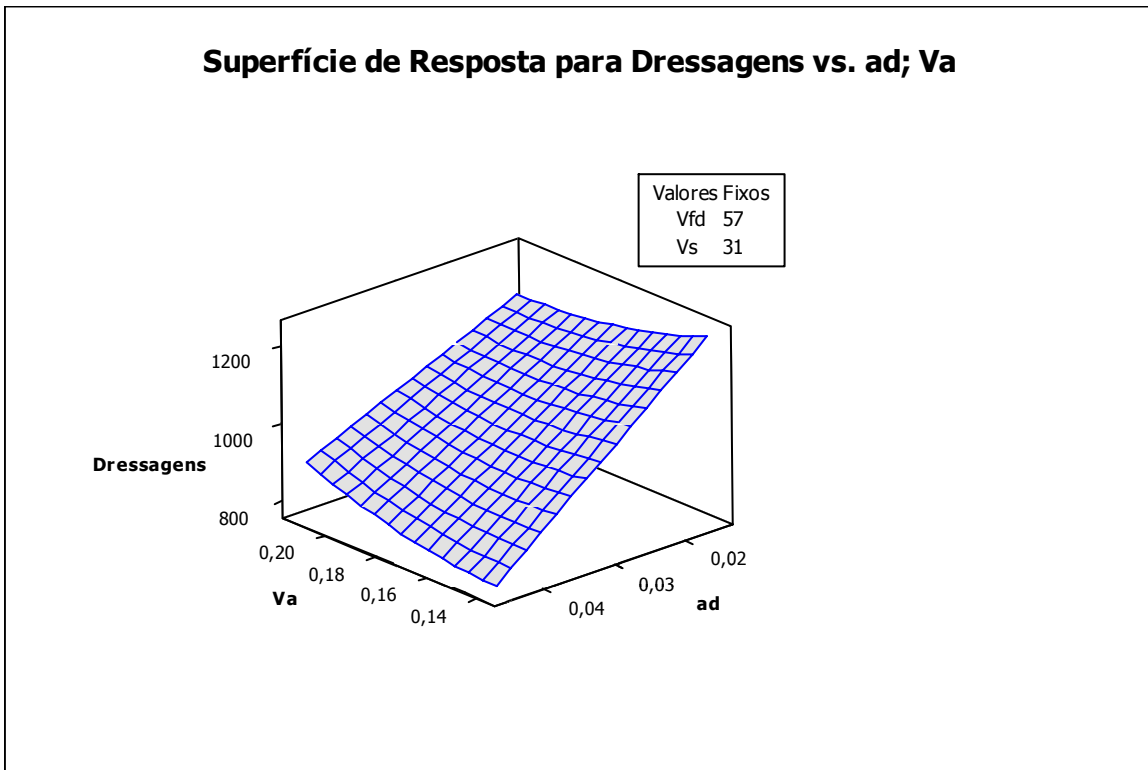
Exp.	Dimensão T_1				Dimensão T_2				Dimensão T_3			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Z1												
Setup	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Z2												
Árvore	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
1	5	6	4	3	51	53	44	45	15	15	16	17
2	4	5	4	5	45	50	48	47	17	15	16	16
3	5	6	6	4	47	54	46	43	16	15	16	18
4	6	4	4	5	48	45	46	48	16	17	16	16
5	5	5	4	5	48	49	46	47	16	16	18	16
6	5	4	5	4	46	40	51	47	16	18	15	16
7	6	5	3	5	47	51	45	49	16	17	17	16
8	6	4	5	4	47	41	47	45	16	18	16	17
9	6	3	5	4	46	42	49	40	16	18	16	17
10	6	3	7	5	48	42	48	45	16	18	16	17
11	6	4	6	4	49	42	47	47	16	18	16	18
12	3	6	6	4	41	46	48	46	18	17	16	17
13	6	4	6	4	48	40	48	45	16	17	16	17
14	6	5	6	3	49	46	48	40	16	16	16	18
15	3	6	7	5	42	49	46	42	17	16	15	17
16	5	3	4	6	47	42	45	46	16	18	17	16
17	5	6	4	6	46	48	46	47	18	16	18	16
18	6	4	4	6	49	43	45	48	17	18	17	16
19	5	5		6	46	48	44	47	17	15	18	17
20	6	4	7	4	48	44	49	43	16	18	15	17
21	6	4	6	4	49	43	47	44	17	18	16	16
22	5	5	6	4	50	46	42	44	15	17	16	17
23	6	5	6	4	47	46	46	52	16	16	16	18
24	7	5	6	4	51	52	47	44	16	17	16	17
25	7	5	7	5	50	54	56	55	15	17	16	16
26	7	5	6	4	49	55	48	54	16	17	16	18
27	5	4	6	4	42	42	46	42	16	17	16	16
28	6	3	6	4	43	41	46	40	17	18	15	17
29	6	5	5	5	47	45	50	46	16	17	16	17
30	6	5	7	4	48	47	50	43	16	16	16	18

Apêndice B – Valores das médias, alvos, variâncias e erros quadráticos médios obtidos nos experimentos.

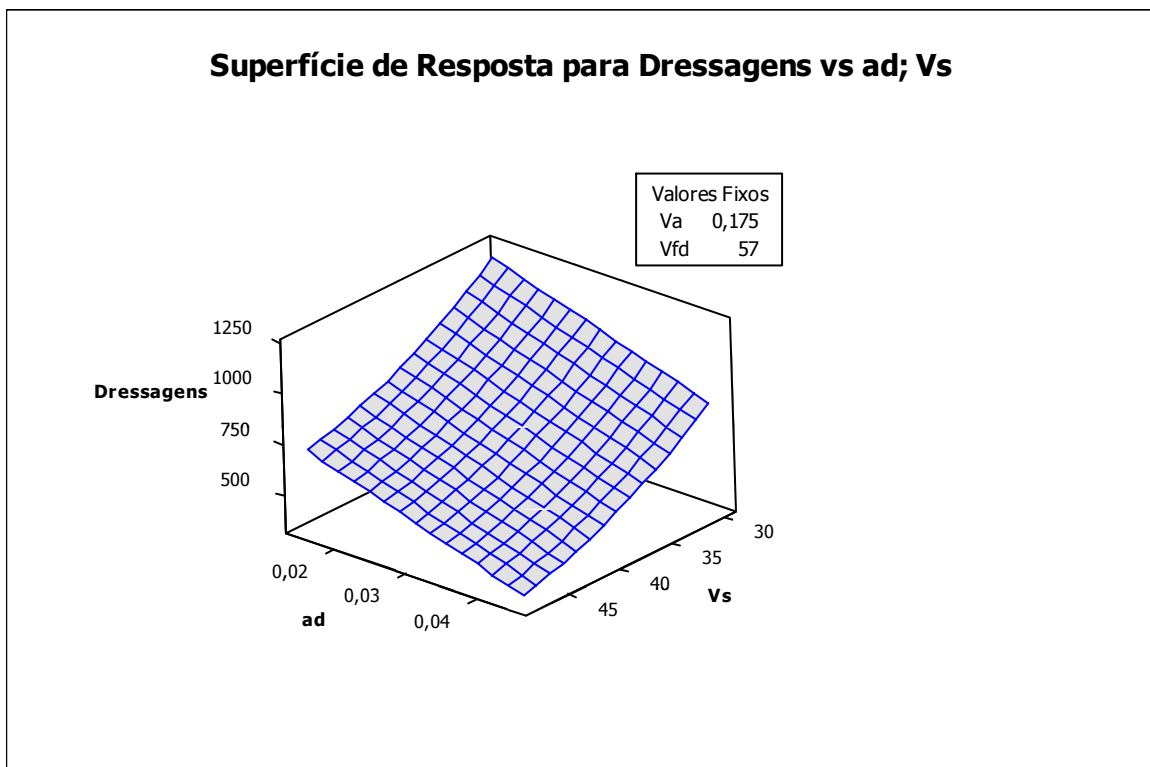
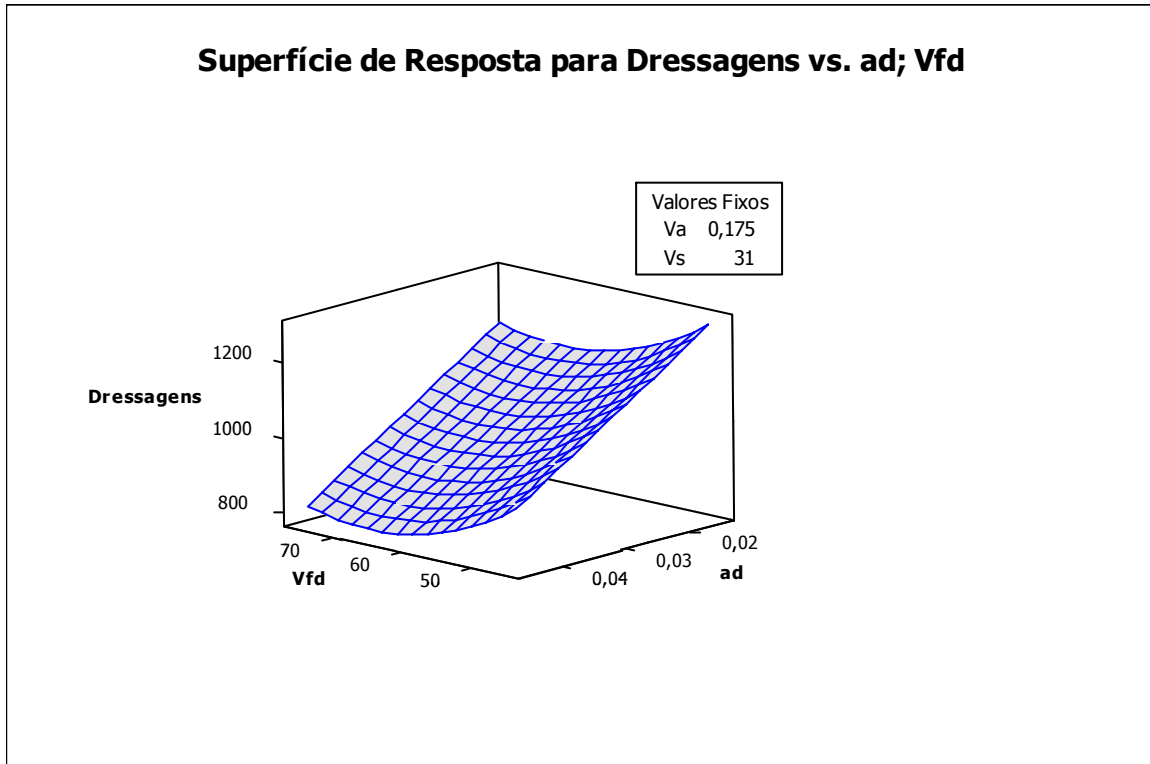
Exp.	Dimensão T ₁				Dimensão T ₂				Dimensão T ₃			
	Média	Alvo	Variância	EQM	Média	Alvo	Variância	EQM	Média	Alvo	Variância	EQM
	$\hat{\mu}$	T	$\hat{\sigma}^2$	$(\hat{\mu} - T) + \hat{\sigma}^2$	$\hat{\mu}$	T	$\hat{\sigma}^2$	$(\hat{\mu} - T) + \hat{\sigma}^2$	$\hat{\mu}$	T	$\hat{\sigma}^2$	$(\hat{\mu} - T) + \hat{\sigma}^2$
1	4,48	4	1,23	1,46	48,05	45	28,51	37,81	15,55	16	1,89	2,10
2	4,61	4	0,61	0,98	47,26	45	19,09	24,22	15,64	16	1,24	1,36
3	5,10	4	0,45	1,66	47,45	45	31,79	37,79	16,10	16	1,63	1,64
4	4,85	4	0,54	1,26	46,63	45	15,06	17,70	16,20	16	1,29	1,33
5	4,78	4	0,59	1,19	47,20	45	16,42	21,26	16,28	16	1,59	1,66
6	4,43	4	0,56	0,74	45,78	45	26,54	27,14	16,18	16	1,33	1,36
7	4,88	4	1,39	2,16	47,73	45	38,67	46,09	16,48	16	1,28	1,51
8	4,75	4	0,91	1,47	45,13	45	24,27	24,28	16,63	16	1,42	1,81
9	4,65	4	1,57	1,99	44,20	45	28,98	29,62	16,75	16	1,63	2,19
10	5,08	4	1,97	3,12	45,50	45	27,64	27,89	16,65	16	1,87	2,30
11	4,77	4	1,46	2,06	46,38	45	27,59	29,49	16,90	16	1,76	2,57
12	4,80	4	1,55	2,19	45,35	45	33,05	33,18	16,90	16	1,94	2,75
13	4,98	4	1,46	2,41	45,55	45	25,18	25,48	16,40	16	1,48	1,64
14	5,03	4	1,61	2,67	45,55	45	30,25	30,56	16,55	16	2,20	2,51
15	5,13	4	1,65	2,92	44,88	45	24,27	24,28	16,50	16	1,38	1,63
16	4,70	4	1,50	1,99	45,08	45	30,17	30,18	16,85	16	1,67	2,39
17	5,15	4	1,46	2,79	46,80	45	28,42	31,66	16,78	16	1,97	2,57
18	5,03	4	2,23	3,28	46,13	45	30,52	31,79	16,88	16	1,65	2,42
19	5,17	4	1,19	2,55	46,18	45	21,43	22,81	16,65	16	2,64	3,07
20	5,23	4	1,41	2,91	46,08	45	27,25	28,41	16,55	16	2,66	2,97
21	5,05	4	1,54	2,64	45,85	45	23,05	23,78	16,48	16	1,69	1,92
22	5,00	4	1,03	2,03	45,38	45	26,75	26,89	16,28	16	1,59	1,66
23	5,10	4	1,17	2,38	47,63	45	34,91	41,80	16,25	16	1,47	1,54
24	5,48	4	1,33	3,51	48,43	45	27,64	39,37	16,48	16	1,13	1,35
25	5,90	4	2,09	5,70	53,58	45	21,33	94,86	16,00	16	1,85	1,85
26	5,70	4	1,55	4,44	51,63	45	20,86	64,75	16,53	16	1,33	1,61
27	4,73	4	0,97	1,50	43,05	45	8,41	12,21	16,13	16	0,98	1,00
28	4,78	4	1,97	2,57	42,38	45	19,83	26,72	16,95	16	1,74	2,64
29	5,18	4	1,07	2,45	47,03	45	20,03	24,13	16,65	16	0,85	1,27
30	5,38	4	1,16	3,05	46,95	45	17,54	21,34	16,30	16	1,86	1,95

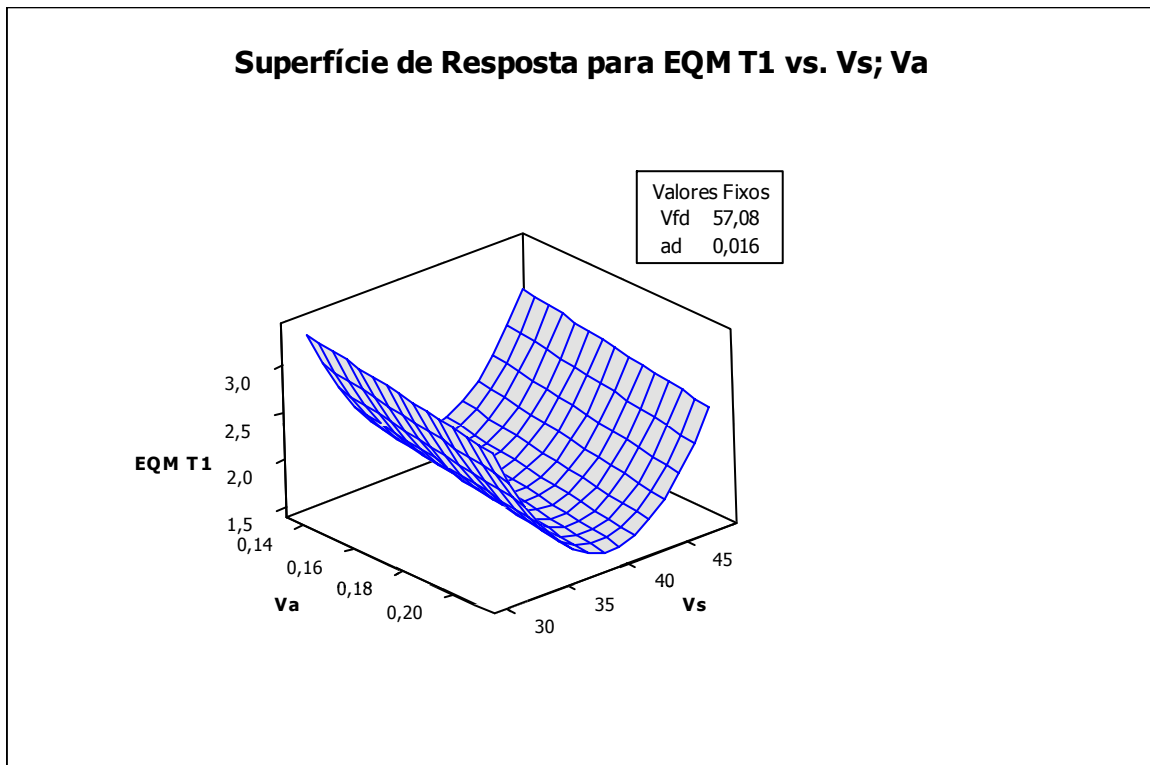
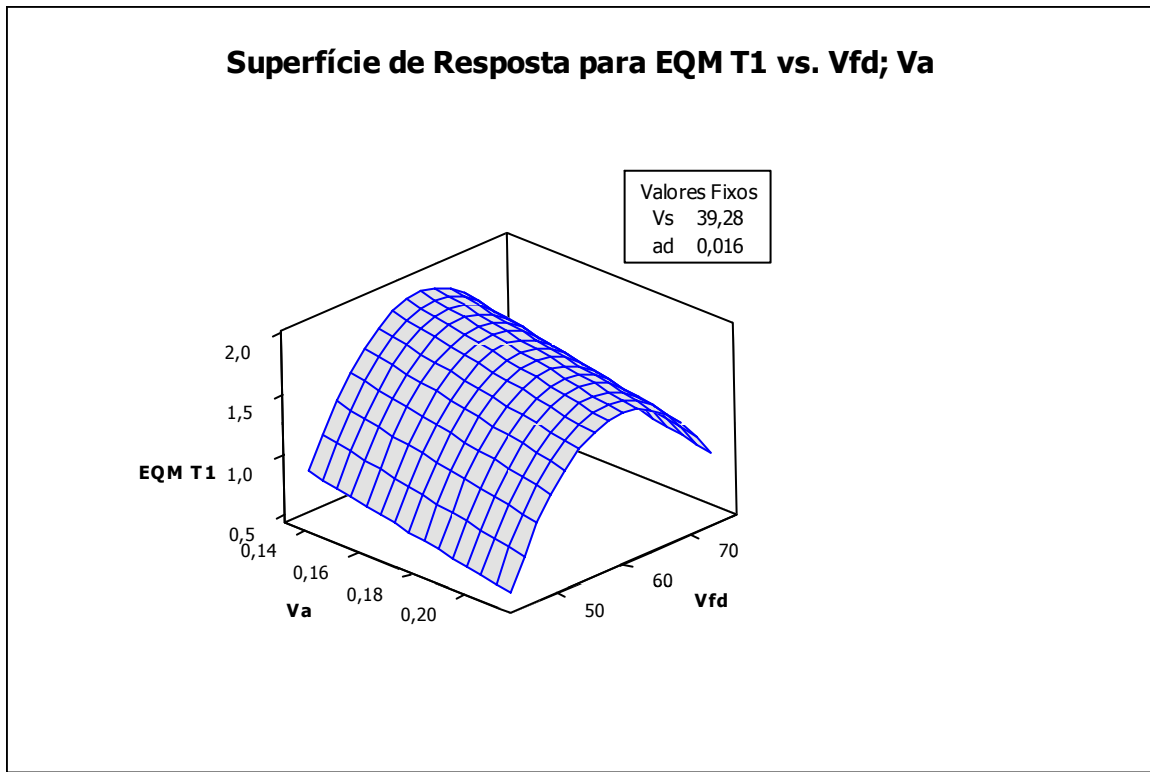
Apêndice C – Gráficos das Superfícies de Resposta para vida do dressador



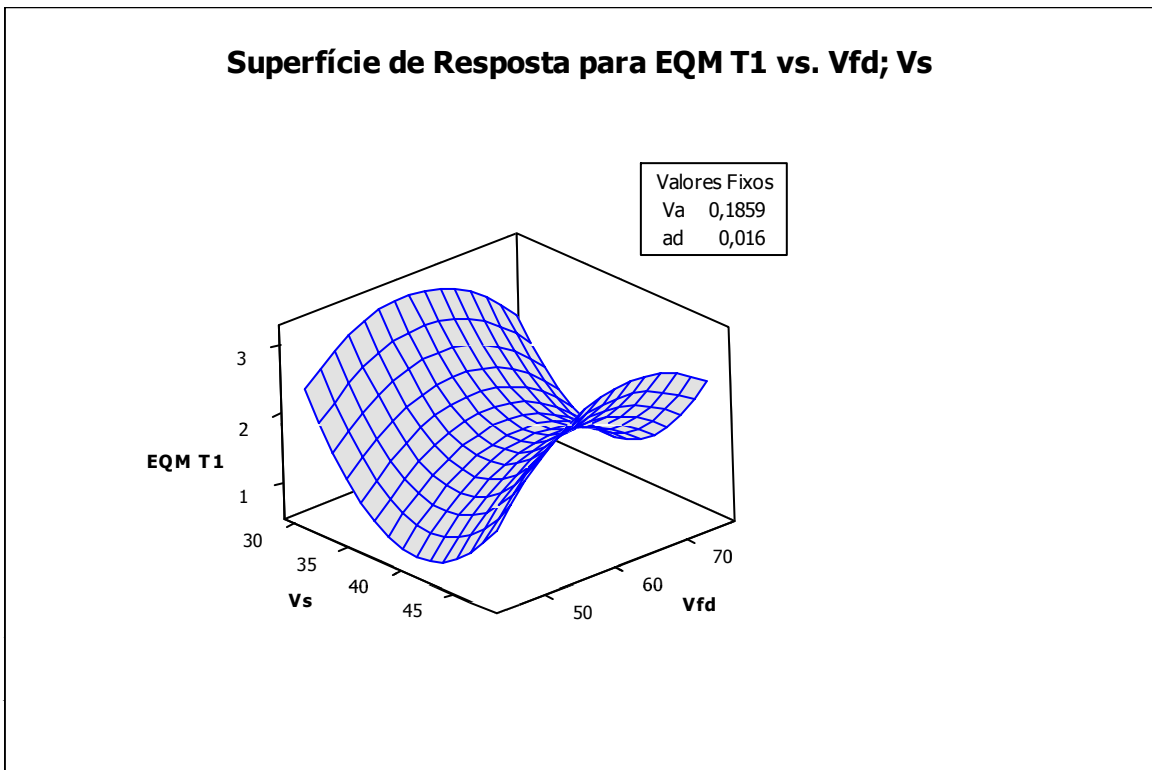
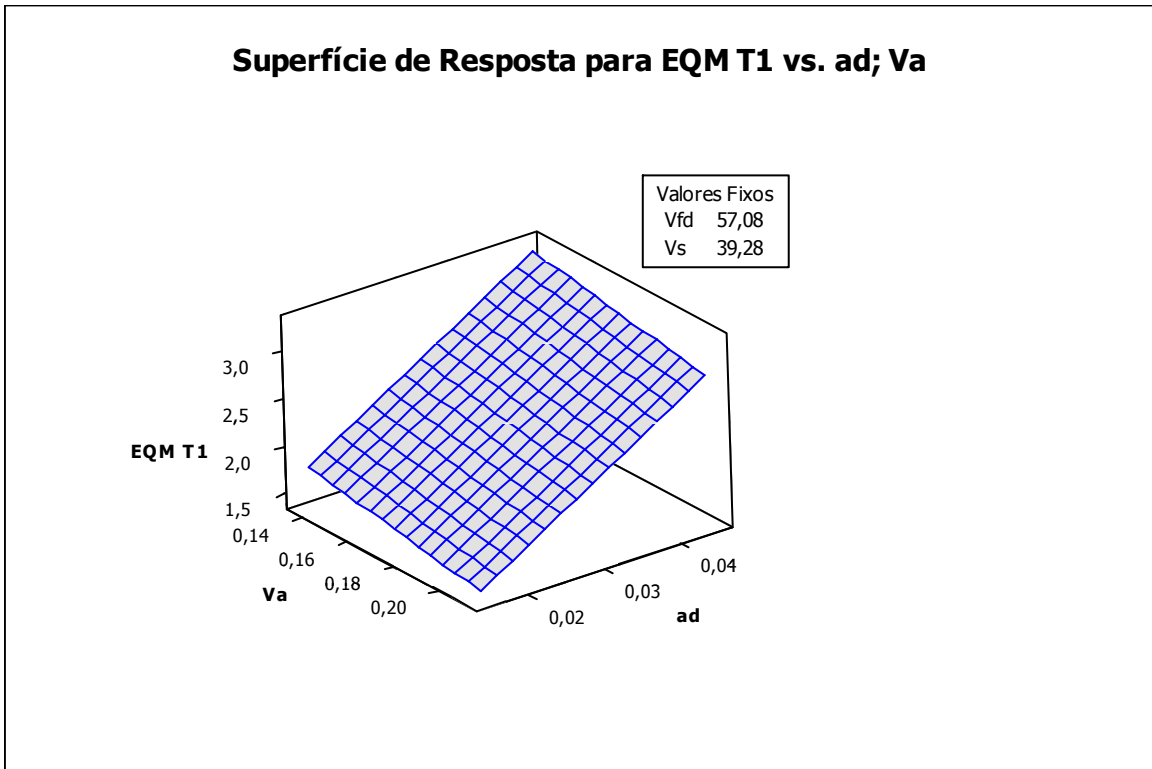
Apêndice C – Gráficos das Superfícies de Resposta para vida do dressador (continuação)

Apêndice C – Gráficos das Superfícies de Resposta para vida do dressador (continuação)

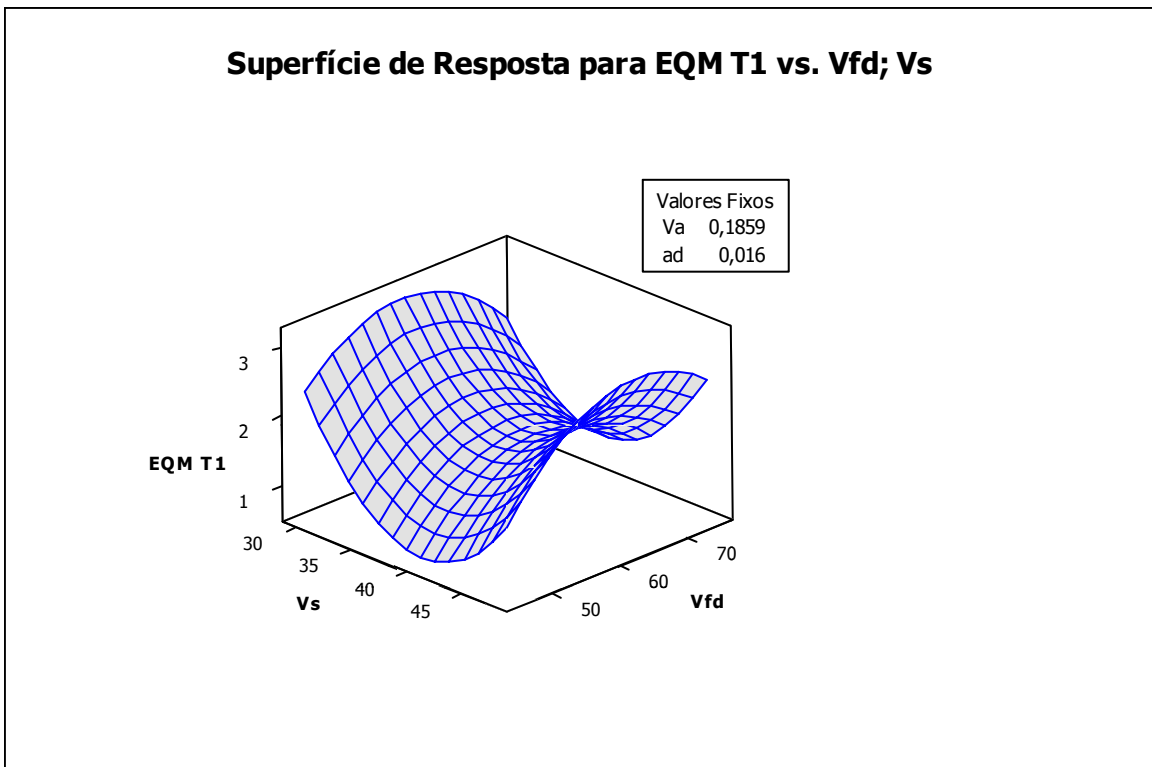
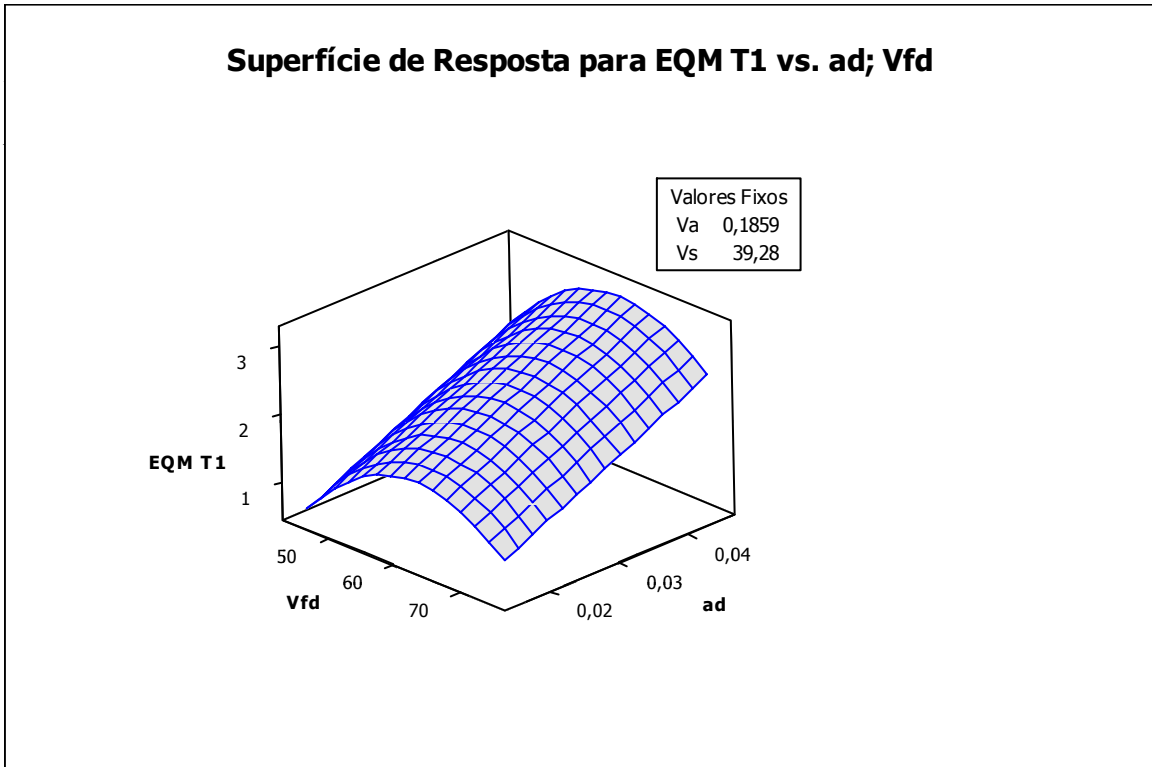


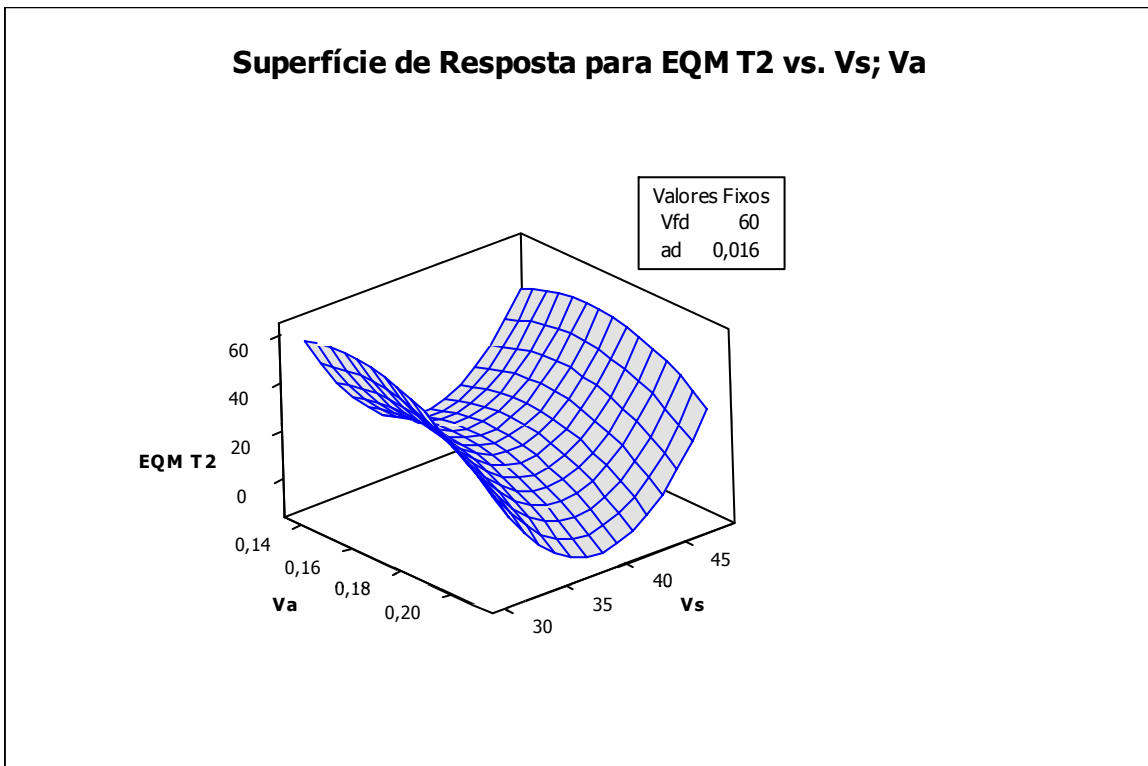
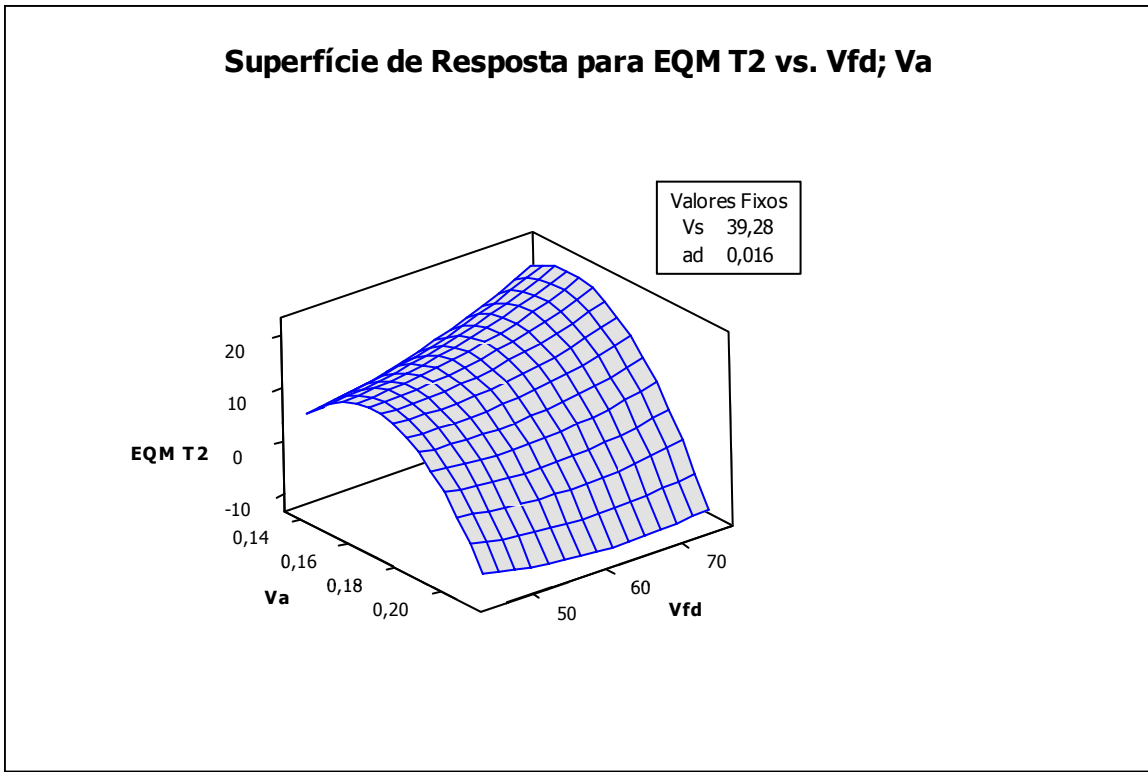
Apêndice D – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_1$ 

Apêndice D – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_1$ (continuação)

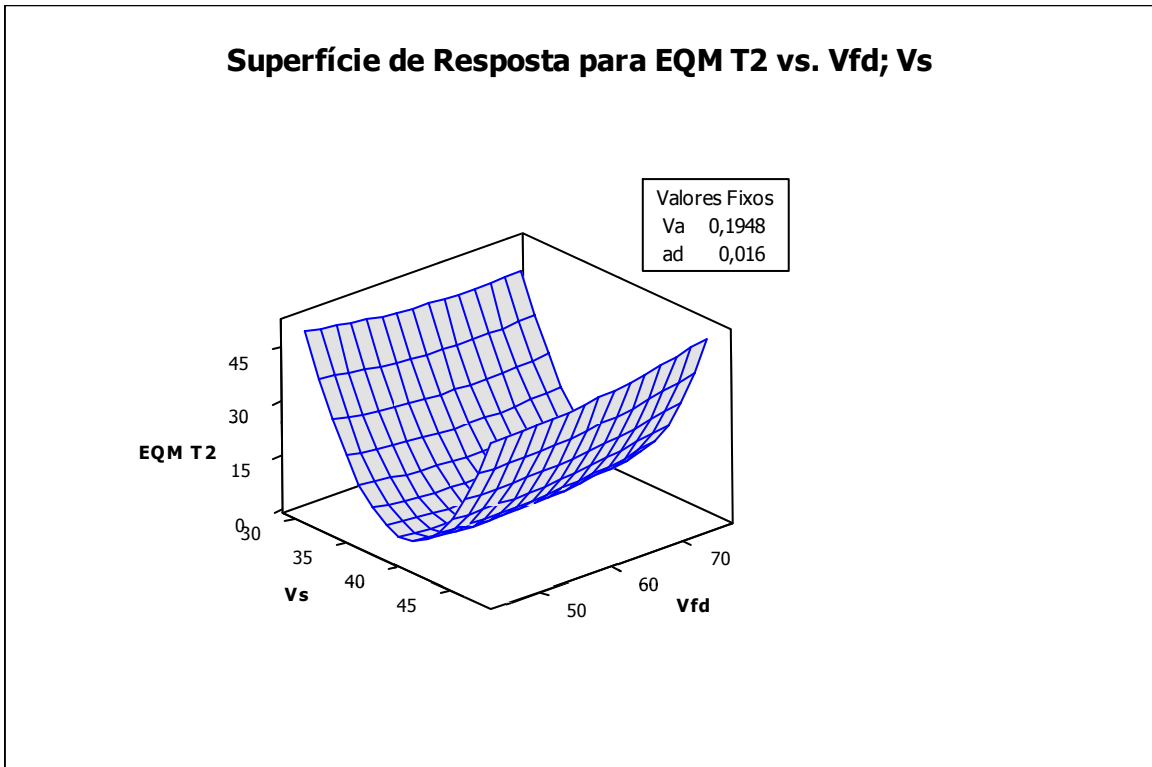
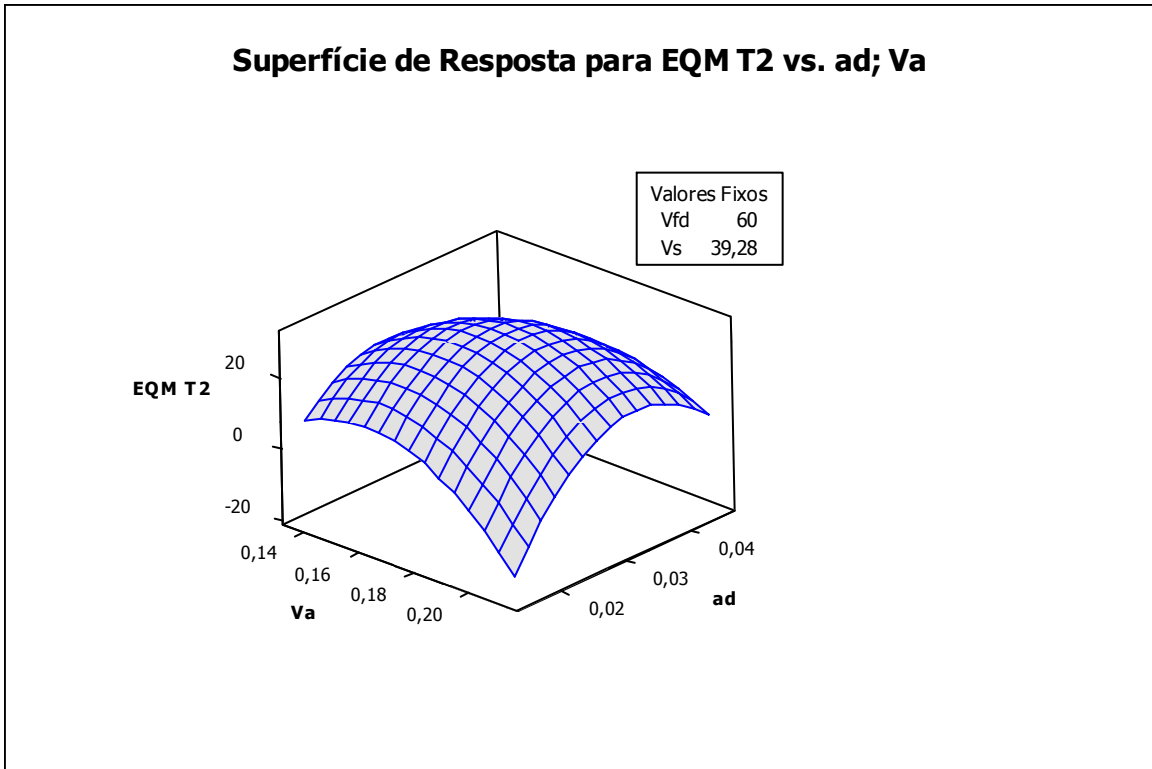


Apêndice D – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_1$ (continuação)

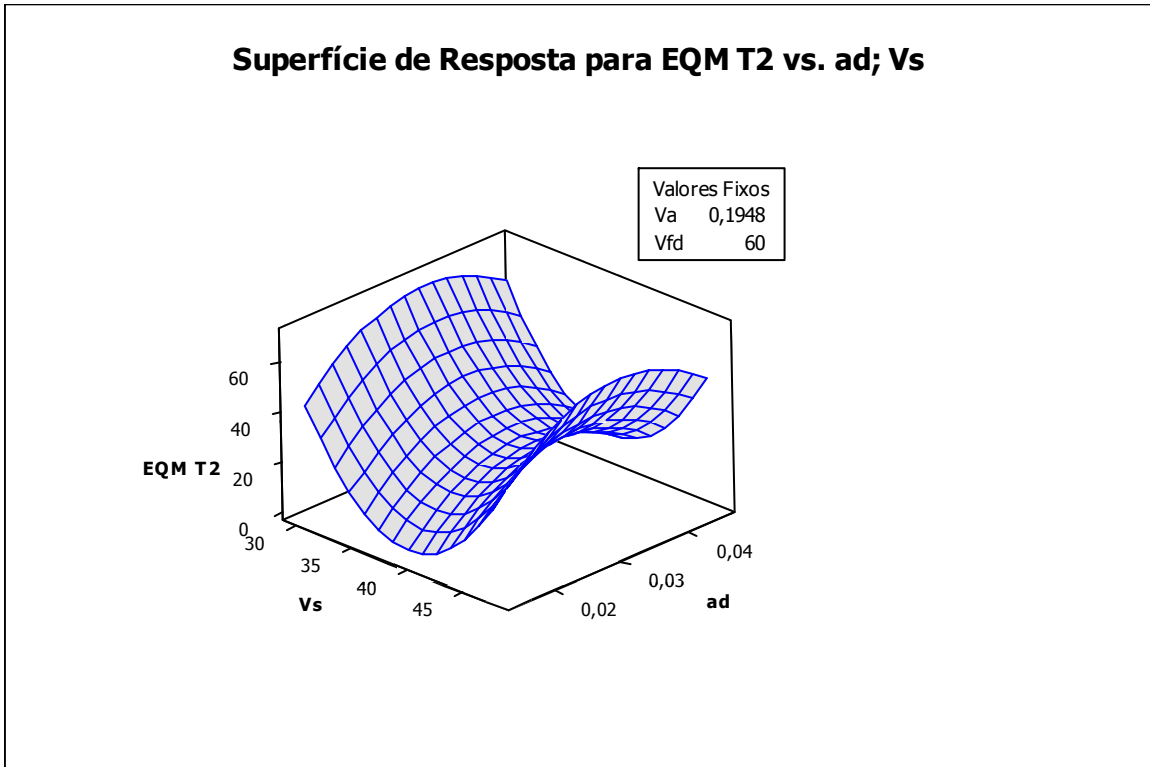
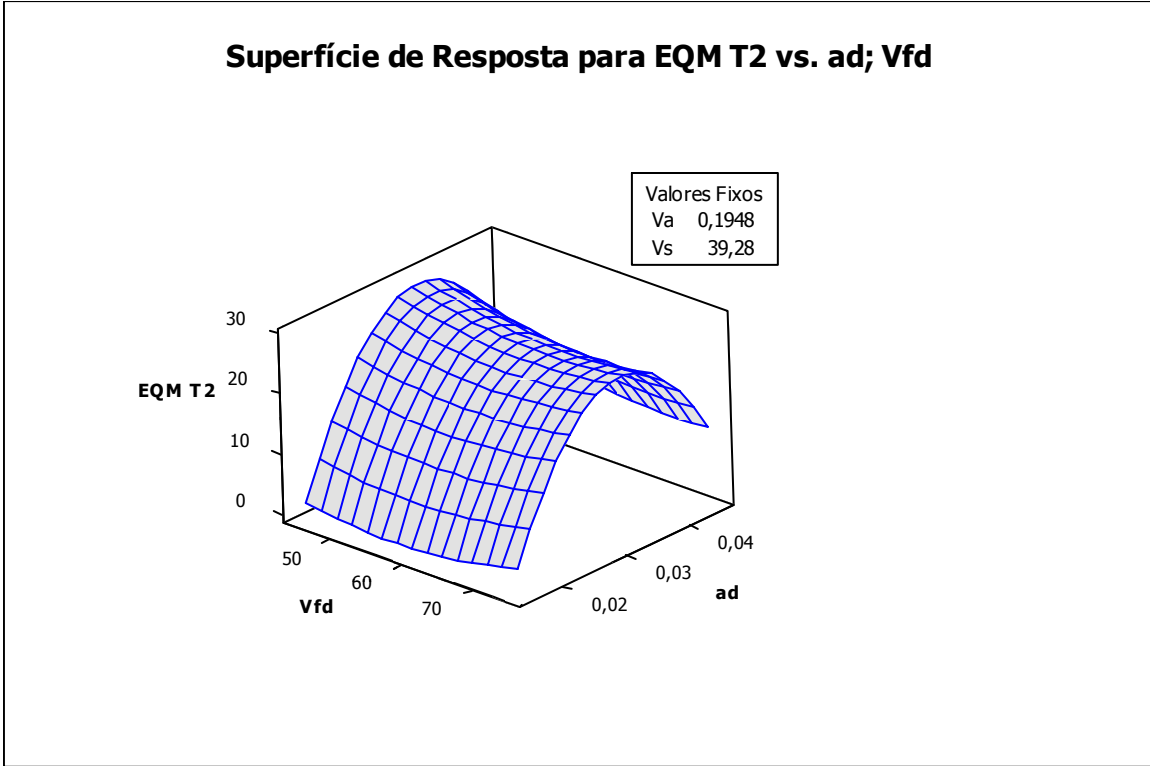


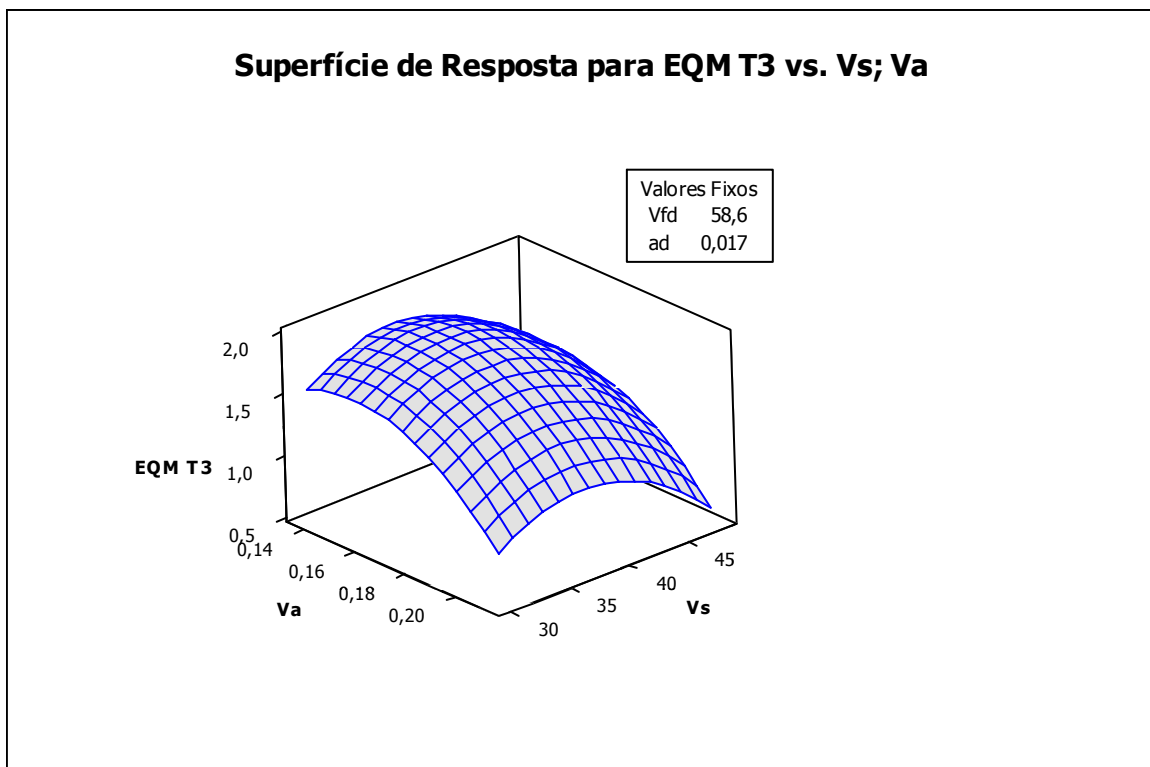
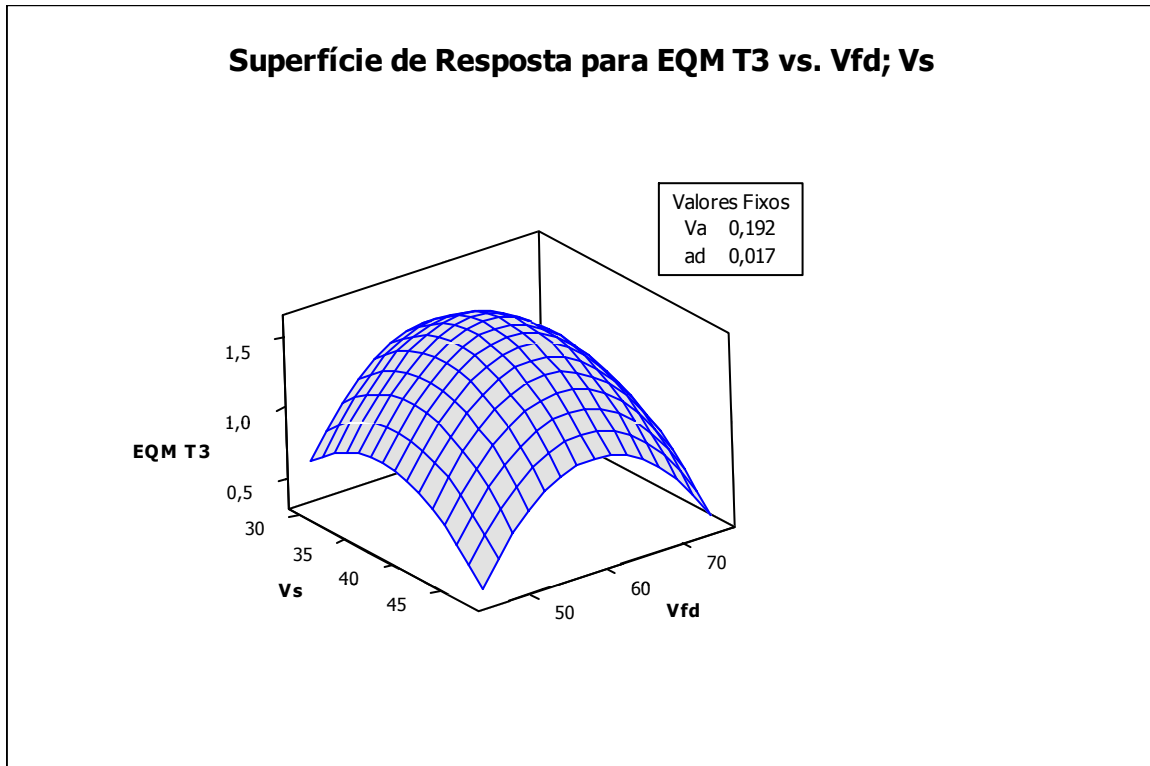
Apêndice E – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_2$ 

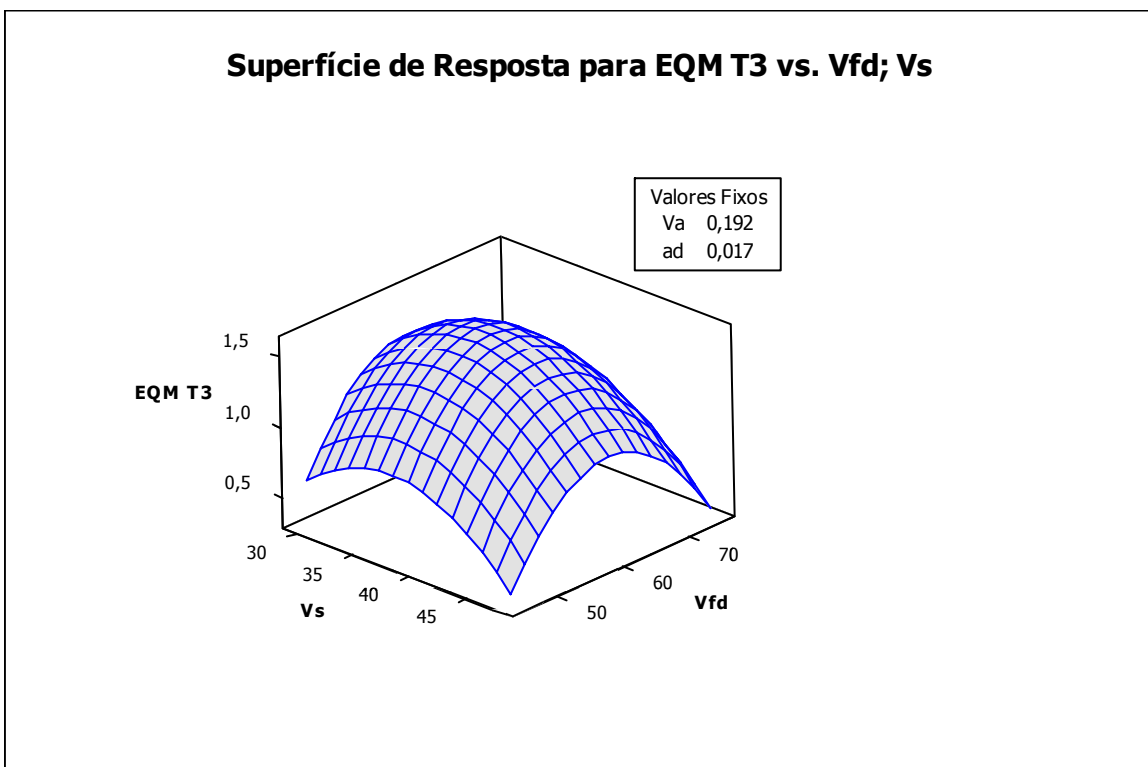
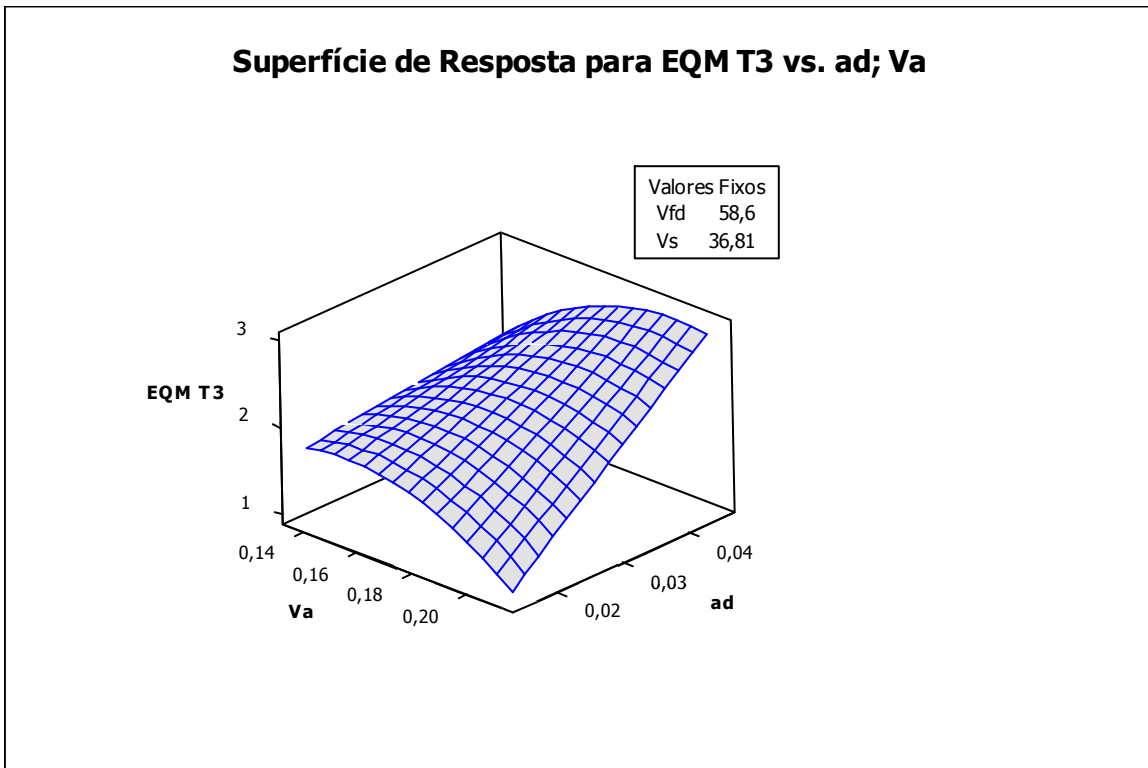
Apêndice E – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_2$ (continuação)



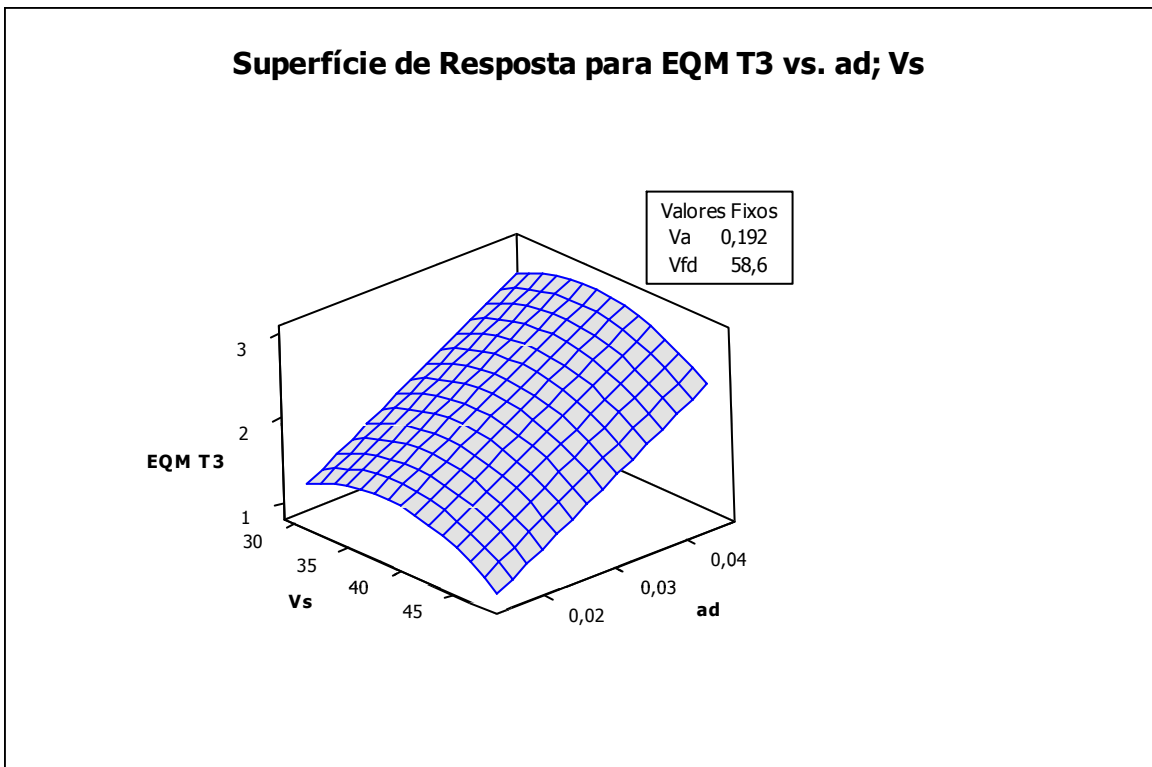
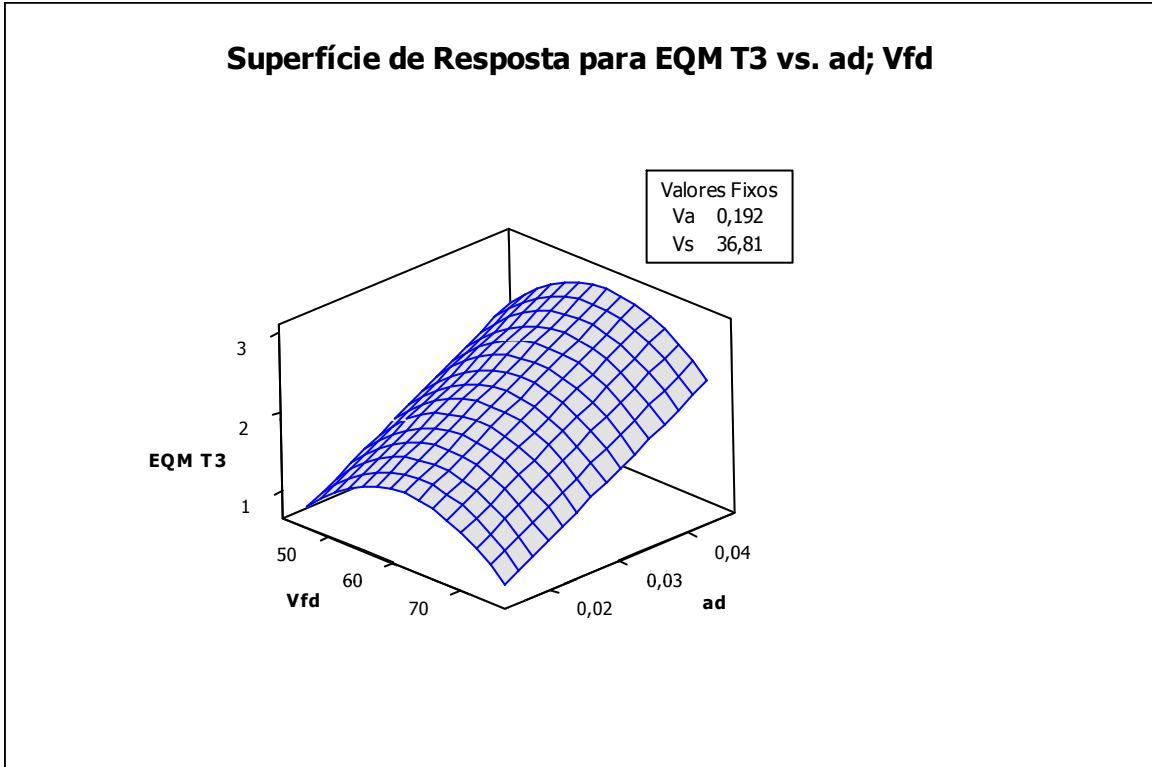
Apêndice E – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_2$ (continuação)



Apêndice F – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_3$ 

Apêndice F – Gráficos das Superfícies de Resposta para $EQM T_3$ (continuação)

Apêndice F – Gráficos das Superfícies de Resposta para *EQM T₃* (continuação)



9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, P.R., CRUZ, C.E.D., PAULA, W.C.F., BIANCHI, E.C., THOMAZELLA R., and DOTTO, F.R.L. “Neural Network Approach for Surface Roughness Prediction in Surface Grinding”. Proceedings of the 25th conference on Proceedings of the 25th IASTED International Multi-Conference: artificial intelligence and applications, pp. 96 -101, 2007.

AIAG, Automotive Institute Action Group, Manual de Referência do Controle Estatístico de Processo (CEP) 2ª Edição, 2005.

AIAG, Automotive Institute Action Group, Manual do Processo de Aprovação de Peças de Produção (PAPP) 4ª Edição, 2006.

ALVES, M.C.S. “Análise da Influência da Velocidade de Mergulho na Retificação de Aços Endurecidos Utilizando Refrigeração Otimizada”. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da UNESP – São Paulo, 2005.

ARDAKANI, M. K., NOOROSSANA R. “A New Optimization Criterion for Robust Parameter Design - The Case of Target is Best”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.38, pp. 851-859, 2008.

ARDAKANI, M. K., NOOROSSANA R. “A Weighted Metric Method to Optimize Multi-Response Robust Problems”. Journal of Industrial Engineering International, v. 5, pp. 10-19, 2009.

BIANCHI, E. C., MONICI R. D., NETO L. D., AGUIAR, A. R. , GUERMANDI , L. G. “Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado, Cerâmica”, v.57, n.344, pp. 431-437, São Paulo, 2011.

BOX, G. E. P. “Discussion: Off Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method”, Journal of Quality Technology, v.17, pp. 189-190, 1985.

BOX, G. E. P. “Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria and Transformations (with discussion)”, Technometrics, v. 30, pp. 1-40, 1988.

BOX, G. E. P., and JONES, S. “Designing Products That Are Robust to the Environment,” Quality and Productivity Report 56, University of Wisconsin, CPQI, 1990.

BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. “Empirical Model-Building and Response Surfaces”. John Wiley and Sons, 1 ed., pp. 650, 1987.

BOYCHUK, L.M and OVCHINNIKOV, V.O. “Principal Methods of Solution Multicriterial Optimization Problems”, Soviet Automatic Control, v.6, pp. 1-4 . 1973.

BREYFOGLE III, Forrest W. “Implementing Six Sigma”. 2nd edition, New York, USA: John Wiley and Sons, 1999.

CARLYLE, W. M., MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. “Optimization Problems and Methods in Quality Control and Improvement”. Journal of Quality Technology. v.32, pp. 1-17, 2000.

CATAI, E. R., BIANCHI E.C., AGUIAR, P.R., SILVA, L.R. “Análise da Influência do Processo de Retificação nas Circularidades, Tensões Residuais e na Microestrutura do Aço VC-131 Mediante a Variação do Tipo de Fluido de Corte”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

CHEN, M. C; FAN, S. S. “Tolerance evaluation of minimum zone straightness using non-linear programming techniques: a spreadsheet approach”. *Computer and Industrial Engineering*. v. 43, pp. 437-453, 2002.

CHEN. X, ROWE B. W. “Analysis and Simulation of Grinding Process”, *International Journal of Machining Tools and Manufacturing*, v. 36, pp 871-906, 1996.

CHO, B. R., PARK C. “Robust design modeling and optimization with unbalanced data, *Computers e Industrial Engineering*”, v. 56, pp. 1328-1332, 2009.

CHOI, T.J., SUBRAHMANYA, N., Li, H., SHIN, Y.C. “Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48, pp. 61–72, 2008.

DAMASCENO, R. F. “Análise Da Influência da Profundidade de Corte e de Diferentes Métodos de Lubrificação na Retificação Plana de Aço ABNT 4340” Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da UNESP – São Paulo, 2010.

DAVIS, J.R., AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Book “ASM Metals Handbook - Volume 16 - Machining”, 9th ed., American Society for Metals International, 1995.

DEDINE, R., “Otimização de um Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho de Virabrequins na Produção” – Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2000.

DHAVLIKAR, M.N., KULKARNI, M.S., MARIAPPAN, V. “Combined Taguchi and Dual Response Method for Optimization of a Centerless Grinding Operation”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 132, pp. 90–94, 2003.

DING, R., LIN, D. K. J., WEI, D. “Dual-response Surface Optimization: A weighted MSE Approach”. *Quality Engineering*, v. 16, pp. 377-385, 2004.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. Artliber Editora, 2008.

FERNANDES JÚNIOR, W. E. “Planejamento Experimental Aplicado a um Novo Separador Líquido-Líquido Utilizado no Tratamento de Águas Residuais Contaminadas com Óleo”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2002.

FISHER, R.A. “The Arrangements of Field Experiments”. *Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain*, v. 33, pp. 503-513, 1926.

GOMES, J.H.F, COSTA, S.C., PAIVA, A. P., BALESTRASSI, P. P. “Otimização de Múltiplos Objetivos na Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço Carbono ABNT 1020 Utilizando Arame Tubular Inoxidável Austenítico”, *Soldagem e Inspeção*, v.16, n.3, São Paulo, 2011.

GONÇALEZ, P.U., WERNER, L. “Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais”. *Revista Gestão & Produção*, v. 16, n. 1, p. 121-132, São Carlos, 2009.

GRAF, W., *Handbook Creep-Feed and Surface Grinding*, Rappold-Winterthur Technology Group, 2010

HAMADA, M., e WU, C. F. J. “A Critical Look at Accumulation Analysis and Related Methods (with discussion)”, *Technometrics*, v.32, pp. 119-130, 1990.

HASSUI, A; DINIZ, A. E. “Correlating surface roughness and vibration in plunge cylindrical grinding of steel”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Inglaterra, v. 43, pp. 855-862, 2003.

HELLMEISTER, C.F.L.P. “Monitoramento da Dressagem na Retificação Através do Sinal Puro de Emissão Acústica”. *Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da UNESP – São Paulo*, 2004.

HUNTER, J. S. “Statistical Design Applied to Product Design”, *Journal of Quality Technology*, v.17, pp. 210-221, 1985.

IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. “A review of cutting fluid application in the grinding process”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture: Design, Research and Application*. v. 45, pp. 1696-1705, 2005.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. “Microscale wear of vitrified abrasive materials”. *Journal of Materials Science*. v. 39, pp. 2131-2143, 2004.

JEONG, I. J., KIM, K. J., CHANG, S. Y. “Optimal Weighting of Bias and Variance in Dual Response Surface Optimization”, *Journal of Quality Technology*, v.37, 3, pp. 236-247, 2005.

JUN, N. Z. X. “Análise de um Processo Abrasivo Combinando em Algumas Características da Lapidação e Retificação”. *Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da UNESP – São Paulo*, 2004.

KACKER, R. N. “Off Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method”. *Journal of Quality Technology*, v.17, pp. 176-188, 1985.

KANE, D. “Análise da integridade superficial na retificação dupla face de anéis de pistão de aço inoxidável ISO 6621-3 MC-66 Nitretado”. *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais*, 2002.

KAZEMZADEH, R. B., BASHIRI, M., ATKINSON, A. C., NOOROSSANA, R. “A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming”, *European Journal of Operational Research*, v. 189, pp. 421–429, 2008.

KIM, D., RHEE, S. “Optimization of GMA welding process using the dual response approach”. *International Journal of Production Research*, v. 41, pp. 4505-4515, 2003.

KING, R.I., HAHN, R.S., *Book “Handbook of Modern Grinding Technology”*, Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series, New York, 1986

- KOKSOY, O. "A Nonlinear Programming Solution to Robust Multiresponse Quality Problem". *Applied Mathematics and Computation*, v. 196, pp. 603-612, 2007.
- KOKSOY, O., DOGANAKSOY, N. "Joint Optimization of Mean and Standard Deviation Using Response Surface Methods", *Journal of Quality Technology*, v. 35, pp. 239–252, 2003.
- KOKSOY, O., YALCINOZ, T. "Mean Square Error Criteria to Multiresponse Process Optimization by A New Genetic Algorithm". *Applied Mathematics and Computation.*, v. 175, pp.1657-1674, 2006.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. "Fertigungsverfahren band2: Shchleifen, Honen, Läppen". 3 Auflage, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1996.
- KOPAC, J.; KRAJNIK, P. "High Performance Grinding – A review". *Journal of Materials Processing Technology*, v.175, pp. 278-284, 2006.
- KOVACH, J., CHO, B. R. "A *D*-Optimal Design Approach to Constrained Multiresponse Robust Design With Prioritized Mean And Variance Considerations", *Computers and Industrial Engineering*, v. 48, pp.173-180, 2005.
- KRAJNIK, P., KOPAC, J. "Adequacy of Matrix Experiment in Grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 157 e 158, pp. 566–572, 2004.
- KRAJNIK, P., KOPAC, J. "Adequacy of matrix experiment In Grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 175, pp. 271–277, 2006.
- KRAJNIK, P., KOPAC, J., SLUGA, A. "Design of Grinding Factors Based on Response Surface Methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162–163, pp. 629 –636, 2005.
- KUNERT, J., AUER, C., ERDBRUGGE, M., and GOBEL, R. "An Experiment to Compare Taguchi's Product Array and the Combined Array", *Journal of Quality Technology*, v. 39, pp. 17-34, 2007.
- KWAK, J. S. "Application of Taguchi and Response Surface Methodologies for Geometric Error in Surface Grinding Process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 45, pp. 327–334, 2005.
- KWAK, J. S., SIM, S. B., JEONG, Y. D., "An Analysis of Grinding Power and Surface Roughness in External Cylindrical Grinding of Hardened SCM440 Steel Using the Response Surface Method", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, pp. 304–312, 2006.
- LASDON, L. S., JAIN, A. D. A., RATNER, M. "Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming". *Journal ACM Transactions on Mathematical Software*, v. 4, pp. 34-50, 1978.
- LEE, S.B., PARK C. "Development of Robust Design Optimization Using Incomplete Data", *Computers and Industrial Engineering*, v. 50, Issue 3, pp. 345-356, 2006.
- LI, X. "System Regularities in Design of Experiments and their Application", Phd Thesis Massachusetts Institute of Techonology, 2006.

LIN, D. K.J., TU, W. “Dual Response Surface Optimization”, *Journal of Quality Technology*, v. 5, pp. 34-39, 1995.

LINKE B., KLOCKE F. “Temperatures and Wear Mechanisms in Dressing of Vitrified Bonded Grinding Wheels”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 50, pp. 552–558, 2010.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B. “Teoria da Usinagem dos Materiais”. Editora E. Blucher, São Paulo. Brasil, 371pp. 2009.

MALKIN, S. “Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage”, In: Malkin, S. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, 1 Ed, Chichester, Ellis Horwood Limited, pp.108-171, 1989.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B. and INASAKI, I. Book “Handbook of Machining with Grinding Wheels”. 1st ed., Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.

MARINESCU, I. D., ROWE, W. B, DIMITROV, B., INASAKI, I. Book “Tribology of Abrasive Machining Processes”. 1st ed. William Andrew, Inc., 2006.

MONTGOMERY, D. C. “Design and Analysis of Experiments”. 5th ed. New York , USA: John Wiley and Sons, 2001.

MONTGOMERY, D. C. “Introduction to Statistical Quality Control”. 6th ed. New York , USA: John Wiley and Sons, 2009.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2nd ed., pp. 570, 2003.

MUKHERJEE, I., RAY, P. K. “Optimal process design of two-stage multiple responses grinding processes using desirability functions and metaheuristic technique”, *Applied Soft Computing*, v. 8, pp. 402–421, 2008.

MYERS, R. H., CARTER, W.H. “Response Surface Techniques for Dual Response Systems”. *Technometrics*, v. 15, pp. 301-317, 1973.

MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C. “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments”. 2nd ed, Wiley – Interscience, New York, 2002.

NAIR, V. N. “Taguchi’s Parameter Design: A Panel Discussion”, *Technometrics*, v.34, pp. 127-161, 1992.

NASH, S. G., SOFER A. “Linear and nonlinear programming”. First ed. McGraw-Hill Companies Inc., pp. 692, 1996.

OLIVEIRA, J. F. G. ; BIANCHI, E. C. “O Desempenho de Rebolos Pode ser Controlado pela Dressagem”. *Revista Máquinas e Metais*, São Paulo, pp. 12 - 25, 01 abr. 1992.

OLIVEIRA, J.F.G. “Tópicos Avançados Sobre o Processo de Retificação, Publicação 048/89, LAMAFE – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989.

OLIVEIRA, L. S. “Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multi-Objetivo”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

OSY CZAKA, A. “Multicriterion Optimization in Engineering with Fortran Programs”. Ellis Horwood Ltda, England, 1984.

PAIVA, A. P. “Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas”. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNIFEI, Itajubá, 2006.

PAIVA, A. P., PAIVA, E. J. , FERREIRA, J. F., BALESTRASSI, P. P., COSTA, S. C. “A Multivariate Mean Square Error Optimization of AISI 52100 Hardened Steel Turning”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.43, pp. 631-643, 2009.

PAIVA, A.P., CAMPOS P.H., FERREIRA J.R., LOPES L.G.D., PAIVA E.J., BALESTRASSI P.P. “A Multivariate Robust Parameter Design Approach for Optimization of AISI 52100 Hardened Steel Turning With Wiper Mixed Ceramic Tool”, *International Journal of Refractory Metals And Hard Materials*, v. 30, pp.152–163, 2012.

PAULA, W. C. F. “Análise de Superfícies de Peças Retificadas com o Uso de Redes Neurais Artificiais”. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais - Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2007.

PEI, Z.J., STRASBAUGH, A. “Fine Grinding of Silicon Wafers: Designed Experiments”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 42, pp. 395–404, 2002.

PEI, Z.J., XIN, X.J., LIU W. “Finite Element Analysis for Grinding of Wire-Sawn Silicon Wafers: A Designed Experiment”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, pp. 7–16, 2003.

PHADKE, M.S. “Quality Engineering Using Robust Design”. Book, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1995.

PICCILLI, M. R.; BALESTRASSI, P. P., PAIVA, A. P., FERREIRA, J. R., DIAZ, A. G. “Crack Avoidance in Steel Piston Rings Through the Optimization of Process and Gas Nitriding Parameters”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.56, pp. 397-409, 2011.

PIMENTA, C. D. “Projeto de Experimentos e Modelamento Matemático do Limite de Resistência dos Arames de Aço SAE-9254 Temperados e Revenidos Usados na Fabricação de Molas Automobilísticas” Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, 2008.

QUESADA, G. M. and DEL CASTILLO, E. “A Dual-Response Approach to the Multivariate Robust Parameter Design Problem” - *Technometrics*, v. 46, pp.176-187, 2004.

RAO, S.S. *Engineering optimization: “Theory and Practice”*. 3ed. USA: John Wiley e Sons, 1996.

SALGADO JÚNIOR, A. R. “Otimização de Múltiplos Duais Correlacionados no Processo de Torneamento do Aço de Corte Fácil ABNT 12L14”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais, 2010.

SAMULEWSKI, G. “Otimização do Processo de Retificação de Peças Prismáticas”, Monografia, Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Positivo, 2006.

SEVERIANO, A. C., “Retificação de Aços com Rebolos de CBN Ligado Galvanicamente Sobre Corpo de Alumínio”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SEVERINO G., PAIVA, E. J., FERREIRA J. R., BALESTRASSI P. P., PAIVA A. P. “Development of a Special Geometry Carbide Tool for the Optimization of Vertical Turning of Martensitic Gray Cast Iron Piston Rings”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 60, pp 1–12, 2012.

SEVERINO, G., “Otimização do Torneamento Vertical de Anéis de Pistão de Ferro Fundido Cinzento Martensítico Utilizando Ferramenta de Metal Duro com Geometria Especial”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Minas Gerais, 2011

SHAIBU, A. B., CHO, B. R. “Another View of Dual Response Surface Modeling and Optimization in Robust Parameter Design”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 41, pp. 631–641, 2009.

SHAJI, S., RADHAKRISHNAN, V. “Analysis of Process Parameters in Surface Grinding With Graphite as Lubricant Based on the Taguchi Method”. Journal of Materials Processing Technology, v. 141, pp. 51–59, 2003.

SHAW, M. C. “Principles of Abrasives Processing”. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.

SHIN, S., SAMANLIOGLU, F., CHO B. R., WIECEK. M.M. “Computing Trade-Offs in Robust Design: Perspectives of the Mean Squared Error”, Computers and Industrial Engineering, v. 60, pp. 248–255, 2011.

SHOEMAKER, A. C., TSUI, K. L., e WU, C. F. J. “Economical Experimentation Methods for Robust Design”, Technometrics, v.33, pp. 415-427, 1991.

SILVA JÚNIOR, C. E., COELHO, R. T. “Dressagem de Rebolos para Aplicações de Precisão”. Máquinas e Metais , v. 393, pp. 100-111,1998.

SINGH, J., FREY, D. D., SODERBORG, N., JUGULUM R. “Compound Noise: Evaluation as a Robust Design Method”, Quality and Reliability Engineering International, v.23, pp. 387–398, 2007.

STEENACKERS, G., GUILLAUME, P. “Bias-Specified Robust Design Optimization: A Generalized Mean Squared Error Approach”, Computers & Industrial Engineering, v. 54, pp. 259-268, 2008.

TAGUCHI G. “System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs”. UNIPUB/Kraus International: White Plains, NY, 1987.

TANG, L.C., XU, K. “A Unified Approach for Dual Response Surface Optimization”, Journal of Quality Technology, v. 34, pp. 437–447, 2002.

THOMAZELLA, I. H. AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C., SOUZA, A. G. O., CANARIM, R. C. e BOUJU, M., “Study of The Cutting Fluid Influence on Acoustic Emission Signal During the Dressing Operation”. 2nd International Researchers Symposium 2009 on Innovative Production Machines and Systems, Ischia, Italy, 2009.

TORMINATO, S.M. “Análise Da Utilização Da Ferramenta CEP: Um Estudo de Caso na Manufatura de Autopeças ” – Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2004.

VIEIRA Jr., M. “Metodologia para Determinações das Condições de Usinagem e de Operação no Processo de Retificação”. EESC, USP, São Carlos, Dissertação de Mestrado, 1992.

VINING, G.G., R.H. MYERS, “Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A Dual Response Approach”, *Journal of Quality Technology*, v. 22, pp. 38–45, 1990.

WEBSTER, J. “Optimizing Coolant Application Systems for High Productivity Grinding”, *Abrasives Magazine*, v.26, pp. 34-41, 1999.

WELCH, W. J., YU, T. K., KANG, S. M., SACKS, J. “Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design”, *Journal of Quality Technology*, v. 22, pp. 15-22, 1990.

WU, C. F. J., ZHU, Y. “Optimal Selection of Single Arrays for Parameter Design Experiments”, *Statistica Sinica*, v.13, pp. 1179-1199, 2003.

WU, C. F. J., HAMADA, M. “Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization”, Wiley e Sons Inc., New York, 2000.

ZHANG C., SHIN Y.C. “Wear of Diamond Dresser in Laser Assisted Truing and Dressing of Vitrified CBN Wheels”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, pp. 41–49, 2003.